

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: «Підвищення точності та якості обробки отворів у деталях сільськогосподарської техніки за допомогою збірних розгорток»

КРМ.133ГМмд(ОНП)_21.05.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за міждисциплінарною освітньо-
науковою програмою
*«Сервісна інженерія в агро-
промисловому виробництві»*
спеціальностей 133 *«Галузеве
машинобудування»*, 208 *«Агроінженерія»*
ступеня вищої освіти *магістр*
групи 133ГМмд(ОНП)_21
БРМОТ Кирило

Керівник: докт. техн. наук, професор
ЗУБКО Владислав

Полтава – 2026 року

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Міждисциплінарна освітньо-наукова програма
«Сервісна інженерія в агропромисловому виробництві»
Спеціальності: 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія»
Ступінь вищої освіти *магістр*

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри механічної
та електричної інженерії,
канд. техн. наук, доцент,
_____ Станіслав ПОПОВ
30 червня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

БРОМОТ Кирило

1. Тема роботи: «Підвищення точності та якості обробки отворів у деталях сільськогосподарської техніки за допомогою збірних розгортки», керівник роботи **докт. техн. наук, доцент ВЕТОХІН Володимир**, затверджено засіданням кафедри, протокол №18 від 30.06.2025 р.

2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи – 20 травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: *аналіз літературних джерел Полтавської обласної універсальної наукової бібліотеки імені Івана Котляревського; аналіз літературних джерел Національної бібліотеки України імені Володимира Вернадського; сучасний досвід підприємств машинобудування та АПК за тематичним спрямуванням.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Розділ 1. Аналіз існуючих досліджень.

Розділ 2. Методика досліджень.

Розділ 3. Результати експериментів.

Розділ 4. Практична реалізація розробок.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу: *титольний аркуш; назва теми, мета і задачі дослідження; огляд літературних джерел; методика досліджень (моделі, плани експериментів, перевірка адекватності математичних моделей); результати експериментальних досліджень; висновки.*

6. Консультанти розділів *кваліфікаційної роботи*

Розділ	Власне ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання отримав
Практична реалізація розробок	Володимир ДУДНИК, доцент кафедри механічної та електричної інженерії		
	Петро МАКАРЕНКО, професор кафедри економіки та публічного управління		
	Павло ПИСАРЕНКО, завідувач кафедри екології, збалансованого природокористування та захисту довкілля		

7. Дата видачі завдання 30 червня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з.п.	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір і затвердження теми роботи	До 30.06.25	
2	Складання і затвердження розгорнутого плану та завдання на кваліфікаційну роботу	21.07-27.07.25	
3	Опрацювання літературних джерел	15.12-28.12.25	
4	Збір, вивчення і обробка інформації, необхідної для виконання роботи	20.04-26.04.26	
5	Виконання розділів роботи	27.04.26-10.05.26	
6	Оформлення тексту роботи		
7	Попередній захист роботи на кафедрі	11.05-15.05.26	
8	Доопрацювання роботи з урахуванням зауважень і пропозицій	18.05-20.05.26	
9	Нормалізаційний контроль		
10	Захист кваліфікаційної роботи	25.05-31.05.26	

Здобувач вищої освіти _____ Кирило БРОМОТ
(підпис)

Керівник роботи _____ Володимир ВЕТОХІН
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 4 розділи, 49 рисунків, 3 таблиці, 20 використаних джерел, 67 сторінок. **Ілюстраційна частина:** 11 слайдів.

Об'єкт дослідження – процес розгортання точних отворів у деталях машин і механізмів агропромислового виробництва.

Предмет дослідження – конструкції різцевих збірних розгорток із безвершинними зубами та їх вплив на точність відновлення і виготовлення отворів у деталях сільськогосподарської техніки.

Встановка актуальної технічної задачі – підвищення якості деталей сільськогосподарських машин.

Мета кваліфікаційної роботи магістра – дослідження конструкції металорізального інструменту, що забезпечує високу ефективність чистової операції розгортання, підвищення точності і якості обробки, зниження шорсткості оброблюваних деталей.

Практичне значення кваліфікаційної роботи магістра – надання рекомендацій стосовно удосконалення деталей машин і обладнання агропромислового виробництва.

