

Центральноукраїнський національний технічний університет
Центр заочної та дистанційної освіти
Кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки

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

**Підвищення ефективності обробки фасонних поверхонь
на прикладі деталі палець**

**Improving the efficiency of machining shaped surfaces
using the example of a finger part**

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури групи ПМ-24Мз-3
ОПП «Прикладна механіка»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»
_____ Дмитро МАКЛАСОВ

Керівник роботи:
канд. техн. наук, доцент
_____ Олександр СКІБІНСЬКИЙ

Рецензент:
канд. техн. наук, доцент
_____ Руслан ОСІН

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

Кропивницький 2025

Центральноукраїнський національний технічний університет

Центр заочної та дистанційної освіти

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 Макласову Дмитру Сергійовичу

Тема роботи:

Підвищення ефективності обробки фасонних поверхонь на прикладі деталі палець

Керівник роботи:

канд. техн. наук, доцент Олександр СКІБІНСЬКИЙ

Затверджено наказом ЦНТУ від 22 серпня 2025 року № 49-13.

Строк подання роботи до захисту:

20 грудня 2025 р.

Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Мета: виявлення резерву підвищення продуктивності, недовикористаного в загальноприйнятих методиках призначення режимів різання, та розробка технології точення фасонних поверхонь, що дозволяє максимально використовувати ці резерви.

Завдання: розробити технологічний процес виготовлення палець; дослідити інтенсивність впливу швидкості різання, подачі та глибини різання на період стійкості токарного інструменту; дослідити вплив переднього та заднього кутів в плані на шорсткість оброблюваної поверхні та встановити оптимальні значення цих кутів.

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 навчальної та наукової літератури по тематиці роботи	01.10.2025 р.	
2	Виконання першої частини роботи	20.10.2025 р.	
3	Виконання другої частини роботи	10.11.2025 р.	
3	Виконання третьої частини роботи	30.11.2025 р.	
4	Виконання економічної частини роботи	08.12.2025 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

Дмитро МАКЛАСОВ

Керівник роботи

Олександр СКІБІНСЬКИЙ

АНОТАЦІЯ

Макласов Д. С. Підвищення ефективності обробки фасонних поверхонь на прикладі деталі палець : кваліфікаційна магістерська робота : спец. 131 «Прикладна механіка» ОПП «Прикладна механіка» / наук. кер. О. І. Скібінський. Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. Кропивницький : ЦНТУ, 2025. - 72 с.

Графічна частина – 8 аркушів формату А1.

Метою роботи є виявлення резерву підвищення продуктивності, недовикористаного в загальноприйнятих методиках призначення режимів різання, та розробка технології точення фасонних поверхонь, що дозволяє максимально використовувати ці резерви.

Актуальність роботи. Завдання призначення оптимального режиму різання полягає в тому, щоб на основі даних про технологію виготовлення деталі, призначити такі швидкості різання та подачі на всіх технологічних переходах, які забезпечили б виготовлення деталі відповідно до вимог креслення при мінімальній собівартості обробки.

Наукова новизна. Проаналізовано низку автоматизованих систем призначення режимів обробки, були відзначені їхні переваги та недоліки. В результаті закладено покладено початок розробці адаптивних систем керування режимами різання. Виведенно аналітичні залежності, що пов'язують вплив на - шорсткість обробленої поверхні, геометрії інструменту в плані, геометрії - оброблюваної поверхні та подачі. Проведено аналіз аналітичних залежностей для визначення складових сил різання з урахуванням дійсної межі міцності оброблюваного матеріалу та наявності фаски зносу.

режими різання, фасонна поверхня, технологічний процес, різець, точіння

ANNOTATION

Maklasov D. S. Improving the efficiency of machining shaped surfaces using the example of a finger part : qualification work for the educational level "Master's" : specialty 131 "Applied Mechanics" EPP "Applied Mechanics" / scientific director O. I. Skibinskyi. Central Ukrainian National Technical University. Kropyvnytskyi: TsNTU, 2025. - 72 p.

Graphic part - 8 sheets of A1 format.

The aim of the work is to identify reserves for increasing productivity that are underutilised in conventional methods of assigning cutting modes, and to develop a technology for turning shaped surfaces that allows these reserves to be maximised.

Relevance of the work. The task of assigning the optimal cutting mode is to assign cutting and feed rates for all technological transitions based on data about the part manufacturing technology, which would ensure the manufacture of the part in accordance with the drawing requirements at the minimum processing cost.

Scientific novelty. A number of automated systems for assigning processing modes were analysed, and their advantages and disadvantages were noted. As a result, the development of adaptive cutting mode control systems has been initiated. Analytical dependencies have been derived that link the influence on the roughness of the machined surface, the geometry of the tool in the plane, the geometry of the machined surface, and the feed. An analysis of analytical dependencies was carried out to determine the components of cutting forces, taking into account the actual strength limit of the processed material and the presence of a wear chamfer.

cutting modes, shaped surface, technological process, cutter, turning

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ОБРОБКИ ДЕТАЛІ ПАЛЕЦЬ	9
1.1 Аналіз точності та технологічності деталі	9
1.2 Вибір методів обробки поверхонь	10
1.3 Розробка маршруту виготовлення деталі	11
1.4 Розробка структури та змісту технологічних операцій	12
1.5 Вибір технологічного оснащення, ріжучого та контрольного інструменту	16
2 СТАН ПИТАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ОБРОБКИ	19
2.1 Аналіз літературних джерел по питанню оптимізації режимів обробки	19
2.2 Питання автоматизації вибору режимів обробки	22
2.3 Висновки до розділу	28
3 ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ ПРИ ОБРОБЦІ ФАСОННИХ ПОВЕРХОНЬ	29
3.1. Дослідження впливу зрізаемого шару, матеріалу заготовки та інструменту та періоду стійкості інструменту на допустиму швидкість різання	29
3.2 Вплив геометричних параметрів інструменту на період стійкості та швидкість різання	33
3.3 Вплив мастильно-охолоджувальних технологічних засобів та способу їх підведення	42
3.4 Методика і алгоритм призначення оптимальних режимів різання при точінні фасонних поверхонь	45
4 ВПЛИВ ЕКОНОМІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ВИБІР РЕЖИМІВ РІЗАННЯ	59
ВИСНОВКИ	67
ЛІТЕРАТУРА	69

ВСТУП

Актуальність теми дослідження

Завдання призначення оптимального режиму різання полягає в тому, щоб на основі даних про технологію виготовлення деталі, призначити такі швидкості різання та подачі на всіх технологічних переходах, які забезпечили б виготовлення деталі відповідно до вимог креслення при мінімальній собівартості обробки.

Розрахунок режимі різання за емпіричними формулами був прийнятним і досить ефективним на ранніх етапах розвитку машинобудівного виробництва, в умовах обмеженої номенклатури різальних інструментів і оброблюваних матеріалів. Вони не враховують змінності жорсткості по довжині заготовки, а також специфіки точення фасонних поверхонь, що мають крім циліндричних ще й конічні та радіусні поверхні. Усі наявні методики і створені на їх основі САПР ТП, або недостатньо враховують вплив змінних умов обробки на вихідні характеристики, або намагаються вирішити задачу обліку змінних умов обробки шляхом використання адаптивних систем, які мають ряд істотних недоліків, обумовлених самою ідеєю адаптивної системи і тому зазначені недоліки не можуть бути усунуті в принципі. Тож розробка методики призначення режимів різання, що усуває вказані протиріччя, є актуальним науковим завданням.

Об'єктом дослідження є технологічна операція точення фасонних поверхонь заготовок.

Метою роботи є виявлення резерву підвищення продуктивності, недовикористаного в загальноприйнятих методиках призначення режимів різання, та розробка технології точення фасонних поверхонь, що дозволяє максимально використовувати ці резерви.

Наукова новизна

- проаналізовано низку автоматизованих систем призначення режимів обробки, були відзначені їхні переваги та недоліки. В результаті закладено покладено початок розробці адаптивних систем керування режимами різання.

- виведенно аналітичні залежності, що пов'язують вплив на шорсткість обробленої поверхні, геометрії інструменту в плані, геометрії оброблюваної поверхні та подачі;
- проведено аналіз аналітичних залежностей для визначення складових сил різання з урахуванням дійсної межі міцності оброблюваного матеріалу та наявності фаски зносу.

Практична цінність

Створені методика та алгоритм призначення режимів різання з урахуванням впливу змінних факторів на операції точення фасонних поверхонь, що дозволить стабілізувати шорсткість обробленої поверхні, завдяки чому підвищиться точність обробки.

1 ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ОБРОБКИ ДЕТАЛІ ПАЛЕЦЬ

1.1 Аналіз точності та технологічності деталі

Виконаємо ескіз деталі з нумерацією поверхонь, які обробляються, та зведемо в таблицю 1.1 параметри точності поверхонь.

Палець не має нетехнологічних елементів, усі вони відкриті і легкодоступні для обробки. Конфігурація деталі не ускладнює використання прохідних та контурних різців при обробці фасонних поверхонь. Жорсткість деталі є достатньою для використання сучасного обладнання та ріжучого інструменту для отримання розмірів високої точності.

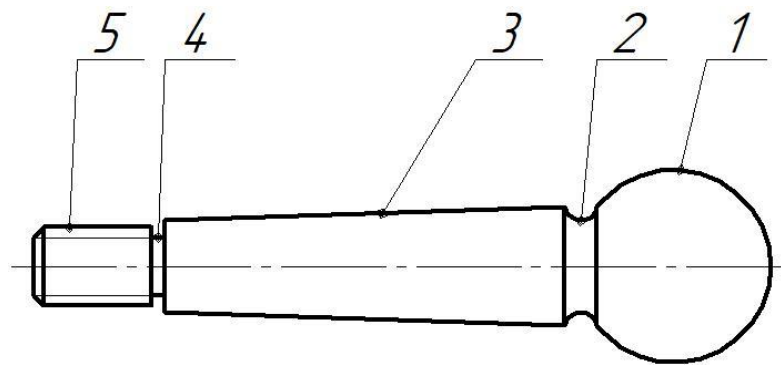
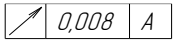


Рисунок 1.1 – Поверхні що обробляються в деталі палець

Найбільш відповідальними поверхнями деталі палець є сфера $\varnothing 30f7^{-0,02}_{-0,041}$ (пов. 1) та конус з конусністю 1:15 (пов. 3) і вони мають параметр шорсткості R_a 0,16. Ці поверхні є найбільш точними та вимагають використання шліфувальних та суперфінішних верстатів. Технологічні канавки (пов. 2 та 4) та зовнішня різь M12 (пов. 5) мають параметр шорсткості R_a 2,5-3,12 мкм. Ці параметри можна досягти лезовою обробкою.

Таблиця 1.1 – Параметри точності деталі палець

№	Найменування поверхні	Розміри з відхиленням	Квалітет	Точність відносних поворотів	R _a
1	Сферична поверхня	Ø30 ^{-0,02} _{-0,041}	f7		0,16
2	Канавка сферична	Ø14±0,055	f6		2,5
3	Конус	5 ^{-0,02} Ø14; Ø18 1:15	-		0,16
4	Канавка	2 ^{-0,02} Ø10 ^{-0,52}	h10 h12		3,2
5	Різь	M12	g7		3,2

Деталь є нескладною та в цілому, технологічною, але високі вимоги по точності і шорсткості призводять до високої трудомісткості. З точки зору механічної обробки деталь технологічна. Вона має зручні базові поверхні для закріплення деталі. Конструкція деталі дозволяє використовувати при токарній обробці поверхонь токарні верстати з ЧПУ. До всіх оброблюваних поверхонь є вільний доступ різального і вимірювального інструментів.

1.2 Вибір методів обробки поверхонь

Методи та маршрути обробки поверхонь визначаємо виходячи з вимог, щодо точності та якості готової деталі, щоб найкоротшим і найекономічнішим шляхом забезпечити задані параметри [5, 20, 21].

Таблиця 1.2 – Таблиця технологічних маршрутів обробки поверхонь деталі

Позначення поверхні	Допуск на поверхню деталі δ_d , мм	Шорсткість поверхні R_a	Допуск на заготовку δ_z , мм	Загальне уточнення ϵ_z	Можливі технологічні маршрути обробки		Економічні допуски на проміжні методи обробки	Частинні коефіцієнти уточнення
					№	Зміст маршруту		
1	0,021	0,16	0.8	38,1	1	Точіння чорнове	0,13	6.15
						Точіння чистове	0,084	1,55
						Шліфування	0,033	2,55
						Суперфініш	0,021	1,57
2	0,11	2,5	-	-	1	Точіння канавки	0,11	-
3	0,021	0,16	0.8	38,1	1	Точіння чорнове	0,13	6.15
						Точіння чистове	0,084	1,55
						Шліфування	0,033	2,55
						Суперфініш	0,021	1,57
4	0,02	3,2	-	-	1	Точіння канавки	0,02	-
5	0,025	3,2	0,8	32	1	Точіння чорнове	0,19	4,21
						Точіння чистове	0,074	2,57
						Нарізання різі	0,025	2.96

1.3 Розробка маршруту виготовлення деталі

Маршрут обробки пальця розробляємо з урахуванням обраних маршрутів обробки окремих поверхонь, технологічних можливостей вибраних металорізальних верстатів, технічних вимог тощо [4, 21].

Маршрут виготовлення деталі палець.

005 Токарна з ЧПК (токарний з ЧПК SL-10 фірми HAAS).

Точити палець зі сторони різьбової поверхні, точити канавки, нарізати різь, відрізати деталь

010 Токарна з ЧПК (токарний з ЧПК SL-10 фірми HAAS).

Точити сферичну поверхню.

020 Термічна

030 Круглошліфувальна (круглошліфувальний з ЧПК G20P CNC фірми SUPERTEC)

Шліфувати сферичну поверхню та конус.

040 Слюсарна

Спилять заусенці.

050 Суперфінішна (суперфінішний напівавтомат 3Д879)

Суперфінішувати конічну поверхню.

055 Суперфінішна (суперфінішний напівавтомат 3Д879)

Суперфінішувати сферичну поверхню.

060 Слюсарна

Спилять заусенці.

065 Контрольна

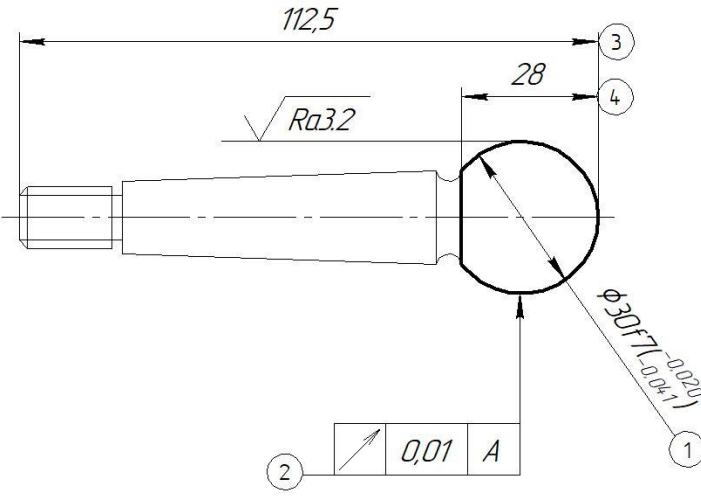
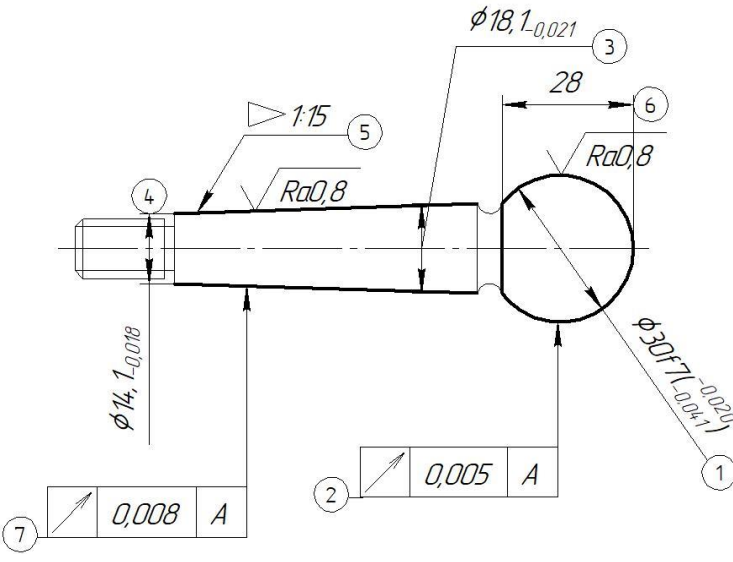
1.4 Розробка структури та змісту технологічних операцій

На підставі технологічного маршруту обробки пальця, маршрутів обробки окремих поверхонь з урахуванням технічних вимог до окремих поверхонь, розробляється структура та зміст кожної операції [6].

