

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра будівництва та професійної освіти

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

магістр

на тему: «Дослідження процесу вискоєфективного шліфування за умов
гнучкого машинобудівного виробництва»

КРМ.133ГМмд_21.20.000 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
ПЕРЕПЕЛИЦЯ Андрій

Керівник: канд. техн. наук, доцент
БІДА Сергій

Полтава – 2023 року

ВСТУП

Виготовлення безшовних сталевих труб, що досить часто використовуються підприємствами АПК, виконується на станах холодного прокатування труб. При цьому пластичне деформування заготовки в трубу необхідного діаметру відбувається за рахунок її взаємодії з робочими поверхнями калібрів і оправки. Наразі для підвищення якості процесу прокатування застосовують оправки зі складними робочими поверхнями, що мають круглий поперечний переріз зі зміною діаметру за довжиною робочої частини за певним законом. Крім того, оправка за своїми геометричними параметрами відноситься до нежорстких деталей (відношення довжини до діаметру > 20) і виготовляються із спеціальної сталі (Сталь 60С2ХФА, твердість НРС 54..58), мають жорсткі вимоги до точності (допуск на діаметр робочої частини $\pm 0,01\text{мм}$) та якості поверхні ($Ra 0,16\text{мкм}$).

Отже, складна форма робочої поверхні оправки з одного боку обумовлює необхідність застосування шліфувального верстату з ЧПК, а з другого боку не дозволяє використовувати традиційні конструкції лонетів, які рекомендуються при обробці деталей малої жорсткості, оскільки діаметр деталі змінюється за довжиною робочої частини за певним законом. Гостро стоїть питання забезпечення максимальної продуктивності процесу при забезпеченні необхідної якості і точності, шляхом призначення раціональних режимів різання.

Таким чином, розробка технологічних засобів забезпечення шліфування оправок малої жорсткості станів холодного прокатування труб на шліфувальних верстатах з ЧПК, що підтримують оптимальний режим різання є актуальною науково-технічною проблемою.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Особливості виготовлення маложорстких деталей

У різних галузях машинобудування зустрічаються так звані маложорсткі деталі, які характеризуються великим відношенням довжини до діаметра (або площі поперечного перерізу). Обробка різанням таких деталей завжди викликає труднощі, пов'язані з неможливістю застосовувати стандартні режими різання, з проблемами отримання необхідної точності та якості обробленої поверхні.

Такі проблеми обумовлені суттєвим зниженням жорсткості технологічної обробляючої системи, що навіть при невеликих силах різання приводить до виникнення значних пружних деформацій пружної системи, які супроводжуються коливальними процесами, виникненням огранювання, хвилястості та інших дефектів обробленої поверхні деталі. Крім того, вісь деталі може бути легко викривлена внаслідок перерозподілу внутрішніх напружень після зрізування кожного шару металу.

Найбільш часто такі проблеми виникають при обробленні маложорстких деталей, які мають складну форму (лопатки газотурбінних двигунів, оправки станів холодного прокатування труб, некруглі вали тощо).

Відомі різні способи та прийоми зниження величини пружних деформацій і амплітуди коливань при обробленні маложорстких деталей. Більшість з них зводиться до застосування спеціальних верстатних пристроїв, зокрема люнетів, для підвищення жорсткості технологічної обробляючої системи. З робіт Драчева О.І. [1, 2], Тараненка В.А. [3, 4] і Мозолевої Т.В. [5] відомо про технологічний прийом при токарній обробці маложорстких деталей типу «вал», що полягає у прикладанні до заготовки осьової сили, що розтягує. Стверджується, що оброблення з прикладанням до заготовки такої сили дозволяє мінімізувати вплив на точність та якість обробки пружних деформацій заготовки під дією сили різання.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Питання, пов'язані з дослідженням токарної обробки маложорстких деталей, розглядались в роботах А.П. Соколовського, В.Г. Подпоркіна, К.С. Колева, В.С. Корсакова, Б.М. Базрова, Ю.И. Городецького, В.В. Чебоксарова С.Л. Васильєвих, О. И. Драчева, В. А. Тараненко і інших. Слід відзначити роботу В.Г. Подпоркіна [6], присвячену специфічному процесу обробки нежорстких валів на токарних верстатах.

Фінішна обробка довгих валів (відношення довжини до діаметру більше 10) є однією з найбільш складних операцій. Це обумовлено малою жорсткістю заготовки, а як наслідок, значними пружними деформаціями, вібраціями, що легко збуджуються через нестійкість технологічної обробляючої системи, високою чутливістю до пружних переміщень і контактних деформацій, схильністю до температурних деформацій і дефектів поверхневого шару, складністю досягнення заданої якості, точності та продуктивності [7]. Питання ж шліфування маложорстких валів в літературі практично не розглядаються.

Проведений в роботах [8, 9] аналіз показує, що 90% сумарної похибки при обробці нежорстких валів виникає через пружні деформації заготовок. Пружні деформації виникають під впливом нестабільності сил різання і жорсткості елементів технологічної системи внаслідок коливання твердості матеріалу шліфувального круга і деталі, нерівномірності припуску, вихідної похибки і жорсткості вала по довжині обробки, зміни в часі різальних властивостей круга і режимів різання.

Змінна по довжині вала жорсткість призводить до відхилення форми від циліндричності (діжкоподібність). Прагнення до зменшення цієї похибки вимагає зниження режимів обробки і, зокрема, поперечної подачі (глибини різання). Однак деякі дослідники [10] не рекомендують призначати завідомо малі (менше 0,005 мм) поперечні подачі, оскільки вважають, що це призводить до виникнення вібрацій, до втрати точності в поперечному перерізі і до зниження продуктивності.

Враховуючи технологічні особливості, в літературі [11] рекомендується ряд способів зниження похибок і підвищення точності обробки нежорстких валів:

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

переважне проектування гладких валів; застосування малонавантажених технологічних процесів і режимів; повне видалення похибок за рахунок додаткових проходів або виходжування; виконання чистових операцій на строго регламентованих режимах різання; попередня обробка одного з валів з постійним радіальним зусиллям, а потім обробка решти валів з програмним керуванням зусиллям пропорційно прогину вала; контроль прогину вала в процесі обробки; вирівнювання піддатливості елементів пружної технологічної системи.

В роботі [12] А.А. Жданов запропонував розрахунковий спосіб забезпечення точності маложорстких валів за рахунок зміни подачі в процесі різання, а як наслідок і сили різання, що викликає деформацію. Представлені результати досліджень: наявність дефектів обробки (канавки вистою інструменту) і запропоновані теоретичні методи вирішення.

Існує точка зору [13], що однією з умов отримання високої точності і продуктивності обробки є досить висока жорсткість технологічної системи. Для підвищення продуктивності і забезпечення якості при обробці довгих циліндричних поверхонь застосовують різні додаткові опори (наприклад, люнети), які підвищують жорсткість заготовки. При цьому схема установки люнетів, їх конструкція, характер закріплення, вибір технологічних баз має вирішальний вплив на продуктивність та точність обробки діаметральних розмірів вала.

1.2 Оправки станів для холодного прокатування труб

На початку і в середині ХХ століття близько половини холоднодеформованих труб вироблялися різними способами волочіння. Перевагами такого методу були простота обладнання і технології виготовлення, висока якість, але такий метод підходив лише для труб, які виготовлялися з вуглецевих і низьколегованих сталей, які відносно легко деформуються, кольорових металів і сплавів.

Недоліки волочіння стимулювали науку до винайдення у 20-х роках способу холодного прокатування труб. Такий спосіб дозволяв отримувати труби з

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

малопластичних матеріалів. За час свого існування він став основним для виробництва труб з більшості відомих металів і сплавів, через те, що такий спосіб дозволяє виготовляти труби з високолегованих сталей і сплавів, багато з яких відносяться до групи таких, які важко деформуються, а виробництво традиційним способом волочінням – утруднено або взагалі неможливо. Не аби яку роль у поширенні способу зіграла мобільність: для переходу на прокат труби іншого розміру потрібно замінити тільки робочий інструмент.

Труби, виготовлені методом холодного прокатування, мають високу якість і надійність, відсутність зварного шва, однорідну дрібнозернисту структуру і міцність металу по всій довжині. Такі труби застосовуються в суворих умовах і використовуються в різних галузях промисловості, де працюють з агресивними середовищами, з середовищами з високими і надвисокими температурами і тисками, іншими агресивними умовами.

Основні галузі застосування таких труб: атомна та теплова енергетика; паливно-енергетичний комплекс; хімічна промисловість; всі види машинобудування, включаючи літакобудування та космічну техніку.

Виготовлення холоднодеформованих безшовних труб виконується на станах холодного прокатування труб, при якому деформування заготовки в трубу необхідного діаметру відбувається за рахунок взаємодії з робочими поверхнями калібрів і оправки, які мають складні форми [14].

Процес прокатки на станах холодного прокатування труб має періодичний характер, оскільки труба прокатується окремими ділянками по її довжині при зворотно-поступальному русі кліті [15]. Початковий розмір рівчака відповідає зовнішньому діаметру заготовки, кінцевий розмір – зовнішньому діаметру готової труби.

Якщо деформуючі елементи матимуть навіть незначні похибки форм робочих поверхонь, то в процесі прокатування в місцях можуть виникнути концентрації навантажень, що призведуть до тріщин або до моментального руйнування інструменту без можливості повторного перешліфовування.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Робочий інструмент в процесі обробки сприймає надзвичайно великі навантаження, близько 150 тонн, що сприяє його зносу. Тому оправки і валки-калібри перешліфовують на інший типорозмір і інструмент використовують повторно.

Відповідальним елементами даного процесу є калібр та оправка. Для реалізації правильного процесу деформування потрібно забезпечити точну форму робочої поверхні калібру та оправки з високими показниками якості.

Оправка представляє собою більш просту деталь типу тіла обертання з лінійною або криволінійною твірною (рисунок 1.1) [15].

Рисунок 1.1 – Оправка станів холодного прокатування труб

Обов'язковими конструктивними елементами оправки (рисунок 1.1) є хвостова частина з різьбою для кріплення оправки до стержня, перехідна циліндрична частина, власне робоча частина з криволінійною або прямолінійною твірною і різьбовий отвір для кріплення подовжувача, який задіяний у системі попередження поломки валків холодного прокатування труб. Оправки станів виготовляються зі спеціальної сталі (Сталь 60С2ХФА, твердість HRC 54..58), мають жорсткі вимоги до точності (допуск на діаметр робочої частини ± 0.03 мм) та якості поверхні (Ra 0.16 мкм).