У **першому розділі** проведено огляд існуючих досліджень щодо обробки точних отворів та конструкцій металорізальних розгорток. Показано переваги та недоліки традиційних інструментів і обґрунтовано доцільність застосування розгорток із безвершинними зубами. Розділ формує теоретичну базу для подальших досліджень.

Другий розділ описує методику проведення експериментів, включно з характеристиками верстатного обладнання, вимірювальних приладів і параметрами налаштування інструменту. Визначено порядок перевірки геометричної точності верстата та умови забезпечення достовірності експериментальних даних. Це створює основу для коректного аналізу результатів.

У **третьому розділі** наведено результати експериментальних досліджень роботи розгорток із безвершинними зубами за різних режимів обробки. Показано вплив геометрії та технологічних параметрів на точність і шорсткість отворів. Отримані дані підтверджують ефективність удосконаленого інструменту.

Четвертий розділ присвячений аналізу практичного застосування розроблених інструментів, зокрема їх безпечної експлуатації та економічної ефективності. Визначено можливі екологічні ризики та заходи для їх мінімізації. Показано, що впровадження запропонованих рішень є технічно і економічно доцільним.

Практичні результати роботи – розробка та випробування різцевих збірних розгорток із безвершинними зубами, які забезпечують підвищену точність і меншу шорсткість оброблених отворів. Експерименти підтвердили

покращення центрування інструменту, зменшення відхилень від круглості та підвищення стабільності процесу обробки.

Рекомендації щодо використання результатів роботи – результати роботи рекомендовано до використання на підприємствах сервісу та сільськогосподарського машинобудування.

Сфера застосування результатів роботи – виробничі підприємства машинобудівної галузі, агротехнічні сервісні центри, науково-дослідні та проектно-конструкторські організації.

Текст роботи пройшов перевірку на плагіат за допомогою відповідного сервісу та є оригінальним.

АНОТАЦІЯ

У роботі досліджено процес чистової обробки точних отворів у деталях машин агропромислового комплексу та удосконалено конструкцію різцевих збірних розгортків із безвершинними зубами. Проведено аналіз існуючих інструментів і визначено їхні обмеження щодо точності, стабільності різання та вібростійкості. Розроблено й обґрунтовано конструкції розгортків, які забезпечують покращене самоцентрування, підвищення точності діаметра та зниження шорсткості оброблених поверхонь. У межах експериментальних досліджень здійснено вимірювання точності та шорсткості, проаналізовано вплив режимів різання й геометрії зубів на якість отворів. Практична частина включає оцінку економічної ефективності й аналіз безпеки та екологічних аспектів процесу. Результати роботи можуть бути використані у виробничих і ремонтних підрозділах для підвищення надійності та довговічності техніки.

РЕЗГОРТАННЯ, ТОЧНІСТЬ ОБРОБКИ, ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХНІ, ОБРОБКА ОТВОРІВ, ОХОРОНА ПРАЦІ, ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ, ДОВКІЛЛЯ

ANNOTATION

This work investigates the process of finishing precise holes in agricultural machinery components and improves the design of assembled reamers equipped with tipless cutting teeth. An analysis of existing cutting tools was carried out, identifying their limitations in terms of accuracy, cutting stability, and vibration resistance. Enhanced reamer designs were developed and justified, ensuring improved self-centering, higher dimensional accuracy, and reduced surface roughness of machined holes. Experimental studies included measurements of accuracy and roughness, as well as an evaluation of how cutting regimes and tooth geometry influence hole quality. The practical section provides an assessment of economic efficiency, safety considerations, and environmental aspects of the machining process. The results can be applied in manufacturing and repair facilities to increase the reliability and service life of agricultural machinery.

REAMING, MACHINING ACCURACY, SURFACE ROUGHNESS, HOLE MACHINING, OCCUPATIONAL SAFETY, ECONOMIC EFFECT, ENVIRONMENT.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	8
1.1 Особливості обробки отворів різанням	8
1.2 Аналіз існуючих конструкцій розгортки	14
1.3 Розгортки із зубами-різцями без вершин	23
1.4 Удосконалення основних металорізальних інструментів	33
Висновки до розділу 1	36
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	37
2.1 Обладнання, прилади та матеріали	37
2.2 Перевірка точності металорізального обладнання	39
Висновки до розділу 2	43
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	44
3.1 Математична обробка результатів	44
3.2 Дослідження умов обробки на якість при постійній довжині обробки	52
3.3 Дослідження умов обробки на якість при змінній довжині обробки	54
Висновки до розділу 3	56
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК	58
4.1 Безпека робіт під час розгортання	58
4.2 Розрахунок економічного ефекту	60
4.3 Екологічна безпека при розгортанні	62
Висновки до розділу 4	63
ВИСНОВКИ	65
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	68