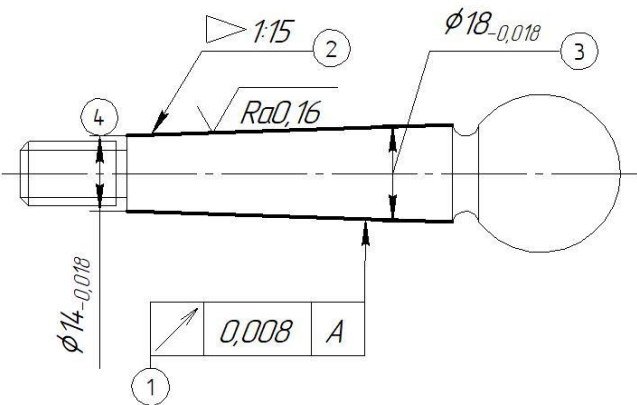
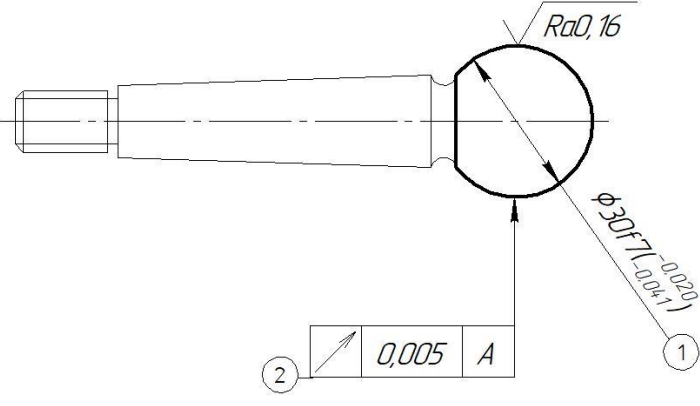
Таблиця 1.3 – Розробка маршруту обробки пальця

№ операції	Обладнання	Операційний ескіз	Зміст операції
1	2	3	4
005 Токарна з ЧПК	Токарний з ЧПК SL-10 фірми HAAS		1. Встановити деталь. 2. Точити різьову поверхню та конусну поверхню начорно. 3. Точити різьову поверхню та конусну поверхню начисто, витримавши розміри 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11. 4. Точити канавку, витримавши розміри 6, 8, 10. 5. Точити канавку, витримавши розміри 2, 12, 13, 14, 15. 6. Нарізати різь M12. 7. Відрізати деталь.

Продовження таблиці 1.3

1	2	3	4
010 Токарна з ЧПК	Токарний з ЧПК SL-10 фірми HAAS		1. Встановити деталь. 2. Точити сферу начорно, витримавши розміри 1, 2, 3, 4. 3. Точити сферу начисто, витримавши розміри 1, 2, 3, 4. 4. Зняти деталь.
030 Круглошліфувальна з ЧКП	Круглошліфувальний з ЧПК G20P CNC фірми SUPERTEC		1. Встановити деталь. 2. Шліфувати сферу та конічну поверхню, витримавши розміри 1, 3, 4, 5, 6 та допуски 2, 7. 3. Зняти деталь.

Продовження таблиці 1.3

1	2	3	4
050 Суперфінішна	Суперфінішний автисат 3Д879		1. Встановити деталь. 2. Суперфінішувати конічну поверхню, витримавши розміри 2, 3, 4 та вимогу 1. 3. Зняти деталь
055 Суперфінішна	Суперфінішний автисат 3Д879		1. Встановити деталь. 2. Суперфінішувати сферичну поверхню, витримавши розмір 1 та вимогу 2. 3. Зняти деталь

1.5 Вибір технологічного оснащення, ріжучого та контрольного інструменту

Обираємо, які затискні пристрої необхідні для реалізації операцій, згідно прийнятого технологічного процесу обробки пальця [3, 7, 18].

Таблиця 1.4 – Затискні пристрої для обробки пальця

№ перації	Найменування пристосування	Стандарт (код)	Вид приводу
005	Патрон VITAGANA B-210	-	Гідравлічний
010	Патрон VITAGANA B-210	-	Гідравлічний
030	Центр задній	7032-4025	Пневматичний
	Центр передній	7067-6319	
	Поводок	1309-86	
050	Валок (2 штуки)	7032-3893	Механічний
055	Валок (2 штуки)	7032-3899	Механічний

Ріжучий інструмент на операціях обираємо з урахуванням обраного верстату, поверхні яка обробляється, методу та стадії обробки (чорнова, чистова) типу виробництва, ріжучих властивостей та стійкості інструменту [8]. На операціях, де обробка ведеться на оброблюючих центрах ЧПК SL-10 фірми HAAS використовуємо ріжучий інструмент фірми Iscar.

Таблиця 1.5 – Ріжучий інструмент для механічної обробки пальця

№ опер	№ пер.	Назва інструменту	Стандарт (код)	Ріжуча частина	
				Матеріал	ГОСТ
1	2	3	4	5	6
005	2, 3	Різець контурний: державка	MULR2020M15	-	-
		пластина	WNMG06...WG	IC 9015	DIN/ISO513
	4	Різець канавочний державка	BNR MC25x100	-	-
		пластина	CLMT 09T305	IC 9025	DIN/ISO513
	5	Різець канавочний державка	BNR MC25x100	-	-
		пластина	CLMT 09T305	IC 9025	DIN/ISO513
	6	Різець канавочний державка	BGDR KL25x100	-	-
		пластина	ZMT 0658	IC 9025	DIN/ISO513
010	2, 3	Різець контурний: державка пластина	MULR2020M15 WNMG06...WG	- IC 9015	- DIN/ISO513
030	2	Круг шліфувальний ПП600x80x305	2424-83	14A25ПC3 T1K6	3647-81
050	2	АББС 125x80x5x16	37397-83	АСМ20/14 К3-02-1-К	-
055	2	АББС 125x80x5x16	37397-83	АСМ20/14 К3-02-1-К	-

Засоби технічного контролю технічних операцій обирають з урахуванням точності вимірювання, розміру, якості вимірювальної поверхні.

Таблиця 1.6 – Вимірювальний інструмент для контролю пальця

№ опер	№ пер.	Параметр деталі, що контролюється	Найменування інструменту	Стандарт (код)
005	3	Конус 1:15 Різь M12	Шаблон 1:15 Калібр для різі M12	8251-6922 2246-4520
	4	Діаметр канавки $\varnothing 14.5_{-0,04}$	Калібр-скоба 14.5 _{-0,04}	8551-75
	4	Діаметр канавки $\varnothing 10.5_{-0,21}$	Калібр-скоба 10,5h12	8551-75
010	2	Діаметр сфери $\varnothing 30,5$	Калібр-скоба 30,5h10	8551-75
030	2	Конус 1:15 Діаметр сфери $\varnothing 30_{-0,02}^{-0,041}$	Шаблон 1:15 Калібр-скоба 30f7	8251-6922 8551-75
050	2	Діаметр $\varnothing 14_{-0,018}$ Діаметр $\varnothing 18_{-0,018}$	Калібр-скоба 14h7 Калібр-скоба 18h7	8551-75 8551-75
055	2	Діаметр сфери $\varnothing 30_{-0,041}^{-0,02}$	Калібр-скоба 30f7	8551-75

2 СТАН ПИТАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ОБРОБКИ

2.1 Аналіз літературних джерел по питанню оптимізації режимів обробки

Завдання призначення оптимальних режимів різання полягає в тому, щоб на основі даних про технологію виготовлення деталі, призначити такі швидкості різання та подачі на всіх технологічних переходах, які б забезпечили виготовлення деталі відповідно до вимог креслення.

Багато дослідників, які займаються даним питанням, використовують раніше створені (і створюють нові) емпіричні формули, що виражають залежності вихідних параметрів процесу різання від технологічних умов обробки [1, 2, 5]. На базі таких залежностей створюються таблиці і номограми для різних поєднань оброблюваних і інструментальних матеріалів, за допомогою яких можна порівняно швидко вибрати режим обробки. Однак проведений аналіз показав, що в даний час при визначенні параметрів режимів різання за допомогою емпіричних формул не є можливим встановити залежність між усіма факторами, що впливають на процес різання. Крім того, такі формули, що являють собою спрощені статечні залежності, застосовні для обмеженого діапазону режимів обробки і мають досить великі похибки. У зв'язку з цим розрахунок режимів різання за емпіричними формулами був прийнятним і досить ефективним на етапах розвитку машинобудівного виробництва, в умовах обмеженої номенклатури різальних інструментів і оброблюваних матеріалів.

На основі зазначених методів створено ряд систем автоматизованого визначення режимів обробки. Ці системи засновані на використанні засобів обчислювальної техніки і тому набули досить широкого поширення порівняно недавно.

Відомий цілий ряд систем: APT, AOTOPIT, AUTAP, AUTOTECH-DR4, INFOS, AUTOPRO GRAMMER, TMO, SWS, DREKAL, CAPSY, VERDI [9, 11, 12, 15]. Це системи, що мають модулі визначення режимів різання і норм часу.

На наш погляд, найвідомішою і вдалою системою, що використовується - табличні методи призначення режиму обробки, є система автоматизованого визначення режиму різання INFOS. Розроблена в Аахенському технічному університеті (Німеччина) [9]. Для даної системи характерний облік безлічі функціональних, технологічних та економічних факторів. На її вхід надходить інформація про заготовку та вихідну деталь, про вид обробки (токарна, свердлильна, фрезерна, шліфувальна). Система INFOS забезпечує оптимізацію числа переходів та кожного переходу окремо з урахуванням обробки на верстатах з ЧПУ; розрахунок швидкості різання за допомогою розширеного рівняння Тейлора з урахуванням стійкості та інструменту та часу обробки; розрахунок основного машинного часу та вартості обробки. Повнота бази даних системи така, що вона покриває близько 80% всіх запитів за технологією токарної обробки. Система містить інформацію про верстати, інструменти, затискні механізми, матеріали.

Підготовка даних для введення в систему передбачає збір та експериментальну перевірку їх достовірності. На цей етап падає найбільша частка витрат, тому його оптимізація має принципове значення.

Результати вимірювання зносу інструмента, що складають сили різання - отримують з використанням відповідних датчиків. ЕОМ контролює хід перевірки, аналізує результати, проводить їх загальну оцінку та підготовляє дані для зберігання в системі.

В рамках даної системи реалізовані програми оптимізації вартісних і тимчасових витрат для точення, свердління та фрезерування.

Поряд з очевидними перевагами системі INFOS властивий і ряд характерних для такого роду систем недоліків:

- для кожного матеріалу, як оброблюваного, так і інструментального, потрібно проведення великого обсягу експериментальних досліджень, кількість яких при великій кількості даних матеріалів може досягати величезних величин;
- відсутність у даній системі математичних моделей для визначення параметрів якості поверхонь деталі, таких як величина залишкових напруг, глибина

і ступінь наклепу, шорсткість поверхні, похибка обробки, що встановлюють їх залежність від режиму обробки, від властивостей оброблюваного та інструментального матеріалів та інших величин, що характеризують процес лезвийної обробки, не дозволяють перерахованих параметрів якості.

Таким чином, призначення режимів обробки при проектуванні технологічних проектів за допомогою емпіричних залежностей, спеціальних табличних і дослідних даних не дозволяє вибрати оптимальні режими, що забезпечують певний комплекс показників якості поверхонь деталі, при цьому часто прийняті рішення мають суб'єктивний характер. Тільки з детальною розробкою теоретичних положень теорії різання та з побудовою адекватних математичних моделей процесу різання, з розвитком математичних основ оптимізації та засобів електронно-обчислювальної техніки стала можливою дійсна оптимізація технологічних параметрів у механообробці. Певні кроки в цьому напрямі вже зроблені, проте тут ще є великі можливості для подальшого розвитку.

Певний інтерес у сфері оптимізації різання становить робота німецьких фахівців Якобса Г.Ю., Якоба Еге., Кохана.Д. [16]. Вони розглядають оптимізацію процесу різання як двоповерхову задачу оптимізації режимів обробки, насамперед величин швидкості різання, подачі та глибини різання. Точне визначення параметрів процесу важко, оскільки необхідно враховувати вплив на процес різання обурювальних впливів, що породжуються змінним припуском на обробку, навантаженням в технологічній системі, властивостями матеріалу заготовки, що обробляється і ріжучої частини інструменту. Тому на першому етапі - етапі "зовнішньої" оптимізації - вирішується завдання знаходження технологічних параметрів обробки на підставі плоскої (для двомірної оптимізації, тобто за величинами швидкості різання і подачі, або для просторової багатовимірної оптимізації) статичної моделі процесу без урахування впливу впливів, що обурюють.

На другому етапі в процесі обробки постійно вимірюються необхідні параметри, щоб цілеспрямованим регулюванням режиму обробки підтримувати

фіксованими найважливіші характеристики процесу.

Внутрішня оптимізація заснована на динамічній моделі процесу і враховує зміну впливу, що змінюється в часі. Область дії оптимізаційної моделі обмежується так, щоб можна було отримати технологічно реальні рішення, що піддаються розрахунку. Критерії оптимізації та система обмежень розробляється для різних видів обробки в залежності від величин, що оптимізуються, і заданих значень параметрів технологічного завдання. Результатом внутрішньої оптимізації є комбінація параметрів режиму обробки, що змінюється в часі. Незважаючи на наявні недоліки використаний метод двох поверхової параметричної оптимізації процесу обробки, що включає в себе призначення теоретично обґрунтованого вихідного режиму обробки і застосування адаптивної системи власне при обробці, дуже перспективний і може бути надалі використаний.

2.2 Питання автоматизації вибору режимів обробки

Оскільки найбільш поширеним видом механообробки є процес точення, то, враховуючи вищевикладені обставини і тенденції, можна констатувати, що проблема науково обґрунтованого вибору найбільш раціональних технологічних умов здійснення токарної обробки деталей машин і механізмів на верстатах з ЧПУ, що забезпечують підвищення точності і якості поверхонь. виробництва, є важливою та актуальною, що представляє не тільки науковий, а й значний практичний інтерес.

Вченими досягнуто значних успіхів у цій галузі, проте деякі аспекти теорії та практики призначення раціональних технологічних умов токарної обробки деталей потребують подальшого розгляду. Зокрема, це стосується обробки складнопрофільних поверхонь, що є окремим випадком нестационарних процесів різання. Інтерес до зазначеної проблеми з боку інженерно-технічних працівників підприємств не випадковий, оскільки, судячи з результатів теоретико-експериментальних досліджень, проведених останніми роками, тут закладено потужний, але недостатньо використовуваний резерв подальшого підвищення

рентабельності машинобудівного виробництва.

Причинами нестабільності процесу різання є наростаючий у часі знос різця, зміна дійсних геометричних параметрів інструменту, діаметра обробки, жорсткості системи різання вздовж оброблюваної поверхні та ін. Таким чином, постійні режимні умови не можуть бути оптимальними протягом усієї обробки аналізованої поверхні при нестационарних процесах різання.

В даний час завдання підвищення техніко-економічної ефективності - нестационарних процесів різання вирішується одним із наведених нижче способів:

- призначенням змінних режимних умов обробки з використанням - емпіричних методик і методик, що враховують тільки один змінний параметр;
- шляхом використання вузькоспеціалізованих верстатів (наприклад, сферотокарних) або пристроїв (наприклад, поворотний супорт);
- використанням систем адаптивного керування процесом різання.

На жаль, всі згадані способи не позбавлені суттєвих недоліків.

При використанні емпіричних методик призначення змінних режимних умов обробки відсутня комплексний облік змінних параметрів (як правило, враховується тільки один). Крім того, використання залежностей спрощеного виду може призводити до зниження достовірності розрахунку режимів різання.

Спеціалізовані верстати та пристосування забезпечують сталість деяких параметрів. Наприклад, жорсткості деталі (люнет), кута між віссю різця і дотичної до оброблюваної поверхні (сферотокарні верстати і поворотний супорт) і т.д. Проте вони не забезпечується сталості інших змінних параметрів, стосовно обробки складно- профільних поверхонь часто є вузькоспеціалізованими і вимагають додаткових капіталовкладень.

В даний час створено велику кількість системи адаптивного управління (САУ), що істотно відрізняються один від одного. Динамічна зміна режимних умов обробки в САУ відбувається на основі постійного моніторингу процесу різання, що дозволяє враховувати навіть ті фактори, які є невідомими на етапі технічної підготовки виробництва (ТПП). Це є істотним плюсом у порівнянні з методиками призначення

режимів різання на стадії ТПП, основується виключно на інформації, отриманій до початку обробки.

У той же час, незважаючи на певні переваги систем адаптивного управління процесом різання, існує й ряд недоліків, що значно обмежують можливість їх широкого практичного використання у сфері машинобудівного виробництва. Основний недолік полягає у високій вартості даних систем, порівнянної з вартістю металорізального обладнання, на якому встановлюються зазначені системи. Крім того, як зазначалося вище, створені і продовжують створюватися нові САУ, що істотно відрізняються один від одного, що свідчить про їхню вузьку спеціалізацію.

Іншими недоліками адаптивних систем управління є складність їх технічного обслуговування, а також тривалий процес налагодження та налаштування цих систем, що призводить до збільшення часу технологічної підготовки виробництва нової та модернізованої продукції. Установка контрольно-вимірювальної апаратури на верстаті призводить до зниження жорсткості технологічної системи і до збільшення рівня вібрацій.

