

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

магістр

на тему: «Дослідження обробки вальниць кочення»

КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
*«Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва»*
спеціальності 133 *«Галузеве
машинобудування»*
ступеня вищої освіти *магістр*
групи 133ГМмд 21
ГОЛОВЕЦЬКИЙ Андрій

Керівник: докт. техн. наук, доцент
ВЕТОХІН Володимир

Полтава – 2022 року

ВСТУП

Для промисловості, що спеціалізується на виготовленні вальниць, шліфування є одним із основних методів обробки, що визначає геометричну точність.

Проте шліфування кілець вальниць пов'язано зі значними труднощами. Ці труднощі обумовлені складністю забезпечення геометричної точності кілець, що мають початкові відхилення від площинності торців в результаті термообробки або попередніх операцій механічної обробки.

Для забезпечення заданих геометричних параметрів торцеві поверхні піддають шліфуванню. Наявність відхилень від площинності торцевих поверхонь істотно ускладнює процес шліфування, оскільки під дією магнітного поля столу верстата кільце отримує пружну деформацію.

Різні технологічні прийоми, що використовуються для усунення відхилень від площинності торців кілець вальниць, істотно збільшують їх час обробки та вартість операції.

При шліфуванні кілець вальниць необхідно враховувати пружні деформації, що виникають від дії магнітного поля столу та сили різання. Керування цими факторами дозволить зменшити час і вартість операції при гарантованому забезпеченні геометричної точності деталі. Тим не менше, дане питання досліджено недостатньо, зокрема на етапі визначення залежності впливу технологічних параметрів процесу виготовлення вальниць кочення на силові характеристики та параметри шорсткості оброблених поверхонь.

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Властивості та галузі застосування сталі ШХ15

Найбільш поширені підшипникові високовуглецеві сталі залежно від умов експлуатації ділять на дві групи [1, 2]:

- працюючі за звичайних умов (хромиста, хромиста з добавкою молібдену, хромомарганцевокремниста, хромомарганцева з добавкою молібдену);
- сталі для вальниць, що працюють в агресивних середовищах і при підвищеній температурі (корозійно стійка, теплостійка).

До перших належать сталі марок ШХ15, ШХ15СГ, ШХ20СГ, ШХ4, ШХ6, ШХ9 і т.д. До других належать сталі марок 95Х18-Ш, 11Х18М-ШД, 8Х4М4ВФ1-Ш, 8ДСВ40, М50, Z80WDCV6, 80MoCrV4216 та ін.

Хімічний склад сталі повинен відповідати нормам, зазначеним у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сталей [3, 4]

Марка сталі	Масова доля елементів, %								
	Вуглець	Кремній	Марганець	Хром	Сірка	Фосфор	Нікель	Мідь	Нікель та мідь
ШХ15	0,95-1,05	0,2-0,4	0,2-0,4	1,3-1,7	0,02	0,027	0,30	0,25	0,50
ШХ15СГ	0,95-1,05	0,4-0,65	0,9-1,2	1,3-1,7	0,02	0,027	0,30	0,25	0,50
ШХ4	0,95-1,05	0,15-0,3	0,15-0,3	0,4-0,5	0,02	0,027	0,30	0,25	0,50
ШХ20СГ	0,90-1,00	0,55-0,9	1,4-1,7	1,4-1,7	0,02	0,027	0,30	0,25	0,50

Механічні та фізичні властивості, технологічні характеристики сталі ШХ15 наведені у таблиці 1.2.

Висока міцність підшипникових сталей після термічної обробки і стійкість проти стирання обумовлюється наявністю вуглецю.

Таблиця 1.2 – Властивості сталі ШХ15 (сортовий прокат)

Механічні властивості при кімнатній температурі							
Режим термообробки	Переріз, мм	Межа текучості умовна $\sigma_{0,2}$, МПа	Тимчасовий опір σ_B , МПа	Відносне видовження після розриву δ , %	Відносне звуження після розриву ψ , %	Ударна в'язкість КСУ, Дж/см ²	Твердість HRC (HB), не більше
Відпалювання 800°C, потім до 650 °C зі швидкістю 10-20%/год, повітря	-	370-410	500-730	15-25	35-55	44	179-207
Гартування 810°C, вода до 200°C, потім масло. Відпускання 150°C, повітря	30-60	1670	2160	-	-	5	62-65
Межа витривалості							
σ_{-1} , МПа		Термообробка					
333		Відпалювання, 192 HB					
804		Гартування 830°C в масло, відпускання 150°C, 60 HRC					
Технологічні характеристики							
Оброблюваність різанням у відпаленому стані при 179-217 HB та $\sigma_B=730$ МПа коефіцієнт відн. оброблюваності	Шліфованість		Зварюваність		Флокено-чутливість		Схильність до відпускнуї крихкості
$K_r = 0,9$ (тв. сплав) $K_r = 0,36$ (шв. сталь)	Добра		Важко-зварювана, контактне зварювання		Чутлива		Схильна

Продовження таблиці 1.2

Фізичні властивості сталі ШХ15						
Властивості	при температурі, °C					
	20	100	200	300	400	500
Модуль нормальної пружності, Е, МПа	2,11	-	-	-	-	-
Модуль зсуву, G, 10 ⁵ МПа	0,80	-	-	-	-	-
Коефіцієнт лінійного розширення, α, 10 ⁻⁶ 1/°C	11,9	15,1	15,5	15,6	15,7	-
Теплопровідність, λ, Вт/(м·°C)	40	-	-	-	-	37
Щільність, кг/м ³	7812	7790	7750	7720	7680	7640
Питомий електричний опір, ρ, нОМ·м	-	390	470	520	-	-

Твердість внутрішніх шарів металу залежить від глибини прогартованості, на яку впливає кількісний вміст хрому. Збільшення прогартованості сталі, характеризується відрізком часу перетворення аустеніту в перліт, а наявність хрому уповільнює цей процес. Тому, для виготовлення великих деталей вальниць, необхідно застосовувати сталь з більшим вмістом хрому (0,4-1,65%).

Зносостійкість сталі, підвищується за рахунок високої твердості карбідів хрому. Так само хром зменшує схильність стали до перегріву, та надає їй дрібнозернисту структуру. Але при високому вмісті хрому (>1,65 %) важко одержати однорідну структуру, тому вміст хрому в таких сталях зазвичай не перевищує 1,65%.

Поряд з тим, що марганець, як і хром, збільшують опір сталі стиранню і твердість, одночасно вони сприяють росту зерна при нагріванні, у результаті чого при термічній обробці може утворюватися крупнозерниста структура перегрітої сталі. Кремній має негативний вплив на в'язкість підшипникової сталі. Кремній і марганець є розкислювачами, тому чим вище їх зміст, тим повніше розкислена сталь, поряд з цим їх кількість в підшипникової сталі всіх марок має бути не більше 0,35%Si і 0,4%Mn. Підвищений вміст марганцю і кремнію для виготовлення великих деталей вальниць з ШХ15Г пояснюється тим, що ці

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

елементи зменшують критичну швидкість загартування, знижуючи тим самим схильність сталі до викривлення і тріщин [1, 2].

Фосфор, мідь і нікель є шкідливими домішками. За рахунок утворення крупнозернистої структури при нагріванні фосфор підвищує крихкість і зменшує міцність на згин, що в свою чергу, збільшує чутливість сталі до динамічних навантажень і схильність виробів до появи гартувальних тріщин. Утворення при гарячій механічній обробці поверхневих тріщин і надривів характеризуються підвищеним вмістом міді, хоча вона і збільшує твердість, межа міцності і прогартованість, її наявність як домішки є небажаною. Вміст нікелю обмежують у зв'язку з тим, що його присутність знижує твердість сталі.

Неоднозначний вплив на сталь для вальниць надає наявність сірки. Навколо сульфідних включень утворюється сульфідна оболонка, яка зменшує вплив цих включень на концентрацію напружень і внаслідок цього підвищує опір втоми. При виході на робочу поверхню сульфідів знижується стійкість проти стирання і втомного руйнування. Зі збільшенням відношення концентрацій S/O до 3-5 стійкість вальниць збільшиться. Цьому сприяє і поліпшення якості поверхні внаслідок того, що сірка покращує оброблюваність сталі [1, 2].

1.2 Вимоги до параметрів шорсткості деталей вальниць

У сучасній промисловості широкого застосування знайшли деталі класу кілець, необхідні для виготовлення вальниць кочення. Якість вальниць визначається багато у чому якістю елементів, із яких вони зібрані. Найважливішою складовою якості є точність виготовлення.

Вальниці кочення є основним видом опор обертових деталей і деталей машин, що гойдаються, механізмів різного цільового призначення [5].

Вальниці кочення складаються з двох кілець – внутрішнього 1 і зовнішнього 3, що мають доріжки кочення, тіл кочення 2 (кульок, роликів або голок) і сепаратора 4, що розділяє тіла кочення (рисунок 1.1, а). У залежності від

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

форми тіл кочення розрізняють вальниці кулькові (рисунок 1.1, а, б, ж, і) і роликові (рисунок 1.1, в, г, е, з, к). Різновидом роликових вальниць є голчасті, що зображені далі (рисунок 1.1, д).

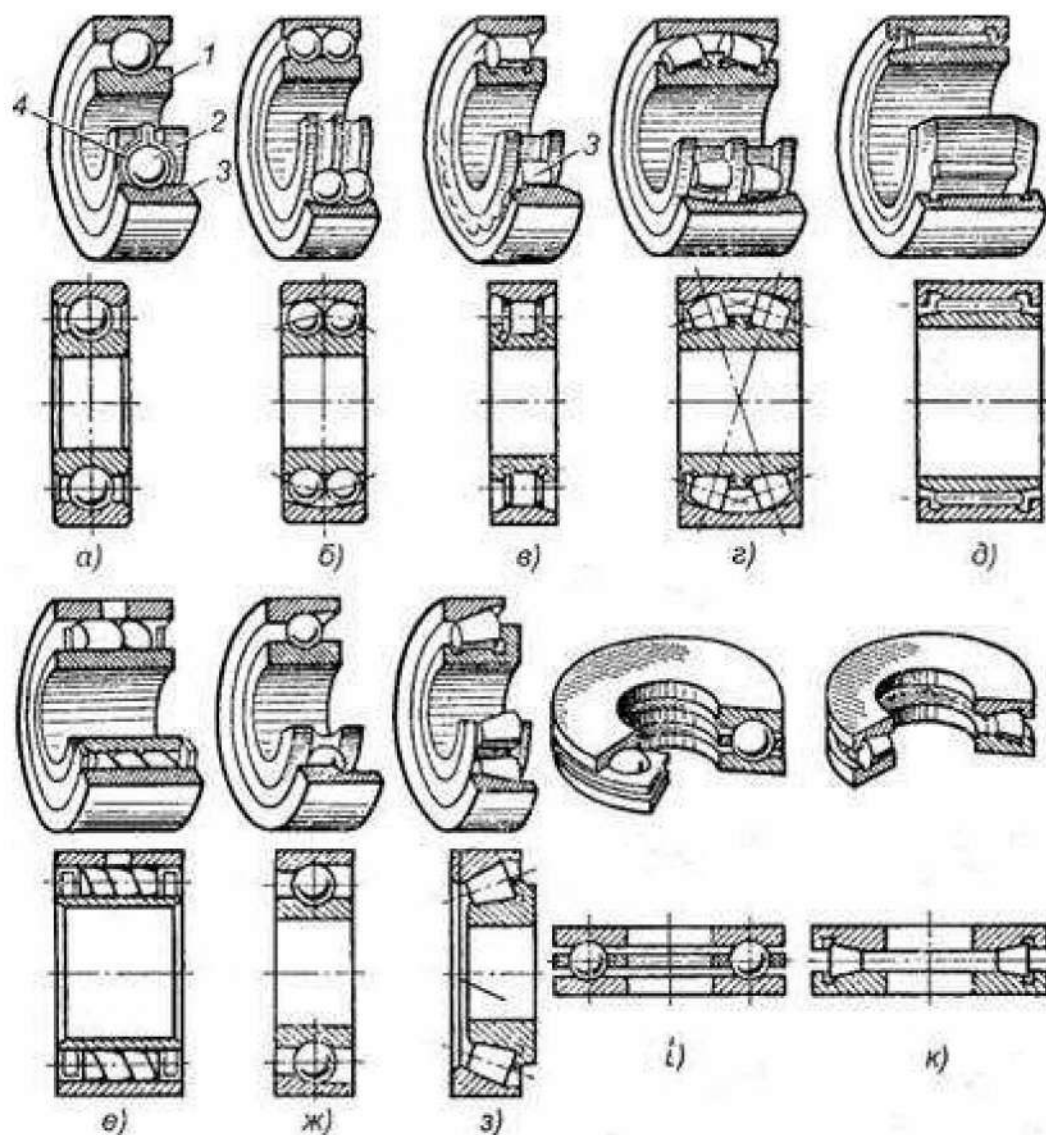


Рисунок 1.1 – Вальниці кочення: а, б, в, г, д, е – радіальні вальниці;
ж, з – радіально-упорні вальниці; і, к – упорні вальниці;
1 – внутрішнє кільце; 2 – тіло кочення; 3 – зовнішнє кільце; 4 – сепаратор

Основними елементами вальниць кочення є тіла кочення – кульки або ролики, встановлені між кільцями і утримувані сепаратором на певній відстані одна від одної.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Роликові тіла кочення бувають: короткі при відношенні довжини до діаметру $l/d = 1 \dots 1,25$, довгі при $l/d = 2 \dots 2,5$, голчасті при $l/d = 10 \dots 20$.

Розміри вальниці – внутрішній d і зовнішній D діаметри, ширина B (висота H) і радіуси r фасок кілець – встановлені ГОСТ 3478. Вальниці кочення у діапазоні внутрішніх діаметрів 3...10 мм стандартизовані через 1 мм, до 20 мм – через 2...3 мм до 110 мм – через 5 мм.

Матеріали вальниць кочення призначаються з урахуванням високих вимог до твердості та зносостійкості кілець, а також тіл кочення. Тут використовуються підшипникові високовуглецеві хромисті сталі ШХ15 і ШХ15СГ, а також цементовані леговані сталі 18ХГТ і 20Х2Н4А. Твердість кілець та роликів зазвичай HRC 60...65, а у кульок трохи більше – HRC 62... 66, оскільки ділянка контактного тиску у кульки менше. Сепаратори виготовляють з м'яких вуглецевих сталей або з антифрикційних бронз для високошвидкісних вальниць. Широко впроваджуються сепаратори з дюралюмінію, металокераміки, текстоліту, пластмас. Сепаратори високошвидкісних вальниць називають масивними і виконують із текстоліту, фторопласту, латуні, бронзи із переважним centruванням їх по зовнішньому кільцю.

Для забезпечення нормальної і довговічної роботи вальниць кочення до якості їх виготовлення і термічної обробки тіл кочення та кілець пред'являють являють високі вимоги.

Вальниці кочення на відміну від вальниць ковзання стандартизовані. Вальниці кочення різних конструкцій (діапазон зовнішніх діаметрів 1,0...2600 мм, маса 0,5...3,5 т) виготовляють на спеціалізованих заводах. Вальниці кочення із зовнішнім діаметром ≥ 200 мм відносять до великогабаритних; із зовнішнім діаметром ≥ 500 мм – до понад крупногабаритних.

Вальниці кочення класифікують за напрямом навантаження, яке вони сприймають, відповідно до ГОСТ 3395 – радіальні, радіально-упорні, упорно-радіальні та упорні.

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Радіальні вальниці (див. рисунок 1.1, а-е) сприймають (в основному) радіальне навантаження, тобто навантаження, спрямоване перпендикулярно до геометричної осі вала. Упорні вальниці (див. рисунок 1.1 і, к) сприймають тільки осьове навантаження. Радіально-упорні (див. рисунок 1.1 ж, з) і упорно-радіальні вальниці можуть одночасно сприймати як радіальне, так і осьове навантаження. При цьому упорно-радіальні вальниці призначені для осьового навантаження, що переважає.