ВСТУП

Агропромислове виробництво характеризується високими вимогами до надійності, точності та довговічності машин і механізмів, що працюють у змінних та часто ускладнених умовах. В значній частині таких машин містяться відповідальні отвори та позадкові поверхні, до яких пред'являються високі вимоги щодо геометричної точності та шорсткості, адже саме ці параметри визначають ресурс роботи вузлів, якість з'єднань і стабільність функціонування агрегатів.

У системі сервісної інженерії особливе значення має забезпечення якісного технічного обслуговування, відновлення та ремонту деталей сільськогосподарської техніки. Одним із ключових процесів є механічна обробка та відновлення точних отворів шляхом розгортання. Саме ця операція дозволяє гарантувати відповідність ремонтних або виготовлених деталей заводським параметрам, підвищити термін служби вузлів і точність їх взаємодії.

Разом з тим традиційні конструкції розгортки не завжди забезпечують стабільність процесу при роботі з конструкційними сталями, характерними для деталей тракторів, комбайнів, ґрунтообробних та транспортних машин. Мала товщина зрізу, жорсткі експлуатаційні вимоги та обмеження ремонтних умов вимагають використання вдосконаленого інструменту з підвищеною точністю, вібростійкістю і довговічністю.

Тому актуальність роботи визначається необхідністю підвищення ефективності та якості відновлення деталей сільськогосподарської техніки шляхом удосконалення конструкцій розгортки, що забезпечують підвищену точність обробки отворів, стабільність технологічного процесу та високу експлуатаційну надійність.

У роботі аналізуються сучасні конструкції розгортки, досліджується вплив геометрії безвершинних зубів на формування якості поверхонь, виконується експериментальна оцінка їх роботи та визначаються шляхи підвищення ефективності сервісного інженерного обслуговування машин агропромислового комплексу шляхом впровадження високоточного інструменту.

Метою роботи є дослідження конструкції металорізального інструменту, що забезпечує високу ефективність чистової операції розгортання, підвищення точності і якості обробки, зниження шорсткості оброблюваних деталей.

Об'єктом дослідження є процес розгортання точних отворів у деталях машин і механізмів агропромислового виробництва, а **предметом** – конструкції різцевих збірних розгортяк із безвершинними зубами та їх вплив на точність відновлення і виготовлення отворів у деталях сільськогосподарської техніки.

Для досягнення поставленої мети передбачено розв'язання таких **завдань**.

1. Проаналізувати особливості експлуатації та ремонту деталей сільськогосподарських машин, для яких критичною є точність обробки отворів. Вивчити існуючі конструкції розгортяк та визначити їхні можливості й обмеження у сервісному інженерному забезпеченні с/г машин.

2. Встановити вплив основних технологічних та конструктивних факторів на формування точності та шорсткості отворів при розгортанні. Розробити та технічно обґрунтувати конструкцію різцевої збірної розгортяк з безвершинними зубами, що забезпечує підвищену точність та стабільність обробки в умовах ремонтного виробництва.

3. Провести експериментальні дослідження роботи запропонованого інструменту, визначити якість оброблених поверхонь та оцінити стійкість інструменту.

4. Оцінити екологічні та виробничі ризики, пов'язані з процесом розгортання, та запропонувати заходи щодо їх мінімізації. Провести розрахунки економічної ефективності.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Особливості обробки отворів різанням

Процес обробки різанням займає значне місце в технологічних процесах, пов'язаних з отриманням деталей необхідної форми, складаючи близько 30-40% від загальної трудомісткості машин. При виготовленні деталей найрізноманітніших форм і розмірів зустрідаються точні отвори, які необхідно отримати обробкою різанням. В суцільному металі отвори отримують свердлінням з точністю 8-11 квалітети і шорсткістю поверхні 10-80 мкм. Після свердління точні отвори отримують зенкуванням, розгортанням, протягуванням, розточуванням, шліфуванням і іншими способами застосовуваними залежно від необхідної точності і якості поверхні.