У зв'язку з цим найперспективнішим способом вирішення зазначеної проблеми є науково обґрунтоване призначення змінних режимних умов різання на стадії ТПП при комплексному обліку всіх змінних параметрів процесу точення. Такий підхід дозволить поєднати високу якість обробки, що досягається при застосуванні САУ, з низькою собівартістю та швидкістю технологічної підготовки виробництва. Крім того, оскільки режими різання, витрата інструменту та результати обробки відомі на стадії ТПП, це дозволяє точніше планувати здійснення виробничого процесу, що також призводить до підвищення економічної ефективності виробництва.

Зазначений спосіб вирішення проблеми можливий лише за наявності відповідних аналітичних методик (теоретичного або теоретико-експериментального характеру), що дозволяють визначати вихідні характеристики механічної обробки матеріалів розрахунковим шляхом без проведення будь-яких додаткових (як правило, дорогих, тривалих та трудомістких) експериментальних досліджень. Створення такого роду методики, заснованої на аналітичній моделі процесу різання,

є складним науково-прикладним завданням, зважаючи на значну складність самої технологічної системи і процесів, що протікають в ній.

Головним критерієм при розробці забезпечення ефективності токарного процесу є обґрунтування мети та оцінка ефективності виконання технологічних операцій або її окремих елементів. Основні види критеріїв оптимальності, що використовуються, можна об'єднати в наступні групи:

1. Економічні: мінімальна собівартість; найменші народногосподарські - наведені витрати; найменші наведені госпрозрахункові витрати; найбільша прибуль; рентабельність; мінімальний рівень витрат на виробництво (мінімальні витрати на електричну та інші види енергії, на основні та допоміжні матеріали, мінімальні - витрати на фонд заробітної плати та ін.).

2. Техніко-економічні: максимальна продуктивність; найменший штучний, основний та допоміжний час; коефіцієнт корисної дії обладнання; надійність роботи системи обладнання чи окремих її елементів; верстатомісткість виробу; стабільність технологічного процесу обробки.

3. Технологічні: точність виготовлення; показники якості поверхні виробу (шорсткість, хвилястість, мікротвердість, залишкові напруження та ін.); фізико-хімічні властивості виробів; стійкість інструменту.

4. Експлуатаційні: зносостійкість; втомна міцність; контактна жорсткість та інші показники довговічності виробів.

Динамічна оптимізація досліджує обробку на основі моделі процесу різання, за допомогою яких враховується випадковість і змінність характеристик з плином часу. При точенні система вимірюватиме параметри деталі (такі як розмір, похибки форми), режиму різання та параметри технологічної системи (наприклад, затуплення інструменту, сили різання, температуру різання, вібрації технологічної системи тощо) і передаватиметься швидкодіючим процесорам системи (рис. 2.1). Ця система визначає оптимальний режим і передає результат технологічній системі, де регулюється режим різання.

У процесі роботи з допомогою швидкого аналізу системою результату виміру забезпечуються раціональні режими різання. Загальний вигляд цільової функції оптимізації процесу точення [17]:

$$Y = f(x), \quad (2.1)$$

де Y – оптимальні цілі (вихідні величини);

x – технологічні параметри (вхідні величини).

Обмежувальні умови параметрів режимів різання (t , V , S):

- глибина різання $t_{min} < t_{on} < t_{max}$;
- швидкість різання $V_{min} < V_{on} < V_{max}$;
- подача $S_{min} < S_{on} < S_{max}$.

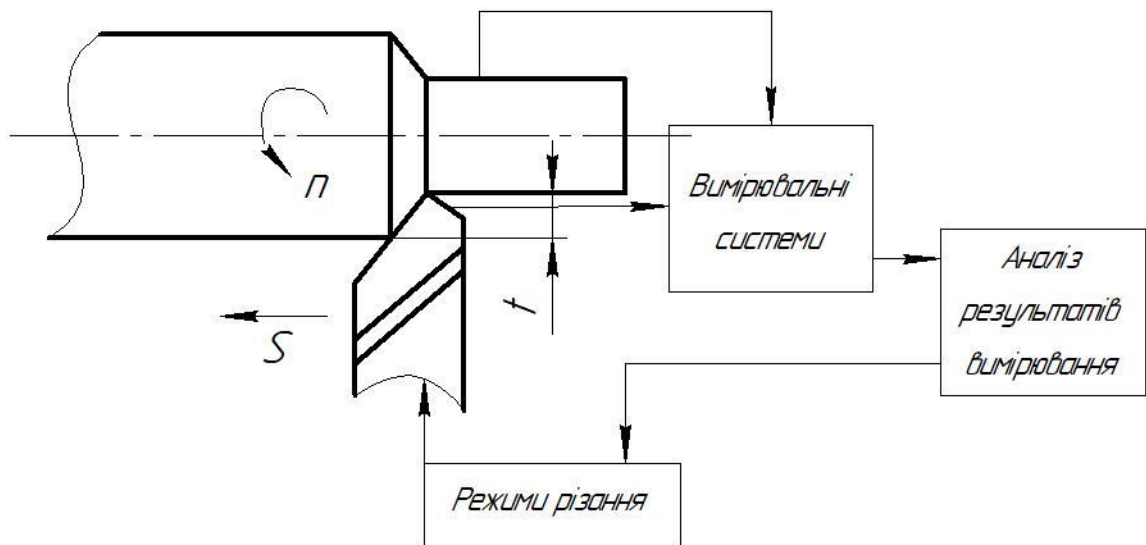


Рисунок 2.1 – Схема оптимізації процесу точення

Вихідними величинами оптимізації є якість оброблюваної деталі => max; собівартості => min; продуктивність => max. Максимально можлива глибина різання дорівнює припуску, що залишився на обробку. Якщо немає обмежень щодо точності обробки, весь припуск зрізають за один прохід. Інакше припуск знімається за кілька робочих ходів: чорнових і чистових. При цьому глибина різання на чорнових ходах

має бути більшою, а на чистовий хід слід залишати такий мінімальний припуск, який забезпечить виготовлення деталі із заданим допуском. Максимально допустима подача, як правило, обмежується ефективною потужністю або крутним моментом верстата, міцністю слабкої ланки механізму подачі верстата, жорсткістю оброблюваної заготовки, міцністю і жорсткістю інструменту, шорсткістю обробленої поверхні.

У процесі різання лезовим інструментом неминуче виникає похибка обробки, обумовлена, з загальним, процесом різання, а також спільним впливом силового і теплового факторів. При обробці жароміцних сталей і сплавів, інших важкооброблюваних матеріалів, внаслідок значних зусиль різання та високих температур у зоні обробки, дана похибка може досягати істотних величин. Найбільш значними при цьому є похибки, пов'язані з недостатньою жорсткістю технологічної системи, з температурними деформаціями деталі і ріжучого інструменту, з розмірним зносом ріжучої частини інструменту.

Як показує аналіз стану питання управління показниками якості токарної обробки, роботи в цій галузі вже ведуться: створено низку математичних моделей процесу різання, є окремі системи призначення режимів обробки, розроблено адаптивні системи управління процесом обробки. Однак більшість цих робіт має низку серйозних недоліків, що різко обмежують можливості та сферу їх застосування у реальних виробничих умовах.

У той же час, зростаючі вимоги до якості машинобудівної продукції, особливо до відповідальних деталей авіаційних двигунів, що працюють у складних умовах експлуатації, наполегливо вимагають вирішення проблем забезпечення експлуатаційних характеристик деталей на основі формування оптимальних параметрів якості поверхневого шару деталей, забезпечення заданої точності їх обробки.

2.3 Висновки до розділу

В даному розділі стан питання, пов'язаного з призначенням режимів обробки деталей різанням, що забезпечують необхідні показники якості обробленої поверхні. Було розглянуто низку автоматизованих систем призначення режимів обробки, були відзначені їхні переваги та недоліки. В результаті встановлено, що всі наявні методики і створені на їх основі САПР ТП, або в недостатній мірі враховують вплив змінних умов обробки на вихідні характеристики, або намагаються вирішити задачу обліку змінних умов обробки шляхом використання адаптивних систем, які, як вказувалося вище, мають ряд істотних недоліків, зумовлених самою ідеєю адаптивної системи.

3 ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ ПРИ ОБРОБЦІ ФАСОННИХ ПОВЕРХОНЬ

3.1. Дослідження впливу зрізаємого шару, матеріалу заготовки та інструменту та періоду стійкості інструменту на допустиму швидкість різання

Дослідженню періоду стійкості різального інструменту та швидкості різання - присвячено велику кількість робіт [1, 2, 5, 19, 23, 24, 25, 29, 33, 35].

Швидкість різання, що допускається інструментом, залежить від його ріжучих властивостей і є швидкістю за певної, заздалегідь обумовленої стійкості, що позначається V_T . В таких випадках позначають – V_{60} чи V_{90} . Це означає, що швидкість різання відповідає стійкості $T = 60$ чи 90 хв.

Для прохідних різців зазвичай $T = 60$ хв. Тож, знаючи V_T можна визначити частоту обертання деталі:

$$n = \frac{1000 \cdot V_T}{\pi \cdot D}; \quad (3.1)$$

Очевидно, що на стійкість інструменту впливає не тільки швидкість різання, але і багато інших факторів. В теорії різання металів зазвичай з'ясовують вплив різних чинників не так на стійкість, а на швидкість різання при умові сталої стійкості. Тобто замість функціональної залежності:

$$T = \varphi(V, a, b, C_M, C_{in}, \gamma, \alpha, K_{охл}, \dots); \quad (3.2)$$

розглядають залежність:

$$V = \psi(T, a, b, C_M, C_{in}, \gamma, \alpha, K_{охл}, \dots); \quad (3.3)$$

Частина цієї залежності, що стосується стійкості, вже розкрита, тому розглянемо залежність:

$$V_T = f(a, b, C_M, C_{in}, \gamma, \alpha, K_{охл}, \dots); \quad (3.4)$$

Дані, що наведені в [1], мають вигляд:

$$V_T = \frac{C_v}{a^{y_v} \cdot b^{x_v}}; \quad (3.5)$$

де x_v, y_v – показники ступенів;

C_v – коефіцієнт;

a – товщиною шару, що зрізається;

b – ширина шару, що зрізається.

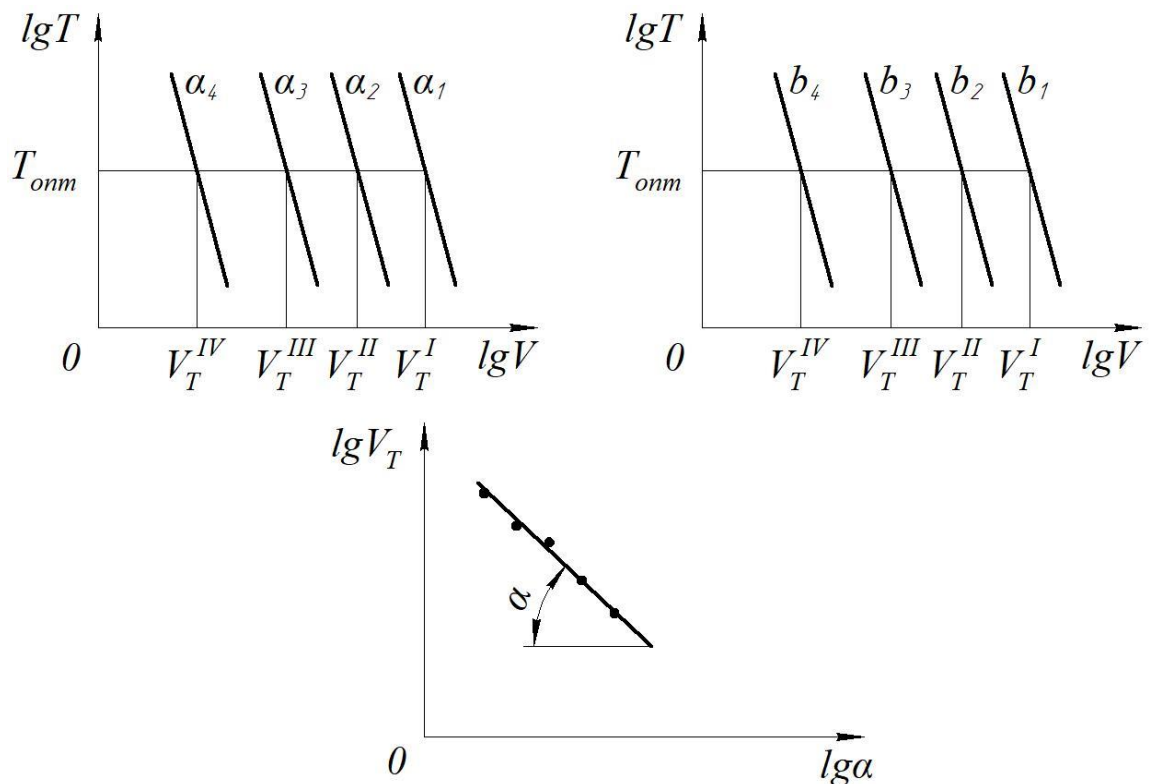


Рисунок 3.1 – Вплив елементів зрізу на допустиму швидкість різання

Дослідним шляхом було встановлено залежності впливу швидкості різання, подачі і глибини різання при точінні на період стійкості різця.

$$T = \frac{C_1}{V^{m_1}}; \quad T = \frac{C_2}{t^q}; \quad T = \frac{C_3}{S^p}. \quad (3.6)$$

Їх можна об'єднати в загальну залежність.

$$T = \frac{C_4}{V^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p}; \quad (3.7)$$

Аналіз показників ступеня при V , S і t показує, що при обробці будь-яких матеріалів з прямими шарами, що зрізаються $m_1 > p > q$, тобто найбільший вплив на період стійкості надає швидкість різання, потім подача і найменше – глибина різання. Встановлена закономірність фізично легко зрозуміла. На спадних гілках кривої $T = f(V)$ зменшення періоду стійкості пов'язане з підвищенням температури різання. Температура різання також зростає і при збільшенні глибини різання та подачі внаслідок збільшення роботи різання та тепловиділення. Інтенсивність впливу V , S і t на період стійкості інструменту буде такою, якою є ступінь впливу цих факторів на температуру різання. Тому в такому ж порядку V , S і t впливають і на період стійкості інструменту.

Виразимо глибину різання і подачу через ширину і товщину шару, що зрізається. Тоді:

$$T = \frac{C_4}{V^{m_1} \cdot (b \cdot \sin \varphi)^q \cdot \left(\frac{a}{\sin \varphi}\right)^p} = \frac{C_4}{V^{m_1} \cdot \frac{a^p \cdot b^q}{(\sin \varphi)^{p-q}}}; \quad (3.8)$$

Оскільки кут φ має сталу величину, то

$$T = \frac{C_5}{V^{m_1} \cdot b^q \cdot a^p}; \quad (3.9)$$

З останнього виразу випливає, що збільшення товщини зрізуваного шару зменшує період стійкості сильніше, ніж рівне збільшення ширини шару, що зрізається.

Таким чином, для того щоб період стійкості інструменту був можливо великим, необхідно при постійній площі перерізу шару, що зрізається, збільшувати ширину шару за рахунок зменшення його товщини, тобто. прагнути працювати з якомога більшим співвідношенням b/a . Встановлена закономірність має універсальний характер і справедлива не тільки для точення, але і для будь-якого іншого виду робіт (свердління, торцевого фрезерування, протягування і т. д.). Вона дозволяє намітити шляхи раціонального конструювання та експлуатації інструменту.

Вирішимо вираз (3.9):

$$V = \frac{C_6}{T^m \cdot b^{x_v} \cdot a^{y_v}}; \quad (3.10)$$

$$\text{де } m = \frac{1}{m_1}; \quad x_v = \frac{q}{m_1}; \quad y_v = \frac{p}{m_1}; \quad C_6 = C_5^{\frac{1}{m_1}};$$

Оскільки $p > q$, то $y_v > x_v$, звідки випливає, що ширина і товщина зраємого шару впливають неоднаково не тільки на період стійкості інструменту, але і на швидкість різання, що допускається.

Виразимо у формулі (3.10) товщину і ширину шару, що зрізається через подачу і глибину різання. Тоді:

$$V = \frac{C_6}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S^{y_v} \cdot (\sin \varphi)^{y_v - x_v}}; \quad (3.11)$$

З виразів (3.10) і (3.11) виходить, що для отримання максимально можливої при заданому періоді стійкості інструменту швидкості різання при певній площі перерізу шару, що зрізається, необхідно прагнути працювати з максимальним співвідношенням b/a і t/S . При заданих технологічно допустимих глибині різання та подачі швидкість різання можна підвищити, зменшуючи головний кут у плані інструменту.

3.2 Вплив геометричних параметрів інструменту на період стійкості та швидкість різання

3.2.1. Вплив переднього кута

Передній кут γ (рис 3.2) є найважливішим з геометричних параметрів інструменту, що визначають процес перетворення зрізуваного шару на стружку. Від його величини залежать ступінь деформації шару, що зрізається, робота стружкоутворення, сила різання, кількість тепла, що виділяється і температурв різання. Тому величина переднього кута визначає стійкість інструменту.