Точність вальниць кочення визначається точністю основних розмірів; точністю обертання. Точність основних розмірів визначається відхиленнями розмірів внутрішнього і зовнішнього діаметрів, ширини кільця. Відхилення розмірів діаметрів визначає характер посадки. Торці деталей майже всіх класів в машинобудуванні є технологічною базою для обробки поверхонь.

Точність таких параметрів торців кілець, як конусність, відхилення від площинності, вгнутість даними державним стандартом не регламентуються. Ці параметри встановлюються стандартами підприємств-виробників вальниць кочення (СТП). Допуски на такі параметри, як конусність, відхилення від площинності торців кілець СТП встановлюються в межах 50% допуску на непостійність ширини; при цьому вгнутість торців кілець не допускається.

Вимоги до шорсткості поверхонь торців наводяться в таблиці 1.3 [6-9].

Таблиця 1.3 – Шорсткість торців кілець R_a

Клас точності вальниць	Номинальні діаметри d і D , мм			R_a , мкм
	Від 150 до 250	Від 250 до 500	Від 500 до 2500	
0	2,5	2,5	2,5	2,5
6х, 6, 5	1,25	2,5	2,5	1,25
4, 2, Т	0,63	1,25	-	0,63

1.3 Особливості обробки вальниць кочення шліфуванням

Для підшипникової промисловості шліфування є одним із основних методів обробки, що визначає геометричну точність деталей вальниць. Шляхи підвищення геометричної і розмірної точності шліфування вальниць кочення визначені в численних дослідженнях [10-27].

Проте виготовлення великогабаритних вальниць, застосування яких в різних галузях машинобудування постійно розширюється, пов'язано зі значними труднощами.

Ці труднощі обумовлені складністю забезпечення геометричної і розмірної точності кілець, що мають початкові відхилення від площинності базових торців, що утворилися в результаті термообробки або попередніх операцій механічної обробки.

Для забезпечення заданих геометричних параметрів торцеві поверхні піддають шліфуванню. Наявність відхилень від площинності торцевих поверхонь істотно ускладнює процес шліфування, оскільки під впливом магнітного поля столу верстата кільце отримує пружну деформацію. Після шліфування і зняття магнітного поля пружні деформації повертають певну величину неплоскостності обробленого торця.

Різні технологічні прийоми, що використовуються для усунення відхилень від площинності торців кілець великогабаритних вальниць, суттєво збільшують час обробки і вартість операції [10].

Відхилення від площинності, вигнутість заготовок кілець перед шліфуванням визначається в основному деформацією при загартуванні під впливом теплових і структурних напружень [28-31].

У роботі [28] досліджувалися в основному кільця вальниць з $D \leq 250$ мм. Для кілець великогабаритних вальниць з $D > 250$ мм величини відхилення від площинності зростають.

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відхилення від площинності, вигнутість заготовок кілець перед шліфуванням визначається деформацією при загартуванні під впливом теплових і структурних напружень.

Теплові напруження виникають внаслідок неоднорідного нагрівання і охолодження кілець по перерізу.

Структурні напруження з'являються в залежності від змін об'єму в різних частинах кілець при неодночасному протіканні процесів перетворення.

За результатами досліджень різних способів гартування можна зробити висновок про неможливість повністю виключити відхилення від площинності торців кілець після гартування.

В залежності від застосовуваних методів термообробки (гартування і відпускання), кільця набувають вигнутість різного характеру:

- систематичну (кратну числу упорів в штампах) при термообробці в штампах;
- невизначену – при термообробці з обертанням кільця у вільному стані або укладання одним з торців на під печі.

Наявність відхилення від площинності базових торців заготовок кілець є передумовою пружної деформації кілець в осьовому напрямку при закріпленні заготовки кільця магнітним полем столу і шліфуванні торців.

Шліфування торців великогабаритних кілець на верстатах з круглим магнітним столом в залежності від їх діаметральних розмірів здійснюють одним з двох методів – з поперечною подачею кола і врізанням [32-34].

Схеми обробки представлені на рисунку 1.2:

- із поперечною подачею шліфувального круга для групи кілець з рядним укладанням на магнітний стіл (рисунок 1.2, а);
- із поперечною подачею при висоті круга менше ширини торця кільця – $B_k < B_o$ (рисунок 1.2, б);
- торцем круга із рядним укладанням (рисунок 1.2, в);
- врізанням при висоті круга більшої ширини торця кільця – $B_k > B_o$ (рисунок 1.2, г).

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При обробці торців кілець з рядним укладанням їх на магнітний стіл і поперечною подачею шліфувального круга останній зазнає нерівномірні ударні навантаження, що викликаються перервністю оброблюваних поверхонь.

Це призводить до нерівномірного зносу робочої поверхні круга, зниження стійкості, збільшення кількості правок для відновлення геометрії круга. При цьому точність і прямолінійність обробленої поверхні торця повністю залежать від стану шпиндельної групи. Поверхня торців може набувати опуклості зі зміною шорсткості.

Ця схема обробки рекомендується для попереднього (чорнового) шліфування. Оброблені за цією схемою торці потребують доопрацювання для забезпечення параметрів точності по технічним умовам, використовуючи схеми обробки (рисунок 1.2, б, в).

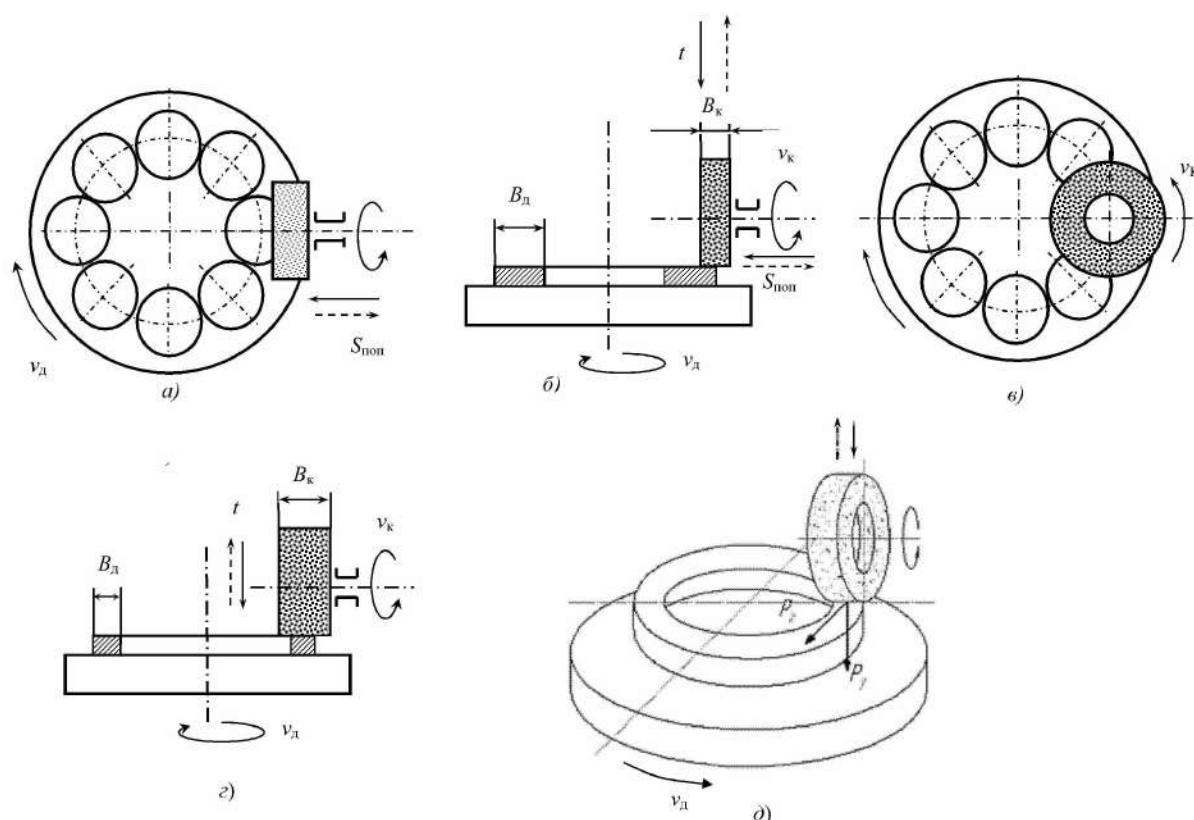


Рисунок 1.2 – Методи шліфування торців кілець на верстатах з круглим магнітним столом: а, б – периферією круга з поперечною подачею; в – торцем круга; г – периферією круга врізанням; д – сили різання при шліфуванні периферією круга врізанням

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Обробка торців кілець з рядним укладанням їх на магнітний стіл верстата торцем шліфувального круга (див. рисунок 1.2, в) використовується як для попереднього (чорнового), так і для остаточного шліфування.

Особливості шліфування заготовок кілець великогабаритних вальниць, що мають початкові відхилення від площинності пов'язані зі складністю одержання необхідної геометричної точності, що в свою чергу, обумовлено необхідністю урахування осьових пружних деформацій кілець в процесі шліфування від зусиль різання і затискання кілець.

Дослідження з оптимізації процесу плоского шліфування із забезпеченням необхідної якості обробленої поверхні, методи вирішення задач розглядаються у роботах [35-37]. У роботі [14] розглядається оптимізація процесу плоского шліфування із забезпеченням параметра шорсткості обробленої поверхні $R_a = 1, 25 \dots 2,5$ мкм без виходжування.

Висновки до розділу 1

З вищевикладеного матеріалу випливає:

- 1) для виготовлення вальниць застосовують сталі двох груп із високим вмістом вуглецю;
- 2) найважливішою складовою якості виготовлення є точність, до якої відноситься і шорсткість оброблених поверхонь;
- 3) шліфування є одним із основних методів виготовлення вальниць, але йому притаманні певні складнощі із забезпечення геометричної та розмірної точностей.

Отже, **мета дослідження** – підвищення ефективності технологічного процесу обробки кулькових опор. **Об'єктом** розробки є процес підвищення точності кілець опор вальниць, а **предметом** – оптимальні режимні параметри обробки шліфуванням.

Для вирішення поставленої мети необхідно розв'язати наступні **задачі**:

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- розробити конструкцію експериментальної установки на базі плоскошліфувального верстату;
- запропонувати методику експериментальних досліджень процесу обробки вальниць кочення;
- знайти залежність силових характеристик процесу шліфування від умов обробки;
- отримати моделі регресії шорсткості та коефіцієнта шліфування;
- надати рекомендації із практичної реалізації розробок.

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

2.1 Використання повного факторного експерименту 2^k

Метою планування при експериментальних дослідженнях є вибір оптимальної кількості та умов проведення експериментів, що забезпечують отримання найкращого результату. Перші кроки дослідження будуються на основі збору, вивчення та аналізу всіх наявних даних про об'єкт, причому характер і ретельність обробки мізерної або великої апріорної інформації безпосередньо впливають на швидкість отримання остаточного вирішення поставленого завдання.

У результаті попереднього (апріорного) етапу дослідник вибирає параметри оптимізації у відповідності з поставленим завданням, складає повний список факторів, (зауважимо, що іноді краще включити в нього деякі малозначні фактори, які в сукупному впливі можуть представляти значимість) і визначає орієнтовні межі зміни факторів з урахуванням вимог їх сумісності. При цьому враховуються принципові обмеження (наприклад, для температури нижньою межею буде абсолютний нуль), техніко-економічні обмеження – вартість, час випробувань, а також можливості апаратури, технології та ін [38-46]. При виявленні занадто великого числа факторів рекомендується виконувати відсів незначних згідно з існуючими методиками, викладеними у відповідній літературі. У цьому полягає етап попередньої підготовки до експерименту.

Згідно ідеї крокового пошуку експеримент проводиться за етапами: результат попереднього етапу дослідження і тип кінцевої мети визначає кількість наступних етапів і порядок дій на кожному з них, що в результаті приводить до досягнення кінцевої мети дослідження. Методика повного факторного експерименту (ПФЕ) передбачає визначення значення параметра оптимізації при всіх можливих комбінаціях рівнів варіювання факторів. При наявності k факторів, кожен з яких може встановлюватися на q рівнях, згідно з методикою ПФЕ необхідно поставити $n = q^k$ дослідів. Очевидно, що із зростанням числа рівнів факторів різко зростає

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кількість дослідів, тому найбільше поширення набули експерименти, у яких фактори варіюють на двох рівнях (верхній і нижній), тобто експерименти типу 2^k .

Для виключення впливу систематичних похибок, викликаних зовнішніми умовами (заважаючі фактори), дослід, запланований матрицею, необхідно проводити у випадковій послідовності. Цей прийом називається рандомізацією. Цей найпростіший і кардинальний спосіб заснований на використанні таблиці випадкових чисел, з якої вибирається послідовність всіх дослідів, включаючи n_u дослідів у кожній точці (паралельні дослід передбачаються для оцінки відтворюваності процесу і проведення статистичних оцінок).

Інший підхід полягає в розбиванні план-матриці на блоки. Якщо експериментатор знає про зміну якихось зовнішніх умов, то він може планувати експеримент так, щоб ефект впливу цих умов був пов'язаний з певним впливом, яким можна знехтувати [46-50].

2.2 План факторного експерименту типу 2^4

При плануванні експерименту до факторів висувають дві основні вимоги: сумісність та некорельованість. Під сумісністю розуміється можливість поєднання будь-яких рівнів факторів всередині заданої області визначення при збереженні цілісності досліджуваного процесу. Некорельованість означає можливість змінювати значення кожного із розглянутих факторів незалежно один від одного. Невиконання хоча б однієї з вимог призводить до неможливості використання методики планування експерименту для розробки моделі процесу. Правильний вибір факторів дозволяє чітко задавати умови дослід.

Розробка моделі зусиль різання здійснювалася методом повного факторного експерименту типу 2^k .

Планування, проведення та обробка результатів ПФЕ складається з таких обов'язкових етапів: кодування факторів; складання план-матриці експерименту; рандомізація дослідів; реалізація плану експерименту; перевірка відтворюваності

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дослідів; перевірка адекватності лінійної моделі; оцінка значущості коефіцієнта полінома.

Розглянемо процес плоского врізного шліфування заготовки зі сталі ШХ15. Результатами планування є математичні моделі складових сил різання, приведені до одиниці ширини оброблюваної поверхні (p_y, p_z), коефіцієнта шліфування (K_u) і шорсткість обробленої поверхні (параметр R_a). Дотична складова сили різання P_z характеризує теплову напруженість у зоні шліфування. Тому її використовують як критерій, що визначає ймовірність утворення шліфувальних прижогів [33]. Радіальна складова сили різання P_y впливає на виникнення осьових пружних деформацій при шліфуванні заготовки.

У якості абразивного інструменту використовували шліфувальні круги, що відрізняються зернистістю абразивного матеріалу та твердістю.

Процес плоского врізного шліфування характеризується наступними факторами: характеристиками круга, режимами різання, фізико-механічними властивостями оброблюваного матеріалу, використовуваної мастильно-охолоджувальної рідини і т.д.

З аналізу літературних джерел у якості вхідних факторів при моделюванні процесу шліфування обрано такі параметри характеристики абразивного інструменту та режиму шліфування [51, 52]: F – зернистість; $c_1(x_1)$ – твердість шліфувального круга, визначена звуковим методом за наведеною швидкістю поширення акустичних хвиль, м/с (стандартна методика); $t(x_2)$ – глибина шліфування, мм/хід; $v_s(x_3)$ – швидкість подачі столу, м/хв. У дужках дано умовне позначення кодованих значень факторів.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вибрати інтервали варіювання факторів. Часто, особливо при оптимізації процесу, спочатку доцільно описати його лінійним рівнянням. Для отримання лінійного рівняння інтервал варіювання вибирають невеликим. Але разом з тим він повинен бути і достатній,

щоб не отримати помилкового висновку про незначний вплив будь-якого з факторів.

З урахуванням виробничого досвіду було обрано такі діапазони варіювання вхідних факторів:

F – от $F60$ до $F46$;

c_1 – от 4504 м/с (K) до 4930 м/с (L);

t – от 0,01 до 0,02 мм/хід;

v_s от – 10 до 20 м/хв.