Найбільшого поширення при обробці точних отворів діаметрів до 8-10 мм отримали внутрішнє шліфування, протягування та розгортання. Внутрішнє шліфування і протягування отворів малих діаметрів відносяться до числа дорогих операцій. Крім того, ці види обробки важко застосовувати при обробці великих громіздких деталей з глибокими, ступінчастими і глухими отворами. Тому основним методом при обробці точних отворів малих діаметрів часто застосовується операція розгортання, виконувана в поєднанні зі свердлінням і зенкуванням.

Встановлена конструкція інструменту, освоєна технологія його виготовлення, можливість використання на різних верстатах і різних типах виробництва, практична незамінність при отриманні глухих і східчастих отворів (особливо малих діаметрів) в громіздких деталях та ін., визначили широке застосування процесу розгортання як фінішної операції.

Основними характеристиками процесу розгортання є точність і якість обробленого отвору, які залежать від наступних факторів: конструкції, геометрії, стану, способу кріплення і матеріалу інструментів, явищ стружкоутворення, динамічних явищ, застосовуваних мастильно-охолоджуючих технологічних засобів (МOTЗ), режимів різання, точності і якості попередньо обробленого отвору.

Перераховані фактори впливають на точність і якість обробленого отвору по-різному. Є ряд опублікованих робіт [1-5], присвячених дослідженню процесу розгортання отворів. У цих роботах висвітлені основні положення даної технологічної операції, тобто розглянуті питання різання, явища при стружкоутворенні, зусилля, що виникають, знос і стійкість інструменту, вивчено вплив геометричних параметрів розгортки, їх кріплення, характеристики застосовуваних режимів різання, МОТЗ і їх вплив на процес різання.

Основна відмінність процесу розгортання від інших видів лезової обробки полягає в тому, що дана операція виконується при малих товщинах зрізу, які становлять 0,05-0,1 мм, а геометрія ріжучого клина є вкрай несприятливою з точки зору процесів стружкоутворення, тертя і зношування. Так, передній кут, як правило, близький до нуля, а задня поверхня має «нульову» фаску шириною 0,05-0,1 мм. Малі перетини стружки стають надзвичайно чутливими до кінематичних похибок процесу розгортання, таким як неспіввісність, радіальне биття зубів і т.д. Це, в свою чергу, призводить до зниження динамічної стійкості процесу розгортання і посилення параметрів точності самої розгортки. Зі зменшенням діаметра розгортки динамічна стабільність процесу знижується додатково за рахунок зниження жорсткості інструмента. Через ці причини процес розгортання проводиться на занижених режимах різання порівняно з іншими видами механічної обробки отворів, що впливає на продуктивність і собівартість продукції, що випускається.

При використанні самовстановлюваних мірних інструментів забезпечення необхідного розміру отвору досягається правильним, з урахуванням розбірки отвору, допуском на знос і виготовлення інструменту, вибором діаметра калібруючої частини інструменту. Забезпечення точності розташування отворів досягається на операціях (або переходах), що передують попередній обробці інструментом, що самовстановлюється. При цьому останній в процесі обробки отворів, повинен зберігати задану перед його застосуванням позиційну точність отворів [6, 7].

Проведені дослідження впливу конструктивних особливостей розгортки на точність форми оброблених отворів. Точність отворів, оброблених розгортками з визначеністю базування, може бути підвищена при збільшенні числа лез і

напрямних.

Вимоги до конструкцій мірних інструментів з визначеністю базування можна сформулювати наступним чином:

1) геометрія ріжучого кінця і, відповідно, розташування і поділ ріжучих лез слід вибирати таким чином, щоб сума сил, що виникають на лезах, забезпечувала надійне і стійке положення інструменту в отворі;

2) напрямні повинні бути розташовані так, щоб перекривався кут, в межах якого може знаходитися вектор радіальної складової сили різання, що притискає інструмент до стінок отвору. При цьому тиск на напрямні має бути таким, щоб забезпечувалося вигладжування поверхні отвору і обидві напрямні інструменту піддавалися невеликому і однаковому зношуванню.

Розрахунок ріжучих інструментів з визначеністю базування передбачає, головним чином, визначення кутів розташування лез і напрямних відповідно до вищесказаних вимог.