Зі збільшенням переднього кута умови стружкоутворення полегшуються, зменшуються роботи деформації і тертя на передній поверхні, сили різання і, як наслідок, кількості тепла, що виділяється. Зменшення тепловиділення сприяє підвищенню періоду стійкості інструменту. Однак збільшення переднього кута приводить при постійному задньому куті до зменшення кута загострення β_k клина інструменту (рис. 3.3), від величини якого залежать міцність ріжучої частини та умови відведення тепла від контактних майданчиків у тіло інструменту. Зі зменшенням кута β_k тепловідведення погіршується, а міцність падає, що веде до зниження періоду стійкості інструменту. Зменшення розмірів клина особливо небажане для твердосплавних інструментів. Тому величина переднього кута визначає стійкість інструменту. При малих кутах β_k спостерігаються мікро- і макросколи вершини клину та головного леза інструменту.

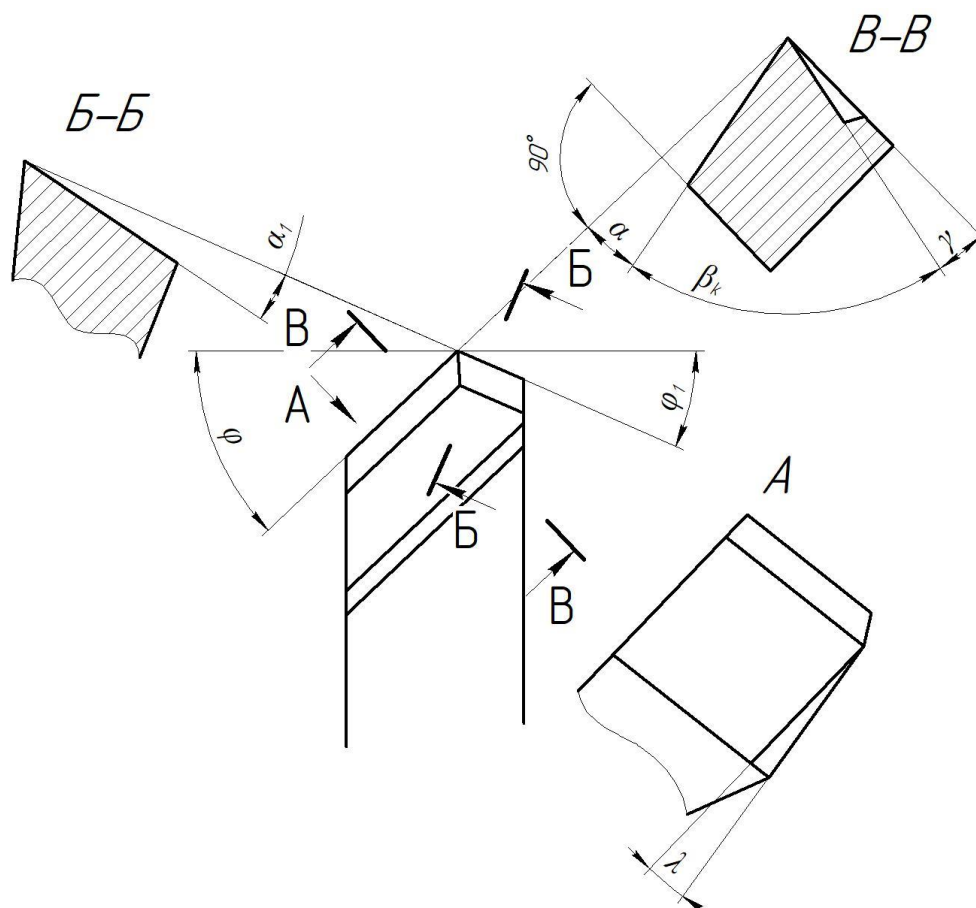


Рисунок 3.2 – Геоцентричні параметри різця

Величина оптимального переднього кута $\gamma_{\text{опт}}$ забезпечує максимальний період стійкості інструменту, та визначається механічними властивостями оброблюваного та інструментального матеріалів. Для висхідної гілки кривої $T = f(\gamma)$ переважним при збільшенні кута γ є зменшення тепловиділення. В результаті чого стійкість інструменту зростає. Для низхідної гілки кривої переважним при збільшенні кута є погіршення тепловідведення і зменшення міцності, що знижує стійкість інструменту. Чим вище міцність і твердість оброблюваного матеріалу, тим більша кількість тепла, що виділяється, і вище температура різання. Тому зі збільшенням межі міцності та твердості матеріалу оброблюваної деталі величина оптимального переднього кута зменшується. Зі зменшенням міцності інструментального матеріалу оптимальний передній кут також зменшується, що пов'язано з необхідністю збільшення кута загострення клина. Тому оптимальний передній кут інструментів зі

швидкорізальних сталей більше, ніж твердосплавних, які мають більший кут $\gamma_{\text{опт}}$, ніж інструменти з мінеральної кераміки.

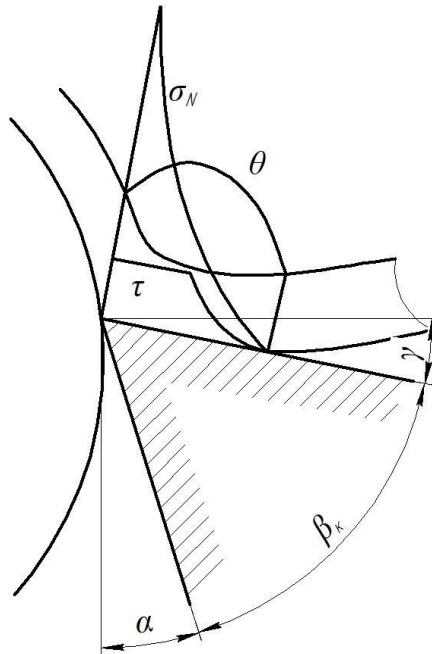


Рисунок 3.3 – Навантаження ріжучого клина інструменту силовим і тепловим навантаженням

В різних дослідженнях можна зустріти формули для прилизного розрахунку оптимального переднього кута інструменту з швидкорізальної сталі та твердого сплаву, що має плоску передню поверхню.

Для інструменту з швидкорізальної сталі:

$$\gamma_{\text{опт}} = 42 - \frac{55}{K_{LC}}; \quad (3.12)$$

де K_{LC} – коефіцієнт усадки стружки, що визначається при умовах: $\gamma=10$, товщина зрізаного шару $a=0,5$ мм, швидкість різання $V=10$ м/хв.

Для інструментів з пластинками з твердого сплаву при обробці сталей:

При $\sigma_B \leq 80$ кгс/мм²

$$+\gamma_{onm} = \frac{25 \cdot 10^{14}}{\sigma_{\epsilon}^8}; \quad (3.13)$$

При $\sigma_B = 80 - 120 \text{ кгс/мм}^2$

$$-\gamma_{onm} = 5 \cdot 10^{13} \cdot \sigma_{\epsilon}^8; \quad (3.14)$$

При обробці чавуну

$$\gamma_{onm} = 17,2 - 0,066 HB; \quad (3.15)$$

З наведених формул випливає, що при збільшенні межі міцності та твердості оброблюваного матеріалу величина позитивного оптимального переднього кута зменшується, а негативного збільшується.

3.2.2. Вплив заднього кута

Крім забезпечення свободи переміщення задньої поверхні відносно поверхні різання задній кут зменшує тертя між ними. Задній кут не впливає на процес стружкоутворення та контактні явища на передній поверхні інструменту, але для гострого інструменту від нього величини залежать контактні явища задньої поверхні. При зміні заднього кута змінюються величина сил, що діють на задній поверхні, ширина майданчика контакту та інтенсивність зношування задньої поверхні. Від величини заднього кута залежать величина радіуса округлення клина і міцність ріжучої частини інструменту внаслідок зміни кута загострення.

Спочатку, у міру збільшення заднього кута, зменшуються ширина майданчика контакту та сила тертя на задній поверхні, що зменшує зношування інструменту. Тому період стійкості інструменту зростає. При подальшому збільшенні заднього кута зменшується кут загострення, що знижує міцність клину і погіршує відведення

тепла в тіло інструменту. Внаслідок цього період стійкості при великих передніх кутах починає зменшуватися. Величина оптимального заднього кута, при якому період стійкості максимальний, залежить в основному від пружних властивостей матеріалу оброблюваної деталі і товщини шару, що зрізається головним лезом інструменту. З рис. 3.4 видно, що чим більше пружне відновлення h_y поверхні різання, тим більше ширина S_2 майданчика дотику інструмента з поверхнею різання, в межах якої фактичний задній кут дорівнює нулю. Тому зі збільшенням межі пружності матеріалу оброблюваної деталі величина оптимального заднього кута стає більшою. Наприклад, оптимальний задній кут токарного прохідного різця при обробці вуглецевих конструкційних сталей дорівнює $6^\circ - 8^\circ$. При обробці титанових сплавів, що володіють значною межею пружності, величина оптимального заднього кута становить $10^\circ - 12^\circ$.

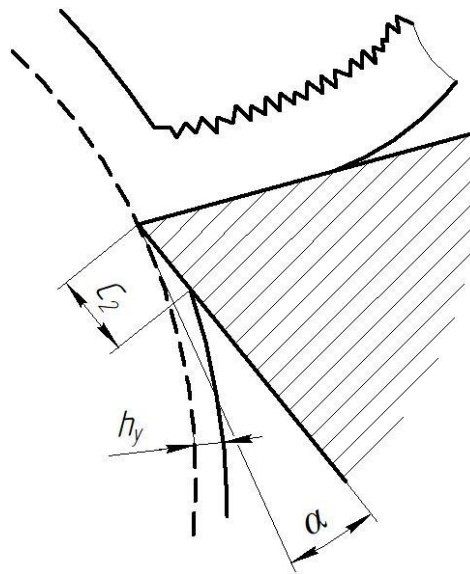


Рисунок 3.4 – Схема контакту задньої поверхні інструменту з поверхнею різання

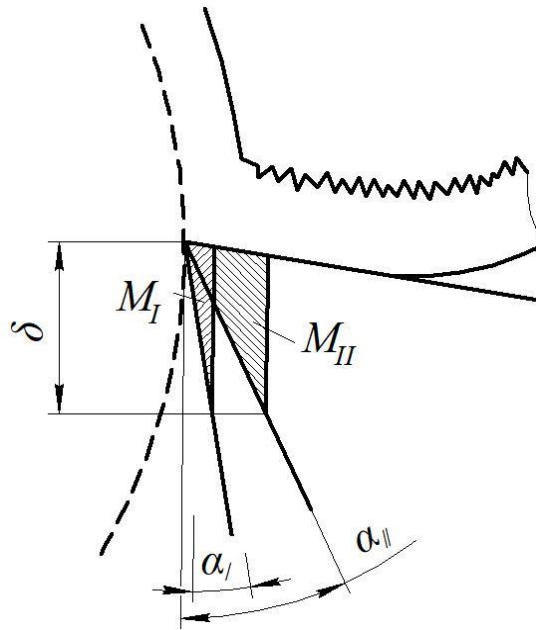


Рисунок 3.5 – Схема впливу заднього кута α на масу зношеного інструментального матеріалу

На рисунку 3.5 показано ширина майданчика зносу δ задньої поверхні та відповідні їй маси M_I та M_{II} зношеного інструментального матеріалу при значеннях заднього кута α_I та α_{II} . Зі збільшенням заднього кута маса зношеного інструментального матеріалу зростає, і для його дисперсії потрібно більш тривалий термін роботи інструменту. Таким чином, якщо переважним є зношування задньої поверхні інструменту, то збільшення заднього кута до певної межі сприяє - підвищенню періоду стійкості.

3.2.3. Вплив головного кута в плані φ

Основною функцією головного кута в плані є зміна співвідношення між шириною і товщиною шару, що зрізається. При збільшенні кута φ відношення b/a ширини шару, що зрізається до його товщини (рис. 3.6) безперервно зменшується і досягає мінімуму при $\varphi = 90^\circ$. Одночасно з цим зменшується кут загострення ϵ_k різця у плані.

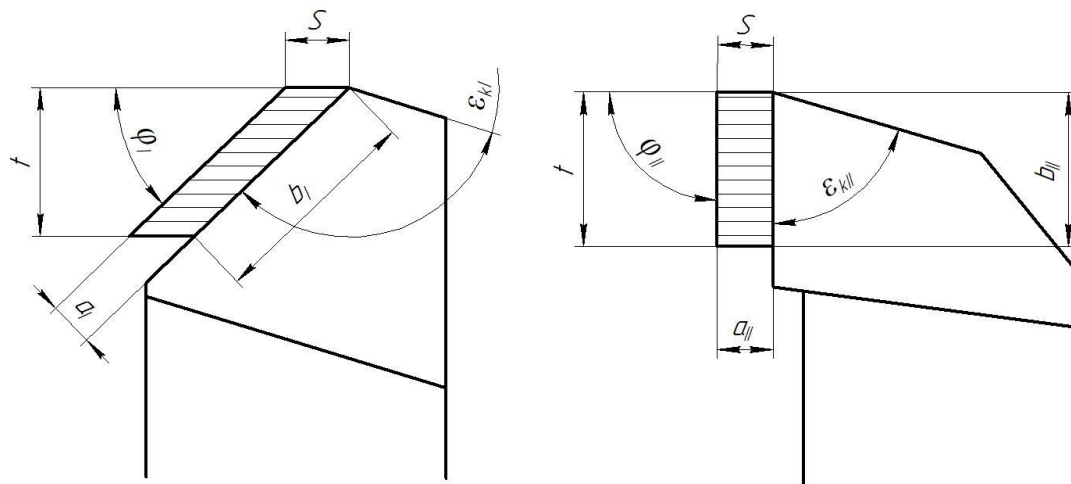


Рисунок 3.6 – Схема впливу головного кута в плані на співвідношення b/a

Внаслідок зменшення відношення b/a і кута ϵ_k температура різання зростає, стійкість інструменту падає, і інструмент допускає роботу на менших швидкостях різання (рис. 3.7).

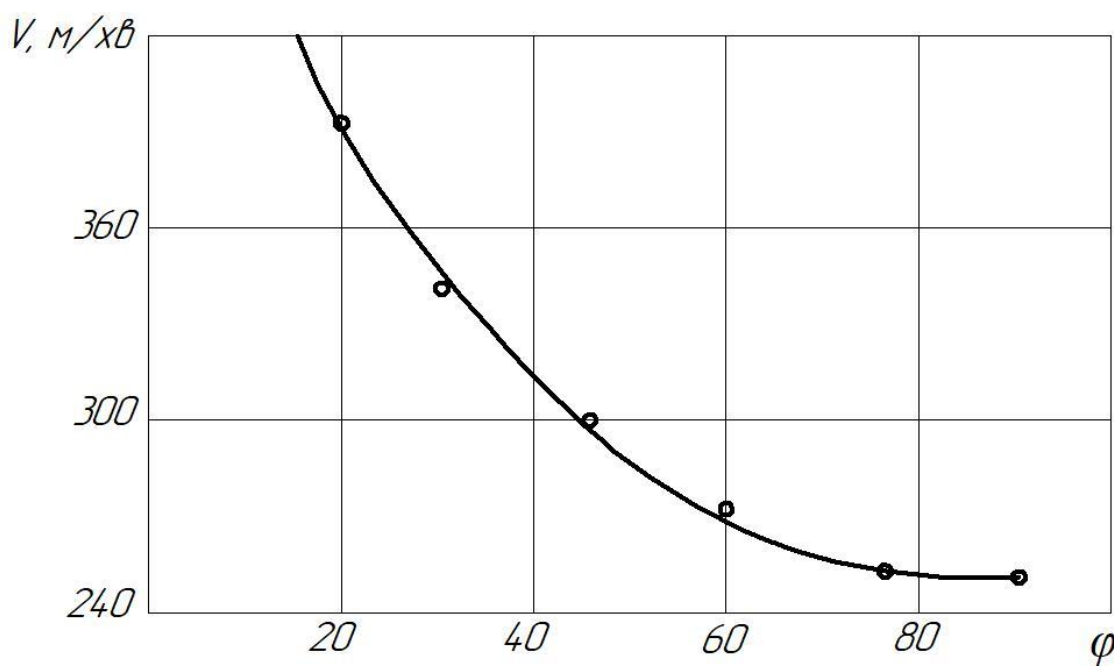


Рисунок 3.7 – Вплив головного кута в плані з твердого сплаву Т15К6 на допустиму швидкість різання при точінні (сталь 45; $t=2\text{мм}$; $S=0,3\text{мм/об}$)

Зв'язок між головним кутом у плані та швидкістю різання при точенні може бути виражена ступеневою залежністю:

$$V = \frac{C_\varphi}{\varphi^{\mu_v}}; \quad (3.16)$$

При обробці сталей різцями з двокарбідних сплавів $u_v=0.35$ і при обробці чавуна різцями з однокрбідних сплавів $u_v=0.4$.

3.2.4. Вплив допоміжного кута у плані φ_1

Допоміжний кут φ_1 у плані на стійкість інструменту впливає подвійно. При малих кутах φ_1 збільшується робоча довжина допоміжного леза, що збільшує силу тертя на допоміжній задній поверхні і знос інструменту. Тому при збільшенні допоміжного кута в плані до деякого значення стійкість інструменту зростає. При подальшому збільшенні кута φ_1 період стійкості не зростає, а зменшується внаслідок погіршення умов тепловідведення від лез інструмента та зменшення міцності вершини.