У результаті порівняння дисперсій вихідних факторів процесу за критерієм Кохрену було встановлено, що в розглянутому діапазоні варіювання дисперсії вихідних факторів неоднорідні, тобто не виконується обов'язкова умова математичного моделювання з використанням методики раціонального планування експерименту. Зниження відмінності дисперсій досягається зменшенням варіювання факторів. З метою збереження обраних інтервалів було прийнято рішення про розділення деяких факторів.

Найбільші дисперсії вихідних параметрів спостерігаються при шліфуванні кругами різної зернистості. Виходячи з цього, математичні моделі вихідних параметрів процесу шліфування розробляли окремо для кожної зернистості. Дисперсії складових сили різання для кругів однієї зернистості в даному випадку, як буде показано далі, можна вважати однорідними.

Як буде показано нижче, складові сили різання значимо залежать від обсягу матеріалу, що видаляється, або напрацювання. У зв'язку з цим напрацювання було введено в математичні моделі у якості четвертого вхідного фактору. Напрацювання, як і складові сили різання приводили до одиниці ширини оброблюваної поверхні – приведене напрацювання $V_n(x_4)$, $\text{мм}^3/\text{мм}=\text{мм}^2$.

Зміна зернистості і твердості круга забезпечувалися шляхом заміни інструментів. Режими різання регулювалися на верстаті. Число паралельних дослідів – 3.

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки до розділу 2

Запропоновано провести під час досліджень повний факторний експеримент, а також складено його план. Запропоновано діапазони варіювання вхідних параметрів на підставі виробничого досвіду.

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Дослідні зразки та різальний інструмент

Дослідження проводились на призматичних зразках, виготовлених зі сталі ШХ15 ГОСТ 801-78 розмірами $L = 100$ мм, $B = 10$ мм, $H = 45$ мм. Попередньо зі зразків знімався шар товщиною $0,1 \dots 0,15$ мм для виключення впливу технологічної спадковості. Заготовки використовуються до тих пір, поки їх висота не складе 20 мм.

Необхідно відзначити, що зразки, які використовуються в експерименті повинні відповідати ряду вимог:

- мати однакову форму і геометричні розміри в межах одного класу;
- твердість зразків повинна знаходитися в межах HRC 58-61, а допустиме відхилення середнього арифметичного значення твердості $\pm 5\%$;
- всі зразки повинні мати однорідну структуру за хімічним складом та фізико-хімічними властивостями;
- всі зразки до проведення випробувань повинні бути промарковані, щоб уникнути при їх подальшому дослідженні можливих помилок.

Для обробки зразків у якості інструменту використовувались електрокорундові шліфувальні круги прямого профілю з наступними розмірами $200 \times 16 \times 76$ чотирьох типів: 25AF46K6V, 25AF46L6V, 25AF60K6V, 25AF60L6V.

Вимірювання фактичної твердості абразивного інструменту (ГОСТ Р 52710-2007. Інструмент абразивний. Акустичний метод визначення твердості та звукових індексів за швидкістю поширення акустичних хвиль) здійснювали ультразвуковим методом за допомогою приладу "Звук-110М" (рисунок 3.1) призначеного для вимірювання частот власних коливань (ЧВК) і визначення швидкості поширення акустичних хвиль.

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

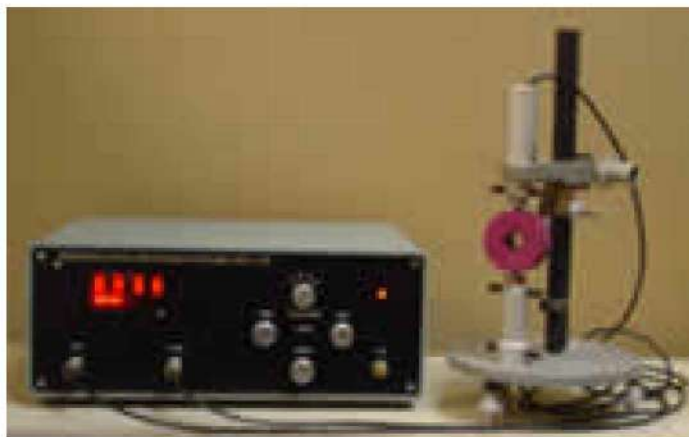


Рисунок 3.1 – Прилад "Звук-110М" для неруйнівного контролю твердості абразивного інструменту

У приладі використаний акустичний резонансний метод контролю, заснований на кореляційному зв'язку між фізико-механічними властивостями виробів, у тому числі твердістю абразивного інструменту, і параметрами спектра частот власних коливань.

Принцип дії приладу полягає у збудженні в контрольованому виробі вимушених механічних коливань і визначенні моменту резонансу, який виникає при збігові частоти вимушених коливань із частотою власних коливань виробу. При контролі виріб закріплюють у вимірювальній стійці між двома п'єзоелектричними перетворювачами, один з яких з'єднаний з виходом генератора електричних коливань змінної частоти, а інший – з широкосмуговим підсилювачем, на виході якого включений індикатор амплітуди сигналу. В момент збігу частоти генератора з частотою власних коливань виробу виникає резонанс, амплітуда сигналу на виході підсилювача досягає максимального значення, при цьому загоряється найбільша кількість світлодіодів амплітудного індикатора в блоці індикації, а значення частоти власних коливань висвічується на цифровому табло.

Для досліджень відбиралися круги, що володіють однаковою твердістю у межах ступеня K і L . Швидкість поширення акустичних хвиль визначали у 8 діаметральних перерізах круга.

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Биття та різнотовщинність (різновисотність) є основними факторами, що визначають точність форми шліфувального круга після механічної обробки [51-52].

Перед установкою на верстат для зниження неврівноваженості мас здійснювали статичне балансування круга в зборі із планшайбою. Додатково візуально перевіряли круг на наявність тріщин і сколів.

Для здійснення операції балансування фланці планшайби (рисунок 3.2) мають кругові пази, у яких переміщаються і кріпляться компенсуючі сухарі 5.

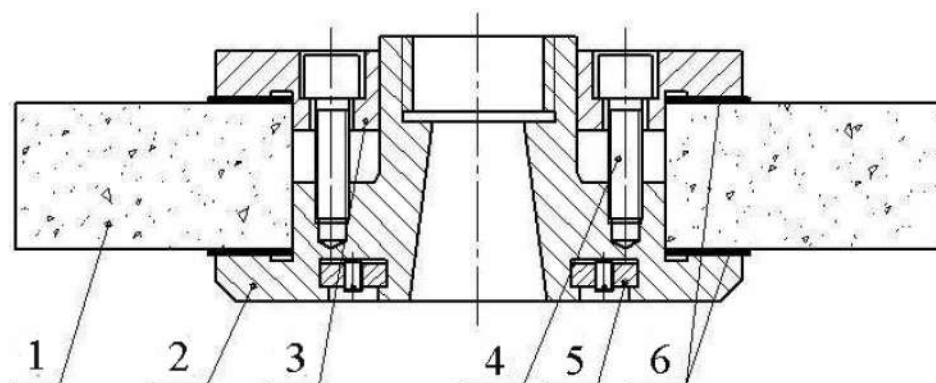


Рисунок 3.2 – Кріплення шліфувальних кругів на планшайбі:

- 1 – шліфувальний круг; 2 – нижній фланець; 3 – верхній фланець; 4 – гвинт;
5 – компенсуючий сухар; 6 – прокладки

Для статичного балансування використовувався балансувальний стенд (рисунок 3.3). На дві опори (ножі) балансування пристосування встановлюється спеціальна оправка, на якій знаходиться круг, закріплений на планшайбі. Суміщення центра ваги круга із віссю обертання забезпечується переміщенням сухариків у пазах планшайби.

Правку шліфувального круга здійснюємо алмазним олівцем марки 3908-0061 вик. А тип 04 ГОСТ 607-80. Олівець, закріплений в оправці, встановлюємо на магнітній плиті шліфувального верстата і здійснюємо правку абразивного інструменту при наступних режимах: швидкість круга – 35 м/с; поперечна подача

зі швидкістю $V = 1 \dots 2$ м/хв, вертикальна подача $0,005 \dots 0,015$ мм/подв. хід; подача МОЖ – $6 \dots 12$ л/хв.

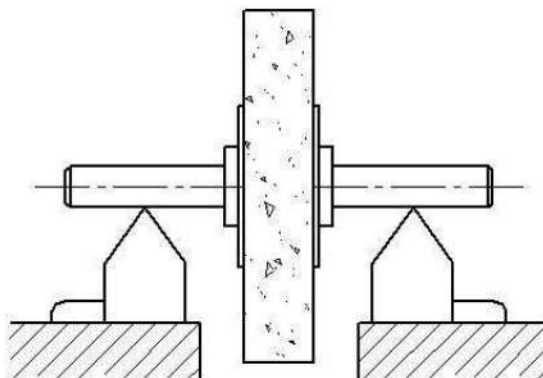


Рисунок 3.3 – Балансуюче пристосування

Після правки встановлюємо шліфувальний круг на пристрій для балансування. У випадку дисбалансу, проводимо повторне балансування і правку абразивного інструменту. Операцію повторюємо, до тих пір, поки не виявиться, що виправлений шліфувальний круг має врівноважений стан.

3.2 Визначення радіальної P_y та дотичної P_z складових сил різання

Метою експериментального дослідження було знаходження залежності величини складових сил шліфування від різних параметрів і режимів обробки заготовок із сталі ШХ15. Для цього в лабораторних умовах була створена експериментальна установка на базі плоскошліфувального верстата 3Г71 (рисунок 3.4).

У якості МОР використовували 5% емульсійний розчин «Авазол». Подача МОР здійснювалася за допомогою відцентрового електронасоса через клинові щілинні сопла (насадки) в зону шліфування з боку входу і виходу робочої поверхні круга, а також в зону контакту круга з правлячим алмазним олівцем при постійній витраті $6-12$ л/хв. під тиском $0,6$ МПа.



Рисунок 3.4 –Верстат плоскошліфувальний 3Г71
зі встановленим динамометром УДМ-100

Експериментальна установка включає у себе кілька вимірювально-реєструвальних приладів, призначених для реєстрації експлуатаційних показників процесу шліфування.

Для вимірювання складових сил шліфування використовували динамометр УДМ-100, що дозволяє одночасно вимірювати три взаємно перпендикулярні сили P_z , P_y , P_x і крутний момент $M_{кр}$, що встановлювався магнітному столі. Габарити і посадочні місця динамометра дозволяють встановлювати його без проміжних прокладок на верстат.

Випробовувані зразки кріпилися в динамометрі за допомогою лещат, при цьому їх положення повинно бути по центру динамометра, для виключення додаткових зусиль на динамометр (рисунок 3.5).

Сигнал від динамометра надходив на підсилювач УТ4-1 ТУ25.06.1377-82, а потім через аналогово-цифровий перетворювач Е14-140 передавався на персональний комп'ютер. Миттєві значення сил різання можна досліджувати в діапазоні частот від 0 до 500 кГц з похибкою не вище 10%.



Рисунок 3.5 – Динамометр УДМ-100 із встановленим зразком

Значення складових сил шліфування на комп'ютері видаються у вигляді графіків з одиницями вимірювання у вольтях (В). Переклад цих значень у ньютони (Н) здійснюється за допомогою тарувальних коефіцієнтів, шляхом перемноження двох значень.

Процес тарування включає в себе три основних етапи:

- 1) навантаження динамометричного датчика вантажами;
- 2) фіксування одержуваного вихідного сигналу з АЦП;
- 3) обробка отриманих даних.

Використовуючи отримані дані ми будемо тарувальні графіки за кожною окремо взятою силою, а потім отримуємо тарувальні коефіцієнти (коефіцієнт посилення) (рисунок 3.6).

Тарування здійснюється на спеціальному пристосуванні (рисунок 3.7).

При таруванні поздовжньої сили P_z здійснюють покрокове навантаження опори 2 еталонними вантажами масою 1 кг з інтервалом 6-10 с. При цьому відбувається автоматична реєстрація. Зусилля від вантажів, що встановлюються на опору 2, через трос 4 будуть безпосередньо передаватися на динамометр.

Кронштейн 1 потрібен для виставлення необхідного рівня опори, так щоб вона не торкалася поверхні верстата.



Рисунок 3.6 – Вид тарувальних графіків P_z та P_y

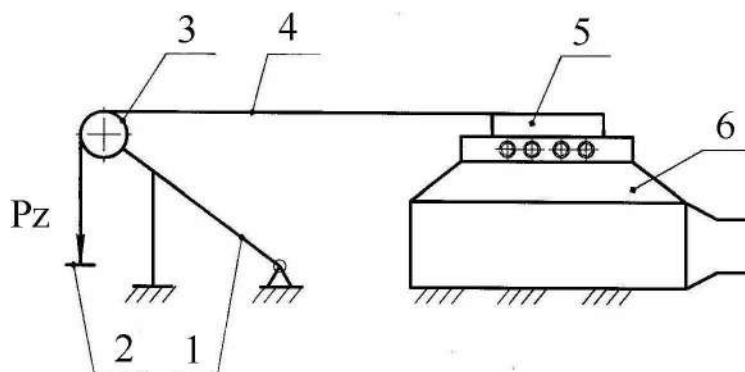


Рисунок 3.7 – Схема тарування складової сили шліфування P_z :

1 – кронштейн; 2 – опора для вантажу; 3 – блок; 4 – трос;
5 – струбцина; 6 – динамометр

При таруванні радіальної сили P_y навантаження проводять за тією ж схемою (при тих же умовах), але навантаження (встановлення вантажів) здійснюють безпосередньо на сам динамометр.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Необхідно зазначити, що максимальне навантаження при горизонтальному таруванні досягає 6 кг, а при вертикальному – 10 кг. Це необхідно, щоб охопити весь діапазон сил для запланованих режимів шліфування. Важливим завданням при роботі є забезпечення стабільних значень тарувальних коефіцієнтів протягом робочого дня. Для цього необхідно дотримувати ряд умов: точне балансування схеми з'єднання підсилювача із динамометром, при установці на датчик еталонних вантажів ретельне їх центрування, перед початком роботи необхідно прогріти підсилювач не менше години.

Побудова тарувальних графіків проводиться за шкалою напружень (вольт) і навантаження (ньютон). Для цього необхідно знати середнє значення „висоти” (вольт) кожної полиці, а також похибку її вимірювання, що визначається за формулою:

$$P = \frac{S \cdot 100\%}{n}, \quad (3.1)$$

де S – стандартне відхилення;

n – середнє значення вибірки за довжиною полиці.

У нашому випадку при дотриманні усіх умов вимірювання похибка за окремо узятими полками не перевищує 0,2%.

Результатом побудови такого графіка буде отримання прямої пропорційної залежності виду:

$$Y = K \cdot X, \quad (3.2)$$

де K – тарувальний коефіцієнт;

X – напруга, Вольт.

У нашому випадку K – шуканий тарувальний коефіцієнт. В подальшому при перекладі отриманих значень сил різання з одиниці вимірювання вольт необхідні (ньютон) ми будемо користуватися тарувальним коефіцієнтом. Підставляючи

надалі в формулу (3.2) значення K і X , отримуємо шукані значення діючих на заготовку сил у процесі абразивної обробки на верстаті. Обробка отриманих в процесі реєстрації даних проводиться за приведеними нижче формулами.

1. Обчислюємо середнє арифметичне, дисперсію, довірчий інтервал і стандартне відхилення для кожної полиці:

а) середнє арифметичне

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{10}; \quad (3.3)$$

б) дисперсія

$$S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x}_i)^2}{n-1}; \quad (3.4)$$

в) довірчий інтервал

$$\pm \Delta x = \frac{St}{\sqrt{n}}; \quad (3.5)$$

г) стандартне відхилення

$$S = \sqrt{S_i^2}, \quad (3.6)$$

де n – кількість значень вибірки;

x_i – одиничне значення з вибірки;

$\bar{x}_i$ – середнє арифметичне вибірки (полиці).