З моменту виникнення способу холодного прокатування труб велика увага приділялася калібруванню інструменту [16]. Завданням калібрування є визначення геометричної форми і розрахунок розмірів оправки і калібру, які визначають основні показники процесу для конкретного прокатного стану і металу, що деформується.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Методика калібрування постійно розвивалась і вдосконалювалась – результатом стало калібрування пропорційних обтискань, яке було розроблено в Трубному інституті (м. Дніпропетровськ) [17].

Розвиток калібрування пропорційних обтискань, признаний винаходом і захищено авторським свідоцтвом і патентом України [18].

Розглянуті особливості оправок станів холодного прокатування труб, а саме завдання профілю робочої поверхні в повздовжньому перерізі (зміна діаметру за довжиною оправки), вимагатиме при обробці використовувати верстати з ЧПК. З одного боку оправка представляє собою просту деталь типу «вал», але з іншого боку за своїми геометричними параметрами вона відноситься до деталей малої жорсткості (відношення довжини до діаметру оправки складає більше 10), звідки виникає необхідність застосування люнетів.

1.3 Вимоги до матеріалу та термообробки оправок станів для холодного прокатування труб

Інструмент станів холодного прокатування труб знаходиться в дуже важких умовах роботи [19]. Деформація металу відбувається в холодному стані, завдяки чому валки і оправка сприймають значне зусилля прокатування. Для отримання якісних труб інструмент станів холодного прокатування труб повинен бути зносостійким, достатньої твердості і міцності в умовах нагрівання до 150-200°C, володіти хорошими показниками опору згину, пружності і в'язкості [19], мати шорсткість робочої поверхні R_a 0,16...0,25 мкм і точні геометричні розміри (точність до 0,05...0,06 мм).

Тому зносостійкість і твердість інструменту досягаються застосуванням відповідних марок сталі та її термічної обробки, шорсткість поверхні і точність розмірів досягаються шліфуванням і поліруванням інструменту.

В якості матеріалу для виготовлення оправок раніше застосовували сталь ШХ15, 50ХФА, 60ХФА [19], але тепер широкого використання здобули сталі

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

60С2ХФА, рідше 4Х5МФС. Інколи як заміник 4Х5МФС можуть застосовувати 4Х5В2ФС, 4Х4ВМФС. Інструмент з цих марок сталей показав високу стійкість і твердість при відповідній термічній обробці. Хімічний склад сталей наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сталей, застосовуваних для виготовлення оправки станів холодного прокатування труб

Марка сталі	Масова частка елементів, %								
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	P	S	V
ШХ15	0.95-1.05	0.17-0.37	0.2-0.4	< 0.3	1.3-1.65	< 0.25	< 0.027	< 0.02	
50ХФА	0.46-0.54	0.17-0.37	0.5-0.8	< 0.25	0.8-1.1	< 0.2	< 0.025	< 0.025	0.1-0.2
60ХФА	0.55-0.65	< 1.5	0.5-0.8	< 0.25	0.8-1.1	< 0.2	< 0.025	< 0,025	0.1-0.2
60С2ХФА	0.56-0.64	1.4-1.8	0.4-0.7	< 0.25	0.9-1.2	< 0.2	< 0.025	< 0.025	0.1-0.2
S690	≤ 0.2	≤ 0.8	≤ 1.2	≤ 2.0	≤ 1.5	≤ 0.5	≤ 0.025	≤ 0.015	≤ 0.12
4Х5МФС	0.32-0.4	0.9-1.2	0.2-0.5	< 0.35	4.5-5.5	< 0.3	< 0.03	< 0.03	0.3-0.5
4Х5В2ФС	0.35-0.45	0.8-1.2	0.15-0.45	< 0.35	4.5-5.5	< 0.3	< 0.03	< 0.03	0.6-0.9
4Х4ВМФС	0.37-0.44	0.6-1.0	0.2-0.5	< 0.35	3.2-4.0	< 0.3	< 0.03	< 0.03	0.6-0.9

Матеріал заготовки оправки щодо хімічного складу, чистоти від неметалічних включень, мікроструктури, наявності флокенів і пористості повинен задовольняти вимогам технічних умов. Поковки для оправок отримують з круглих штанг,

прокатаних на сортових станах, з одного нагрівання при температурі 1050-1100°C (сталь ШХ15) або 1150-1180°C (сталь 50ХФА) за певним графіком. Поковки піддають поліпшенню (нагрівання до 880-900°C з охолодженням у маслі до 550-600°C з подальшим високотемпературним відпусканням при 710-720°C) або відпалу (так як при підвищеному вмісті в металі вуглецю і хрому поковки загартовуються на повітрі; відпал, окрім зменшення твердості, сприяє зняттю напружень в металі і покращує його структуру) [20]. Метал поковок оправок після первинної термообробки повинен мати твердість не вище HRC 22 і структуру, що складається з глобул цементиту, розташованих у фериті, відповідати 2-5 балам шкали № 1 за ГОСТ 801-60 [19]. Допуск на неточність розмірів поковок оправок становить 1,5-2,0 мм (1,5-2,0).

Первинну механічну обробку оправок проводять в центрах на токарних верстатах до розмірів, відповідних розрахунковим даним калібрування з припуском по діаметру на шліфування: при діаметрі до 70 мм – 0,8-1,0 мм; понад 70 мм – 2,0-2,5 мм [19]. Вона полягає в centruванні, проточці хвостовика під нарізання різьби, проточці циліндричної і конічної ділянок та перехідної частини, а також фрезеруванні граней під ключ, часто ці ділянки об'єднують в одну конічну поверхню. На поверхні оправки не повинно бути глибоких рисок, уступів, а в середині оправки чорновин (руйнування по серцевині).

Після первинної механічної обробки оправки піддають у вертикальному положенні загартуванню та відпуску по певному режиму з нагріванням перед загартуванням до 860-870 °С, а більш великих розмірів – до 820-840 °С і відпуску при 240-260 °С [19]. Оправки перед загартуванням нагрівають у соляних ваннах або інструментальних печах камерного типу з електричним або газовим обігрівом. Для ванн застосовується суміш кухонної солі (NaCl) у кількості 75% за вагою та хлористого барію (BaCl₂) у кількості 25%. Оправки діаметром більше 80 мм перед загартуванням нагрівають в печах камерного типу. Перед посадкою в відпускну ванну оправки встановлюють у центри гвинтового преса і, в разі потреби, правлять. Оправки зі сталі 50ХФА відпускають в масляній ванні при температурі

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

180-200°C протягом 2-3 год. При охолодженні необхідно оправки занурювати в охолоджуюче середовище строго вертикально. Після відпуску оправки для повного охолодження й видалення залишків мастила занурюють у слабкий розчин каустичної соди або знежирюють в 0,25-0,5% розчині кальцинованої соди (Na_2CO_3), підігрітому до 85-95°C. Хвостовик, на якому нарізають різьбу, і перехідну ділянку оправки від циліндра до хвостовика піддають неповному загартуванню. Мікроструктура металу загартованого шару оправки повинна складатися з дрібнодисперсного мартенситу з рівномірно розподіленими вторинними карбідами. Злам загартованого шару повинен бути оксамитовим.

Твердість робочої частини оправки після відпуску має бути в межах HRC 52-64, а хвостовій частині 25-35 [19].

Оправки, виготовлені зі сталі 50ХФА, мають приблизно в два рази більшу стійкість, ніж оправки зі сталі ШХ15. Підвищена стійкість оправок зі сталі 50ХФА пояснюється сприятливим поєднанням показників міцності і пластичності, а також більшою здатністю до загартування. Істотним недоліком сталі 50ХФА при виготовленні з неї оправок є велика схильність до викривлення при загартуванні у воді, в порівнянні зі сталлю ШХ15. Для зменшення викривлення необхідно загартування оправок проводити в маслі при високих температурах (940-960°C).

Термічно оброблені оправки шліфують і полірують. Лінійно конусні оправки шліфують в центрах на звичайних круглошліфувальних верстатах. Оправки з криволінійною твірною рекомендовано шліфувати на круглошліфувальних верстатах з ЧПК. Для шліфування довгих і тонких оправок, з метою підвищення точності, особливо в центральній частині, де оправка згинається під дією сил різання, рекомендовано застосовувати лунети [16].

На поверхні оправки після шліфування не допускаються уступи (дроблення), риски, припали. Інколи особливо відповідальні оправки полірують, а в окремих випадках ще і хромують.

Таким чином, в усіх випадках оправка станів холодного прокатування труб виготовляється з матеріалів з високою твердістю (HRC 52-64), а вимоги щодо

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

якості та точності робочої поверхні дуже високі. Насамперед це визначає тип обробки і майже виключає можливість використання лезової обробки на фінішних операціях. Найбільш доцільно для остаточної обробки оправки станів холодного прокатування труб використовувати абразивну обробку, котра дозволяє досягти потрібної якості та точності робочої поверхні оправки.

1.4 Верстатне обладнання для шліфування оправок станів холодного прокатування труб

Шліфування оправок в залежності від форми робочої поверхні здійснюють на звичайних круглошліфувальних верстатах або на круглошліфувальних верстатах з ЧПК [21]. Раніше майже усі оправки, які вироблялися, мали лінійну конусну робочу поверхню, що пояснювалось простотою і стандартністю методу виготовлення, наявністю необхідного верстатного обладнання і методів його налагодження.

В наслідок широкого асортименту конусних оправок, при шліфуванні використовують універсальні круглошліфувальні верстати. На ринку круглошліфувальних верстатів представлена продукція двох вітчизняних виробників: ВАТ «Лубенський верстатобудівний завод «ШЛІФВЕРСТ» (м. Лубни) – 3Т130Ф3, 3Н130В, 3С130В, 3С130ВФ10, і ВАТ «Харківський верстатобудівний завод «ХАРВЕРСТ» (м. Харків) – 3М132В, 3М152МВ, 3М162В. Такі верстати для шліфування лінійно конусних оправок використовують схему обробки конуса шляхом повороту стола. Вона полягає в наступному: заготовку оправки, встановлену в центрах, повертають разом з столом на деякий кут, так щоб положення твірної збігалось з напрямком повздовжньої подачі [22]. Далі проводять обробку подібну до обробки циліндричних деталей.

Але на таких верстатах і за такої схеми обробки неможливо шліфувати оправки, які мають криволінійну твірну. Це спонукало використовувати

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

круглошліфувальні верстати з ЧПК. Схема шліфування з криволінійною твірною зображена на рисунку 1.2.

Рисунок 1.2 – Схема шліфування оправок з криволінійною твірною

Форма вихідної інструментальної поверхні шліфувального круга, при такій схемі шліфування, виконується за дугою кола R_s . Вона має ряд переваг: скорочення часу переналадки верстату, можливість обробки оправок як з криволінійною так і з лінійно конусною твірними, реалізація будь-якого управління верстатом в рамках системи ЧПК. Проте такі можливості сучасних верстатів не використовуються.