Криві залежностей $V=f_1(\varphi_1)$ і $T=f_2(\varphi_1)$ мають горбоподібний вигляд, і для них оптимальна величина кута φ_1 визначається типом інструменту і видом інструментального матеріалу). Якщо кут φ_1 більший за оптимальний, то швидкість різання повинна бути знижена. Наприклад, для кутів $\varphi_1 > 6^\circ-10^\circ$ взаємозв'язок між допоміжним кутом в плані та швидкістю різання при точінні може виражатися

залежністю $V = \frac{C_{\varphi_1}}{\varphi_1^{0,1}}$. Кут φ_1 сильно впливає на висоту шорсткості обробленої поверхні. Бажаючи знизити шорсткість поверхні, необхідно зменшувати допоміжний кут у плані до мінімально допустимої величини.

Є інструменти, які мають кут $\varphi_1 = 0$. На рисунку 3.8 зображено різець для роботи з великими подачами, у якого на довжину леза l_1 кут $\varphi_1 = 0$. Оскільки довжина леза l_1 на 20—30% перевищує подачу S , з якою працює різець, то висота

розрахункових нерівностей обробленої поверхні стає рівною нулю і шорсткість обробленої поверхні зменшується.

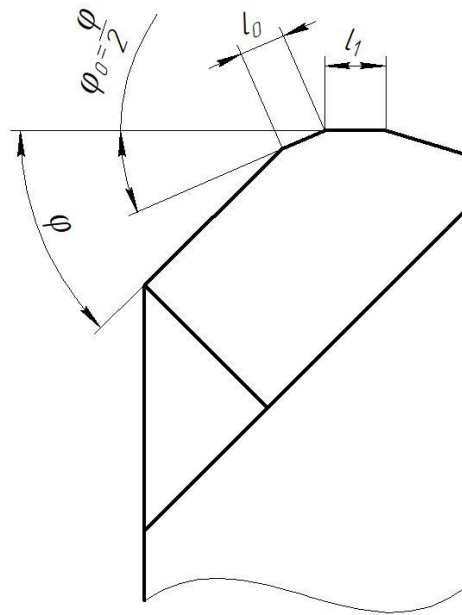


Рисунок 3.8 – Різець, що призначений для роботи на високих значеннях подачі ($l_1 = (1,2-1,3)S$)

Особливістю роботи різцями є те, що глибини різання, що застосовуються, менше подачі на оборот деталі. Тому різці працюють зі зворотними шарами, що зрізаються, і лезо довжиною l_1 є головним лезом, а лезо, нахилене під кутом φ , - допоміжним лезом. Серйозним недоліком різців для роботи з великими подачами, що не дозволили їм замінити звичайні різці, є дуже велика величина реакції радіальної сили P_y , що згинає деталь. Тому різці можуть продуктивно обробляти лише жорсткі деталі із співвідношенням $l/D < 5$.

3.2.5 Вплив кута нахилу головного леза λ

Кут нахилу головного леза λ на процес перетворення шару, що зрізається, в стружку впливає найбільш своєрідно. Зміна кута нахилу головного леза змінює положення передньої поверхні інструменту щодо напрямку його руху та відношення

робочої довжини головного леза до товщини шару, що зрізається. Плaskий деформований стан у зоні різання при $\lambda=0$ замінюється об'ємним. Величина і знак кута нахилу головного леза визначають напрям сходу стружки по передній поверхні. Напрямок сходу стружки по передній поверхні характеризується кутом сходу стружки η , тобто кутом між напрямком руху стружки по передній поверхні і нормаллю до головного леза.

3.3 Вплив мастильно-охолоджувальних технологічних засобів та способу їх підведення

Обробка металів різанням часто здійснюється із застосуванням різних мастильно-охолоджуючих рідин (МОР), в деяких випадках для підвищення ефективності процесу різання важкооброблюваних матеріалів виробляють попередній підігрів шару, що зрізається.

Мастило-охолоджувальні рідини є обов'язковим елементом більшості технологічних процесів обробки матеріалів різанням. Основне призначення МОР - зменшити температуру, силові параметри обробки та зношування ріжучого інструменту, забезпечити задовільну якість обробленої поверхні. Крім цього МОР повинні відповідати гігієнічним, екологічним та іншим вимогам, мати комплекс антикорозійних, миючих, анти мікробних та інших експлуатаційних властивостей. Рациональне застосування МОР дозволяє у ряді випадків підвищити стійкість ріжучого інструменту від 1,5 до 4 разів. Мастильно-охолоджувальні технологічні засоби та способи їх застосування, ефективні для однієї групи оброблюваних матеріалів і видів обробки, можуть бути малоефективними для інших оброблюваних матеріалів і видів обробки і навіть шкідливо впливати. Кожною комбінацією: оброблюваний матеріал - вид обробки - інструментальний матеріал - режим різання повинна відповідати певна, найбільш ефективна для даних умов мастильно-охолоджувальна рідина.

В умовах гнучкого виробництва при постійній частій зміні оброблюваних

матеріалів (алюміній, бронза, сталь, чавун та інші), а також широкій номенклатурі робіт виконуваних одним верстатом (точіння, свердління, фрезерування, нарізання різьблення, розгортання і так далі) заміна МОР під конкретну комбінацію умов. Тому в умовах гнучкого виробництва частіше використовують універсальну МОР. Універсальні МОР із надлишком представлені на вітчизняному ринку. За словами фірм-виробників, всі вони застосовуються при різних оброблюваних матеріалах і видах обробки. Вивчення переваг та недоліків усіх запропонованих варіантів МОР є темою окремої роботи. Параметри, що застосовуються МОР, представлені у зведеній таблиці 3.1. В обох випадках подача охолоджуючої рідини здійснювалася вільно падаючим струменем (поливом) через сопло діаметром 5 мм. Витрата МОР - 6 л/хв. Напрямок потоку (струмені) МОР – на передню поверхню різця.

Таблиця 3.1 – Параметри МОР

Показник	Dascosol 2500	МОР-ПРО
Форма	рідка	
Колір	коричневий	прозора біла
Запах	легкий	спецефічний
Щільність, г/см ³	0,93	1,0-1,1
Кінематична в'язкість при 20° С, сСт	70	4
Підклас МОР	емільгуюча	напівсинтетика
Концентрація МОР, %	4-8	3-10

При тому, що вплив застосування МОР на стійкість інструменту є незначним, обробка із застосуванням МОР дозволяє спостерігати зниження шорсткості обробленої поверхні. Це пояснюється зниженням рівня пластичної деформації шару за рахунок зниження середньої температури в зоні різання. На практиці, зважаючи на відомі санітарно-гігієнічні та інші недоліки масляних МОР, вважають за краще використовувати на цих операціях водозмішувані МОР. Фірма *ISCAR* (Ізраїль) яка

для відрізного інструменту, що має проблеми з випаровуванням СОЖ ще до того моменту досягнення нею ріжучої кромки, розробила комплекс конструкцій ріжуча пластина - державка - оснастка - верстат (система типу *JET - CUT* або «Канал-Стружка», в якій рідина подається через канал у різальній пласти. При цьому МОР потрапляє безпосередньо на передню поверхню інструменту поблизу ріжучої кромки і прямує до нижньої поверхні стружки (рис. 3.9, а), що сприяє значному поліпшенню тепловідводу. А зменшення інтенсивності зношування робочих поверхонь пластини і сприятливо впливає на форму стружки.

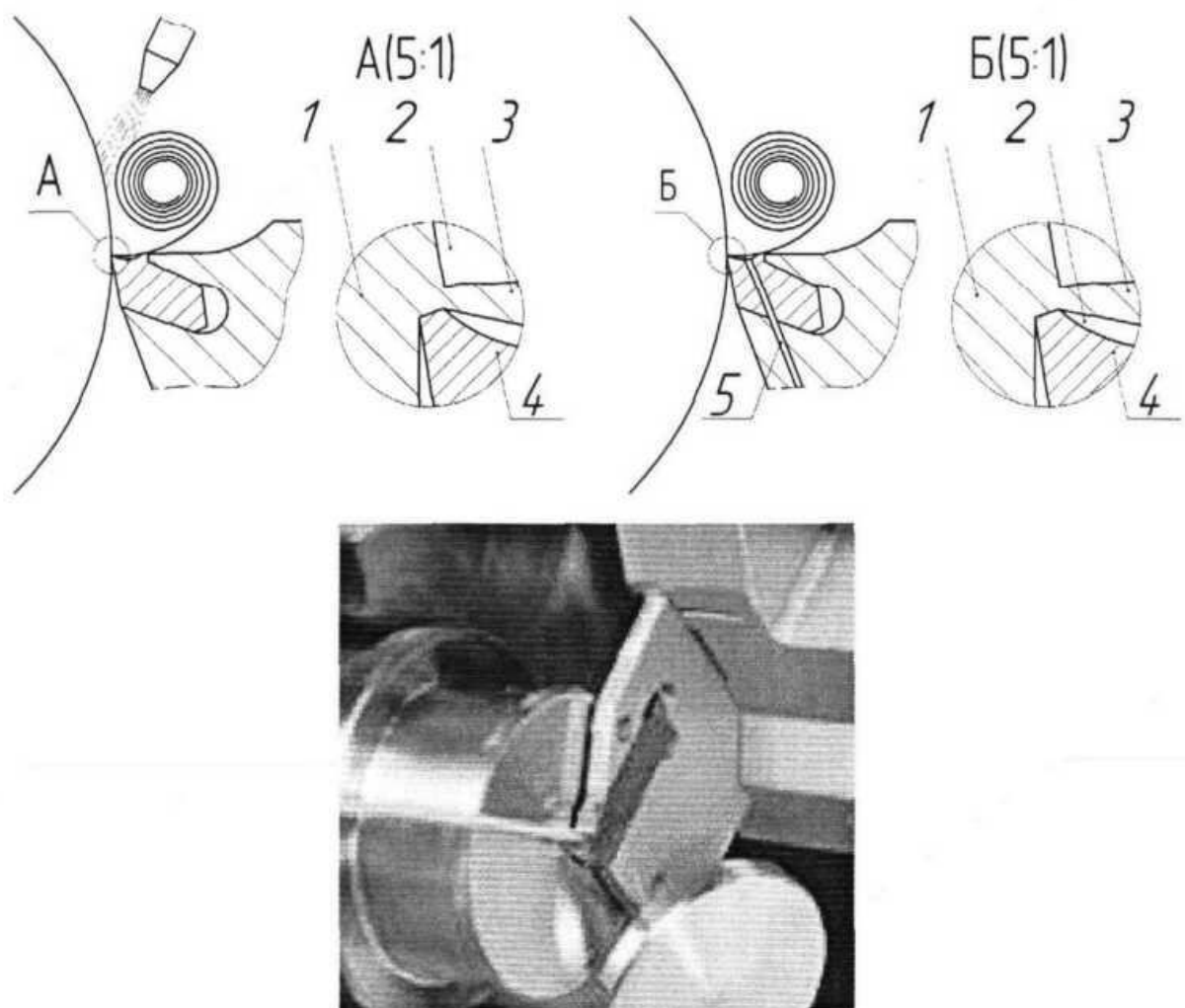


Рисунок 3.9 – Схема підводу МОР при відрізанні при поливанні зверху (а) і системі типу *JET-CUT* (б): 1 – оброблювана деталь; 2 – зона проникнення МОР; 3 – стружка; 4 – ріжуча пластина; 5 – канал для підводу МОР

Такий спосіб підведення МОР кращий, але на сьогоднішній день не має настільки широкого застосування як спосіб поливу, що вільно падає струменем і потребує спеціального технологічного оснащення. У разі підведення МОР розпиленням такий буде спеціальна установка для утворення повітро-рідинної суміші. А у разі реалізації способу JET-CUT потрібна гідравлічна система, що забезпечує підведення МОР в зону різання під тиском до 2,5 МПа за допомогою трубопроводів через супорт, державки (блоки) та ріжучу пластину.

На верстатах з ЧПК при роботі твердосплавним інструментом, особливо на високих швидкостях різання, слід рекомендувати використовувати рясну і безперервну подачу МОР, яка дозволить:

- мінімізувати ймовірність крихкого руйнування різця внаслідок випадкового попадання крапель МОР з інших технологічних переходів;
- знизити величину задирки (напливу металу) видавлюваного по стороні - западини, вздовж якої здійснюється врізання різця;
- покращити якість обробленої поверхні.

3.4 Методика і алгоритм призначення оптимальних режимів різання при точінні фасонних поверхонь

Розраховуємо значення подічі S_i і знаходимо серед них мінімальне значення S_i , що задовільняє обмеженню $S_i \leq M$, (рис.3.12), до $M = \min \left[\frac{S_i}{k_{zn}} \right]$.

В отриманій точці дискретних значень швидкості різання і подачі досліджується оціночна функція $C=F(V, S)$ в рамках $[S_{min} \dots M]$, де S_{min} приймаємо за паспортом верстату.

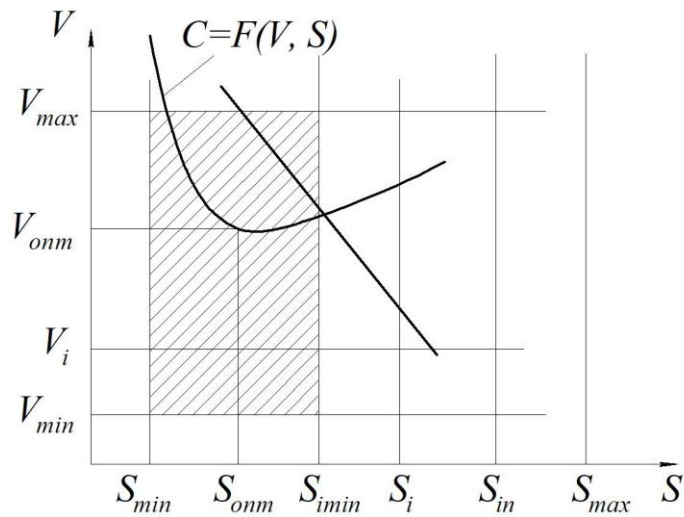


Рисунок 3.12 – Залежність собівартості обробки від режимів різання

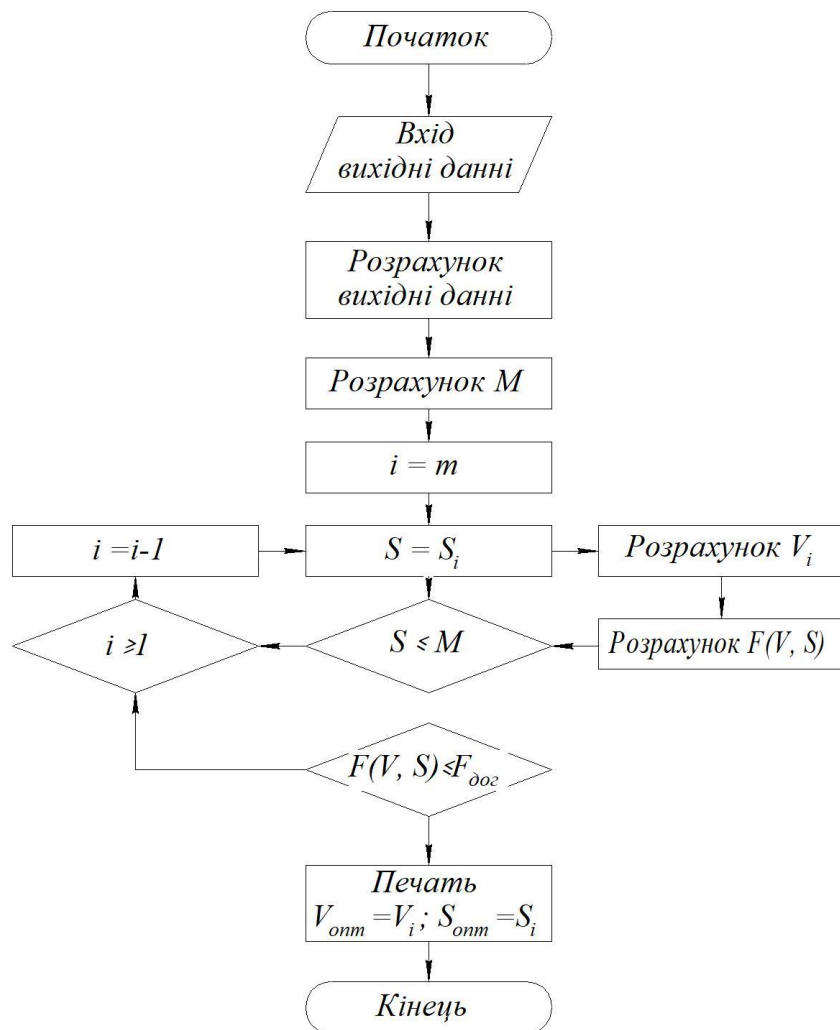


Рисунок 3.13 – Схема спрощеного алгоритма оптимізації режимів різання

Методика дослідження оціночна функція $C=F(V, S)$ полягає в наступному:

Розіб'ємо відрізок $[S_{min} \dots M]$ на « m » розрахункових точок з кроком $\frac{M - S_{min}}{m}$, по кожній точці обрахуємо значення $C=F(V, S)$. Найменше з значень $C=F(V, S)$ і буде оптимальним.

Наприкінці, отримаємо оптимальне значення $C_{opt}=F(V_{opt}, S_{opt})$, як є найменшим $C_{opt}=F(V_{opt}, S_{opt})$. Описаний алгоритм показаний у вигляді блок-схеми наведено на рисунку 3.13.