2. Визначаємо величину для кожної групи полиць низ-верх-низ (змiна напруги при реєстрації даних):

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$V_i = \bar{x}_{i.B} - \frac{(\bar{x}_{i.H.L.} + \bar{x}_{i.H.P.})}{2}, \quad (3.7)$$

де $\bar{x}_{i.B}$ – середнє арифметичне верхньої полиці;

$\bar{x}_{i.H.L.}$, $\bar{x}_{i.H.P.}$ – середні арифметичні крайніх нижніх полиць (лівої і правої).

Будується лінія тренду за графіком і знаходиться лінійна залежність, у даному прикладі: $y = 185,91 \cdot x$. Де 185,91 – шуканий тарувальний коефіцієнт (рисунок 3.8).

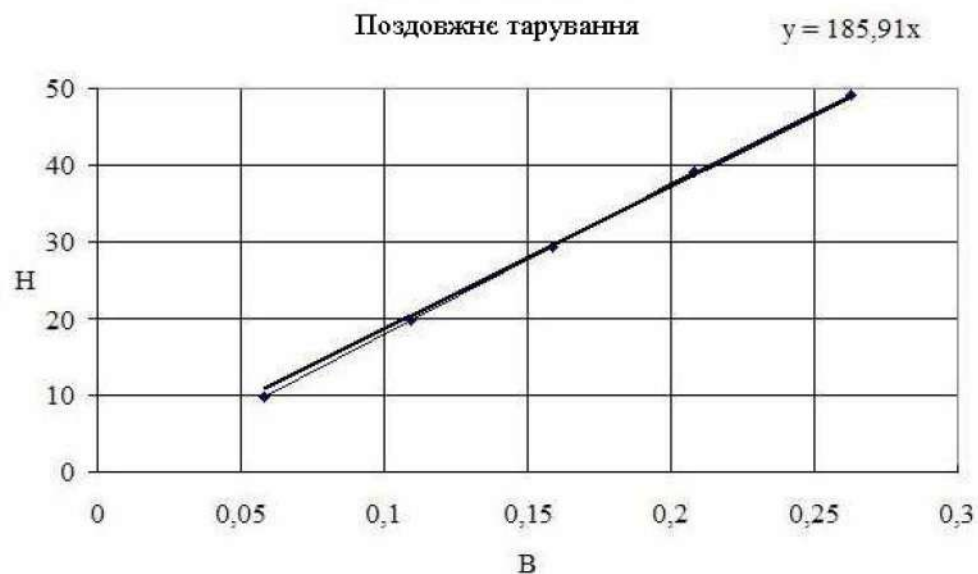


Рисунок 3.8 – Тарувальний графік та коефіцієнт підсилення

Без проріджування даних кількість значень в одній секунді при збереженні дорівнює 20000. Для тарувального графіка збереження кожного значення великої ролі не грає (вручну брали по 100 значень, проріджуючи початковий файл). Однак, для обробки робочих графіків (всі дані спочатку в програмному забезпеченні PowerGraph представлені у вигляді графіків з циклічно повторюваними піками) велике проріджування даних не бажано, хоча можливо.

У процесі роботи установка реєструє зміни напруги в ланцюзі. Представлене програмне забезпечення має широкий вибір засобів для обробки отриманих даних (різного роду математичні функції, функції згладжування і т. д.). Є можливість збереження одержаного результату у вигляді файлів збереження своєї програми

(PowerGraph Chart [*pgc]), також у текстовому вигляді, що дає можливість при необхідності обробляти вручну результати випробувань в Excel.

3.3 Методики визначення шорсткості, коефіцієнту шліфування та зношування поверхні, прижогів

Шорсткість поверхні визначали за допомогою профілографа-профілометра моделі БВ-7669М (рисунок 3.9). Дія приладу заснована на принципі осягання нерівностей контрольованої поверхні діамантовою голкою щупа (радіус алмазної голки 0,002 мм) первинного перетворювача і перетворення, виникаючих при цьому механічних коливань щупа в електричний сигнал, що змінюється пропорційно цим коливанням.

Прилад дозволяє вимірювати шорсткість поверхні за 16 параметрами: R_a ; R_z ; R_{max} ; R_p ; R_v ; R_q ; S_m ; S ; λ_q ; λ_a ; L_0 ; l_0 ; D ; Δq ; Δa ; t_p .

Вимірювання параметрів шорсткості проводиться за системою середньої лінії (ГОСТ 25142) у відповідності до номенклатури і співвідношень значень параметрів, передбаченими ГОСТ 2789. Межа допустимої основної відносної похибки приладу складає $\pm 5\%$.

Вимірювання шорсткості поверхні здійснюємо безпосередньо в робочій зоні плоскошліфувального верстата.

Контроль шорсткості здійснювали у 20 перетинах рівномірно розподілених по всій довжині зразка. Базова довжина L вимірюваної ділянки становить 2,5 мм. Перед кожним замірюванням зразка здійснюємо калібрування приладу, за допомогою спеціальної калібрувальної скоби по ГОСТ 2789. Результати замірів зберігаємо в базі даних, для подальшої статистичної обробки згідно з формулами (3.3)-(3.6).

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 3.9 – Профілограф-профілометр моделі БВ-7669М

На рисунку 3.10 показано робоче вікно програми Profil зі значеннями параметрів шорсткості, профілограмою, графічним зображенням відносної опорної довжини профілю.

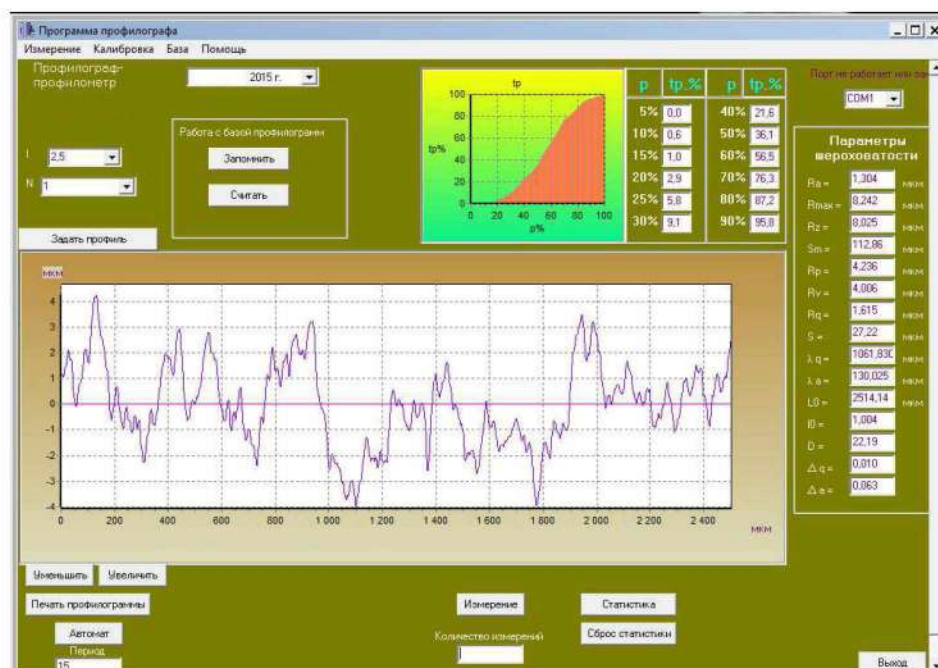


Рисунок 3.10 – Робоче вікно програми Profil

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Для серії дослідів проводимо порівняння дисперсій за допомогою статистичного критерію Кохрена, у випадку однорідності дисперсій, порівняння середніх значень здійснюємо за методикою однофакторного дисперсійного аналізу.

Для визначення коефіцієнта шліфування $K_{ш}$ визначався знос робочої поверхні круга. Знос робочої поверхні круга при шліфуванні є складним механічним і фізико-хімічним процесом, перебіг якого залежить від умов обробки: режиму, характеристики круга, властивостей оброблюваного матеріалу та ін. [52].

Для вимірювання зносу поверхні круга розбивали його окружність на 24 однакових сектора. В кожному секторі по одній довжині здійснювали вимірювання за допомогою стрілочного індикатора зі шкалою поділки 1 мкм (ГОСТ 577). Для оцінки якості поверхні було вибрано 6 точок на базовій поверхні і 6 точок на робочій (рисунок 3.11).

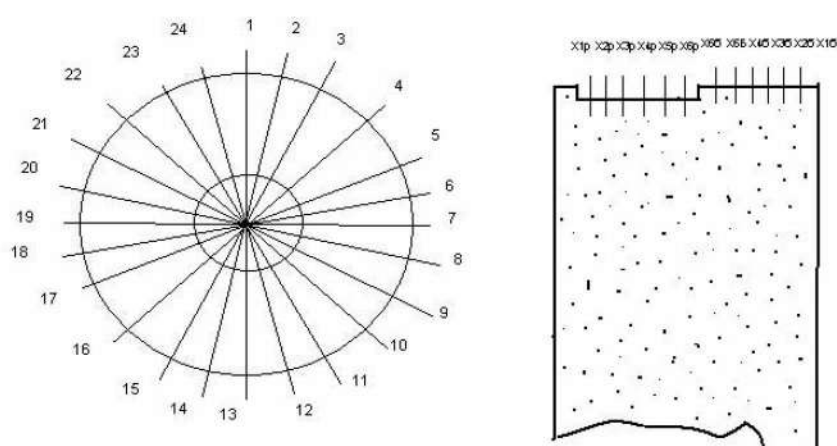


Рисунок 3.11 – Перетини шліфувального круга під час вимірювання зносу

Дані, отримані при вимірюванні за базовою та робочою поверхнями, складають математичні матриці. Визначення зносу проводиться шляхом усереднення значень за базовою поверхнею ($X_{16}...X_{66}$) і мінусом отриманих значень

($X_{cp1} \dots X_{cp6}$). Статистична обробка даних проводиться як за замірами у кожному з 24 перетинів, так і за перетинами, що проходять через окремо взяті точки робочої і базової поверхонь і перпендикулярним осі обертання шліфувального круга. Таким чином, ми маємо можливість побудувати графік, що відображає глибину зносу круга на окремо взятому вимірі в будь-якому перерізі за висотою круга.

Коефіцієнт шліфування визначається як відношення напрацювання до зносу абразивного інструменту. Напрацювання, наведене до ширини зразка, для всіх експериментів було зафіксовано і становило 400 мм^2 .

Знос абразивного інструменту визначали за формулою:

$$V_k = \pi \cdot D \cdot t_{cp}, \quad (3.8)$$

де D – зовнішній діаметр круга, мм;

t_{cp} – середній знос круга за 3 дослідями, мм.

Шліфувальні прижоги визначалися методом травлення. Шліфовану площину промивали водою (теплою) і травили у 5%-му розчині азотної кислоти (за ГОСТ 4461) до тих пір, поки поверхня не стане чорною (30-60 с.). Після травлення поверхню промивали теплою водою, а потім зразок занурювали на 3 с в 50%-ий водний розчин соляної кислоти (за ГОСТ 3118) і промивали водою.

Висновки до розділу 3

Запропоновано дослідні зразки та різальний інструмент, методику визначення радіальної та дотичної складових сил різання, шорсткості, коефіцієнту шліфування та зношування поверхні, а також прижогів.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

4.1 Вплив режимів обробки та характеристик абразивного інструмента на складові сили різання

За характером зміни складових сили різання весь період обробки можна розділити на чотири ділянки: різке зростання сил; більш плавне зниження; стабільні значення; плавний уповільнений ріст (рисунк 4.1). При шліфуванні кругом характеристики **25AF46L6V** на швидкості подачі стола $v_s = 10$ м/хв і глибині $t = 10$ мкм/хід, складові сили різання на першій ділянці різко зростають з перших проходів столу при досягненні наведеного напрацювання (далі напрацювання) 8-10 мм³/мм (далі мм²). Максимальне значення сил на даній ділянці: $p_z \approx 6,5$ Н/мм, $p_y \approx 23$ Н/мм. Сила p_y росте швидше p_z , про що свідчить падіння відношення сил з 0,33 до 0,27. Потім сили починають плавно знижуватися до $p_z \approx 5$ Н/мм, $p_y \approx 14$ Н/мм, причому p_y знижується швидше p_z . В результаті відношення сил зростає до 0,34-0,35. Сили стабілізуються приблизно при $V_n \approx 55$ мм² і залишаються на одному рівні до $V_n \approx 100$ мм². В тому ж інтервалі стабільні значення отримані і для відношення сил: $p_z / p_y \approx 0,34 - 0,35$.

При напрацюванні від 100 до 400 мм² складові сили різання зростають майже пропорційно V_n . Залежність складових сили від V_n на даному етапі апроксимована наступними кореляційними залежностями:

$$\begin{aligned} p_z &= 0,008V_n + 4,09(H / \text{мм}), R^2 = 0,97; \\ p_y &= 0,068V_n + 6,27(H / \text{мм}), R^2 = 0,99. \end{aligned} \quad (4.1)$$

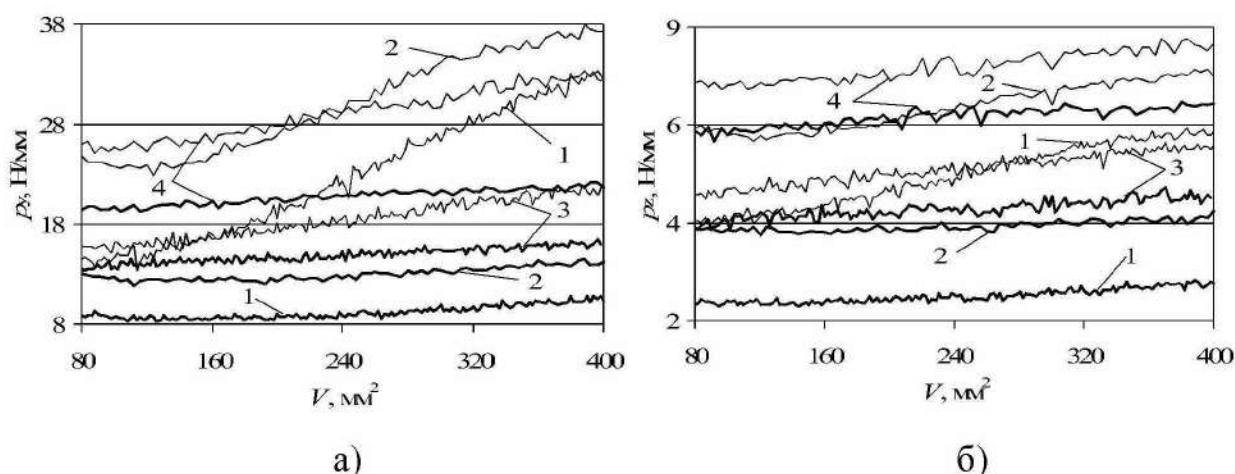


Рисунок 4.1 – Зміна складових сили різання p_y (а) і p_z (б) за період шліфування кругом зернистістю $F46$: – твердість L ; — твердість K ;
 1 – $v_s=10$ м/хв, $t=10$ мкм/хід; 2 – $v_s=10$ м/хв, $t=20$ мкм/хід;
 3 – $v_s=20$ м/хв, $t=10$ мкм/хід; 4 – $v_s=20$ м/хв, $t=20$ мкм/хід

Сила p_y росте більш інтенсивно, ніж p_z в результаті співвідношення сил знижується до 0,21.

Зі збільшенням v_s до 20 м/хв закономірність зміни складових сили різання залишається колишньою. В інтервалі V_n від 1 до 8 мм² сили зростають і досягають: p_z – близько – 7 Н/мм, p_y – 28 Н/мм.

Зі збільшенням у два рази швидкості подачі стола максимальне значення сили p_z зростає в 1,1 рази, p_y – в 1,2 рази. Відношення сил знижується до 0,25. Потім сили знижуються. При $V_n \approx 46 \text{ мм}^2$ p_z досягає 5,8 Н/мм, а p_y – 15,3 Н/мм, що відповідно на 15 і 6 % більше, ніж при шліфуванні з $v_s=10$ мм/хв. На даній ділянці, як при шліфуванні з $v_s=10$ м/мм більшою мірою знижується сила p_y . У результаті відношення сил зростає з 0,25 до 0,38.