На вітчизняному ринку присутні круглошліфувальні верстати з ЧПК, які можливо використати при шліфуванні оправок: 3К152ВФ20 виробництва ВАТ «Харківський верстатобудівний завод «ХАРВЕРСТ» (м. Харків) і 3В130Ф4 виробництва ВАТ «Лубенський верстатобудівний завод «ШЛІФВЕРСТ» (м. Лубни). Основні характеристики верстатів наведено у таблиці 1.2. Верстат моделі 3В130Ф4 (рисунок 1.3) – круглошліфувальний автомат високої точності призначений для шліфування циліндричних поверхонь складних у повздовжньому і поперечному перерізах. Оснащений системою ЧПУ фірми SIEMENS SINUMERIK-840D(e). Заявлена шорсткість оброблених поверхонь R_a 0,16 мкм, відхилення від круглості до 1,6 мкм, постійність діаметру в повздовжньому

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перерізі до 5 мкм, відхилення від профілю в поперечному і повздовжньому перерізах до 10 мкм.

Таблиця 1.2 – Основні характеристики круглошліфувальних верстатів з ЧПК

Характеристики	Модель верстата	
	3В130Ф4	3К152ВФ20
Макс. розміри заготовки в центрах, мм	Ø300/1000	Ø200/1000
Макс. розміри шліфування в центрах, мм	Ø300/900	Ø200/1000
Макс. розміри шліфувального круга, мм	Ø500/80	Ø600/100
Макс. швидкість обертання шліфувального круга, м/с	50	50
Частота обертання приводу заготовки, 1/хв	25-500	5-800
Клас точності по ГОСТ8-82	В	В

Рисунок 1.3 – Верстат 3В130Ф4 (Україна)

Виробник заявляє наявність програмного забезпечення для створення програм шліфування складного в поперечному перерізі профілю «Фенікс», але введення вихідних даних геометричної інформації, профілю до програмного забезпечення невизначено, крім того відсутнім є підхід до призначення режимів різання.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Верстат моделі 3К152ВФ20 (рисунок 1.4) – круглошліфувальний напівавтомат високої точності. Призначений для зовнішнього шліфування циліндричних і конічних поверхонь ступінчастих валів методом врізного, рядкового і повздовжнього шліфування в напівавтоматичному циклі, а також для шліфування торців методом повздовжньої подачі столу.

Рисунок 1.4 – Верстат 3К152ВФ20 (Україна):

а – зовнішній вид; б – робоча зона з пультом оператора ЧПК

В базовій поставці оснащений системою ЧПК NC-210 фірми «Констар», м. Харків. Заявлена шорсткість оброблених поверхонь R_a 0,16 мкм, відхилення від круглості до 0,6 мкм, постійність діаметру в повздовжньому перерізі до 3 мкм, відхилення від профілю в поперечному і повздовжньому перерізах до 6 мкм. Інформація про наявність програмного забезпечення для створення програм шліфування відсутня, що дає підставу вважати про відсутність САМ-системи.

Для фінішної операції шліфування робочої поверхні оправки станів холодного прокатування труб можуть застосуватися верстати з ЧПК шліфувальної групи, наприклад, верстати вітчизняних виробників «ХАРВЕРСТ» або «ШЛІФВЕРСТ». Такі верстати необхідно обладнати люнетами, що підвищить їх технологічні можливості, проте усталених рішень для шліфування робочої поверхні оправки не виявлено.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.5 Шліфувальні круги

Шліфувальні круги, якими здійснюють обробку на шліфувальних верстатах, це різальний інструмент, що складається із абразивного матеріалу, який представляє собою окремі зерна високої твердості (більшої твердості в порівнянні з оброблюваним матеріалом), з'єднаних спеціальною речовиною – зв'язкою [23]. По формі представляють собою тіла обертання з наскрізним отвором для кріплення шліфувального круга на шпинделі верстату.

Шліфувальні круги, як абразивні інструменти, на відміну від металічних мають властивість автоматично відновлювати ріжучу здатність в процесі роботи в результаті зламів, викришування і навіть відриву абразивних зерен, що призводить до утворення нових ріжучих кромки [24].

Оскільки матеріал оправки після проведення термічної обробки має твердість поверхневого шару HRC 58...62, то для обробки оправок станів холодного прокатування труб використовують шліфувальні круги з нормального електрокорунду зернистістю 32, 40 на керамічній зв'язці, середньої м'якості 2-го ступеня.

Застосування нормального електрокорунду пояснюється його теплостійкістю, високою міцністю з'єднання зі зв'язкою, механічною міцністю зерна, високою в'язкістю, яка необхідна для виконання операцій зі змінним навантаженням [25]. Крім того, підтверджено його ефективність застосування для обробки деталей з легованих загартованих сталей.

Застосування зернистості 32 регламентується рекомендаціями [24]: для отримання шорсткості поверхні R_a 0,08-0,32 мкм; при обробці загартованих сталей і твердих сплавів; при чистовому шліфуванні; при високих вимогах до точності оброблюваного профілю деталі.

Застосування круга середньої м'якості регламентується рекомендаціями [26], для чистового шліфування загартованих сталей.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Використання керамічної зв'язки пояснюється водостійкістю, хімічною стійкістю, жорсткістю і механічною міцністю [24], тривалим збереженням профілю робочої кромки [27], але також присутня чутливість до ударних навантажень [28].

Типи форм шліфувальних кругів і геометричні розміри регламентується ГОСТ 2424-83 і залежать від конструкції верстату, кріплення і типу виконуваних робіт. Найбільш широко вживаними є круги прямого профілю. Відповідно до ГОСТ 2424-83 шліфувальні круги підлягають маркуванню.

Найпоширеніша схема установки шліфувального круга на круглошліфувальному верстаті – консольна на шпинделі верстату [29], при якій шліфувальний круг закріплюють фланцями, гвинтами або перехідними фланцями в залежності від габаритних розмірів шліфувального круга.

1.6 Режими різання при шліфуванні оправок станів холодного прокатування труб

Не менш важливим елементом вибору технологічних умов шліфування є призначення параметрів режиму різання і правки шліфувального круга. В залежності від схеми шліфування основними параметрами режиму різання виступають: швидкість обертання шліфувального круга (швидкість різання), глибина шліфування (поперечна подача), швидкість обертання заготовки для круглого шліфування, поздовжня подача. В основному режими різання обирають із інформації, яку надають довідники або продавці обладнання та інструменту. Рекомендована швидкість різання сталей при круглому зовнішньому шліфуванні абразивними кругами на керамічних зв'язках становить 20-35 м/с, а при великих глибинах різання – 18-20 м/с [30]. В деяких випадках, з метою підвищення продуктивності обробки, швидкість різання збільшують до 42-52 м/с [30]. Швидкість круга приймають максимально допустимим можливостям верстату, що пояснюється зниженням сили тертя в парі шліфувальний круг-деталь, зношування зерен круга знижується, а стійкість підвищується. Що стосується нежорстких

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

деталей, то швидкість приймають ще більшою. Глибину різання призначають залежно від припуску на обробку та вимог по точності і якості оброблюваної поверхні. На чорнових проходах глибину різання призначають в межах 0,01-0,025 мм, при чистовому – 0,0025-0,01 мм [31]. Зі збільшенням швидкості круга і зменшенням швидкості обертання деталі зростає небезпека припалів, внаслідок підвищення інтенсивності нагрівання поверхні. Саме тому при підвищенні швидкості круга потрібно підвищувати швидкість деталі. Надмірне підвищення поздовжньої подачі також підвищує небезпеку виникнення припалів по гвинтовій лінії подачі, така сама небезпека виникає при надмірному збільшенні поперечної подачі. При правці шліфувального круга алмазними олівцями рекомендована глибина правки 0,01-0,04 мм на подвійний хід, поздовжня подача не більше 0,3 м/хв. При профілюванні і правці круга алмазними роликами глибина врізання може становити 0,005-0,2мм. При правці за методом обкатки швидкість обертання шліфувального круга не повинна перевищувати 5-10 м/с.

Однак, в умовах реального виробництва використовують прийом заниження режиму різання для отримання якісної поверхні. Тому остаточному призначенню режиму різання передують попереднє оброблення декількох деталей.

Використання мастильно-охолоджувального технологічного середовища (МОТС) істотно впливає на продуктивність, якість обробленої поверхні, затуплення, засалювання шліфувальних кругів, а тим самим і на їх стійкість. Шляхом раціонального підбору і використання МОТС можливо зменшити сили тертя в контакті пари «шліфувальний круг-деталь», а також тепловиділення, інтенсифікувати відвід тепла, забезпечити видалення стружки й абразивних частинок з зони різання і з робочих частин верстата, підвищити продуктивність обробки і поліпшити якість оброблених деталей [32].

При профільному шліфуванні легированих конструкційних сталей використовують наступні МОТС [33]:

- водні розчини поверхнево-активних речовин (наприклад, 5...7 г/л тріетаноламіна, 2,5 г/л нітрату натрію, 1,0 г/л змочувача ОП-7 і вода);

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- мінеральні мастила з хімічно активними присадками (наприклад, сульфофрезол або суміш сульфофрезола з дизельним паливом);
- висококонцентровані емульсії (наприклад, 20...40%-ні емульсії з емульсолу НГЛ-205).

При шліфуванні високолегованих сталей рекомендовано використовувати такі МОТС [33]:

- високов'язкі мінеральні мастила з присадками (наприклад, масло індустріальне, 5% масла ВНИИ НП-232, 3% масла ЛЗ-23К);
- висококонцентровані емульсії (наприклад, 40%-ні емульсії з емульсолу НГЛ-205);
- водні розчини мила і розчинних масел (наприклад, 3% фтористого натрію, 1% кремній фториду морфоліну 0,005% високомолекулярного змочувача, 0,005% продукту окису етилену, або 5% розчин хлористого барію у воді, 1,5% нітриту натрію).

Рациональне поєднання матеріалів інструменту (шліфувального круга), режимів обробки, правки інструменту, МОТС дозволяє одержувати високу точність та необхідну якість обробленої поверхні.

1.7 Особливості правки шліфувальних кругів

При шліфуванні важливим питанням є забезпечення геометричної форми інструменту – шліфувального круга, яке напряму визначає якість і точність обробки. Для цього широко застосовується правка шліфувального круга, необхідність якої визначається ступенем втрати геометричних розмірів і ріжучої здатності. В залежності від шліфувального круга, що використовується, правка здійснюється різними типами інструментів і методами, але для відновлення профілю найчастіше застосовують саме алмазний інструмент (рисунок 1.5) [34].