Наведемо приклад розрахунку режимів різання по наведеному вище алгоритму. Для прикладу розглянемо токарну обробку деталі палець, що наведена на рисунку 3.14.

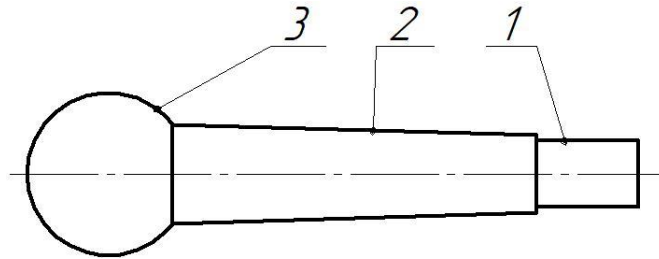


Рисунок 3.14 – Ескіз деталі для токарної операції

Встановимо вихідні дані.

Матеріал деталі сталь 30Г (207-209 НВ), $\sigma_s = 590 \text{ Н / мм}^2$.

Точність обробки поверхонь IT9.

Параметри шорсткості поверхні після токарної обробки $R_a=3,2 \text{ мкм}$.

Заготовка- прокат звичайної точності з коркою.

Визначаємо значення головного і допоміжного кутів в плані.

Оскільки частина деталі має форму сфери (поверхня 3, рис. 3.14), то умова здійснення процесу:

$$\varphi_i = \varphi - \theta_{\max} > 0 \text{ і } \varphi_{li} = \varphi_1 + \theta_{\min} > 0.$$

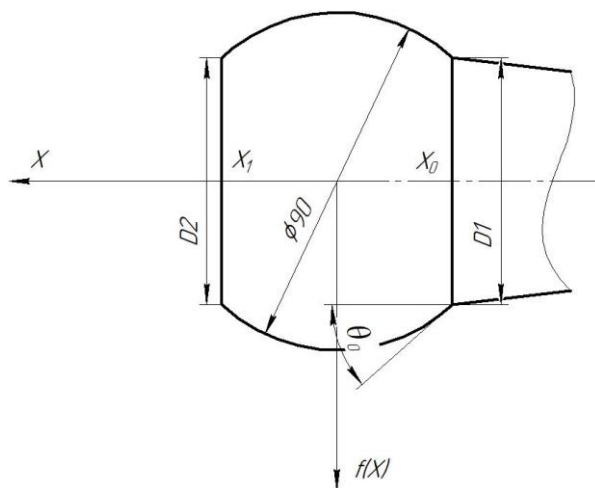


Рисунок 5.15 – Схема до визначення головного та допоміжного кута в плані

Коли $x = x_1 = 35$ мм, то $\operatorname{tg} \theta_0 = \frac{2x_0}{D_1} = \frac{2 \cdot 35}{56.57}$, $\theta_0 = 51^\circ$ і $\varphi > \theta_0 = 51^\circ$.

Якщо $x = x_1 = 35$ мм, то $\operatorname{tg} \theta_0 = \frac{2x_0}{D_2} = \frac{2 \cdot 35}{56.57}$, $\theta_{\min} = -51^\circ$ і $\varphi_1 > 51^\circ$.

Між ріжучою пластиною та профілем, що обробляється, необхідно мати гарантований кутовий зазор не менше $2^\circ - 5^\circ$. Вибираємо $\varphi = \varphi_1 = 60^\circ$ для обробки поверхні 3. Оскільки кінці поверхні 1 деталі має $\theta = 90^\circ$, тому $\varphi > 90^\circ$. Вибираємо $\varphi = 93^\circ$, $\varphi_1 = 32^\circ$ для обробки поверхонь 1,2.

Залежно від фізико-механічних властивостей оброблюваної заготовки визначаємо оптимальне значення переднього кута:

$$+\gamma_{onm} = \frac{25 \cdot 10^{14}}{\sigma_e^8} = \frac{25 \cdot 10^{14}}{59^8} = +17^\circ.$$

Приймаємо з умов міцності та постачання ріжучих пластин $\gamma = +15^\circ$; задній кут $\alpha = 8^\circ$; форма передньої поверхні – пласка з фаскою; ширина фаски вздовж головного різального леза $f = 0,3$ мм; радіус заокруглення ріжучої кромки $\rho = 0,03$ мм; радіус вершини різця $r_B = 1$ мм.

Розраховуємо допустимі значення подачі для кожної ділянки поверхні у кожному технічному обмеженні.

Обмеження по допускаємій висоті шорсткості оброблюваної поверхні:

- для поверхні 1:

$$R_{\text{адод}} = 3,2 \text{ мкм, при } \varphi = 93^\circ \text{ і } R_{\text{адод}} \leq 2r \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) = 1 \text{ мм.}$$

Значення S_{max} визначається залежністю:

$$S_{\text{max}} = 2\sqrt{2r \cdot R_{\text{зоддо}} - R_{\text{зоддо}}^2},$$

$$S_{\text{max}} = 2\sqrt{2 \cdot 1 \cdot 0,0125 - 0,0125^2} = 0,315 \text{ мм / об.}$$

- для поверхні 2:

$$R_{\text{адод}} = 3,2 \text{ мкм, } \varphi = 93^\circ \text{ і } \omega = 13^\circ.$$

$$\text{При } \varphi \triangleright \varphi_1 + 2\omega = 32 + 2 \cdot 13 = 58^\circ. \text{ і } R_{\text{адод}} \leq 2r \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_1 + \omega}{2}\right) = 0,76 \text{ мм.}$$

Значення S_{max} визначається залежністю:

$$S_{\text{max}} = 2\sqrt{2r \cdot R_{\text{зоддо}} - R_{\text{зоддо}}^2},$$

$$S_{\text{max}} = 2\sqrt{2 \cdot 1 \cdot 0,0125 - 0,0125^2} = 0,315 \text{ мм / об.}$$

- для поверхні 3:

$$R_{\text{адод}} = 3,2 \text{ мкм, } r_{\text{в}} = 1 \text{ мм і } R_{\rho} = 45 \text{ мм.}$$

Значення S_{max} визначається залежністю:

$$S_{\text{max}} = 2 \cdot R_{\rho} \cdot \arccos \frac{R_{\rho}(R_{\rho} + r) + R_{\text{зоддо}} \left(R_{\rho} + \frac{R_{\text{зоддо}}}{2} \right)}{(R_{\rho} + r)(R_{\rho} + R_{\text{зоддо}})},$$

$$S_{\text{max}} = 2 \cdot 45 \cdot \arccos \frac{45(45 + 1) + 0,0125 \left(45 + \frac{0,0125}{2} \right)}{(45 + 1)(45 + 0,0125)} = 0,31 \text{ мм / об.}$$

$$x_{\text{лодо}} = \frac{b - z_R \ln \frac{\varphi + \varphi_1}{2}}{y_R}; \quad \ln \frac{R_{\text{зоддо}} \cdot r^{q_R}}{C_R \cdot t^{x_R}} = b.$$

C_R – коефіцієнт, що характеризує оброблюваний матеріал;

x_R, y_R – показники ступенів.

Для сталі середньої твердості $C_R = 148 \dots 162$, $x_R = 0,3 \dots 0,4$, $y_R = 1,4 \dots 1,7$, тоді при $t = 0,8$ мм; $b = -2,45$; $x_{\text{доп}} = -1,44$; отримуємо $S_{\text{max}} = 0,169$ мм/об.

Для поверхні 1 $t = 0,6$ мм. З графіка на рисунку 3.16 $S_{\text{доп}} = 300$ мм/об.

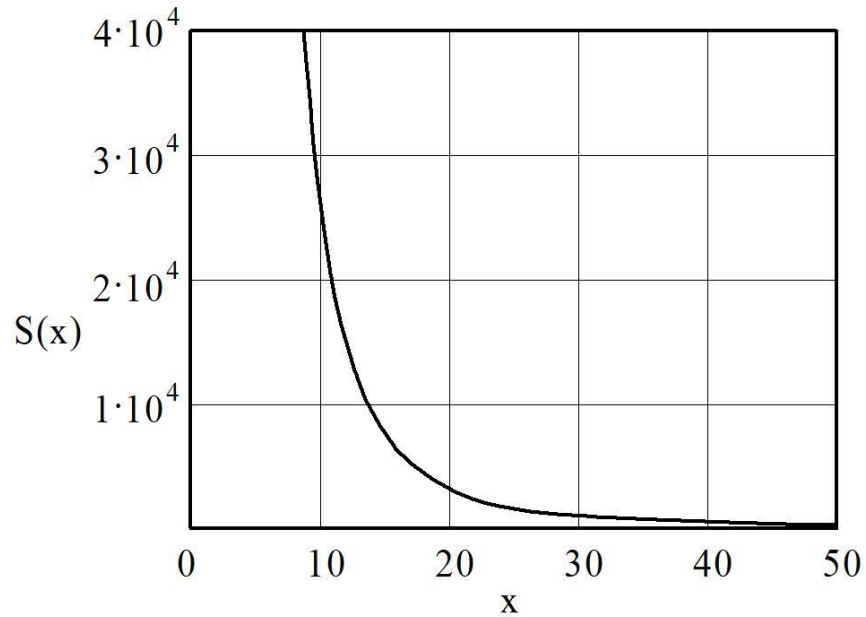


Рисунок 3.16 – Залежність значення допустимої подачі $S_{\text{доп}}$ при обробці поверхні 1 від координати x

Для поверхні 2 $t = 0,7$ мм. З графіка на рисунку 3.17 $S_{\text{доп}} = 108$ мм/об.

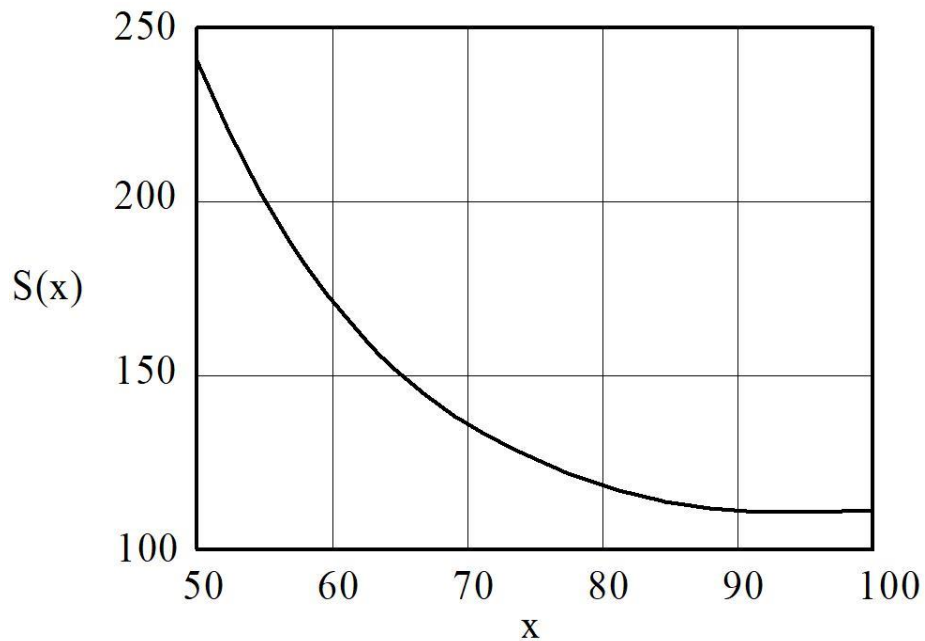


Рисунок 3.17 – Залежність значення допустимої подачі $S_{\text{доп}}$ при обробці поверхні 2 від координати x

Для поверхні 3 $t = 0.8$ мм. З графіка на рисунку 3.18 $S_{\text{доп}} = 90$ мм/об.

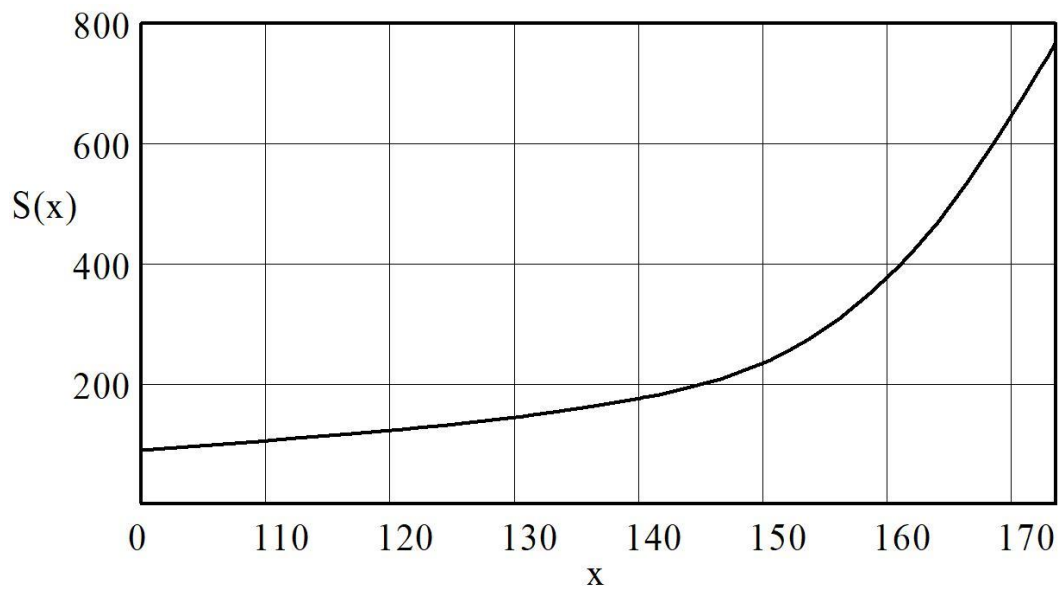


Рисунок 3.18 – Залежність значення допустимої подачі $S_{\text{доп}}$ при обробці поверхні 3 від координати x

Для компенсації шкідливого зношування інструмента на параметри шорсткості поверхні доцільно при призначенні режимів різання для універсальних верстатів занижувати розрахункову величину подачі на коефіцієнт впливу зносу на шорсткість оброблюваної поверхні ($k=1.3$).

$$S_{\text{max зн}} = \frac{S_{\text{max}}}{k_{\text{зн}}} \quad (3.17)$$

Для поверхні 1:

$$S_{\text{max зн}} = \frac{0,315}{1,3} = 0,24 \text{ мм/об.}$$

Для поверхні 2:

$$S_{\text{max зн}} = \frac{0,315}{1,3} = 0,24 \text{ мм/об.}$$

Для поверхні 3:

$$S_{\text{max зн}} = \frac{0,169}{1,3} = 0,13 \text{ мм/об.}$$

Для поверхні 1: $M = 0,24$ мм/об.

Для поверхні 2: $M = 0,24$ мм/об.

Для поверхні 3: $M = 0,13$ мм/об.

Вибираємо значення $S_{оп}$ на відрізку $[S_{min} \dots M]$, що зазвичай знаходиться в правій області. Тож маємо:

Для поверхні 1: $S = 0,24$ мм/об.

Для поверхні 2: $S = 0,24$ мм/об.

Для поверхні 3: $S = 0,13$ мм/об.

Визначаємо складові сили різання.

Для поверхні 1 при $\varphi = 93^\circ$; $t = 0,6$ мм; $r = 1$ мм; $S = 0,24$ мм/об; $\mu = 0.4$; $h_3 = 1$ мм.

У випадку ($\varphi > 90^\circ$, $t < r$) визначаємо значення кута ψ за формулою:

$$ctg\psi = \frac{\sqrt{2rt - t^2}}{t} \cdot \frac{S}{t} \quad (3.18)$$

тоді $\psi = 28^\circ$.

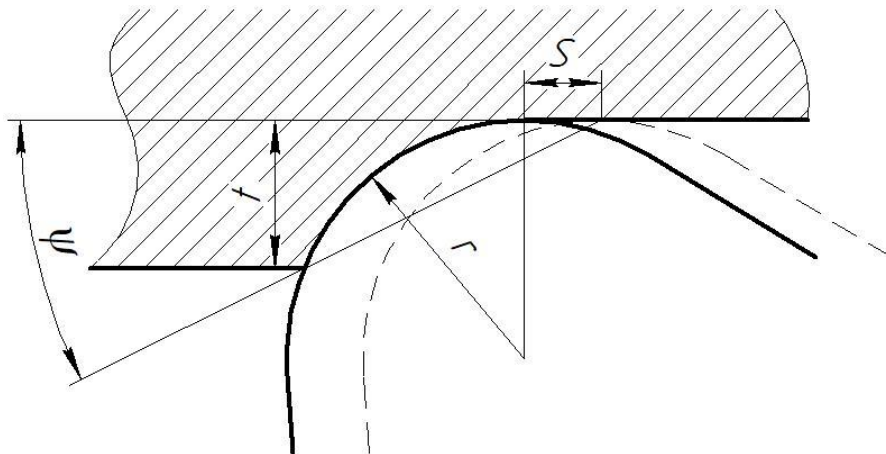


Рисунок 3.19 – Визначення значення кута ψ

Тоді

$$P_x = 151 \text{ Н}; P_y = 575 \text{ Н}; P_z = 475 \text{ Н}.$$

Для поверхні 2 при $\varphi = 93^\circ$; $\omega = 13^\circ$; $\varphi_i = \varphi - \omega = 80^\circ$; $t = 0,7$ мм; $S = 0,24$ мм/об; $\mu = 0.4$; $h_3 = 1$ мм.