Надалі сила p_z не змінюється майже до $V_n \approx 125 \text{ мм}^2$, а p_y починає плавно зростати з $V_n \approx 60-65 \text{ мм}^2$. В інтервалі напрацювання від 100 до 400 мм² зміна складових сили різання апроксимовано лінійними кореляційними залежностями:

$$p_z = 0,002V_n + 5,56(H / \text{мм}), R^2 = 0,96; \quad (4.2)$$

$$p_y = 0,019V_n + 13,9(H / \text{мм}), R^2 = 0,95.$$

Зі збільшенням глибини шліфування на швидкості подачі стола 10 м/хв закономірність зміни складових сили різання залишається колишньою.

Відмінність полягає в тому, що ділянка різкого зростання сил за об'ємом видаляемого металу збільшилась майже в 2 рази і становить близько 18 мм². Сили досягають значень: $p_z \approx 9$ Н/мм, $p_y \approx 41$ Н/мм, що в 1,4 і 1,8 рази більше відповідних значень складових сили різання на глибині 10 мкм/хід.

На другій ділянці сили зменшуються до $V_n \approx 110 \text{ мм}^2$. Відношення сил зростає з 0,22 до 0,28 оскільки p_y знижується швидше p_z . Сили можна вважати стабільними до $V_n \approx 140 \text{ мм}^3$, де середні значення сил $p_z \approx 7$ Н/мм, $p_y \approx 24$ Н/мм, що в 1,5 рази більше, ніж при шліфуванні з глибиною 10 мкм/хід. На четвертій ділянці сили зростають до значень $p_z \approx 7,6$ Н/мм, і $p_y \approx 37$ Н/мм. В інтервалі напрацювання 100-400 мм² сили апроксимовані лінійними кореляційними залежностями:

$$p_z = 0,004V_n + 5,97(H / \text{мм}), R^2 = 0,97; \quad (4.3)$$

$$p_y = 0,054V_n + 16,8(H / \text{мм}), R^2 = 0,97.$$

При збільшенні t до 20 мкм/хід максимальні значення складових сили p_z і p_y збільшилися відповідно на 20 і 13%. Порівняно з $v_s=10$ м/мм, $t=10$ мкм/хід p_z і p_y зросли майже в 1,6 і 2 рази. Більшою мірою зростає p_y , тому відношення сил знижується. На другій ділянці, як і для всіх раніше розглянутих режимів, сила p_y знижується швидше, і відношення сил зростає. На третій ділянці, протяжність якої за об'ємом металу, що видаляється, становить близько 20 мм², стабільні значення складових $p_z \approx 7,3$ Н/мм, $p_y \approx 25,5$ Н/мм, що в 1,5 та 1,8 рази більше відповідних сил

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

при шліфуванні на $v_s=10$ м/мм , $t=10$ мкм/хід. На четвертій ділянці сили апроксимовані лінійними кореляційними залежностями:

$$p_z = 0,003V_n + 7,03(H / мм), R^2 = 0,91; \quad (4.4)$$

$$p_y = 0,026V_n + 23,0(H / мм), R^2 = 0,96.$$

Зі зменшенням твердості круга на одну ступінь при шліфуванні на режимах $v_s=10$ м/хв , $t=10$ мкм/хід дещо скорочується протяжність першої ділянки зростання сил. При напрацюванні 4-6 мм² сили досягають максимуму: $p_z \approx 4,3$ Н/мм, $p_y \approx 15,3$ Н/мм (рисунок 4.1, а). Значення складових сили шліфування приблизно в 1,5 менше, ніж на кругу твердістю L . Змінюється і співвідношення ступеня зростання p_z і p_y . Якщо при шліфуванні кругом твердістю L сила p_y зростала швидше p_z , то зі зменшенням твердості на ступінь швидше росте сила p_z . У результаті відношення сил на даному етапі зростає.

Потім сили починають плавно знижуватись до $p_z \approx 3$ Н/мм, $p_y \approx 9$ Н/мм, причому p_y знижується швидше p_z . В результаті відношення сил продовжує зростати до 0,36-0,37. Оскільки і на першому і на другому етапі відношення сил зростає, за значенням p_z/p_y чітка відмінність між етапами, як це було при шліфуванні кругом твердістю L , відсутня.

Сили стабілізуються, починаючи з напрацювання 68-70 мм² і залишаються на одному рівні до $V_n \approx 280$ мм².

В інтервалі напрацювання від 100 до 400 мм² складові сили різання апроксимовані залежностями:

$$p_z = 0,001V_n + 2,85(H / мм), R^2 = 0,77; \quad (4.5)$$

$$p_y = 0,007V_n + 7,52(H / мм), R^2 = 0,82.$$

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Динаміка росту сил практично однакова на ділянці від 100 до 300 мм². В інтервалі від 300 до 400 мм² сила p_y починає зростати інтенсивніше p_z , відповідно відношення сил знижується з 0,35 до 0,33. До кінця процесу складові сили різання досягають таких значень: $p_z \approx 2,9$ Н/мм, $p_y \approx 10,4$ Н/мм. У порівнянні з більш твердим кругом максимальні значення сили p_z і p_y на четвертій ділянці знизилися відповідно в 2 і 3 рази.

Зі збільшенням швидкості подачі стола до 20 м/хв закономірність зміни складових сили різання залишається колишньою. До напрацювання 6 мм² сили зростають і досягають $p_z \approx 7$ Н/мм, $p_y \approx 23$ Н/мм. Зі збільшенням в два рази швидкості подачі стола максимальне значення сили p_z на даному етапі зростає в 1,7 рази, p_y – в 1,5 рази. Відношення сил на даному етапі досягає 0,31. Порівняно з кругом твердістю L складові сили шліфування менше: p_z – на 11%, p_y - на 33%.

Зниження сил відбувається до напрацювання близько 65 мм². Сила p_z досягає 5 Н/мм, а $p_y = 14$ Н/мм, що відповідно на 40 і 35% більше, ніж при шліфуванні з $v_s=10$ м/мм. На даному етапі, як і при шліфуванні з подачею 10 м/хв більшою мірою знижується сила p_y . У результаті відношення сил зростає з 0,31 до 0,39. Порівняно з кругом твердістю L складові сили різання на 10-13% менше.

В інтервалі напрацювання від 65 до 85 мм² сили різання практично не змінюються, потім починають зростати. В діапазоні 100-400 мм² зміна складових сили різання апроксимована залежностями:

$$\begin{aligned} p_z &= 0,001V_n + 4,12(H / \text{мм}), R^2 = 0,80; \\ p_y &= 0,007V_n + 13,2(H / \text{мм}), R^2 = 0,86. \end{aligned} \quad (4.6)$$

З аналізу залежностей випливає, що сила p_y зростає більш інтенсивно.

Відношення сил у цьому інтервалі знижується майже лінійно, досягаючи значення 0,38, що на 13% більше, ніж при шліфуванні з подачею 10 м/хв.

При $v_s = 10$ м/хв зі збільшенням глибини шліфування закономірність зміни складових сили різання змінюється.

Деякі відмінності спостерігаються за темпами зростання сил на першій ділянці, де p_z і p_y змінюються майже пропорційно і досягають значень: $p_z = 6,5 \text{ Н / мм}$, а $p_y = 21 \text{ Н / мм}$, що в середньому за 30% більше, ніж значення сил різання на глибині 10 мкм/хід.

Якщо раніше на даному етапі сила p_y збільшувалася швидше p_z , зі збільшенням глибини шліфування в два рази можна говорити майже про їх пропорційну зміну.

На другому етапі сили знижуються до $V_n \approx 100 \text{ мм}^2$. Оскільки p_y знижується швидше p_z відношення сил зростає з 0,31 до 0,38. Після цього сили можна вважати стабільними на ділянці майже до $V_n \approx 200 \text{ мм}^3$, де середні значення сил $p_z = 4,7 \text{ Н / мм}$, $p_y = 12,3 \text{ Н / мм}$, що в 1,5 рази більше, ніж при шліфуванні з глибиною 10 мкм/хід. Після цього спостерігається плавне зростання на всьому останньому проміжку до $p_z = 4,7 \text{ Н / мм}$, $p_y = 16 \text{ Н / мм}$. У порівнянні з більш твердим кругом значення сил знижені на 20-40%.

На четвертій ділянці залежність складових сили від напрацювання має вигляд:

$$\begin{aligned} p_z &= 0,001V_n + 4,05(H / \text{мм}), R^2 = 0,76; \\ p_y &= 0,007V_n + 11,4(H / \text{мм}), R^2 = 0,82. \end{aligned} \quad (4.7)$$

При шліфуванні на режимі $v_s = 20 \text{ м / хв}$, $t = 20 \text{ мкм / хід}$ закономірності зміни складових сили різання залишаються колишніми. На першій ділянці максимальні значення складових сили різання $p_z = 9,2 \text{ Н / мм}$, $p_y = 34,8 \text{ Н / мм}$, що в 2,1-2,3 рази

більше, ніж при шліфуванні з $v_s = 10 \text{ м/хв}$, $t = 10 \text{ мкм/хід}$ і на 13 і 30% менше, ніж при обробці кругом твердістю L .

На четвертій ділянці зміни складових сили різання від напрацювання також апроксимовано лінійною кореляційною залежністю:

$$\begin{aligned} p_z &= 0,002V_n + 6,14(H / \text{мм}), R^2 = 0,87; \\ p_y &= 0,008V_n + 18,9(H / \text{мм}), R^2 = 0,91. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Необхідно відзначити, що напрацювання дуже впливає на складові сили різання, особливо при використанні в якості абразивного інструменту кругів твердості L .

Виходячи з цього, до розглянутих раніше трьох факторів (швидкість подачі столу, глибина і твердість круга) був доданий четвертий фактор – напрацювання. Оскільки етап припрацювання у більшості визначається умовами правки і суттєво залежить від жорсткості шпинделя, з усього періоду шліфування обрано четверту ділянку в діапазоні від 100 до 400 мм^2 . Закономірність зміни складових сили різання на даній ділянці апроксимовано лінійними залежностями (4.1)-(4.8).

Проаналізувавши зміни радіальної і дотичній складових сили при роботі кругами з різною твердістю, можна сказати, що при обробці кругом твердістю L динаміка зміни сил вище, ніж кругом з твердістю K на всіх досліджених режимах.

Аналогічним чином проаналізували процес шліфування заготовок із сталі ШХ15 кругом **25AF60L6V** (рисунок 4.2).

На швидкості подачі столу $v_s = 10 \text{ м/хв}$ та глибині $t = 10 \text{ мкм/хід}$ порівняно з роботою круга **25AF46L6V** на тих же режимах, можна побачити, що при роботі кругом зернистістю $F60$ сили поведуться більш стабільно в інтервалі $V_n \approx 100 \dots 400 \text{ мм}^2$, те ж стосується і відношення сил. Але на першому етапі сили досягають майже в 3,5 рази більших значень, ніж при роботі кругом із зернистістю $F46$.

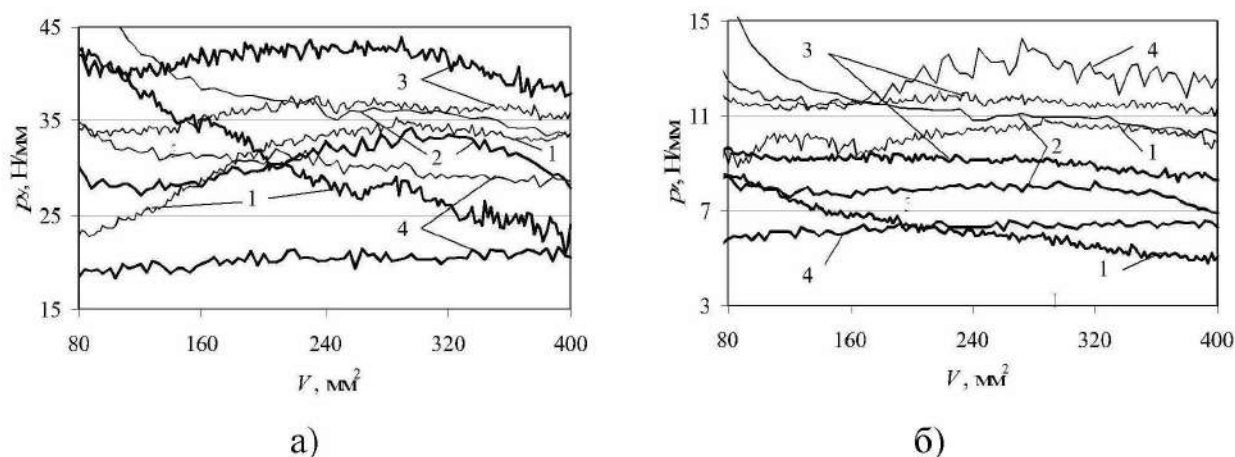


Рисунок 4.2 – Зміна складових сили різання p_y (а) і p_z (б) за період шліфування кругом зернистістю $F60$: – твердість L ; — твердість K ;
 1 – $v_s=10$ м/хв, $t=10$ мкм/хід; 2 – $v_s=10$ м/хв, $t=20$ мкм/хід;
 3 – $v_s=20$ м/хв, $t=10$ мкм/хід; 4 – $v_s=20$ м/хв, $t=20$ мкм/хід;

Залежність складових сили від V_n при напрацюванні від 100 до 400 мм² апроксимована наступними кореляційними залежностями:

$$\begin{aligned} p_z &= 0,002V_n + 9,68(H / мм), R^2 = 0,28; \\ p_y &= 0,029V_n + 24,35(H / мм), R^2 = 0,61. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Зі збільшенням v_s до 20 м/хв сила p_y на першому етапі збільшилася в 2,6 рази, а p_z – 3,2 рази, порівняно з роботою круга зернистості $F46$ на тих же режимах. Також можна побачити, що при роботі круга із зернистістю $F60$ сила p_y при напрацюванні $V_n \approx 230 \text{ мм}^2$ починає повільно знижуватися, а при роботі кругом зернистістю $F46$ при напрацюванні $V_n \approx 60-65 \text{ мм}^2$ сили плавно зростають до самого кінця процесу шліфування.

Залежність складових сили від V_n при напрацюванні від 100 до 400 мм² апроксимована наступними кореляційними залежностями:

$$p_z = -0,0004V_n + 11,63(H / мм), R^2 = 0,038; \quad (4.10)$$

$$p_y = 0,006V_n + 34,3(H / мм), R^2 = 0,29.$$

Зі збільшенням глибини шліфування на швидкості подачі 10 м/хв у порівнянні з роботою круга зернистості F46 значення складових сили змінюються таким чином: p_z збільшується на 15% , а p_y зменшується на 8 %.

В інтервалі напрацювання 100-400 мм² сили апроксимовані лінійними кореляційними залежностями:

$$p_z = -0,009V_n + 12,15(H / мм), R^2 = 0,95; \quad (4.11)$$

$$p_y = -0,036V_n + 40,5(H / мм), R^2 = 0,93.$$

Відзначимо, що в обох залежностях коефіцієнти при V_n негативні. Це свідчить про зниження складових сили зі збільшенням напрацювання, що наочно представлено на графіках.

При збільшенні у два рази швидкості подачі стола ($t = 20$ мкм/хід) максимальні значення складових сили p_z і p_y збільшилися в середньому в 1,4 рази. Порівняно з $v_s = 10 м / хв$, $t = 10 мкм / хід$ p_z і p_y зросли майже в 1,4 и 1,3 рази. На ділянці V_n от 100 до 400 мм² сили апроксимовані лінійними кореляційними залежностями:

$$p_z = 0,004V_n + 11,45(H / мм), R^2 = 0,28; \quad (4.12)$$

$$p_y = -0,012V_n + 33,37(H / мм), R^2 = 0,86.$$

Зі зменшенням твердості круга на одну ступінь при шліфуванні на режимах $v_s = 10 м / хв$, $t = 10 мкм / хід$ закономірність зміни складових сили різання майже не

змінюється. Значення p_z і p_y приблизно в 1,3 менше, ніж на кругу твердістю L і в середньому в 4 рази більше, ніж на кругу зернистістю $F46$. Так як збільшилися значення сил, відповідно відношення сил знижується від 0,3 до 0,17.