Для отримання вихідної інструментальної поверхні за дугою кола правку круга здійснюють методом обточування. Для цього використовують алмазні олівці

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ГОСТ 607-80 (рисунок 1.5, а). Вони набули широкого використання внаслідок простоти їх конструкції, жорсткості, багатоваріантності характеристик за розмірами, кількості і розташуванню алмазів, рівномірного розподілу навантаження між алмазними зернами, низької вірогідності руйнування алмазів і низької вартості. Утворення, з часом, площадок зношування, негативно впливають на відновлення геометричного профілю круга, що обмежує використання даного типу олівців.

Рисунок 1.5 – Алмазні інструменти, для правки шліфувального круга:

а – алмазний олівець; б – алмаз в оправі; в – алмазна гребінка;

г – алмазній різець, д – алмазний ролик

З однокристалних алмазних інструментів для правки використовуються природні алмази в оправці ГОСТ 22908-81 (рисунок 1.5, б) і алмазні різці (рисунок 1.5, г). Вони мають сформовані гострі різальні кромки, тому поверхня інструменту після правки якісніша ніж після правки олівцями [25], але якість правки забезпечується обробленим кристалом алмазу, якому при огранці надається

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

необхідна геометрична форма і формуються різальні кромки. Сам процес правки відбувається за широко прийнятою схемою як на спеціальному, так і на універсальному обладнанні [35]. Алмазу надається еквідістантний рух до профілю круга, що обертається, за допомогою якого і поновлюється геометрична форма інструмента. До недоліків алмазного однокристалного інструменту (алмаз в оправі, алмазний різець) відноситься необхідність його частішої перестановки і повторних огранок алмазу. Тому частіше застосовують алмазні гребінки (рисунки 1.5, в), в яких алмази подовженої форми закріплені по периферії і бічних сторонах пластин. Алмазні гребінки забезпечують високу точність правки і мають стійкість в 10-15 разів вищу, ніж одно кристальний інструмент [36].

Продуктивність даного процесу правки можна підвищити, якщо використати в якості правлячого інструменту алмазні ролики (рисунки 1.5, д). Правку здійснюють методом обточування, при якому використовують вузький ролик, який обертається в напрямку протилежному обертанню шліфувального круга, отримуючи обертовий рух від двигуна [11]. Цей метод є більш ефективним з точки зору витрат машинного часу та вимагає застосування простого, надійного і точного правлячого пристрою.

Точність процесу обробки і використання правки під час обробки (між проходами) вимагає використання спеціальних пристроїв правки, що закріплюються безпосередньо до станини чи шліфувальної бабки верстату. На практиці використовуються прості пристрої, в яких кількість рухомих вузлів стараються звести до мінімуму (рисунки 1.6 [37]).

Пристрій правки (рисунки 1.6, а) встановлюється на корпусі задньої бабки верстату Jainnher JHP-3506, подібне рішення застосовано для верстатів Studer S33CNC. Перевагою такого способу є простота, універсальність, правлячі рухи виконуються від системи ЧПК верстату, не потребує додаткових приводів, до недоліків можна віднести складність налаштування [37].

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Спосіб правки шліфувального круга (рисунок 1.6, б) алмазним роликом є більш прогресивним, дозволяє отримувати правлену поверхню високої точності, а разом з застосуванням відповідних пристроїв скоротити час операції.

Рисунок 1.6 – Пристрої правки шліфувального круга верстатів:
а – Jainnher JHP-3506; б – Palmary OCD32100

Для шліфування оправок з криволінійною твірною необхідно використовувати правку шліфувального круга за дугою кола.

Висновки до розділу 1

Проведений аналітичний огляд сучасного стану технології виготовлення маложорстких деталей круглого перерізу з криволінійною утворюючою на прикладі оправок станів холодної прокатки труб, а також дослідження в області управління процесу шліфування підтверджують актуальність й важливість проблеми забезпечення необхідної жорсткості технологічної обробляючої системи та створення системи автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ для оброблення таких деталей, що автоматично визначатимуть всі параметри процесу різання.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У теоретичному плані залишається актуальною проблема розробки концепції оптимального управління процесом різання, створення адекватної, інформативної математичної моделі процесу різання. Відсутність надійного математичного алгоритму стримує процес впровадження передових технологій в цьому напрямку.

Отже, **мета дослідження** – є створення передумов для повного управління процесом шліфування робочої поверхні оправки стану холодного прокатування труб. **Об'єктом розробки** є технологічний процес шліфування безшовних труб, а **предметом** – закономірності впливу режимних параметрів, а також умов обробки на якість обробки.

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

- розробити математичні моделі, що описуватимуть процес створення робочої поверхні оправки станів холодної прокатки труб для верстату з ЧПК шліфувальним кругом, а саме: модель правки шліфувального круга; модель формоутворення; модель геометричної взаємодії опор лунету з поверхнею заготовки;

- визначити вплив складових режиму різання на детерміновану складову шорсткості поверхні;

- запропонувати методику та провести дослідження жорсткості технологічної оброблюваної системи, а також отримати математичну модель залежності обмежень від режиму різання;

- приділити увагу питанням економічної ефективності, охорони праці та захисту довкілля.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Технологічна схема шліфування

Оскільки оправки станів холодного прокатування труб [56] виготовляють зі спеціальної сталі (Сталь 60С2ХФА, твердість НРС 54..58), до них висуваються жорсткі вимоги за точністю (допуск на діаметр робочої частини $\pm 0,03\text{мм}$) та якістю поверхні (R_a 0,16 мкм), тому для обробки робочої поверхні таких оправок застосовують операцію шліфування (рисунок 2.1).

Рисунок 2.1 – Схема операції шліфування робочої поверхні оправки
стана холодного прокатування труб

Заготовка 1 встановлена в центрах 2, 3 і оброблюється шліфувальним кругом 4, вихідна інструментальна поверхня якого виконана за дугою кола, радіусом R_s , центр розташування якого визначається з технологічних міркувань та геометричних умов формоутворення.

Як вже зазначалось, за своїми геометричними параметрами оправки станів холодного прокатування труб відносяться до деталей малої жорсткості (відношення довжини до діаметра 50...80) і мають складну робочу поверхню круглого перерізу зі зміною координати x за довжиною z за спеціальним законом:

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$x_i = 0,5 \left[d_{\min} + (d_{\max} - d_{\min} - kL_r) \left(\frac{z_i}{L_r} \right)^n + kz_i^2 \right], \quad (2.1)$$

де d_{\min} , d_{\max} – мінімальний і максимальний діаметри робочої частини оправки;

L_r – довжина робочої частини;

k – початкова конусність;

n – показник степені.

В технологічній схемі операції застосований спеціальний люнет 5 з керуванням від системи ЧПК, що нерухомо встановлений напроти шліфувального круга [57].

Рух за координатою Z виконується столом (рисунок 2.2), на якому встановлено заготовку в центрах, а шліфувальний круг одночасно з опорою люнету виконує рух за координатами X і U відповідно.

Рисунок 2.2 – Оправка стану холодного прокатування труб в робочій зоні верстата

В зв'язку з застосуванням верстату з ЧПК і спеціального люнета технологічна підготовка операції шліфування повинна полягати у проектуванні управляючої програми.

Для забезпечення технологічної операції шліфування оправок станів холодного прокатування труб на круглошліфувальних верстатах з ЧПК з використанням спеціального люнету з двома опорами, що управляється від системи ЧПК верстату, необхідно розробити математичні моделі геометричної

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

взаємодії шліфувального круга і опор лунету з поверхнею заготовки, що обробляється.

2.2 Математична модель правки шліфувального круга

Перша задача полягає у визначенні траєкторії правлячого алмазу для формування вихідної інструментальної поверхні шліфувального круга за дугою кола. Оскільки правка виконується на верстаті з ЧПК, то в результаті розрахунків за математичною моделлю має утворитись масив даних, який потім перетворюється у G-коди для управління. З особливостей системи ЧПК, що застосовується та початку координат, який обирається при налаштуванні виникла необхідність розрахунку масиву даних за схемою лінійної інтерполяції.

Правка шліфувального круга 1 виконується в системі координат верстата правлячим алмазом 2 (рисунок 2.3). Причому траєкторія руху має забезпечувати деякий перебіг, тобто рух за координатою Z здійснюється на ділянці $z_1 - z_2$. Масив даних для управління розраховується з заданим кроком h_1 . З геометричних співвідношень (рисунок 2.3) можна знайти кут на якому здійснюється правка:

$$\varphi = \arcsin \frac{B_1 + l_1}{R_s} + \arcsin \frac{B_2 + l_1}{R_s}, \quad (2.2)$$

де $B_1 + B_2$ – ширина круга;

l_1 – шлях перебігу правлячого алмазу.

Для розрахунку масиву даних при заданому кроці за довжиною дуги шліфувального круга необхідно визначити крок зміни полярного кута:

$$\delta\alpha = \arcsin(h_1 / R_s). \quad (2.3)$$

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 2.3 – Схема формоутворення при правці

Таким чином, масив траєкторії правки, що визначатиме форму шліфувального круга:

$$\begin{cases} (z_k)_i = z_0 - R_s \sin(i \cdot \delta\alpha) \\ (x_k)_i = x_0 + R_s \cos(i \cdot \delta\alpha) \end{cases} \quad (2.4)$$

де номер i змінюється від 0 до $\text{round}(\varphi / \delta\alpha)$.

2.3 Модель формоутворення

Друга задача полягає у визначенні геометричних параметрів еквідистанти і вирішується з аналізу геометричних співвідношень схеми формоутворення (рисунок 2.4). Для утворення заданої поверхні 1 центр вихідної інструментальної поверхні шліфувального круга 2 має рухатись за еквідистантою 3, а постійний

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контакт опори лонету 4 з поточною поверхнею забезпечує жорсткість деталі під час обробки.

Рисунок 2.4 – Розрахункова схема формоутворення

Відповідно до методики, розробленої у [58], вихідні дані геометричної моделі поверхні трансформуються у цифровий масив: $x_i=F(z_i)$, який відповідає обраній схемі формоутворення на верстаті. Завдяки такому підходу утворюються дискретна геометрична модель поверхні оправки (умовно позначена точками на рисунку 2.4), яка використовується в подальших розрахунках для проектування програми управління формоутворюючим рухом і рухом опори лонету. Для

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

створення такої цифрової моделі профілю оправки використовується залежність (2.1).