У випадку визначення значення кута ψ за формулою:

$$\operatorname{ctg}(\psi - \omega) = \frac{\sqrt{2rt - t^2}}{t} + \frac{S}{t} \quad (3.19)$$

Тоді

$$P_x = 266 \text{ Н}; P_y = 565 \text{ Н}; P_z = 560 \text{ Н}.$$

Для поверхні 3 при $\varphi = \varphi_1 = 60^\circ$; $\varphi_i = \varphi - \theta$ і $\varphi_{1i} = \varphi_1 - \theta$; $t = 0,8$ мм; $S = 0,13$ мм/об; $\mu = 0.4$; $h_3 = 1$ мм.

$$\operatorname{ctg}(\psi - \theta) = \operatorname{ctg} \varphi_i + \frac{r}{t} \operatorname{tg} \frac{\varphi_i}{2} + \frac{S}{t}. \quad (3.19)$$

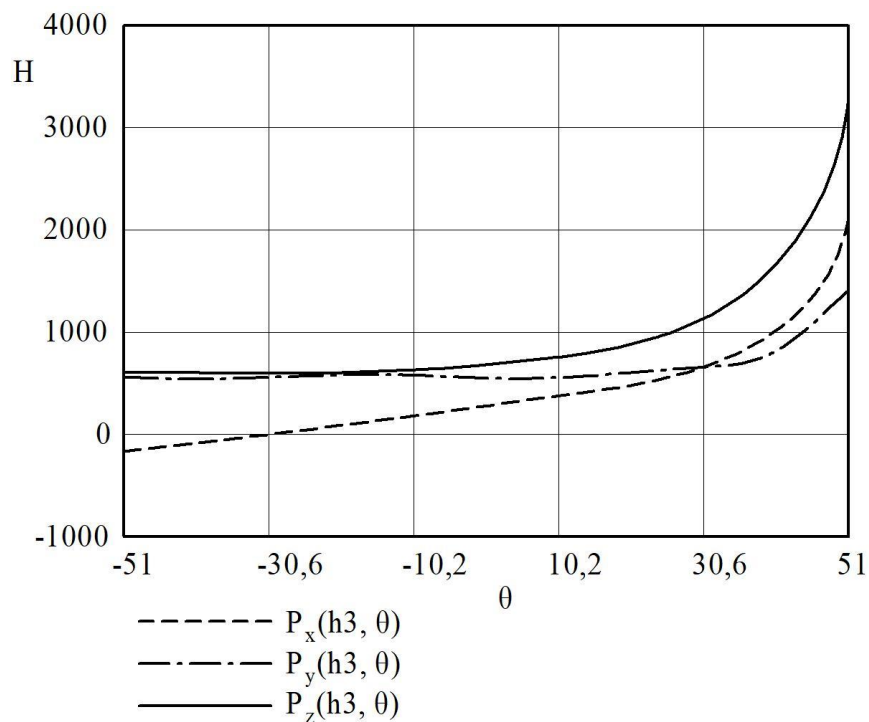


Рисунок 3.21 – Залежність значення сили P_z від θ при $h_3 = 1$ мм

Коли $x = x_0 = 35$ мм (рис. 3.21), то $\operatorname{tg} \theta_0 = \frac{2x_0}{D_1} = \frac{2 \cdot 35}{56.57}$, $\theta_0 = 51^\circ$; і $\varphi_1(x_0) = 51^\circ$;

$\psi = 59^\circ$.

Тоді

$$P_x = 2160 \text{ Н}; P_y = 1418 \text{ Н}; P_z = 3296 \text{ Н}.$$

Розраховані значення відповідних складових сил різання менше, ніж допускає механізм повачі верстату.

Швидкість різання визначаємо за формулою (3.11).

Для поверхні 1: $T = 60$ хв; $C_6 = 349$; $x_v = 0,15$; $y_v = 0,35$; $m = 0.2$; $\varphi = 60^\circ$; $t = 0,6$ мм; $S = 0,24$ мм/об.

Тоді за формулою 3.11 – $V = 273$ м/хв.

Коефіцієнт, що враховує марку матеріалу різця $K_i = 1$.

Коефіцієнт, що враховує міцність оброблюваного матеріалу

$$K_M = \left(\frac{75}{\sigma_s} \right)^{p_v},$$

$\sigma_s = 590 \text{ Н/мм}^2$; $p_v = 1$; тоді $K_M = 1,27$.

Коефіцієнт, що враховує оброблюваність сталі $K_o = 0,8$.

Коефіцієнт, що враховує значення головного кута в плані $K_\varphi = 0,82$.

Тож уточнена швидкість різання:

$$V = 273 \cdot 1 \cdot 1,27 \cdot 0,92 = 287 \text{ м/хв}.$$

Визначаємо число обертів шпинделя:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 287}{3,14 \cdot 29,2} = 3127 \text{ об/хв}.$$

Приймаємо фактичну швидкість різання $n_\phi = 2000$ об/хв.

Тоді фактична швидкість різання визначається залежністю:

$$V_\phi = \frac{\pi \cdot D \cdot n_\phi}{1000} = \frac{3,14 \cdot 29,2 \cdot 2000}{1000} = 183,4 \text{ м/хв}.$$

Для поверхні 2: $T = 60$ хв; $C_6 = 349$; $x_v = 0,15$; $y_v = 0,35$; $m = 0.2$; $\varphi = 93 - 13 = 80^\circ$; $t = 0,7$ мм; $S = 0,24$ мм/об.

Тоді $V = 268$ м/хв.

Коефіцієнт, що враховує марку матеріалу різця $K_i = 1$.

Коефіцієнт, що враховує міцність оброблюваного матеріалу

$$K_M = \left(\frac{75}{\sigma_s} \right)^{p_v},$$

$\sigma_s = 590 \text{ Н/мм}^2$; $p_v = 1$; тоді $K_M = 1,27$.

Коефіцієнт, що враховує оброблюваність сталі $K_o = 0,8$.

Коефіцієнт, що враховує значення головного кута в плані $K_\phi = 0,82$.

Тож уточнена швидкість різання:

$$V = 268 \cdot 1 \cdot 1,27 \cdot 0,92 = 293 \text{ м/хв.}$$

Визначаємо число обертів шпинделя:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 293}{3,14 \cdot 57,97} = 1609 \text{ об/хв.}$$

Приймаємо фактичну швидкість різання $n_\phi = 1400 \text{ об/хв.}$

Тоді фактична швидкість різання визначається залежністю:

$$V_{\phi(\max)} = \frac{\pi \cdot D_{\max} \cdot n_\phi}{1000} = 254,9 \text{ м/хв.}$$

$$V_{\phi(\min)} = \frac{\pi \cdot D_{\min} \cdot n_\phi}{1000} = 146,9 \text{ м/хв.}$$

Для поверхні 3: $T = 60 \text{ хв}$; $C_6 = 349$; $x_v = 0,15$; $y_v = 0,35$; $m = 0,2$; $\phi = 60^\circ$; $t = 0,8 \text{ мм}$; $S = 0,13 \text{ мм/об.}$

З графіка (рис. 3.22) маємо $V = 324 \text{ м/хв}$ при $\theta = -35^\circ$ і $\phi_i = 60 - (-35) = 95^\circ$.

Коефіцієнт, що враховує марку матеріалу різця $K_i = 1$.

Коефіцієнт, що враховує міцність оброблюваного матеріалу

$$K_M = \left(\frac{75}{\sigma_s} \right)^{p_v},$$

$\sigma_s = 590 \text{ Н/мм}^2$; $p_v = 1$; тоді $K_M = 1,27$.

Коефіцієнт, що враховує оброблюваність сталі $K_o = 0,8$.

Коефіцієнт, що враховує значення головного кута в плані $K_\phi = 0,82$.

Тож уточнена швидкість різання:

$$V = 324 \cdot 1 \cdot 1,27 \cdot 0,92 = 333 \text{ м/хв.}$$

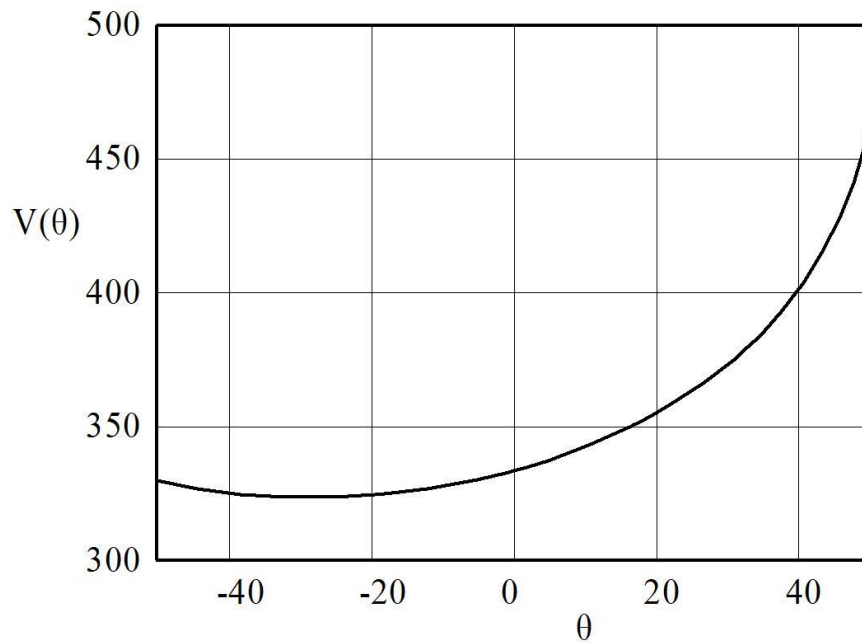


Рисунок 3.22 – Значення допустимої швидкості різання $V_{\text{доп}}$, при обробці фасонної поверхні в залежності від кута θ

Визначаємо число обертів шпинделя:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 333}{3.14 \cdot 91,6} = 1157,1 \text{ об/хв.}$$

Приймаємо фактичну швидкість різання $n_{\phi} = 1000$ об/хв.

Тоді фактична швидкість різання визначається залежністю:

$$V_{\phi(\max)} = \frac{\pi \cdot D_{\max} \cdot n_{\phi}}{1000} = 287,7 \text{ м/хв.}$$

$$V_{\phi(\min)} = \frac{\pi \cdot D_{\min} \cdot n_{\phi}}{1000} = 182 \text{ м/хв.}$$

Розробимо програму для обробки деталі палець на токарній операції з ЧПК

%

(PROGRAM NAME - VIDU1)

(DATE = DD-MM-YY - 07-04-13 TIME = HH : MM - 13:57)

(MCX FILE

C:\USERS\NGUYENCUONG\DESKTOP\MASCAM__VIDU\VIDU2 . MCX- 6)

(NC FILE

C:\USERS\NGUYENCUONG\DESKTOP\MASCAM_ VIDU\VIDU1 . NC)

G21

(TOOL - 1 OFFSET - 1)

(OD ROUGH RIGHT - 80 DEG. INSERT - CNMG 12 04 08)

G0 T0101

G18

G97 S3600 M03

G0 G54 X28 . Z2.

G50 S3600

G96 S2000

G99 G1 Z0. F. 24

Z-50 .

X32 .

X34.828 Z-48.586

G96 S1400

G0 Z-48.774

X31. 948

G1 Z-50. 774

X56.362 Z-103.441

X59.191 Z- 102.027

G28 U0. V0. W0. M05

T0100
M01
(TOOL - 12 OFFSET - 12)
(OD RIGHT 55 DEG INSERT - DNMG 15 06 08)
G0 T1212
G18
G97 S3600 M03
G0 G54 X56.362 Z-113.941
G50 S3600
G96 S1400
G1 Z- 115.941 F. 13
G18 G3 X89.999 Z-151.5 I-29.181 K-35.559
X56.376 Z-187.054 I-46 .
G1 X60.376
G18
G0 Z-185 .969
X59.737
G1 X56.376 Z-187. 054 F.24
X31.955 Z-243.711
X34.784 Z- 242.296
G0 X92.6
G28 U0. V0. W0. M05
T1200
M30

4 ВПЛИВ ЕКОНОМІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ВИБІР РЕЖИМІВ РІЗАННЯ

Для того щоб здійснити оптимальний процес різання, необхідно призначати режими з урахуванням розуміння фізики процесу різання та економічних параметрів операції [13, 27, 34].

При визначенні режимів різання і норм часу найповнішим критерієм оптимальності є собівартість технологічної операції, оскільки вона враховує витрати з усіх видів праці, тобто. витрати праці, безпосередньо пов'язані разом, і витрати попередньої праці, що враховуються амортизацією основних засобів виробництва.

Собівартість технологічної операції визначається наступним виразом:

$$C_{оп} = C_{осн.мат} + C_{ен} + C_{пал} + C_{тр} + C_{посл} + C_{невир} + ЗП_{роб.осн} + C_{мат} + ЗП_{роб.обс} + C_{ам} + C_{рем} + C_{ін} + C_{ін.ав} + C_{ам.пр} + C_{ам.буд} + ЗП_{ау} + ЗП_{ст.п} + ЗП_{кер.п} + ЗП_{дон}; \quad (4.1)$$

де $C_{осн.мат}$ – витрати на основний матеріал на одну деталь;

$C_{ен}$ – витрати на технологічну енергію;

$C_{пал}$ – витрати на технологічне паливо;

$C_{тр}$ – витрати на внутрішньоцехове транспортування;

$C_{посл}$ – витрати, пов'язані з оплатою послуг сторонніх організацій;

$C_{невир}$ – невиробничі витрати;

$ЗП_{роб.осн}$ – заробітна плата верстатника (основна та додаткова з нарахуваннями);

$C_{мат}$ – витрати на матеріали, що витрачаються на утримання верстата;

$ЗП_{роб.обс}$ – заробітна плата з нарахуваннями робітників, зайнятих обслуговуванням основного обладнання;

$C_{ам}$ – витрати з амортизації верстата;

$C_{рем}$ – витрати на поточний та планово-попереджувальний ремонт верстата;

$C_{ін}$ – витрати з експлуатації нормально зношеного ріжучого інструменту;

$C_{ін.ав}$ – витрати, пов'язані з поломками та передчасним зносом ріжучого

інструменту;

$C_{ам.пр}$ – витрати на амортизації пристроїв;

$C_{ам.буд}$ – витрати по амортизації будівлі;

$ЗП_{ay}$ – витрати зміст адміністративно-управлінського персоналу;

$ЗП_{ст.п}$ – витрати на стиснене повітря;

$ЗП_{кер.п}$ – витрати на підготовку та експлуатацію керуючої програми для верстатів з ЧПК;

$ЗП_{дон}$ – вести інших допоміжних робочих.

Елементи собівартості, величина яких залежить від прийнятих режимів обробки:

$$C = ЗП_{роб.осн} + C_{ам} + C_{ін} + C_{ам.пр} + C_{ам.буд}; \quad (4.2)$$

Елементи собівартості, величина яких залежить від прийнятого режимів обробки:

$$C_{оп} = C_{осн.мат} + C_{ен} + C_{нал} + C_{тр} + C_{посл} + C_{невир} + C_{мат} + ЗП_{роб.обс} + C_{рем} + \\ + C_{ін.ав} + ЗП_{ay} + ЗП_{ст.п} + ЗП_{кер.п} + ЗП_{дон}; \quad (4.3)$$

Виходячи з прийнятого припущення, друга група елементів цехової собівартості надалі не розглядається.

Заробітна плата верстатника (основна та додаткова з нарахуваннями) визначається за формулою:

$$ЗП_{роб.осн} = З_{хв} \cdot K_m \left(t_o + \frac{t_c}{Q} \right); \quad (4.4)$$

де $З_{хв}$ – тарифна ставка першого розряду цієї категорії робітників;

K_m – тарифний коефіцієнт;

t_c – час, що витрачається на зняття, встановлення та переточку інструменту, що затупився. Тобто час простою верстата у зв'язку із заміною інструменту;

Q – кількість деталей, оброблених за період стійкості інструменту;

t_o – основний технологічний час;

$$t_o = \frac{L}{n \cdot S} \cdot i = \frac{L}{n \cdot S} \cdot \frac{h}{t}; \quad (4.5)$$

де L – довжина різання з урахуванням величин врізання та перебігу, мм;

n – частота обертання заготовки, хв^{-1} ;

S – подача, мм/об;

i – число проходів;

h – величина припуску на сторону;

t – глибина різання, мм.

Витрати з амортизації верстата визначаються за формулою:

$$C_{ам} = \frac{C_{\epsilon} \cdot H_{ам.в}}{\Phi_{\epsilon} \cdot 60} \cdot \left(t_o + \frac{t_c}{Q} \right); \quad (4.6)$$

де C_{ϵ} – первісна вартість верстата;

$H_{ам.в}$ – норма річних амортизаційних відрахувань на металоріжущі верстати в %;

Φ_{ϵ} – річний фонд часу роботи верстата в годинах.