Потім сили починають плавно знижуватися до $p_z = 10 \text{ Н / мм}$, $p_y = 49 \text{ Н / мм}$ причому p_y знижується швидше p_z . В результаті відношення сил починає зростати до 0,2. При напрацюванні від 100 до 400 мм^2 залежність складових сили від V_n апроксимована наступними кореляційними залежностями:

$$p_z = -0,010V_n + 8,5(H / \text{мм}), R^2 = 0,92; \quad (4.13)$$

$$p_y = -0,054V_n + 43,3(H / \text{мм}), R^2 = 0,93.$$

Зі збільшенням швидкості подачі стола до 20 м/хв значення сили p_z на першому етапі зростає в 1,4 рази, p_y – в 1,2 рази в порівнянні з твердістю L , і відповідно в 2,9 і 4,1 разу порівняно з зернистістю $F46$.

Зниження сил відбувається до напрацювання близько 75 мм^2 . Сила p_z досягає 9,3 Н/мм, а p_y становить 41 Н/мм², що відповідно на 7 та 16% більше, ніж при шліфуванні з $v_s = 10 \text{ м / хв}$. Порівняно з колом твердістю L сила шліфування p_z збільшилась на 16% а p_y зменшилась на 20% порівняно з колом зернистістю $F46$ складові сили різання збільшилися відповідно на 46% и 66%.

В інтервалі напрацювання від 75 до 140 мм^2 сили різання практично не змінюються, приймаючи значення $p_z = 9,2 \text{ Н / мм}$, $p_y = 40 \text{ Н / мм}$. В діапазоні 100-400 мм^3 зміна складових сили різання апроксимовано залежностями:

$$p_z = -0,003V_n + 9,7(H / \text{мм}), R^2 = 0,70; \quad (4.14)$$

$$p_y = -0,006V_n + 42,85(H / \text{мм}), R^2 = 0,13.$$

Зі збільшенням швидкості подачі стола в 2 рази сила p_z збільшилась в 2,1 рази, а p_y – в 1,8 рази. Порівняно з роботою круга твердістю L сила p_z зменшилась в 1,3 рази, а p_y збільшилась в 1,2 рази. При роботі кругом зернистістю $F46$ на тих же режимах сили збільшилися відповідно в 1,7 і 2,6 рази.

При $v_s = 10 \text{ м/хв}$ зі збільшенням глибини шліфування закономірність зміни складових сили різання схожа із закономірністю зміни на режимах $t = 10 \text{ мкм/хід}$ і $v_s = 20 \text{ м/хв}$, але відмінна від шліфування на режимах $t = 10 \text{ мкм/хід}$ і $v_s = 10 \text{ м/хв}$. Це говорить про те, що при збільшенні глибини шліфування або швидкості подачі стола, закономірність зміни сил і динаміка їхнього росту практично однакові.

Деякі відмінності спостерігаються за темпами зростання сил на третій і четвертій ділянках, де складові сили досягають кінцевих значень: $p_z = 7 \text{ Н/мм}$, $p_y = 33,6 \text{ Н/мм}$, що відповідно на 36% і 6% більше, ніж значення сил на глибині 10 мкм/хід.

На першому етапі сили зростають, досягаючи значень $p_z = 21 \text{ Н/мм}$, $p_y = 98 \text{ Н/мм}$, що в середньому в 1,3 рази більше, ніж при $t = 10 \text{ мкм/хід}$, і відповідно в 3,2 і 4,7 рази більше, ніж при роботі кругом зернистістю $F46$. Порівняно зі значеннями сил, отриманими при роботі кругом твердістю L , сила p_z зменшилась на 5% а p_y збільшилась на 18%.

На ділянці V_n от 100 до 400 мм^2 залежність складових сили від напрацювання має вигляд:

$$\begin{aligned} p_z &= -0,001V_n + 8,09 (\text{Н/мм}), R^2 = 0,13; \\ p_y &= 0,014V_n + 27,3 (\text{Н/мм}), R^2 = 0,36. \end{aligned} \quad (4.15)$$

При шліфуванні на режимі $v_s = 20 \text{ м/хв}$, $t = 20 \text{ мкм/хід}$ закономірності зміни складових сили різання можна розділити на 3 ділянки: різке зростання сил; більш плавне зниження; плавний уповільнений ріст. На першій ділянці максимальне значення складових сили різання $p_z = 17 \text{ Н/мм}$, $p_y = 63 \text{ Н/мм}$, що відповідно в 1,1

рази більше і 1,3 рази менше, ніж при шліфуванні на $v_s = 10 \text{ м / хв}$, $t = 10 \text{ мкм / хід}$ і в середньому в 1,9 рази менше, ніж при обробці кругом твердістю L . Порівняно з кругом зернистістю $F46$ сили збільшилися в середньому в 1,8 рази.

На ділянці V_n от 100 до 400 мм^2 зміна складових сили шліфування від напрацювання також апроксимована лінійною кореляційною залежністю:

$$p_z = 0,002V_n + 5,95(H / \text{мм}), R^2 = 0,54; \quad (4.16)$$

$$p_y = 0,006V_n + 18,9(H / \text{мм}), R^2 = 0,46.$$

Сили на даній ділянці зростають майже пропорційно, тому відношення сил практично не змінюється.

4.2 Моделі регресії складових сил різання

Розглянемо повний факторний експеримент для радіальної складової сили різання.

Проводився експеримент типу 2, де число факторів $k = 4$, число рівнів $p = 2$, число дослідів $N = 16$, число повторних дослідів $m = 3$. При складанні плану проведення експериментів (матриці планування) були враховані всі можливі чинники взаємодії (таблиця 4.1).

Перед проведенням експериментальних досліджень була перевірена лінійна апроксимація усереднених складових сил шліфування. Результати розрахунків для зернистості $F46$ представлені в таблиці 4.2, для зернистості $F60$ – в таблиці 4.3.

Після проведення дослідів виконана статистична обробка результатів. Спочатку визначали вибіркочну дисперсію повторних (паралельних) дослідів (таблиця 4.4):

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.1 – Матриця планування експерименту

Номер досліджу	Фактори				Функція відгуку
	x_1	x_2	x_3	x_4	y
	c_1 , м/с	t , мкм/хід	v_s , м/мм	V_n , мм ²	p_y , Н/мм
1	2	3	4	5	6
1	-1	-1	-1	-1	y_1
2	-1	-1	-1	1	y_2
3	-1	-1	1	-1	y_3
4	-1	-1	1	1	y_4
5	-1	1	-1	-1	y_5
6	-1	1	-1	1	y_6
7	-1	1	1	-1	y_7
8	-1	1	1	1	y_8
9	1	-1	-1	-1	y_9
10	1	-1	-1	1	y_{10}
11	1	-1	1	-1	y_{11}
12	1	-1	1	1	y_{12}
13	1	1	-1	-1	y_{13}
14	1	1	-1	1	y_{14}
15	1	1	1	-1	y_{15}
16	1	1	1	1	y_{16}

Таблиця 4.2 – Залежність приведеної складової сили різання p_y від напрацювання для кругів зернистістю F46

Значення факторів		Твердість круга за стандартом	Лінійне рівняння p_y , Н/мм	Середнє відносне відхилення, δ_{cp} , %
t , мкм/хід	v_s , м/хв			
1	2	3	4	5
10	10	K	$p_y = 0,007V_n + 7,5$	2,7
10	20		$p_y = 0,007V_n + 13,2$	1,7
20	10		$p_y = 0,007V_n + 11,4$	1,6
20	20		$p_y = 0,008V_n + 18,9$	0,9

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5
10	10	<i>L</i>	$p_y = 0,068V_n + 6,3$	3,3
10	20		$p_y = 0,019V_n + 13,9$	1,9
20	10		$p_y = 0,054V_n + 16,8$	2,0
20	20		$p_y = 0,026V_n + 23,0$	1,2

$$S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2}{m-1}, \quad (4.17)$$

де $\bar{y}_i$ – середнє арифметичне значення параметра оптимізації з трьох повторних дослідів.

Таблиця 4.3 – Залежність приведеної складової сили різання p_y від напрацювання для кругів зернистістю *F60*

Значення факторів		Твердість круга за стандартом	Лінійне рівняння p_y , Н/мм	Середнє відносне відхилення, δ_{cp} , %
t , мкм/хід	v_s , м/хв			
10	10	<i>K</i>	$p_y = -0,054V_n + 43,3$	3,6
10	20		$p_y = -0,006V_n + 42,9$	3,0
20	10		$p_y = 0,014V_n + 27,3$	4,1
20	20		$p_y = 0,006V_n + 18,9$	2,0
10	10	<i>L</i>	$p_y = 0,029V_n + 24,4$	5,7
10	20		$p_y = 0,006V_n + 34,3$	2,0
20	10		$p_y = -0,036V_n + 40,5$	2,4
20	20		$p_y = -0,012V_n + 33,4$	1,1

Таблиця 4.4 – Вибіркові дисперсії

S_1^2	S_2^2	S_3^2	S_4^2	S_5^2	S_6^2	S_7^2	S_8^2
0,1178	0,467	0,285	0,824	0,404	1,163	1,089	1,947
S_9^2	S_{10}^2	S_{11}^2	S_{12}^2	S_{13}^2	S_{14}^2	S_{15}^2	S_{16}^2
1,497	5,321	0,569	6,733	1,032	2,411	1,962	2,89

Для перевірки однорідності вибірових дисперсій використали критерій Кохрена:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} \leq G_{(0,05;f_1;f_2)} \quad (4.18)$$

де $S_{\max}^2$ – найбільша з дисперсій в рядках плану;

S_i^2 – дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на i -му поєднанні рівнів факторів;

$G_{(0,05;f_1;f_2)}$ – табличне значення критерію Кохрена при 5% рівні значущості;

$f_1 = (m - 1) = (3 - 1) = 2$ – число ступенів свободи кожної оцінки;

$f_2 = N = 16$ – число незалежних оцінок дисперсій;

$m = 3$ – число паралельних дослідів.

У наших дослідях:

$$G = \frac{6,733}{28,772} = 0,234 < 0,322.$$

Так як розрахункове значення критерію менше табличного, то дисперсії будемо вважати однорідними. Це дозволяє для подальшої оцінки використовувати середнє арифметичне значення дисперсій відтворюваності:

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N}; \quad (4.19)$$

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{28,772}{16} = 1,798.$$

Коефіцієнти полінома знаходимо за формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i}{N};$$

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{ji} \bar{y}_i)}{N};$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{ii} x_{ji} \bar{y}_i)}{N}; \quad (4.20)$$

$$b_{ijz} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{zi} x_{ii} x_{ji} \bar{y}_i)}{N};$$

$$b_{ijzy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{yi} x_{zi} x_{ii} x_{ji} \bar{y}_i)}{N}.$$

Значення коефіцієнта регресій наведені в таблиці 4.5

Дисперсію коефіцієнтів розраховуємо за формулою:

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S_{b_j}^2 = \frac{S_{\text{востр}}^2}{Nm}; \quad (4.21)$$

$$S_{b_j}^2 = \frac{1,798}{16 \cdot 3} = 0,038.$$

Таблиця 4.5 – Коефіцієнти регресії

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_{12}	b_{13}	b_{14}
19,99	5,45	3,34	0,99	3,67	1,02	-2,40	2,60
b_{23}	b_{24}	b_{34}	b_{1234}	b_{123}	b_{124}	b_{234}	b_{134}
0,69	-0,13	-1,42	0,37	0,18	-0,14	0,38	-1,49

Жирним шрифтом виділено незначущі коефіцієнти

Оцінка значущості коефіцієнта регресії проводиться за допомогою критерію Стьюдента. Для всіх коефіцієнтів рівняння регресії складається t -відношення:

$$t_j = \frac{b_i}{S_{b_j}}, \quad (4.22)$$

де $t_{(0,05,f)} = 2,04$ – критерій Стьюдента з рівнем значущості $p = 0,05$ і ступенями свободи дисперсії відтворюваності

$$f = N(m-1), \quad (4.23)$$

$$f = 16(3-1) = 32.$$

Якщо $t_j < t_{(0,05,f)}$, то статистично незначущі коефіцієнти можуть бути виключені з рівняння.

Після перевірки на значимість коефіцієнтів полінома отримали наступні кореляційні залежності в кодованому значенні факторів:

$$p_y = 19,9 + 5,45x_1 + 3,43x_2 + 0,99x_3 + 3,67x_4 + 1,02x_1x_2 - 2,40x_1x_3 + 2,6x_1x_4 + 0,69x_2x_3 - 1,42x_3x_4 - 1,49x_1x_3x_4. \quad (4.24)$$

Адекватність лінійної моделі за критерієм Фішера визначається нерівністю:

$$F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{воспр}}^2} \leq F_{(0,05; f_1; f_2)}, \quad (4.25)$$

де $S_{\text{ад}}^2$ – дисперсія адекватності;

рівень значимості $p = 0,05$;

число ступенів свободи дисперсії адекватності

$$f_1 = N - 1 \quad (4.26)$$

$$f_1 = 16 - 11 = 5;$$

число ступенів вільності дисперсії відтворюваності

$$f_2 = N(3 - 1), \quad (4.27)$$

$$f_2 = 16(3 - 1) = 32.$$

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{m \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \bar{y})^2}{N - l} \quad (4.28)$$

$$S_{\infty}^2 = \frac{3 \cdot 5,61}{16-11} = 3,37$$

де $l = 11$ – число значущих коефіцієнтів в рівнянні регресії.

Підставивши значення в (4.25), отримаємо:

$$F = \frac{3,37}{1,798} = 1,87 < 2,5.$$

Виконана умова $F < F_{\text{табл}}$, отже, модель адекватна.

Аналогічним способом отримана регресійна залежність радіальної приведеної складової сили різання p_y , для круга зернистістю $F 60$:

$$p_y = 31,42 + 0,91x_1 - 3,21x_2 - 1,02x_4 + 1,78x_1x_2 - 3,44x_2x_3 + 0,77x_3x_4 + 1,93x_1x_2x_3x_4 + 2,06x_1x_2x_3 - 3,078x_1x_2x_4 - 0,73x_1x_3x_4. \quad (4.29)$$

Адекватність лінійної моделі перевіряємо за критерієм Фішера згідно з формулою (4.25):

$$F = \frac{6,24}{3,969} = 1,57 < 2,5.$$

Модель адекватна.

Зі збільшенням зернистості і зменшенням твердості наведена сила p_y зменшується, зі збільшенням глибини різання наведена сила p_y також зменшиться.

Для розробки математичної моделі наведеної радіальної складової сили різання p_z , обчислення проводилися згідно з вище викладеною методикою. Відносні відхилення лінійної апроксимації усереднених складових сил шліфування не перевищували 4,5%.

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для круга зернистістю $F46$ критерій Кохрена за формулою (4.18) складе:

$$G = \frac{0,774}{7,130} = 0,109 < 0,322,$$

де 0,322 – табличне значення критерію.

Виконання нерівності в подальших розрахунках дозволяє дисперсії вважати однорідними. За формулою (4.19) для подальшої оцінки визначимо значення дисперсії відтворюваності:

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{7,130}{16} = 0,446.$$

За формулами (4.21)-(4.22) і табличному критерію Стюдента здійснюємо оцінку значущості коефіцієнтів полінома, значення яких наведені в таблиці 4.6.

Отримана наступна регресійна математична модель для наведеної радіальної складової сили різання:

$$p_z = 31,42 + 0,91x_1 - 3,21x_2 - 1,02x_4 + 1,78x_1x_2 - 3,44x_2x_3 + 0,77x_3x_4 + 1,93x_1x_2x_3x_4 + 2,06x_1x_2x_3 - 3,08x_1x_2x_4 - 0,73x_1x_3x_4. \quad (4.30)$$

На підставі отриманої дисперсії адекватності за (4.28) $S_{\text{ад}}^2 = 0,703$, визначимо розрахунковий критерій Фішера $F = 1,58$, який виявляється менше табличного значення 2,25, що дозволяє говорити про адекватність отриманої моделі.