Для розрахунку еквідистанти 3, по якій повинен рухатися центр вихідної інструментальної поверхні шліфувального круга 2, використовуються чисельні методи. В кожній точці цифрової моделі профілю оправки визначаються кут нахилу дотичної γ_i [59], який визначає еволюту кривої в точці, що задає положення шліфувального круга в залежності від радіуса округлення вихідної інструментальної поверхні. Для перевірки умов формоутворення за радіусом округлення вихідної інструментальної поверхні R_s , відбувається розрахунок радіусу кривизни поверхні в кожній точці математичної моделі поверхні оправки [59].

Математична модель формоутворення будується за принципом перетворення профілю оправки в цифрову модель [58], що дозволяє використовувати її і для моделювання процесу зрізування припуску. На початку розраховується цифровий масив кутів нахилу нормалі в кожній точці з певним, наперед вибраним кроком та з використанням залежності (2.1):

$$\gamma_i = \frac{\arctg[(x_i - x_{i-1}) / (z_i - z_{i-1})] + \arctg[(x_{i+1} - x_i) / (z_{i+1} - z_i)]}{2}. \quad (2.5)$$

Далі визначається цифровий масив радіусів кривизни:

$$(R_k)_i = \frac{\sqrt{[(z_{i-1} - z_{i+1}) / 2]^2 + [(x_{i-1} - x_{i+1}) / 2]^2}}{\gamma_{i+1} - \gamma_{i-1}}, \quad (2.6)$$

який використовується для вибору радіуса округлення периферії шліфувального круга $R_s < \min[R_k]_i$.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок формоутворюючих траєкторій виконується за залежностями, що отримані з геометричних умов взаємодії вихідної інструментальної поверхні шліфувального круга і поверхні деталі (рисунок 2.4):

$$\begin{cases} (z_k)_i = z_i - l_s + R_s \sin(\gamma_i) \\ (x_k)_i = H + R_s \cos(\gamma_i) + x_i - R_s \end{cases} \quad (2.7)$$

де $(z_k)_i$, $(x_k)_i$ – відповідні координати центру інструментальної поверхні шліфувального круга;

z_i , x_i – відповідні координати кінцевої обробленої поверхні оправки;

R_s – радіус округлення вихідної інструментальної поверхні шліфувального круга;

γ_i – кут нахилу дотичної;

H – величина припуску, що залишився на заготовці і який необхідно зрізати на наступних проходах;

l_s – величина перебігу шліфувального круга.

2.4 Модель геометричної взаємодії опор лунету з поверхнею заготовки

Для створення математичної моделі геометричної взаємодії опори спеціального лунету з поверхнею деталі необхідно розрахувати координати центра опори при обробці профілю оправки [58]. Особливістю геометричної взаємодії опори лунету і деталі є те, що лунет не змінює свого положення відносно шліфувального круга а положення і довжина дуги контакту шліфувального круга з деталлю постійно змінюється, що призводить до постійної зміни поверхні, по якій контактує опора і деталь. На рисунку 2.4 можна виділити три такі поверхні, що утворюються на заготовці в процесі шліфування: поверхня 5 – поверхня що була оброблена на поточному проході, поверхня 6 – поверхня різання, поверхня 7 – поверхня, що була оброблена на попередньому проході.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З плану швидкостей руху центра опори лунета у зворотній схемі (рисунок 2.4) можна визначити кут тиску в парі опора-поверхня: $\alpha = \text{arctg}(V_n / V_z)$, де $V_n = \delta x / \delta t$, $V_z = \delta z / \delta t$, тоді:

$$\alpha_i = \text{arctg}\left(\frac{\delta x_i}{\delta z_i}\right), \quad (2.8)$$

де величини приросту функції δx_i і приросту аргументу δz_i поточної поверхні деталі визначаються чисельним методом з наявного цифрового масиву:

$$\delta x_i = x_{i+1} - x_i, \quad \delta z_i = z_{i+1} - z_i. \quad (2.9)$$

Виходячи з того, що в управляючій програмі задається тільки одна координата $(z_k)_i$, оскільки вона визначає переміщення стола верстата, для розрахунку координати $(u_0)_i$ лунета спочатку треба знайти координату z_{3i} за виконанням умови:

$$z_{3i} \geq (z_k)_i - B, \quad (2.10)$$

де B – відстань між осями опори лунета і шліфувального круга, яка є постійною оскільки визначена конструкцією верстата.

Тепер можна визначити координату $(u_0)_i$ з розмірного ланцюга схеми за рисунком 2.4:

$$(u_0)_i = x_{3i} + O'K' + K'F', \quad (2.11)$$

де x_{3i} – координата за віссю X , що відповідає знайденій за умовою (2.10) координаті z_{3i} з цифрового масиву, який визначає форму заготовки в процесі шліфування.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З прямокутного трикутника ΔEKO маємо:

$$OK = R_0 \cos \alpha_i = O'K'. \quad (2.12)$$

З розмірного ланцюга за напрямом вісі Z та з трикутника ΔEKF маємо:

$$EK' = R_0 \sin \alpha_i + (z_k)_i - z_{3i} + B, \quad (2.13)$$

звідки:

$$K'F' = (R_0 \sin \alpha_i + (z_k)_i - z_{3i} + B) \operatorname{tg} \alpha_i. \quad (2.14)$$

Після підстановки (2.12) і (2.13) в (2.11) остаточно отримуємо формулу, придатну для розрахунків:

$$(u_0)_i = x_{3i} + R_0 \cos \alpha_i + (R_0 \sin \alpha_i + (z_k)_i - z_{3i} + B) \operatorname{tg} \alpha_i. \quad (2.15)$$

Розроблена математична модель може бути використана в САМ системі автоматизованого проектування управляючої програми ЧПУ для модернізованого шліфувального верстата 3К152ВФ20.

2.5 Аналітичне визначення впливу складових режиму різання на детерміновану складову шорсткості поверхні

У відповідності до схеми технологічної операції, зрізування припуску при шліфуванні робочої поверхні оправки відбувається за наступними рухами: за координатою Z – виконується столом верстата, на якому встановлено заготовку в центрах, а шліфувальний круг одночасно з опорою лонету виконує рух за координатами X і U відповідно.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З аналізу представленої схеми шліфування (рисунок 2.1) з повздовжньою подачею впливає деяка специфіка шліфування оправки: робоча поверхня оправки представляється розрахунковими перерізами, які створюють криволінійний профіль, завдяки чому шліфувальний круг повинен рухатись по еквідистанті до поверхні за умовами формоутворення; ріжучий інструмент – шліфувальний круг, вихідна інструментальна поверхня якого виконана за дугою кола, звідки вплив на шорсткість обробленої поверхні; під час обробки при незмінних режимах різання ($n_d = \text{const}$) швидкість обертання деталі V_d змінюється в залежності від діаметру оправки d в перерізі, що призводить до зміни швидкості зрізування припуску. Всі ці особливості показують, що умови різання є суттєво квазістаціонарними і потребують постійного управління.

Тому для забезпечення технологічної операції шліфування оправок станів холодного прокатування труб на круглошліфувальних верстатах з ЧПК необхідно розробити математичні моделі для визначення оптимальних режимів різання, що, безумовно, підвищить продуктивність обробки при забезпеченні необхідної якості та точності обробленої поверхні.

Зрізування припуску під час операції шліфування оправки станів холодного прокатування труб відбувається за рахунок наступних рухів: повздовжньої подачі деталі $S_{\text{пов}}$, поперечної подачі шліфувального круга $S_{\text{поп}}$, а також деталі надається частота обертання n_d . Причому поперечна подача відбувається дискретно, тобто шліфувальний круг переміщується на величину подачі один раз за прохід за всією поверхнею деталі, що оброблюється. Всі ці параметри визначають швидкість зрізування припуску та продуктивність операції.

Таким чином, для технологічної підготовки операції шліфування оправки на верстаті з ЧПК необхідно розробити математичні моделі для визначення приведених вище складових режиму різання.

Повздовжня подача, що допускається необхідною шорсткістю R_z обробки, може бути визначена за детермінованою складовою профілю шорсткості обробленої поверхні – величина гребінця, утвореного двома сусідніми

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

положеннями шліфувального круга (рисунок 2.5). На рисунку 2.5 зображено два положення різального інструменту з радіусом округлення R_s на відстані повздожньої подачі $S_{пов}$ одне від одного. Висота нерівностей $R_z=EF$ визначається наступним чином:

$$R_z = EF = OF - OK - AK. \quad (2.16)$$

Рисунок 2.5 – Схема визначення детермінованої складової шорсткості

Значення ОК визначаємо із $\triangle OKA$:

$$OK = \sqrt{OA^2 - AK^2}. \quad (2.17)$$

Із $\triangle ABM$ маємо $\cos \gamma = \frac{AM}{AB}$ або $AB = \frac{AM}{\cos \gamma}$, з врахуванням $AM = S_{пов}$:

$$BK = AK = \frac{AB}{2} = \frac{S_{пов}}{2 \cos \gamma}. \quad (2.18)$$

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підставляючи (2.18) в (2.17), з врахуванням $OB = R_{кр} - R_s$:

$$OK = \sqrt{(R_{кр} - R_s)^2 - \left(\frac{S_{пов}}{2 \cos \gamma}\right)^2} . \quad (2.19)$$

Значення ЕК визначаємо із ΔEKA :

$$EK = \sqrt{EA^2 - AK^2} . \quad (2.20)$$

Підставляючи (2.18) в (2.20), з врахуванням $EA = R_s$:

$$EK = \sqrt{R_s^2 - \left(\frac{S_{пов}}{2 \cos \gamma}\right)^2} . \quad (2.21)$$

Підставляючи (2.19), (2.21) в (2.16), з врахуванням $OF = R_{кр}$:

$$R_z = R_{кр} - \sqrt{(R_{кр} - R_s)^2 - \left(\frac{S_{пов}}{2 \cos \gamma}\right)^2} - \sqrt{R_s^2 - \left(\frac{S_{пов}}{2 \cos \gamma}\right)^2} . \quad (2.22)$$

Вирішивши рівняння (2.22) відносно $S_{пов}$ маємо залежність для розрахунку допустимої повздовжньої подачі:

$$S_{пов} = \sqrt{R_z(R_z - 2R_s)(2R_zR_s - 4R_sR_{кр} + 4R_{кр}^2 - R_z^2)} \cdot \frac{\cos \gamma}{(R_s - R_z)} . \quad (2.23)$$

де R_s – радіус округлення вихідної інструментальної поверхні шліфувального круга;

R_z – висота нерівностей профілю оправки;

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$R_{кр}$ – радіус кривизни поверхні в кожній точці математичної моделі поверхні оправки [58];

γ_i – кут нахилу дотичної, який визначає еволюту кривої в точці, що задає положення шліфувального круга в залежності від радіуса округлення вихідної інструментальної поверхні [58].