Витрати з експлуатації нормально зношеного інструменту визначаються за формулою:

$$C_{ин} = \left(\frac{C_i + i_{зам} \cdot C_{зам}}{i_{зам}} \right) \cdot \frac{1}{Q}; \quad (4.7)$$

де C_i – первинна вартість інструменту;

$i_{\text{зам}}$ – число заточок інструменту до повного зносу, включаючи і первинну;

$C_{\text{зам}}$ – вартість однієї заточки, включаючи заробітну плату заточника з нарахуваннями та накладні витрати, пов'язані з роботою заточного відділення;

Витрати з експлуатації пристроїв визначаються за формулою:

$$C_{\text{ам.пр}} = \frac{C_{\text{пр}} \cdot H_{\text{ам.пр}}}{\Phi_{\text{пр}} \cdot 60} \cdot \left(t_o + \frac{t_c}{Q} \right); \quad (4.8)$$

де $C_{\text{пр}}$ – первісна вартість пристроїв;

$H_{\text{ам.пр}}$ – норма річних амортизаційних відрахувань на пристосування в %;

$\Phi_{\text{пр}}$ – річний фонд часу роботи пристосування в годинах.

Витрати з амортизації будівлі визначаються за формулою:

$$C_{\text{ам.бюд}} = \frac{C_{\text{бюд}} \cdot H_{\text{ам.бюд}} \cdot F_{\text{вер}}}{F_{\text{бюд}}} \cdot \left(t_o + \frac{t_c}{Q} \right); \quad (4.9)$$

де $C_{\text{бюд}}$ – первісна вартість будівлі;

$H_{\text{ам.бюд}}$ – норма річних амортизаційних відрахувань на будинки в %;

$F_{\text{вер}}$ – площа, що займає верстат, м²;

$F_{\text{бюд}}$ – площа будівлі, м².

Отримаємо наступне вираз змінної частки собівартості технологічної операції:

$$C = t_o \cdot E + \frac{t_c}{Q} \cdot E + \frac{\epsilon}{Q}; \quad (4.10)$$

де

$$E = 3_{\text{хв}} \cdot K_m + \frac{C_{\text{вер}} \cdot H_{\text{ам.вер}}}{\Phi_{\text{вер}} \cdot 60} + \frac{C_{\text{пр}} \cdot H_{\text{ам.пр}}}{\Phi_{\text{пр}} \cdot 60} + \frac{C_{\text{бюд}} \cdot H_{\text{ам.бюд}} \cdot F_{\text{вер}}}{F_{\text{вер}}}; \quad (4.11)$$

$$\epsilon = \frac{C_{in} + t_{zam} \cdot C_{zam}}{t_{zam}}; \quad (4.12)$$

Підставляємо у рівняння (4.10) значення $Q = \frac{T}{t_o}$, де T – період стійкості інструменту, отримаємо:

$$C = t_o \cdot E + (E \cdot t_c + \epsilon) \cdot \frac{t_o}{T}; \quad (4.13)$$

де

$$T = \frac{C_1}{V^{1/m}}; \quad (4.14)$$

$$t_o = \frac{L}{n \cdot S} \cdot i = \frac{L \cdot \pi \cdot D}{1000 \cdot V \cdot S} \cdot \frac{h}{t}; \quad (4.15)$$

m – показник відносної стійкості, що характеризує вплив стійкості на швидкість різання;

C_1 – стала, що характеризує оброблюваний та інструментальний матеріали, геометричні параметри інструменту.

Звідки

$$C = \frac{L \cdot \pi \cdot D \cdot h}{1000 \cdot V \cdot S \cdot t} \cdot E + (E \cdot t_c + \epsilon) \frac{L \cdot \pi \cdot D \cdot h}{1000 \cdot C_1 \cdot S \cdot t \cdot V^{(1-1/m)}}; \quad (4.16)$$

$$C = \frac{L \cdot \pi \cdot D \cdot h}{1000 \cdot t} \cdot \left[\frac{E}{V \cdot S} + \frac{E \cdot t_c + \epsilon}{C_1 \cdot S \cdot V^{(1-1/m)}} \right]; \quad (4.17)$$

Тож, маємо можливість визначити значення швидкості різання V і подачі S , при яких доля собівартості операції буде мінімальною. Для цього необхідно, аби $\frac{dC}{dV} = 0$; або $\frac{dC}{dS} = 0$.

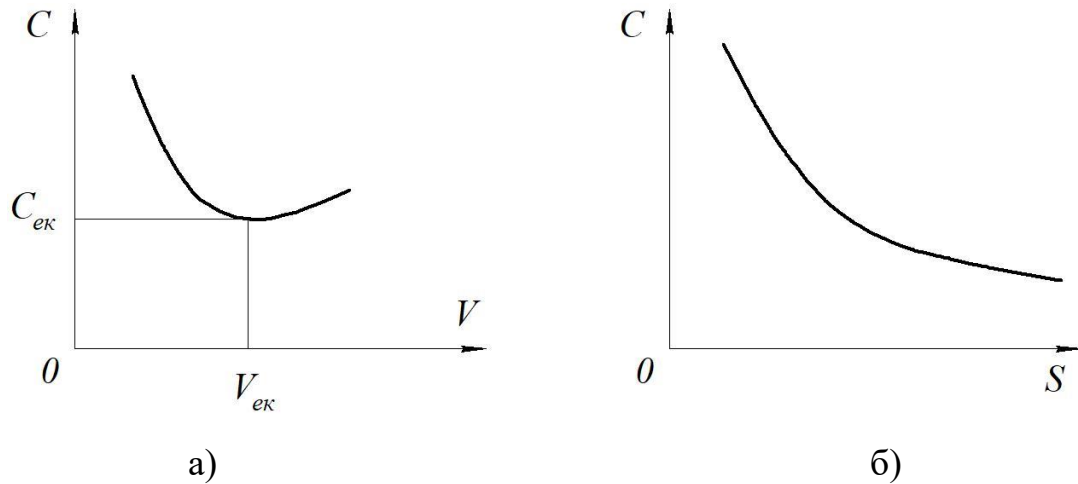


Рисунок 4.1 – Графіки впливу елементів режимів різання на собівартість:
а – швидкості різання, б – подачі

Тобто похідна від собівартості C за швидкістю V повинна дорівнювати нулю:

$$\frac{dC}{dV} = \frac{L \cdot \pi \cdot D \cdot h}{1000 \cdot t} \cdot \left[-\frac{E}{S \cdot V^2} + (E \cdot t_c + \epsilon) \cdot \frac{1-m}{m} \cdot \frac{1}{C_1 \cdot S \cdot V^{(2-1/m)}} \right]; \quad (4.18)$$

що і показано на рис. 5.1, а.

Оскільки залежність $\frac{L \cdot \pi \cdot D \cdot h}{1000 \cdot t} \neq 0$; і є додатньою величиною, то

$$-\frac{E}{S \cdot V^2} + (E \cdot t_c + \epsilon) \cdot \frac{1-m}{m} \cdot \frac{1}{C_1 \cdot S \cdot V^{(2-1/m)}} = 0; \quad (4.19)$$

а економічно доцільна швидкість різання

$$V_{ек} = \left[\frac{E \cdot C_1}{E \cdot t_c + \epsilon} + \frac{m}{1-m} \right]^m; \quad (4.20)$$

звідки оптимальна частота обертання шпинделя визначається залежністю:

$$n_{ек} = \frac{1000}{\pi \cdot D} \cdot \left[\frac{E \cdot C_1}{E \cdot t_c + \epsilon} + \frac{m}{1-m} \right]^m; \quad (4.21)$$

Економічний період стійкості інструменту визначається залежністю:

$$T_{ек} = \frac{m}{1-m} \cdot \left(t_c + \frac{\epsilon}{E} \right); \quad (4.22)$$

Собівартість C пов'язана з подачею S залежністю:

$$\frac{dC}{ds} = -\frac{L \cdot \pi \cdot D \cdot h}{1000 \cdot t} \cdot \left[\frac{E}{V} + \frac{E \cdot t_c + \epsilon}{C_1 \cdot V^{(1-1/m)}} \right] \cdot \frac{1}{S^2}; \quad (4.18)$$

в якій завжди $\frac{dC}{ds} < 0$, оскільки $C=f(S)$ спадаюча функція, що графічно наведена на рис. 5.1, б. Необхідно розглядати спільний вплив швидкості різання V і подачі S на собівартість C . Цей вплив графічно представлено на рис. 5.2.

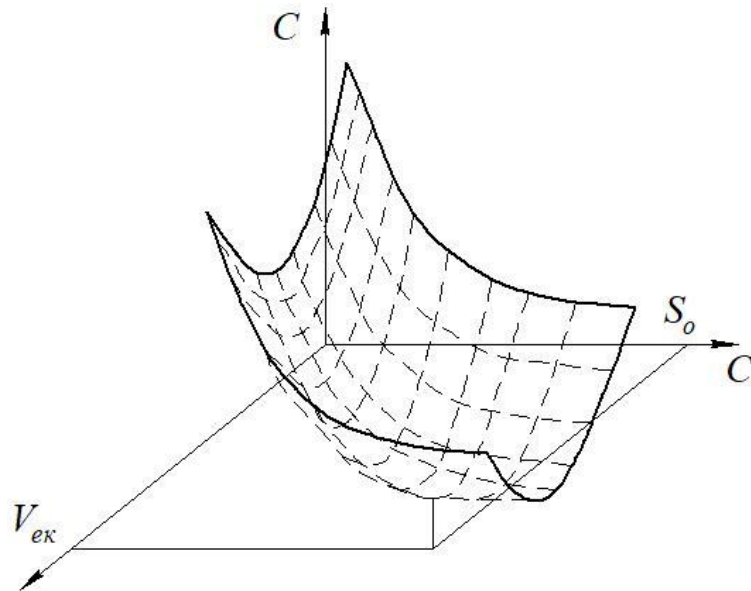


Рисунок 4.2 – Вплив швидкості різання V і подачі S на собівартість обробки поверхні C

З графіка видно, економічно подачу слід вибирати максимально велику, з урахуванням технологічних обмежень. З виразів (3.10) і (3.11) слідує, що для отримання максимально можливих значень швидкості різання при заданому періоді стійкості інструменту при певній площі перерізу необхідно стримитися до якомога більшого співвідношення b/a і t/s . При заданих технологічно допустимих глибині різання та подачі швидкість різання можна підвищити, зменшуючи головний кут в плані.

ВИСНОВКИ

1. При обробці будь-яких матеріалів з прямими шарами, що зрізаються найбільший вплив на період стійкості інструменту має швидкість різання, потім подача та найменше – глибина різання.

2. Інтенсивність впливу V , S та t на період стійкості інструменту буде такою, якою є ступінь впливу цих факторів на температуру різання. Тому в такому самому порядку V , S та t впливають і на період стійкості інструменту.

3. Для того щоб період стійкості інструменту був як омога більшим, необхідно при постійній площі перерізу шару, що зрізається, збільшувати ширину шару за рахунок зменшення його товщини, тобто прагнути працювати з більшим співвідношенням b/a .

4. При заданих глибині різання та подачі швидкість різання можна збільшити за рахунок зменшення головного кута у плані інструменту.

5. З наведених формул робимо висновок, що при збільшенні межі міцності та твердості оброблюваного матеріалу величину позитивного оптимального переднього кута слід зменшувати, а негативного – збільшувати.

6. Оптимальний задній кут токарного прохідного різця при обробці вуглецевих конструкційних сталей дорівнює $6^\circ - 8^\circ$. При обробці матеріалу, що є більш пружним, величина оптимального заднього кута становить $10^\circ - 12^\circ$.

7. При збільшенні кута ϕ співвідношення b/a ширини шару, що зрізається до його товщини безперервно зменшується і досягає мінімуму при $\phi = 90^\circ$. Одночасно з цим зменшується кут загострення ϵ_k різця у плані. Внаслідок зменшення відношення b/a і кута ϵ_k температура різання зростає, стійкість інструменту падає, і інструмент допускає меншу швидкість різання.

8. При малих кутах ϕ_1 збільшується робоча довжина допоміжного леза, що збільшує силу тертя на допоміжній задній поверхні і знос інструменту. Тому при збільшенні допоміжного кута в плані не до деякого значення стійкість інструменту зростає. При подальшому збільшенні кута ϕ_1 період стійкості не зростає, а

зменшується внаслідок погіршення умов тепловідведення від лез інструменту і зменшення міцності вершини.

9. Зміна кута нахилу головного леза змінює положення перед нею поверхні інструменту щодо напрямку його руху та відношення робочої довжини головного леза до товщини шару, що зрізається. Величина і знак кута нахилу головного леза визначають напрям сходу стружки по передній поверхні.

10. Оскільки швидкість різання і подача впливають на одну заготовку, то необхідно розглядати спільний вплив швидкості V і подачі S на собівартість. Економічно подачу слід вибирати максимально велику, з урахуванням технологічних обмежень.

11. Для отримання максимально можливої при заданому періоді стійкості інструменту швидкості різання при певній площі перерізу шару, що зрізається, необхідно прагнути працювати з можливо більшим відношенням b/a і t/S .

ЛІТЕРАТУРА

1. Технологічні основи машинобудування. Навчальний посібник до виконання лабораторних робіт і самостійної роботи студентів інженернохімічного факультету та механіко-машинобудівного інституту / Укл. Добрянський С.С., Малафєєв Ю.М., Субін А.А., Гриценко В.М. Під редакцією Петракова Ю.В. – Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. – 112 с., іл
2. 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.
3. Гевко Б.М., Дичковський М.Г., Матвійчук А.В. Технологічна оснастка. Контрольні пристрої : навч. посіб. Київ : «Кондор», 2008. 220 с.
4. 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».
5. Боженко Л. І. Технологія машинобудування. Проектування технологічного спорядження : посібник. Львів : Світ, 2001. 296 с.
6. 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.
7. Мажара, В. А., Артюхов, А. М., & Тененика, С. А. (2024). Проектування затискних пристроїв та оснащення. Самостійна робота. М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. машинобудування, мехатроніки і робототехніки. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – 44 с.
8. 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.
9. TT8 125 AlphaAL Next generation CVD coated grade TT8 125 for steels // NPA New product announcement TaeguTurn TaeguTec №105: мережевий журн. 2009. URL: http://www.taegutec.com/Img/Board_NPAFile/NPA105_en.pdf (Дата звернення: 26.10.2025).
 10. Крижанівський В.А., Кузнєцов Ю.М., Валявський І.А. і ін. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою. Кіровоград, 2004. – 438с.
 11. FANUC AC servo motor ai, ais series. Descriptions. B-65262EN/03.-Fanuc LTD, 2004 – 368 с.
 12. FANUC AC spindle motor ai series. Descriptions. B-65272EN/04. Fanuc LTD, 2004 – 424 с.
 13. 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.
 14. Павленко І.І., Мажара В.А. Технологічне оснащення. Методичні вказівки виконання курсового проекту студентами спеціальності “Прикладна механіка”. – Кропивницький: ЦНТУ, 2017. – 36 с.
 15. Raja K. Kountanya, William J. Endres. Flank Wear of Edge-Radiused Cutting Tools під Ideal Straight-Edged Orthogonal Conditions.
 16. Якобе Г.Ю., Якоб Е., Кохан Д. Оптимізація різання. Параметризація способів обробки різанням з використанням технологічної оптимізації: Переклад з німецької. К: Наука, 1981. – 279с.
 17. Рижов Е.І., Аверченков В.І. Оптимізація технологічних процесів механічної обробки/АН УРСР. Ін-т надтвердих матеріалів. Київ: Наукова Думка. 1989. 192 с.
 18. Мажара, В. А., Щербина, К. К., Артюхов, А. М., Тененика, С. А., & Шестаков, І. С. (2024). Система автоматизованого проєктування технологічного оснащення. // Конструювання, виробництво та експлуатація

- сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – Вип. 54. – С. 12-23.
19. Алейниченко Г.Ф. Про співвідношення радіуса округлення ріжучої кромки інструменту і товщини шару, що зрізається // Різання та інструмент: Респ. зб. наук. тр. Харків: Техніка, 1976. Вип. 16. с. 94-102.
20. Скібінський О. І., Селєхова В. М. Технологія машинобудування. Самостійні роботи. – 2023. М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. машинобудування, мехатроніки і робототехніки. - Кропивницький : ЦНТУ , 2023. - 77 с.
21. Павленко, І. І., & Мажара, В. А. (2019). Роботизовані технологічні комплекси. Монографія - Кропивницький: Видавництво ТОВ "КОД", 2019.
22. Павленко І.І. Структура промислових роботів. Кіровоград: КІСМ, 1998. – 98с.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. Основи охорони праці: Підручник. / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний, Д. В. Зеркалов, Р. В. Сабарно, о. І. Полукаров, В. С. Козьяков, Л.

- О. Митюк. За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. – К.: Основа, 2003 – 472 с.: іл.
27. 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).
28. Павленко І.І. Захватні пристрої роботів / І.І. Павленко, М.О. Годунко // Захватні пристрої роботів: монографія. – Кропивницький: «КОД», 2020. – 386 с.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. Shcherbyna, K., Hrechka, A., Mazhara, V., & Diachenko, T. (2020). Kinematics of cutting process while honing holes with a hone with variable geometry of sticks.
34. 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.
35. Сафронова Н. В., Мажара В. А. До ефективності використання сучасних токарних обробних центрів. – 2011.