При зменшенні зернистості до $F60$ модель для p_z виглядатиме наступним чином:

$$p_z = 9,18 + 1,86x_1 + 0,67x_3 - 0,27x_4 + 0,32x_1x_3 - 0,38x_2x_3 + 0,37x_3x_4 + 0,37x_1x_2x_3x_4 + 0,72x_1x_2x_3 - 0,35x_1x_2x_4. \quad (4.31)$$

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Значення необхідних параметрів для статистичної оцінки отриманої моделі наведені у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Оцінювальні коефіцієнти

Параметр	$p_y(F46)$	$p_y(F60)$	$p_z(F46)$	$p_z(F60)$	$K_{ш}(F46)$	$K_{ш}(F60)$	$R_a(F46)$	$R_a(F60)$
$f_{1(G)}$	2	2	2	2	2	2	2	2
$f_{2(G)}$	16	16	16	16	8	8	8	8
$G_{расч.}$	0,234	0,133	0,109	0,136	0,258	0,303	0,281	0,382
$G_{табл.}$	0,322	0,322	0,322	0,322	0,516	0,516	0,516	0,516
$S^2_{воспр.}$	1,798	3,969	0,446	1,274	54,345	14,875	0,183	0,15
$f_{(i)табл.}$	2,04	2,04	2,04	2,04	2,12	2,12	2,12	2,12
$S^2_{ад}$	3,37	6,24	0,702	2,52	100,2	42,7	1,02	0,17
$f_{1(F)}$	5	5	9	6	4	1	4	2
$f_{2(F)}$	32	32	32	32	16	16	16	16
$F_{расч.}$	1,87	1,57	1,58	1,99	1,84	2,87	0,56	1,14
$F_{табл.}$	2,5	2,5	2,25	2,4	3,01	4,49	3,01	3,63

4.3 Моделі регресії шорсткості поверхні, коефіцієнта шліфування

Коефіцієнт шліфування $K_{ш}$, визначається відношенням напрацювання до зносу абразивного інструменту.

Наведений обсяг матеріалу, що знімається, був прийнятий однаковим для всіх експериментів і дорівнює 400 мм². Об'єм зношеного абразивного інструменту визначали за формулою:

$$V_K = \pi \cdot D \cdot t_{сп}, \quad (4.32)$$

де D – зовнішній діаметр круга, мм;

t_{cp} – середній знос круга за 3 дослідями, мм.

Усі вимірювання здійснювали наприкінці процесу шліфування при максимальному наведеному напрацюванні, тому при складанні матриці планування, параметр x_4 був виключений і розглядався ПФЕ типу 2^3 таблиця 4.7.

Таблиця 4.7 – Матриця планування експерименту

Номер дослідів	Фактори			Функція відгуку
	x_1	x_2	x_3	y
	c_1 , м/с	t , мкм/хід	V_s , м/хв	p_y , Н/мм
1	-1	-1	-1	y_1
2	-1	-1	-1	y_2
3	-1	-1	1	y_3
4	-1	-1	1	y_4
5	-1	1	-1	y_5
6	-1	1	-1	y_6
7	-1	1	1	y_7
8	-1	1	1	y_8

Із використанням методів математичної статистики, відповідно до формул (4.17)-(4.28) розглянемо виведення математичної моделі коефіцієнта шліфування для кругів твердістю K і L зернистістю $F46$.

Відношення максимальної дисперсії до суми всіх дисперсій складе:

$$G = \frac{112,24}{434,8} = 0,258 < 0,516,$$

де $G_{(0,05;f_1;f_2)} = 0,516$ – табличне значення критерію Кохрена при 5% рівні значущості;

$f_1 = (3 - 1) = 2$ – число ступенів свободи кожної оцінки;

$f_2 = N = 8$ – число незалежних оцінок дисперсії;

$m = 3$ – число паралельних дослідів.

Оскільки групові дисперсії однорідні, це дозволяє знайти уточнене значення дисперсії відтворюваності (4.19):

$$S_{\text{вотпр}}^2 = \frac{434,8}{8} = 54,35.$$

Дисперсія коефіцієнтів складає:

$$S_{b_i}^2 = \frac{54,345}{8 \cdot 3} = 2,26.$$

Критерій $t_{(0,05,f)} = 2,12$ при рівні значущості $p = 0,05$ і ступенями свободи дисперсії відтворюваності

$$f = 8(3 - 1) = 24.$$

Після перевірки на значимість коефіцієнтів регресії (таблиця 4.8) отримаємо наступні кореляційні залежності в кодованому значенні факторів:

$$K_{ui} = 44,77 - 5,06x_2 - 13,51x_3 + 6,15x_1x_3. \quad (4.33)$$

Критерій F

$$F = \frac{100,02}{54,43} = 18,4.$$

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Його табличне значення з рівнем значущості $p=0,05$ і числом ступенів вільності дисперсії адекватності $f_1=8-4=4$ і дисперсії відтворюваності $f_2=8(3-1)=16$ складе 3,01. Оскільки розрахункове значення менше табличного, модель визнається адекватною.

Таким же чином була отримана модель і для круга зернистістю $F60$:

$$K_u = 22,75 - 1,97x_1 - 5,83x_2 - 1,68x_3 - 2,61x_1x_2 + 1,71x_1x_3 - 4,77x_2x_3. \quad (4.34)$$

Основні розрахункові значення представлені таблиці 4.6, а також у таблиці 4.8.

Головним критерієм застосовності отриманої моделі є її адекватність, перевірку якої проводять за відповідним критерієм (4.25):

$$F = \frac{42,7}{14,88} = 2,87 < 4,49.$$

Одним з параметрів якості поверхні є її шорсткість (R_a), до якої згідно з технологічною картою пред'являються відповідні вимоги. Тому необхідно отримати математичні моделі, що дозволять визначати значення R_a при будь-яких можливих комбінаціях режимів обробки. Вимірювання шорсткості обробленої поверхні проводили відповідно до методики.

Розглянемо отримання моделі R_a для при обробці заготовки зі сталі ШХ15 абразивними кругами $25AF46K6V$ і $25AF46L6V$.

Перевірка на однорідність вибірових дисперсій показала, що для подальших розрахунків можна взяти уточнену середню дисперсію:

$$G = \frac{0,41}{1,5} = 0,281 < 0,516,$$

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{1,5}{8} = 0,183.$$

Після оцінки значущості коефіцієнта регресії за допомогою критерію Стьюдента (таблиця 4.8) математична модель прийме вигляд.

$$R_a = 1,81 - 0,22x_1 + 0,46x_3 - 0,22x_1x_3. \quad (4.35)$$

Дисперсія адекватності для даної моделі:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{3 \cdot 0,14}{8 - 4} = 1,02.$$

Умову адекватності моделі виконано:

$$F = \frac{1,02}{0,183} = 0,56 < 3,01.$$

Для кругів зернистістю *F60* отримана наступна математична модель параметра R_a :

$$R_a = 1,92 + 0,27x_1 + 0,2x_2 + 0,29x_1x_2 + 0,3x_1x_3 + 0,26x_1x_2x_3. \quad (4.36)$$

Порівняння дисперсій адекватності і відтворюваності за критерієм Фішера підтвердили її адекватність:

$$F = \frac{0,17}{0,15} = 1,14 < 3,63.$$

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Як видно з отриманих математичних моделей із зменшенням зернистості абразивного матеріалу вплив вхідних факторів на вихідні параметри процесу зростає.

Таблиця 4.8 – Коефіцієнти регресії і оцінка значущості за критерієм Стюдента

$p_y(F46)$

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_{12}	b_{13}	b_{14}
19,99	5,45	3,43	0,99	3,67	1,02	-2,40	2,60
b_{23}	b_{24}	b_{34}	b_{1234}	b_{123}	b_{124}	b_{234}	b_{134}
0,69	-0,13	-1,42	0,37	0,18	-0,14	0,38	-1,49
t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_{12}	t_{13}	t_{14}
103,274	28,172	17,737	5,128	18,984	5,266	12,395	13,423
t_{23}	t_{24}	t_{34}	t_{1234}	t_{123}	t_{124}	t_{234}	t_{134}
3,590	0,680	7,343	1,916	0,938	0,738	1,951	7,707

$p_y(F60)$

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_{12}	b_{13}	b_{14}
31,42	0,91	-3,21	0,53	-1,02	1,78	0,22	0,53
b_{23}	b_{24}	b_{34}	b_{1234}	b_{123}	b_{124}	b_{234}	b_{134}
-3,44	-0,08	0,77	1,93	2,06	-3,07	-0,18	-0,73
t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_{12}	t_{13}	t_{14}
89,21	2,58	9,12	1,50	2,90	5,06	0,62	1,50
t_{23}	t_{24}	t_{34}	t_{1234}	t_{123}	t_{124}	t_{234}	t_{134}
9,78	0,23	2,18	5,47	5,85	8,70	0,52	2,09

$p_z(F46)$

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_{12}	b_{13}	b_{14}
6,21	0,82	0,90	0,82	0,49	0,03	-0,54	0,23
b_{23}	b_{24}	b_{34}	b_{1234}	b_{123}	b_{124}	b_{234}	b_{134}
0,13	-0,02	-0,14	0,04	0,08	-0,03	0,04	-0,17
t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_{12}	t_{13}	t_{14}
64,403	8,491	9,387	8,503	5,077	0,341	5,639	2,380
t_{23}	t_{24}	t_{34}	t_{1234}	t_{123}	t_{124}	t_{234}	t_{134}
1,385	0,189	1,434	0,426	0,824	0,294	0,438	1,812

$p_z(F60)$

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_{12}	b_{13}	b_{14}
9,18	1,86	-0,04	0,67	-0,27	0,21	0,32	0,16
b_{23}	b_{24}	b_{34}	b_{1234}	b_{123}	b_{124}	b_{234}	b_{134}
-0,38	0,11	0,37	0,37	0,72	-0,35	0,23	0,03
t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_{12}	t_{13}	t_{14}
67,42	13,67	0,29	4,94	2,05	1,51	2,37	1,18
t_{23}	t_{24}	t_{34}	t_{1234}	t_{123}	t_{124}	t_{234}	t_{134}
2,77	0,78	2,73	2,74	5,28	2,61	1,70	0,26

$K_u(F46)$

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
44,77	2,45	-5,06	-13,51	0,23	6,15	-1,59	-2,85
t_0	t_1	t_2	t_3	t_{12}	t_{13}	t_{23}	t_{123}
29,75	1,63	3,36	8,98	0,16	4,09	1,06	1,89

$K_u(F60)$

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
22,75	-1,97	-5,83	-1,68	-2,61	1,71	-4,77	1,33
t_0	t_1	t_2	t_3	t_{12}	t_{13}	t_{23}	t_{123}
28,89	2,50	7,41	2,13	3,31	2,17	6,05	1,69

$R_a(F46)$

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
1,81	-0,22	0,13	0,46	0,005	-0,22	0,06	-0,003
t_0	t_1	t_2	t_3	t_{12}	t_{13}	t_{23}	t_{123}
20,75	2,53	1,50	5,23	0,05	2,48	0,68	0,04

 $R_a(F60)$

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
1,92	0,27	0,20	0,11	0,29	0,30	0,05	0,26
t_0	t_1	t_2	t_3	t_{12}	t_{13}	t_{23}	t_{123}
24,37	3,37	2,51	1,35	3,70	3,76	0,69	3,32

Отримані математичні моделі показників процесу плоского врізного шліфування сталі ШХ15 наведені в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Математичні моделі показників процесу шліфування сталі ШХ15

$p_y(F46)$, Н/мм	$p_y = 19,9 + 5,45x_1 + 3,43x_2 + 0,99x_3 + 3,67x_4 + 1,02x_1x_2 - 2,40x_1x_3 + 2,6x_1x_4 + 0,69x_2x_3 - 1,42x_3x_4 - 1,49x_1x_3x_4$
$p_y(F60)$, Н/мм	$p_y = 31,42 + 0,91x_1 - 3,21x_2 - 1,02x_4 + 1,78x_1x_2 - 3,44x_2x_3 + 0,77x_3x_4 + 1,93x_1x_2x_3x_4 + 2,06x_1x_2x_3 - 3,08x_1x_2x_4 - 0,73x_1x_3x_4$
$p_z(F46)$, Н/мм	$p_z = 6,21 + 0,82x_1 + 0,9x_2 + 0,82x_3 + 0,49x_4 - 0,54x_1x_3 + 0,23x_1x_4$
$p_z(F60)$, Н/мм	$p_z = 9,18 + 1,86x_1 + 0,67x_3 - 0,27x_4 + 0,32x_1x_3 - 0,38x_2x_3 + 0,37x_3x_4 + 0,37x_1x_2x_3x_4 + 0,72x_1x_2x_3 - 0,35x_1x_2x_4$
$K_w(F46)$	$K_w = 44,77 - 5,06x_2 - 13,51x_3 + 6,15x_1x_3$

Продовження таблиці 4.9

$K_w(F60)$	$K_w = 22,75 - 1,97x_1 - 5,83x_2 - 1,68x_3 - 2,61x_1x_2 + 1,71x_1x_3 - 4,77x_2x_3$
$R_a(F46)$, МКМ	$R_a = 1,81 - 0,22x_1 + 0,46x_3 - 0,22x_1x_3$
$R_a(F60)$, МКМ	$R_a = 1,92 + 0,27x_1 + 0,2x_2 + 0,29x_1x_2 + 0,3x_1x_3 + 0,26x_1x_2x_3$

Для остаточної перевірки правильності отримання математичних моделей були проведені додаткові досліді при наступних значеннях вхідних параметрів (таблиця 4.10).

Таблиця 4.10 – Значення вхідних параметрів у кодованому вигляді при додаткових дослідіах

Номер дослідіу	Фактори			
	x_1	x_2	x_3	x_4
	c_1 , м/с	t, мкм/хід	v_s , м/хв	V_n , мм ²
1	0	0	0	1
2	1	0	0,6	1
3	-1	0	0,6	1
4	1	0	-0,6	1
5	-1	0	-0,6	1

При переході у натуральні величини значення фактора $x_2 = 0$, складатиме 15 мм / хід, для x_3 : -0,6; 0; 0,6 відповідно 12; 15; 18 м/хв.

Порівняння отриманих за результатами експериментів дисперсій адекватності з раніше знайденими дисперсіями відтворюваності за критерієм Фішера при 5% рівні значущості показало їх однорідність таблиця 4.11, що свідчить про адекватність розроблених математичних моделей.

Таблиця 4.11 – Перевірка математичних моделей на адекватність

Математичні моделі	S_{ad}^2	$F_{розр}$	$F_{табл}$
$p_y(F46)$, Н/мм	3,30	1,84	2,5
$p_y(F60)$, Н/мм	6,11	1,54	2,5
$p_z(F46)$, Н/мм	0,75	1,68	2,25
$p_z(F60)$, Н/мм	1,44	1,13	2,3
$K_{ш}(F46)$	98,96	1,82	3,01
$K_{ш}(F60)$	25,4	1,71	4,49
$R_a(F46)$, мкм	0,171	0,94	3,01
$R_a(F60)$, мкм	0,12	0,78	3,63

Висновки до розділу 4

1 У результаті дослідження впливу режимів обробки та характеристики абразивного інструмента на складові сили різання при шліфуванні сталі ШХ15 показані особливості їх зміни на різних етапах процесу. Установлено, що для деяких режимів обробки і твердості круга істотний вплив на складові сили різання надає обсяг металу, що знімається (напрацювання). У зв'язку з цим напрацювання уведено до числа досліджуваних вхідних факторів.

2 У результаті порівняння дисперсій вихідних факторів процесу за критерієм Кохрену було встановлено, що в розглянутому діапазоні варіювання дисперсії вихідних факторів неоднорідні. Найбільший вплив на неоднорідність дисперсій має зернистість шліфувального круга. У зв'язку з цим, математичні моделі

вихідних параметрів процесу шліфування розробляли окремо для кожної зернистості.

3 Методом повного факторного експерименту розроблено математичні моделі приведені до ширини зразка складових сили різання (p_y , p_z), коефіцієнта шліфування (K_w) та шорсткості обробленої поверхні (параметр R_a) при шліфуванні сталі ШХ15.