Таким чином, задаючись допустимою висотою нерівностей R_z , яку треба визначати з запасом на випадкову складову мікронерівностей, застосовуючи залежність (2.23), можливо визначити необхідну величину повздовжньої подачі $S_{пов}$.

Висновки до розділу 2

1 Розроблена математична модель формоутворення вихідної інструментальної поверхні шліфувального круга за дугою кола, передбачає створення файлу управління рухами за координатами Z і X верстата за лінійною інтерполяцією.

2 Розроблена математична модель розрахунку еквідистанти вихідної інструментальної поверхні шліфувального круга. Разом з процедурами створення цифрових моделей профілю деталі і заготовки забезпечує можливість моделювання процесу зрізування припуску з визначенням необхідних параметрів для управління за оптимальним законом.

3 Створена математична модель вирішує задачі розрахунку координати положення люнету, що синхронізує його рух з рухом шліфувальної бабки за координатою переміщення столу верстата і таким чином забезпечує постійний контакт люнета з заготовкою на протязі всього циклу шліфування оправки.

4 Для технологічної підготовки операції шліфування оправки на верстаті з ЧПК розроблено математичні моделі для визначення складових режиму різання, які базуються на головній характеристики процесу – швидкості зрізування припуску.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Вимірювання жорсткості технологічної оброблюваної системи

Жорсткість технологічної оброблюваної системи шліфувального верстата визначалась експериментально на модернізованому круглошліфувальному верстаті з ЧПК моделі 3K152ВФ20. На рисунку 3.1 представлено робочу зону верстату. Експерименти виконувались при навантаженні технологічної оброблюваної системи за рахунок переміщення шліфувального круга 1 в напрямку оправки 2 через динамометр 3, яким вимірювалась сила навантаження.

Рисунок 3.1 – Вимірювання жорсткості технологічної оброблюваної системи круглошліфувального верстата 3K152ВФ20

Для вимірювання деформації технологічної оброблюваної системи на станині верстату встановлено індикатор 4 з ціною поділки 1мкм. Виміри проводились для оправки КРW25, що будуть оброблятися на верстаті, матеріал заготовки сталь 60С2ХФА, хімічний склад та фізико механічні властивості відповідно до ГОСТ 14959-79.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Визначення математичної моделі залежності обмежень від режиму різання

Границю по лінії 2 (дивись рисунок 2.7), лінії припалу, визначають два параметри: швидкість зрізування припуску $Q_{vд}$ в кінці циклу і критична величина H_k припуску. Як вже зазначалось, ці величини можуть бути визначені тільки на основі обробки експериментальних даних по дослідженню залежностей показників якості (глибини припалу і шорсткості) обробленої поверхні від режимів різання.

Дослідження виконувались верстаті з ЧПК 3K152ВФ20 (рисунок 3.2), для оправок КРВ-25, шліфувальний круг – ПП 600x80x305 14А 32 СМ1 К, правлений за дугою кола відповідно до управляючої програми, змащувально-охолоджуюча рідина – ЕМПО ТУУ30426690.002-99.

а) б)

Рисунок 3.2 – Загальний вид: а – робоча зона;

б – круглошліфувальний верстат 3K152ВФ20

Побудову плану експерименту було вирішено провести на основі рівномірно розподілених послідовностей з наступними діапазонами зміни факторів: для поперечної подачі на робочий хід $S_{\text{поп}}=0.005\dots0.015$ мм, для повздовжньої подачі $S_{\text{пов}}=120\dots800$ мм/хв і для частоти обертання деталі $n_{\text{дет}}=60\dots400$ об/хв.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вимірювання шорсткості поверхні проводилось портативним профілографом Surftest SJ-210 виробництва фірми Mitutoyo (рисунок 3.3).

Рисунок 3.3 – Профілограф Surftest SJ-210 (Mitutoyo, Японія)

Наступним етапом є побудова математичної моделі залежності параметрів якості (R_a , R_z) обробленої робочої поверхні оправки від режиму різання. У якості шуканих математичних моделей було прийнято лінійну модель з використанням поліному першого степеня, які матимуть вигляд:

$$R_a = a_0 + a_1 S_{\text{поп}} + a_2 n_{\text{дет}} + a_3 S_{\text{пов}} ; \quad (3.1)$$

$$R_z = b_0 + b_1 S_{\text{поп}} + b_2 n_{\text{дет}} + b_3 S_{\text{пов}} ; \quad (3.2)$$

де $a_0 \dots a_3$, $b_0 \dots b_3$ – емпіричні коефіцієнти;

$S_{\text{поп}}$ – поперечна подача на робочий хід;

$n_{\text{дет}}$ – частота обертання деталі;

$S_{\text{пов}}$ – повздовжня подача шліфувального круга.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На основі експериментальних даних, використовуючи метод найменших квадратів розраховуються емпіричні коефіцієнти, які визначають рівняння регресії (3.1) і (3.2). Для цього необхідно визначити вектор оцінок S коефіцієнтів для кожного з рівнянь регресії, який вираховується формулою загального виду:

$$S = (X^T X)^{-1} X^T Y , \quad (3.3)$$

де X – матриця вихідних умов, Y – матриця результатів.

Визначення залежності швидкості Q_v зрізування припуску при шліфуванні фасонної поверхні оправки необхідно проводити чисельним методом, застосовуючи моделювання геометричної взаємодії інструментальної поверхні із заготовкою за допомогою програмного забезпечення, інтерфейс якого зображено на рисунку 3.4.

Рисунок 3.4 – Інтерфейс прикладної програми «Моделювання геометричної взаємодії заготовки і шліфувального круга»

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зліва знаходяться вікна для введення відповідних написам вихідних даних. Після введення вихідних даних і їх перевірки, для початку процесу моделювання потрібно натиснути кнопку "Застосувати". У верхньому вікні з'являється зображення поверхні 1 оправки з припуском 2. Після підтвердження вибору проходу (парне число – прохід вліво, непарне – вправо) і вибору положення шліфувального круга, у вікні відображається поточна поверхня оправки, інструментальна поверхня 3 і точки входу/виходу шліфувального круга 4, 5.

У нижньому правому вікні відображається схема зрізування припуску, де при шліфуванні заготовки показано два положення шліфувального круга 6, 7, які відрізняються на величину повздовжньої подачі на оберт заготовки. Товщина шару, що зрізується – заштрихована область 8 – відповідає поперечній подачі на один прохід. Точка вершини гребінця 5, висота якої визначає детерміновану складову шорсткості. У нижньому лівому вікні відображається пляма контакту шліфувального круга і поточної поверхні оправки і величина аналогу швидкості зрізування припуску, для заданого проходу і положення шліфувального круга. Зліва знизу знаходяться функціональні кнопки.

За допомогою прикладної програми за вихідними даними (геометрія оправки) вираховуються значення швидкості Qv_d зрізування припуску при визначених умовами досліду режимів різання.

Наступним етапом є побудова математичної моделі залежності параметрів якості (R_a , R_z) обробленої робочої поверхні оправки станів холодної прокатки труб від швидкості зрізування припуску. У якості шуканих математичних моделей було прийнято степеневу модель:

$$R_a = a \cdot Qv^\alpha, \quad (3.4)$$

$$R_z = b \cdot Qv^\beta, \quad (3.5)$$

де a , b і α , β – емпіричні коефіцієнти і показники ступеня;

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Q_v – швидкість зрізування припуску, $\text{мм}^3/\text{с}$.

Висновки до розділу 3

1 Запропоновано методику вимірювання жорсткості технологічної оброблюваної системи.

2 Визначено методику отримання математичної моделі залежності обмежень від режиму різання. Дослідження виконували на круглошліфувальному верстаті із ЧПК моделі 3K152ВФ20. Вимірювання шорсткості поверхні здійснювалось портативним профілографом Surftest SJ-210. У якості математичної моделі прийнято лінійну модель із використанням поліному першого ступеня.

3 Визначено методику побудови математичної моделі залежності параметрів якості (R_a , R_z) обробленої робочої поверхні оправки станів холодного прокатування труб від швидкості зрізування припуску.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

4.1 Вимірювання жорсткості технологічної оброблюваної системи

Жорсткість технологічної оброблюваної системи шліфувального верстата залежить від багатьох факторів, в тому числі від розмірів заготовки і способу її встановлення, тому її визначення доцільно виконувати за експериментальними даними (методика – див. розділ 3).

Результати вимірювань заносились в таблиці 4.1, за якими побудовані графіки, що представлені на рисунку 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати вимірювань

№	Показники індикатора динамометра, мм	Сила Р, Н	Деформація, мм		Р· $\Delta_{\text{нав.}}$	Р ²
			$\Delta_{\text{нав.}}$	$\Delta_{\text{розв.}}$		
1	2	3	4	5	6	7
1	0,01	26	0,005	0,003	0,131	682
2	0,02	52	0,012	0,008	0,627	2729
3	0,03	78	0,022	0,015	1,724	6140
4	0,04	104	0,036	0,03	3,761	10916
5	0,05	131	0,043	0,037	5,616	17056
6	0,06	157	0,056	0,051	8,776	24561
7	0,07	183	0,066	0,058	12,067	33430
8	0,08	209	0,076	0,071	15,881	43664
9	0,09	235	0,09	0,078	21,157	55263
10	0,1	261	0,095	0,085	24,814	68225
11	0,11	287	0,105	0,096	30,169	82553
12	0,12	313	0,11	0,101	34,478	98245

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5	6	7
13	0,13	340	0,121	0,11	41,087	115301
14	0,14	366	0,126	0,113	46,076	133722
15	0,15	392	0,133	0,125	52,109	153507
16	0,16	418	0,137	0,128	57,255	174657
17	0,17	444	0,145	0,133	64,386	197172
18	0,18	470	0,15	0,14	70,524	221050
19	0,19	496	0,158	0,15	78,412	246294
20	0,2	522	0,162	0,162	84,629	272902
					$\Sigma P \cdot \Delta_{\text{нав.}} = 653,679$	$\Sigma P^2 = 1958070$

За цими графіками (рисунок 4.1) можна визначити жорсткість технологічної

Рисунок 4.1 – Графіки залежності деформації технологічної оброблюваної системи від прикладеної сили: 1 – навантаження; 2 – розвантаження

оброблюваної системи. Шукана жорсткість одночасно є коефіцієнтом лінійної залежності деформації від сили навантаження, який можливо визначити методом найменших квадратів за формулою у відповідності до експериментальних даних таблиці 4.1:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n P^2}{\sum_{i=1}^n P \Delta_{\text{нав.}}} = \frac{1958070}{653,679} = 2995,46 \text{ Н/мм.} \quad (4.1)$$

4.2 Експериментальне визначення математичної моделі залежності обмежень від режиму різання

В таблицю 4.2 заносились результати вимірювань шорсткості обробленої поверхні оправки. Вимірювання шорсткості поверхні проводилось портативним профілографом (розділ 3).

Таблиця 4.2 – Результати експериментів

№	Аналог швидкості зрізування припуску Q, мм ²	Швидкість обертання деталі V _д , мм/с	Швидкість зрізування припуску Q _v , мм ³ /с	Шорсткість, мкм	
				R _a	R _z
1	2	3	4	5	6
1	0,092995	50,23	4,671484791	0,316	1,578
2	0,060969	57,96	3,533776247	0,178	0,897
3	0,059675	83,22	4,966056429	0,229	1,149
4	0,032786	104,52	3,426934356	0,125	0,629
5	0,03562	124,72	4,442666743	0,179	0,894
6	0,017163	145,60	2,49885591	0,119	0,523
7	0,019056	167,10	3,184343733	0,139	0,696
8	0,04357	187,45	8,16727144	0,454	2,273

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5	6
9	0,187914	50,23	9,43961926	0,37	1,854
10	0,122759	57,96	7,115137829	0,208	1,039
11	0,120354	83,22	10,0156641	0,268	1,336
12	0,065821	104,52	6,879895267	0,148	0,742
13	0,071564	124,72	8,925744042	0,209	1,065
14	0,034397	145,60	5,008049101	0,137	0,648
15	0,038172	167,10	6,378713737	0,159	0,797
16	0,087805	187,45	16,45919827	0,531	2,658
17	0,283393	50,23	14,23588461	0,423	2,135
18	0,184875	57,96	10,71539444	0,239	1,198
19	0,181319	83,22	15,08907223	0,307	1,536
20	0,098988	104,52	10,34665339	0,169	0,847
21	0,107628	124,72	13,42378821	0,24	1,249
22	0,051679	145,60	7,524230878	0,154	0,716
23	0,057321	167,10	9,578598191	0,176	0,876
24	0,132123	187,45	24,7666836	0,608	3,045

На основі експериментальних даних (таблиця 4.2), використовуючи метод найменших квадратів розраховуються емпіричні коефіцієнти, які визначають рівняння регресії (3.1) і (3.2).

Були обраховані вектори А і В оцінок коефіцієнтів для кожного з рівнянь регресії відповідно:

$$A = (X^T X)^{-1} X^T Y_{Ra} \quad (4.2)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0.143 \\ 7.2404 \\ -11.236 \cdot 10^{-4} \\ 10.029 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix};$$

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y_{Rz} \quad (4.3)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.714 \\ 37.1503 \\ -57.924 \cdot 10^{-4} \\ 51.136 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

Таким чином остаточно рівняння регресії (3.1) і (3.2) приймають вигляд:

$$R_a = 0.143 + 7.2404 \cdot S_{\text{поп}} - 11.236 \cdot 10^{-4} \cdot n_{\text{дет}} + 10.029 \cdot 10^{-4} \cdot S_{\text{пов}}, \quad (4.5)$$

$$R_z = 0.714 + 37.1503 \cdot S_{\text{поп}} - 57.924 \cdot 10^{-4} \cdot n_{\text{дет}} + 51.136 \cdot 10^{-4} \cdot S_{\text{пов}}, \quad (4.6)$$

де $S_{\text{поп}}$ – поперечна подача на робочий хід;

$n_{\text{дет}}$ – частота обертання деталі;

$S_{\text{пов}}$ – повздовжня подача шліфувального круга.

Для визначення закону управління режимом різання, що забезпечуватиме необхідну шорсткість обробленої поверхні при максимально можливій продуктивності, можна безпосередньо скористатись залежностями (4.5) і (4.6). Проте, підхід, що базується на застосуванні головного комплексного показника процесу шліфування, яким є швидкість зрізування припуску, надає можливість звести вирішувану задачу до однофакторної моделі.

За допомогою прикладної програми за вихідними даними (геометрія оправки) вираховуються значення швидкості Q_{v_d} зрізування припуску при визначених

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

умовами досліджу режимів різання. Результати моделювання занесені до таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати моделювання і шліфування поверхні оправки

№	Аналог швидкості зрізування припуску Q, мм ²	Швидкість обертання деталі V _д , мм/с	Швидкість зрізування припуску Q _v , мм ³ /с	Шорсткість, мкм	
				R _a	R _z
1	2	3	4	5	6
1	0,092995	50,23	4,671484791	0,316	1,578
2	0,060969	57,96	3,533776247	0,178	0,897
3	0,059675	83,22	4,966056429	0,229	1,149
4	0,032786	104,52	3,426934356	0,125	0,629
5	0,03562	124,72	4,442666743	0,179	0,894
6	0,017163	145,60	2,49885591	0,119	0,523
7	0,019056	167,10	3,184343733	0,139	0,696
8	0,04357	187,45	8,16727144	0,454	2,273
9	0,187914	50,23	9,43961926	0,37	1,854
10	0,122759	57,96	7,115137829	0,208	1,039
11	0,120354	83,22	10,0156641	0,268	1,336
12	0,065821	104,52	6,879895267	0,148	0,742
13	0,071564	124,72	8,925744042	0,209	1,065
14	0,034397	145,60	5,008049101	0,137	0,648
15	0,038172	167,10	6,378713737	0,159	0,797
16	0,087805	187,45	16,45919827	0,531	2,658
17	0,283393	50,23	14,23588461	0,423	2,135
18	0,184875	57,96	10,71539444	0,239	1,198
19	0,181319	83,22	15,08907223	0,307	1,536

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5	6
20	0,098988	104,52	10,34665339	0,169	0,847
21	0,107628	124,72	13,42378821	0,24	1,249
22	0,051679	145,60	7,524230878	0,154	0,716
23	0,057321	167,10	9,578598191	0,176	0,876
24	0,132123	187,45	24,7666836	0,608	3,045

Використовуючи підстановку і метод найменших квадратів були визначені емпіричні коефіцієнти і показники ступеня для кожного з рівнянь регресії, які приймають вигляд:

$$R_a = 0,06835 \cdot Qv^{0.5945} , \quad (4.7)$$

$$R_z = 0,3233 \cdot Qv^{0.6187} . \quad (4.8)$$

Висновки до розділу 4

1 Проведено вимірювання жорсткості технологічної оброблюваної системи.

2 Експериментально визначено математичну модель залежності обмежень від режиму різання, а саме жорсткості R_a , R_z від поперечної подачі на робочий хід, частоти обертання деталі та поздовжньої подачі шліфувального круга. Окрім цього, вирішувана задача зведена до одно факторної моделі із застосуванням головного комплексного показника процесу шліфування, яким є швидкість зрізання припуску.

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

5.1 Економічна ефективність впровадження результатів досліджень

Головними факторами з точки зору економічної ефективності від впровадження запропонованої методики у виробництво є: скорочення термінів і витрат на освоєння нової техніки, зменшення витрат, пов'язаних з відпрацюванням технологічних процесів виготовлення деталей і складання виробів, підвищення надійності, довговічності та експлуатаційної придатності виробів (таблиця 5.1). Скорочення термінів створення нової техніки має важливе економічне значення. Тривалі терміни розробки та освоєння нової продукції знижують ефективність суспільного виробництва.

По-перше, подовження термінів впровадження нових розробок у виробництво знижує ефективність вкладених коштів, заморожує їх, зменшує можливий приріст національного доходу.

По-друге, уповільнення періоду освоєння нової техніки призводить до того, що ця техніка застаріває ще до того, як починається її експлуатація, вона не дає очікуваного економічного ефекту.

По-третє, подовження строків освоєння наукових досягнень веде до того, що народне господарство не має того потенційного економічного ефекту, який міг би бути отриманий при своєчасному впровадженні нової техніки.

Зосереджуючи значні трудові, матеріальні та грошові ресурси, сфера підготовки виробництва впливає на ефективність роботи підприємств за рахунок кращого використання цих ресурсів, забезпечення високих темпів створення нових видів техніки при мінімальних витратах живої та уречевленої праці.

Підготовка виробництва впливає на рівень ефективності суспільного виробництва тим, що створює нову високоефективну продукцію та методи її виготовлення.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 5.1 – Порівняння методів роботи технологів за ефективністю

Основні фактори, що впливають на економічну ефективність	Традиційний метод роботи технолога	Застосування комп'ютерного аналізу
	1 варіант	2 варіант
Продуктивність праці технолога	нижче	вище
Якість розробки технологічних процесів (зменшення технологічних помилок)	нижче	вище
Оптимізація технологічних процесів (режими різання та інші технологічні умови обробки)	звичайно не виконуються	можлива
Зниження термінів технологічної підготовки виробництва нових деталей та виробів	ні	так
Терміни проектування та виготовлення зразків нової продукції	більше	менше
Витрати на гарантійний ремонт виробів, що уведені в експлуатацію	більше	менше
Гнучке керування ходом технологічного процесу	не передбачено	передбачено
Витрати часу на відпрацювання та перевірку режимів різання для нових деталей	значні, часто потрібна пробна партія	менше, пробна партія може не виготовлятися
Кількість баракової продукції та продукції	більше	менше
Зниження трудомісткості робіт при впровадженні методик автоматизованих розрахунків у виробництво	До 40%	

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Розглянемо в чому виражається ефект від впровадження розрахункової методики в існуючі САПР системи і її використання в процесі технологічної підготовки виробництва. Припустимо, що на підприємстві вже є автоматизоване робоче місце технолога, оснащене необхідним обладнанням і програмним забезпеченням. Економічну ефективність від удосконалення організації підготовки виробництва за рахунок окремих факторів, слід визначити розрахунками.

Економічний ефект від зниження витрат на підготовку виробництва E може бути визначений за наступною формулою:

$$E = \frac{P \cdot L \cdot t}{100} - \left(K_e + \frac{H}{100} \right) \cdot K, \quad (5.1)$$

де P – кількість працівників, зайнятих підготовкою виробництва, осіб;

L – середньорічна заробітна плата працівника з нарахуваннями, грн.;

t – зниження трудомісткості підготовки виробництва, %;

K_e – нормативний коефіцієнт економічної ефективності;

H – амортизація обладнання, %;

K – додаткові капітальні вкладення на здійснення заходів щодо удосконалення підготовки виробництва.