4 Висвітлені заходи із техніки безпеки при роботі на технологічному оснащенні.

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

5.1 Техніка безпеки на технологічному обладнанні

При роботі на шліфувальних верстатах основну небезпеку представляє розрив шліфувального круга. Крім того, можливе ураження шкіри та очей робочого дрібними розжареним відлітаючими частками шліфувального круга, а також захоплення неогородженими обертовими частинами верстата одягу і волосся робітника.

При недостатньо надійному кріпленні шліфовані деталі можуть зірватися і поранити робітника. Щоб уникнути розриву під час роботи шліфувальний круг, до встановлення його на верстаті, випробують на механічну міцність на спеціальному верстаті. Зазвичай шліфувальний круг встановлює на верстат досвідчений наладчик, який повинен перевірити, чи проведена попереднє балансування круга в зборі з планшайбою і чи є паспорт про його випробування на міцність.

Під час роботи на шліфувальному або заточувальному верстаті робітник повинен стояти збоку, а не проти круга. При сухому шліфуванні необхідно надягати захисні окуляри. Слід оберегати шліфувальний круг від ударів. Зіткнення з оброблюваною деталлю повинно бути плавним, без зайвого натиску. При наявності вібрації шліфувального круга працювати на ньому не дозволяється.

При обробці дрібних деталей з ручною подачею робочого необхідно надягати на руки шкіряні або гумові напальчники для захисту пальців рук від поранення і користуватися при цьому підручником. При зупинці верстата не можна гальмувати шліфувальний круг руками. Не допускається також гальмувати обертовий круг натиском на нього яким-небудь предметом. Не дозволяється правка абразивного круга зубилом або іншим ударним інструментом. Правка проводиться тільки наладчиком.

До встановлення деталі на верстат необхідно оглянути шліфувальний круг, немає на ньому помітних тріщин і вибоїн, є прокладка між затискними фланцями і

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кругом, чи неослаблені гайки, що затискають фланці.

На верстат можна встановлювати тільки випробувані круги. Випробування кругів проводиться на спеціальних випробувальних верстатах навченими для цього робітниками.

Шліфувальний круг, встановлений на верстат, повинен бути закритий огорожею і підданий короткочасному обертанню вхолосту на робочій швидкості. Потім слід перевірити центрування круга та шпинделя (відсутність биття); переконатися чи легко переміщаються шліфувальна задня бабка і піноль.

Ослаблі гайки, контргайки, болти необхідно підтягнути; слід перевірити, як зашплінтовані відповідні болтові з'єднання верстата, допоміжних і запобіжних пристосувань і пристроїв.

При установці і закріпленні оброблюваної деталі на плоскошліфувальному верстаті слід кріпити деталь тільки спеціальними упорними і притискними планками, розміщуючи їх на рівних відстанях одна від одної; всі упорні планки ставити нижче оброблюваної поверхні, щоб круг міг вільно проходити над ними; кріпильні болти розташовувати якомога ближче до місця притискання деталі, а кріпильні планки – під прямим кутом до деталі (різьба кріпильних болтів повинна бути справною); для кріплення деталей не застосовувати випадкових, непристосованих планок і прокладок; при установці деталі перевірити правильність її розташування (чи не зачіпає деталь при русі за виступаючі частини верстата) шляхом ручного переміщення стола, а якщо це неможливо (при великих деталях) – за допомогою масштабної лінійки.

Столи плоскошліфувальних верстатів (в тому числі столи із електромагнітною плитою) повинні бути забезпечені огороженнями. Якщо робота виконується на верстаті з магнітною плитою або патронами, то спочатку включають електромашинний перетворювач, а потім верстат.

Верстати із електромагнітними плитами повинні мати блокувальні пристрої, вимикаючі рух стола і обертання шліфувального круга при припиненні подачі електроенергії на електромагнітну плиту.

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При роботі на верстатах із рухомим столом необхідно дотримуватися наступних правил: не допускати встановлення яких-небудь предметів з торців верстата, щоб до них не притиснуло людей рухомим столом; не допускати людей в небезпечну зону вильоту столу, вимагати її огорожі у вигляді перекриття під столом верстата; у швидкохідних верстатів великої потужності з рухомим столом стежити за справним станом механізму зачеплення; не доторкатися до рухомої оброблюваної деталі і шліфувального круга до повної їх зупинки.

5.2 Хімічна зброя масового ураження, її вплив на довкілля

Хімічна зброя належить до одного із видів зброї масового ураження. Вона з'явилася до створення ядерної зброї та не втратила свого оперативного значення після розробки та прийняття на озброєння ядерних боєприпасів.

До ядерної зброї належать бойові засоби, вражаюча дія яких заснована на токсичних властивостях отруйних речовин, приведених в бойовий стан.

Ядерна зброя має ряд особливостей, які можна розділити на загальні та індивідуальні. До загальних можна віднести: великі масштаби можливого використання та зони враження; можливість нанесення смертельних та важко виліковних поразок; високий морально-психологічний ефект використання; генетичні й екологічні наслідки; складність у своєчасному захисту населення; труднощі ліквідації наслідків використання. До індивідуальних слід віднести: труднощі у своєчасному виявленні фактів використання; вибірковість дії враження; об'ємність та тривалість дії впливу; біохімічний характер; можливість управління характером та ступенем враження.

Для вирішення питання щодо заходів хімічного захисту внаслідок використання хімічної зброї, доцільно взяти до уваги комбіновану класифікацію отруйних речовин. Вона містить токсикологічну (фізіологічну) і тактичну класифікації. Отруйні речовини смертельної дії (нервово-паралітичні, шкірнонарывні, загально отруйні та задушливі) і тимчасово виводять з ладу

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(психотропної та дратівливої дії). Речовини смертельної дії призводять до смертельного ураження чи виводу з ладу живої сили на тривалий час. В залежності від тривалості збереження виражальної здатності отруюючі речовини смертельної дії поділяють на дві групи. До першої групи належать ті, що здатні зберігати уражальну дію до кількох діб і навіть тижнів. До другої, речовини з нестійким впливом (калька хвилин після їх використання).

Кількісний показник, що характеризує отруйні речовини – концентрація, тобто її кількість в тому чи іншому бойовому стані, що міститься в одиниці об'єму середовища. Середовище може бути газоподібним (повітря), рідким (вода або інші розчинники) і твердим (грунт, лакофарбове покриття і інші пористі матеріали). Зазвичай концентрація має розмірність г/м^3 або мг/м^3 .

Дози отруйних речовин і густина зараження – це інтегральні кількісні показники, пов'язані з концентрацією отруйних речовин.

Шляхи проникнення отруйних речовин всередину організму: інгаляційний (через органи дихання), шкірно-резорбтивні (через шкірні покриви) та пероральні (через шлунково-кишковий тракт).

Доза речовини, що спричинила токсичний ефект називається токсичною дозою. Токсична доза, що спричиняє рівні за тяжкістю ураження, залежить від властивостей отруйних речовин, умов використання та шляхів проникнення в організм. В залежності від шляху надходження в організм токсичні дози поділяються на: шкірно-резорбтивні, пероральні та інгаляційні. Шкірно-резорбтивні та пероральні дози вимірюються в міліграмах на кілограм ваги (мг/кг), інгаляційні – в мг/см^3 . Усі токсичні дози розділяються на смертельні, тимчасово виводять з ладу і подразнювальні.

Враховуючи загрозу в разі використання у війні хімічної зброї, світова спільнота веде постійну боротьбу за виключення її з арсеналу всіх армій, а також повну заборону.

Застосування хімічної зброї призводить до утворення зон хімічного зараження. Окрім цього, досить часті випадки утилізації снарядів із хімічними

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

речовинами в болотах та річках. При поєднанні деяких складових хімічних речовин із водою та киснем утворюються кислотні дощі. Вони призводять до зміни кислотності ґрунту. Це викликає опіки рослин. Особливо чутливими є хвойні дерева. Також відчутний негативний вплив таких дощів на савців, птахів та людей.

13 січня 1993 року у Парижі була підписана Конвенція про заборону розробки, виробництва, накопичення, застосування хімічної зброї та про її знищення. Кожна держава-учасниця зобов'язалася не виготовляти та не застосовувати хімічну зброю, ліквідувати потужності з її виробництва та знищити усі її запаси. Вона вступила в дію 29 квітня 1997 року.

5.3 Капітальні вкладення у виробництво

Капітальні вкладення, необхідні для здійснення виробництва, складаються із капітальних вкладень в основні виробничі фонди $K_{\text{оф}}$ та капітальні вкладення в обігові кошти $K_{\text{ок}}$:

$$K = K_{\text{оф}} + K_{\text{ок}}; \quad (5.1)$$

Капітальні вкладення в основні виробничі фонди складаються з вартості споруд та вартості обладнання.

Загальні розміри витрат на обладнання визначають як суму вартості основного обладнання, енергетичного та підйомно-транспортного обладнання, а також засобів контролю та управління, інструментів, виробничого та господарського інвентарю. Вартість одиниці обладнання визначається за початковою (балансовою) вартістю, в яку вводять витрати на придбання обладнання, транспортно-заготівельні витрати, витрати на будівельні роботи, монтаж обладнання.

Вартість обладнання для обробки визначається прямим розрахунком. Підбір обладнання здійснюється з використанням даних, які знаходяться у "Нормативній

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

базі експлуатації обладнання”. Результати підбору обладнання заносять у таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Обладнання

Найменування	Модель	Р, кВт	Балансова вартість, грн.	К-ть	Робітників, чол.	Зайнято робітників, чол. в 2 зм.
Плоскошліфувальний верстат	ЗГ71	2,2	550000	1	1	2
Усього (для обробки)	550000			2	1	2
Усього (виробниче обладнання)	560000			2	1	2

Вартість виробничого обладнання буде складатися із сумарної вартості контрольно-вимірювальних пристроїв та вартості обладнання для обробки деталей. Вартість КВП складає орієнтовно 10000 грн.

Вартість енергетичного обладнання у цеху можна прийняти рівною 6%, підйомно-транспортного обладнання – 10%, засобів контролю та керування – 15%, інструментів та пристроїв – 12% та господарського і виробничого інвентарю – 5% від загальної вартості виробничого обладнання.

Для подальших розрахунків у цьому ж розділі доцільно буде визначити і розміри річних амортизаційних відрахувань на кожний вид основних фондів. Розмір амортизаційних відрахувань розраховується згідно з діючими затвердженими нормами амортизаційних відрахувань. Отримані результати заносяться до таблиці 5.2.

$$C_{\text{енерг}} = 0,06 \cdot 560000 = 33600 \text{ грн.};$$

$$C_{\text{пто}}=0,1 \cdot 560000=5600 \text{ грн.};$$

$$C_{\text{зк}}=0,15 \cdot 560000=84000 \text{ грн.};$$

$$C_{\text{ів}}=0,12 \cdot 560000=67200 \text{ грн.};$$

$$C_{\text{гві}}=0,05 \cdot 560000=28000 \text{ грн.}$$

Для подальших розрахунків у цьому ж розділі доцільно буде визначити і розміри річних амортизаційних відрахувань на кожний вид основних фондів. Розмір амортизаційних відрахувань розраховується згідно з діючими затвердженими нормами амортизаційних відрахувань. Отримані результати заносять у таблицю 5.2.

$$AB = H_{AB} \cdot ЗВ; \quad (5.2)$$

де АВ – амортизаційні відрахування;

H_{AB} – норма амортизаційних відрахувань;

ЗВ – залишкова вартість;

$$H_{AB} = \left(1 - \sqrt[n]{\frac{ЛВ}{ПВ}}\right) \cdot 100\%; \quad (5.3)$$

де ЛВ – ліквідаційна вартість;

ПВ – первісна вартість;

n – кількість років.

Корисний термін використання для будівель становить 20 років, для обладнання – 5 років, підйомно-транспортного обладнання – 6 років, засобів

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контролю – 3 роки, інструменту – 4, інвентарю – 6 років. Ліквідаційне сальдо для будівель становить 2 %, для обладнання цеху – 6 %, підйомно-транспортного обладнання – 4 %, засобів контролю – 12 %, інструменту – 5 %, інвентарю – 5 % .

Для обладнання амортизаційні відрахування становлять:

$$ЛВ = 0,06 \cdot 560000 = 33600 \text{ грн.};$$

$$H_{AB} = (1 - \sqrt[5]{\frac{33600}{560000}}) \cdot 100 = 43\%;$$

$$AB = 0,43 \cdot 560000 = 240800 \text{ грн.}$$

Для підйомно-транспортного обладнання:

$$ЛВ = 0,04 \cdot 5600 = 224 \text{ грн.};$$

$$H_{AB} = (1 - \sqrt[6]{\frac{224}{5600}}) \cdot 100 = 42\%;$$

$$AB = 0,42 \cdot 5600 = 2352 \text{ грн.}$$

Для засобів контролю амортизаційні відрахування становлять:

$$ЛВ = 0,12 \cdot 84000 = 10080 \text{ грн.};$$

$$H_{AB} = (1 - \sqrt[3]{\frac{10080}{84000}}) \cdot 100 = 50,7\%;$$

$$AB = 0,507 \cdot 84000 = 42588 \text{ грн.}$$

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для інструментів та приладів амортизаційні відрахування становлять:

$$ЛВ = 0,05 \cdot 67200 = 3360 \text{ грн.};$$

$$H_{AB} = (1 - \sqrt[4]{\frac{3360}{67200}}) \cdot 100 = 52,7\%;$$

$$AB = 0,527 \cdot 67200 = 35414 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.2 – Основні фонди та їх амортизація

Найменування груп основних фондів	Вартість основних фондів, грн.	Норма амортизаційних відрахувань, %	Річні амортизаційні відрахування, грн.
1. Будівлі, всього	-	5	-
2. Підйомно-транспортне обладнання	5600	42	2352
3. Обладнання, всього	560000	43	240800
4. Засоби контролю та керування	84000	50,7	42588
5. Інструменти та прилади	67200	52,7	35414
6. Господарський інвентар	28000	40	11200
Всього:	744800	-	332354

Для господарського інвентарю амортизаційні відрахування становлять:

$$ЛВ = 0,05 \cdot 28000 = 14000 \text{ грн.};$$

$$H_{AB} = (1 - \sqrt[5]{\frac{14000}{28000}}) \cdot 100 = 40\%;$$

$$AB = 0,4 \cdot 28000 = 11200 \text{ грн.}$$

Капітальні вкладення в обігові кошти визначаються діленням суми коштів, що витрачаються на випуск продукції, на коефіцієнт обертання обігових коштів, який приймається за 3-5 обертів у рік.

Відповідно до цього:

$$K_{ок} = C_T / 4 \quad (5.4)$$

$$K_{ок} = 1128000 / 4 = 282000 \text{ грн.}$$

Капітальні вкладення необхідні для здійснення виробництва:

$$K = 744800 + 282000 = 1026800 \text{ грн.}$$

Висновки до розділу 5

Висвітлені заходи із техніки безпеки при роботі на технологічному оснащенні, а також приділено увагу хімічній зброї, як зброї масового ураження, її впливу на екологію, а також економічним аспектам.

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Отже, відповідно до отриманого завдання на кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти та за результатами її виконання зроблено наступні висновки.

1. На базі плоскошліфувального верстату моделі 3Г71 була створена експериментальна установка, що дозволила провести дослідження залежності величини складових сил шліфування (радіальної P_y та дотичної P_z) від факторів обробки заготовок із сталі ШХ15.

2. Запропоновано методику експериментальних досліджень процесу обробки вальниць кочення, а саме запропоновано: дослідні зразки та інструмент; особливості визначення складових сил різання; методики визначення шорсткості, коефіцієнту шліфування та зношування поверхні, а також прижогів.

3. Визначено залежності силових характеристик процесу шліфування від умов обробки.

4. Отримані математичні моделі регресії шорсткості та коефіцієнта шліфування.

5. Надано рекомендації практичної реалізації розробок.

					КРМ.133ГМмд_21.03.000 ПЗ	Аркуш
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		