Розрахуємо передбачувану економічну ефективність від впровадження розробленої методики в процес технологічної підготовки виробництва для однієї деталі представника. У відповідності з формулою (5.1) приймаємо наступні значення параметрів: $P = 1$ – так як розрахунок проводимо для одного робочого місця технолога; $L = 96000$ грн.; $t = 40\%$ – у відповідності до таблиці 5.1, $K_e = 0,1$; $H = 13\%$ – амортизація обчислювальної техніки; $K = 30000$ грн. – витрати на оснащення автоматизованого робочого місця технолога. В результаті розрахунку отримуємо

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E = \frac{1 \cdot 96000 \cdot 40}{100} - \left(0,1 + \frac{13}{100} \right) \cdot 30000 = 31500 \text{ (грн.)}$$

Як було зазначено раніше, економічний ефект досягається шляхом механізації та автоматизації інженерної праці з використанням систем автоматизованого проектування. Основну роль при цьому відіграє зниження собівартості продукції за рахунок умовно-постійних витрат, що припадають на один виріб, внаслідок збільшення випуску нових виробів за рахунок умовно-змінних витрат, внаслідок зниження трудомісткості в період підготовки та освоєння виробництва, а також скорочення кількості браку, обсягу доводочних і ремонтних робіт. Враховуючи, що кількість типорозмірів деталей на виробництві може досягати декількох десятків, загальний економічний ефект буде досягати декількох сотень тисяч гривень.

5.2 Заходи із охорони праці під час роботи на металорізальному обладнанні

У механічному цеху металорізальні верстати повинні бути встановлені на міцних фундаментах, міцно закріплені болтами та клинками. Обертіві частини необхідно ретельно балансувати. Для безпечної роботи на верстатах необхідно використовувати блокування огорожень з пусковими та гальмівними пристроями. Таке блокування не дозволяє запустити верстат при знятому огороженні. Пускові пристрої на верстатах повинні виключати самовільне приведення верстата в рух. Обробка металу завжди супроводжується великою кількістю стружки. При несвоєчасному видаленні вона захащує виробниче приміщення та заважає обслуговувати верстати. Це може у деякій мірі бути причиною травм та пожежі. Самим раціональним способом вивозу стружки являється використання наземного чи конвеєрного методів, а в деяких випадках можна видаляти відходи пневматичними пристроями.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При роботі на шліфувальних верстатах травми можуть бути нанесені у результаті розриву шліфувальних кругів. Розрив круга може бути викликаний різними причинами: неправильний вибір режиму роботи, неправильне встановлення та кріплення круга на верстаті, дефекти. Усі абразивні інструменти, які призначені для експлуатації, повинні бути перевірені, випробувані на міцність, та відбалансовані. Інструменти потрібно убезпечувати від ударів, морозу та вологи. На складі повинні бути влаштовані стелажі, полки для зберігання кругів різних профілів, типорозмірів. Для здійснення безпечних умов праці на шліфувальних верстатах потрібно огороджувати круг кожухом із сталі або ковкого чавуну.

При роботі на фрезерних верстатах основними причинами, що можуть викликати нещасні випадки, є можливість доторкання руки працюючого до обертової фрези, відкидання фрези, розрив та відлітання фрези під дією відцентрової сили, недостатнє закріплення ножів фрези. Щоб уникнути травматизму на фрезерному верстаті шпиндель верстата огороджують попередньо. Фреза повинна бути закрита огороджувальним ковпаком, прикріпленим до столу верстата та переміщуватися за його площиною.

На металорізальних верстатах усі приводні та передаточні механізми у відповідності з правилами техніки безпеки розміщені у корпусі верстата або огорожені захисними пристроями. Вдало сконструйовані захисні елементи не тільки захищають працюючого, а й підвищують продуктивність його праці. Передаточні вали верстата можуть захоплювати та намотувати на себе частини одягу робітника. Особливо небезпечні вали, котрі мають виступаючі частини або шпонкові канавки. Такі вали повинні бути скриті у станині верстатів або бути огорожені.

Робота на токарних верстатах великих заготовок без пристосувань потребує від працюючого великих фізичних витрат, тому у відповідності з правилами техніки безпеки встановлювати на верстат важкі заготовки, пристосування та знімати їх із верстату потрібно спеціальними підйомними пристроями. Механізація

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

допоміжних операцій потрібна не тільки при серійному, а й при одиничному типах виробництва.

Захист від стружки при обробці може бути різним. При обробці металів виникають три види стружки: сколювання, надлому та зливна. Стружка зливна представляє найбільшу небезпеку для верстатника. Відлітаюча стружка виникає при обробці в'язких металів різцями, що оснащені стружкоподрібнюючими пристроями, а також при обробці чавуну. При швидкісній обробці чавуну, відлітаюча стружка утворює факел, у вигляді конуса з вершиною у місці відділення. Тому основним захистом від стружки є захисні окуляри, маска, захисні світлопроникні щитки, екрани та огороження, стружковідводники та стружковловлювачі. Окуляри відкритого типу з боковими стеклами більш зручні, ніж окуляри закритого типу з шкіряною оправкою. Єдиним недоліком окулярів є те, що вони захищають лише очі. При збільшенні сили різання вище 120 м/хв., гаряча стружка відлітає з великою силою і з'являється небезпека ураження не тільки очей, а й усього обличчя. У таких випадках потрібно використовувати не окуляри, а прозорі індивідуальні щитки, що виготовлені із органічного скла і захищають все лице від опіків та пошкоджень. Якщо швидкість різання перевищує 500 м/хв., тоді захисні щитки не допомагають. Рекомендується використовувати захисні екрани.

5.3 Концепція безвідходного виробництва

Концепція безвідходного виробництва містить декілька положень:

1) створення повністю безналогових підприємств та технологій для виготовлення з відходів високоякісної продукції за безвідходними екологічно чистими технологіями – екотехнологіями та звільнення від усіх податків споживачів даної продукції;

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2) об'єднання виробників продукції з відходів та споживачів продукції у єдиний кластер із регіональними відділеннями із включенням до складу представників академічної, галузевої та заводської науки;

3) виготовлення продукції з одного виду відходів та з поєднання декількох видів за композитними, повністю безвідходними технологіями із використанням комп'ютерних програм штучного інтелекту;

4) технології переробки відходів повинні забезпечувати повне збереження рівноваги із довкіллям, не чинити негативного впливу на нього та здоров'я людини.

Критерієм оцінки якості довкілля є гранично допустимі концентрації, розраховані на їх основі гранично допустимі викиди та гранично допустимі відходи.

Для кожного виду відходів – своя ефективна екологія, технологія, економіка.

Завод із знезараження токсичних відходів призначений для спалювання та фізико-хімічної переробки відходів з метою їх знезараження або зменшення токсичності, переведення у нерозчинну форму або скорочення об'єму відходів.

До складу заводу із знезараження токсичних промислових відходів входять: цех термічного утворення твердих, рідких гарячих та киснемістких відходів; цех фізико-хімічного знезараження твердих та рідких негорючих відходів; відділення знешкодження ртутних та люмінесцентних ламп.

Термічне знешкодження відходів представляє собою попереднє подрібнення відходів, а потім спалювання у печах за температури не нижче 1000°C. Після печей продукти потрапляють у камеру доспалювання при температурі 1200...1400°C, де досягається повне окислення продуктів неповного згорання. Потім газу, що відходять, потрапляють на очистку, а новоутворений шлак відправляють на захоронення. Наведені вище операції доцільно доповнити: у камері доспалювання газів, що відходять, необхідно підняти температуру до температури розкладання, а утворені шлаки направляти, залежно від хімічного складу, на виробництво

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

будівельних матеріалів, доріг, очисних споруд або на отримання рідкоземельних матеріалів тощо.

Доцільно термічне знезараження одних відходів суміщати із знезараженням інших відходів, а також поєднувати їх для отримання нових хімічних з'єднань та речовин, що суттєво підвищить їх ефективність.

Цех фізико-хімічного знешкодження має кілька відділень залежно від виду відходів. Так, у відділенні знешкодження ціановмісні відходи розчиняють і оброблюють гіпохлоритом зі зменшенням токсичності відходів у 1000 разів. У відділенні обробки гальванічних відходів токсичні метали переводять у менш токсичні або важкорозчинні з'єднання.

У хромомістких гальванічних стоках хром знаходиться у токсичному шестивалентному стані. Його відновлюють розчином сірчаної кислоти та залізним купоросом до трьохвалентного стану, а потім оброблюють лугами до отримання $\text{Cr}(\text{OH})_3$. Його, зазвичай, передають на захоронення, а не на отримання цінних продуктів.

Відділення знешкодження ртутних ламп має агрегати та систему очищення газів, стічних вод від ртуті із передаванням її у промисловість.

Висновки до розділу 5

1. Економічна ефективність від впровадження результатів наукового дослідження склала 31500 грн. на рік. Впровадження розробленої методики у процес технологічної підготовки виробництва дозволить скоротити терміни і витрати на освоєння нової техніки, зменшити витрати, пов'язані із обробкою технологічних процесів виготовлення деталей, підвищити надійність, довговічність та експлуатаційну придатність виробів.

2. Надано рекомендації із охорони праці стосовно роботи на металорізальному обладнанні.

3. Розглянуто концепцію безвідходного виробництва.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						61
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 Розроблено математичні моделі, що описують процес створення робочої поверхні оправки станів холодної прокатки труб для верстату з ЧПК шліфувальним кругом, а саме: модель правки шліфувального круга; модель формоутворення; модель геометричної взаємодії опор лунету з поверхнею заготовки.

2 Визначено вплив складових режиму різання на детерміновану складову шорсткості поверхні. Задаючись допустимою висотою нерівностей R_z , яку треба визначати із запасом на випадкову складову мікронерівностей, можливо визначити необхідну величину повздовжньої подачі $S_{пов}$.

3 Запропоновано методику вимірювання жорсткості технологічної оброблюваної системи. У якості математичної моделі прийнято лінійну модель із використанням поліному першого ступеня. Визначено методику побудови математичної моделі залежності параметрів якості (R_a , R_z) обробленої робочої поверхні оправки станів холодного прокатування труб від швидкості зрізування припуску.

4 Проведено вимірювання жорсткості технологічної оброблюваної системи. Експериментально визначено математичну модель залежності обмежень від режиму різання, а саме жорсткості R_a , R_z від поперечної подачі на робочий хід, частоти обертання деталі та поздовжньої подачі шліфувального круга. Окрім цього, вирішувана задача зведена до однофакторної моделі із застосуванням головного комплексного показника процесу шліфування, яким є швидкість зрізаня припуску.

5 Надані пропозиції стосовно забезпечення безпеки при роботі на технологічному обладнанні, приділено увагу питанням економічної ефективності та захисту довкілля.

					КРМ.133ГМмд_21.20.000 ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		