Точність форми отворів, оброблених мірним інструментом, залежить від способу базування інструменту, ступеня нерівномірності колового кроку лез і інших чинників, що вище явно недостатньо. У зв'язку з цим проведено спеціальне дослідження, в якому вивчався вплив зазначених факторів на точність форми оброблюваних отворів. У якості мірного інструменту в дослідженні застосовували розгортки з визначеністю базування (одностороннього різання) (рисунок 1.1, а) і без визначеності базування (рисунок 1.1, б), а також з нерівномірним коловим кроком лез (рисунок 1.2, а) і з лезами та напрямними, що чергуються (рисунок 1.2, б).

а)

б)

Рисунок 1.1 – Перетини робочих частин розгорток з визначеністю базування (а) і без визначеності базування (б): 1 – лезо; 2 – напрямна

Рисунок 1.2 – Розгортка з нерівномірним коловим кроком лез (а) і з лезами і напрямними, що чергуються (б)

В процесі експерименту цими інструментами розгорталися отвори в заготовках-втулках зі сталі 45 із зовнішнім діаметром 43 мм і висотою 20 мм. Розгортки діаметром $14,8_{-0,005}$ мм і довжиною 70 мм були оснащені напаяними ріжучими та напрямними пластинами з твердого сплаву марки Т15К6. Форми перетинів робочих частин розгорток всіх досліджених конструкцій представлені на рисунку 1.3.

Рисунок 1.3 – Форми перетинів робочих частин розгорток досліджених конструкцій

Усі розгортки мали однакові геометричні параметри: кут збірного конусу 5° ; передній кут 0 ; подвійний задній кут $15^{\circ}/25^{\circ}$; ширина каліброчної стрічки $0,15 \pm 0,05$ мм; ширина напрямних – $1,3 \pm 0,1$ мм; діаметр направляючих дорівнює

діаметру лез.

Режим розгортання: швидкість різання $V = 8,4$ м/хв, подача $S_z = 0,05$ мм/зуб, глибина різання $t = 0,1$ мм. У розгортку з визначеністю базування (№13-№15) подача $S = 0,01$ мм/об, глибина різання $t = 0,25$ мм. У якості МОР використовувалася рідина на масляній основі марки МР-7/.

Отвори розгорталися на токарно-гвинторізному верстаті. При цьому заготовкам за допомогою пружної розрізної втулки задавалися зміщення відносно осі обертання шпинделя верстата на величину $e = 0,1 \pm 0,01$ мм. Для компенсації такого неспівпадіння осей отворів і інструменту розгортки закріплювалися за допомогою перехідника-подовжувача з довжиною шийки 170 мм і діаметром 12 мм. Розгорткою кожної конструкції обробляли по сім отворів. Відхилення форми отворів визначали в трьох перетинах по висоті кожного отвору на кругломірі «Talysond-73 PC» фірми «Rank Taylor Hobson» (Великобританія). У якості величини, що характеризує точність форми отворів, оброблених кожною розгорткою, бралася середнє з 21 значення величини відхилень від круглості. Всього було оброблено 112 отворів і знято 336 круглограм.

Таким чином, оптимальна величина нерівномірності колового кроку у чотири- і шестилезових розгортках дорівнює 15° , що значно більше рекомендованої величини.

Дослідження точності форми отворів, оброблених розгортками з визначеністю базування (№13-№15) показало, що в порівнянні з іншими конструкціями розгортки вони забезпечували найбільшу точність форми отворів: $\Delta_{кр}^{№13} = 1,931$ мкм, $\Delta_{кр}^{№15} = 1,839$. Після видалення алмазним кружком у розгортки № 13 одного різального леза вона трансформувалася з однолезову розгортку № 14. При цьому відхилення від круглості отворів збільшилося до $\Delta_{кр}^{№14} = 3,388$ мкм. З цього випливає, що точність форми отворів, оброблених розгортками з визначеністю базування, може бути підвищена за рахунок збільшення числа лез і напрямних.

Таким чином, якщо розгортки без визначеності базування мають рівномірний або нерівномірний коловий крок лез і напрямних, то домінуючі гармоніки повторюються через число проміжних гармонік.

З отриманих даних випливає, що найменшу похибку форми отворів забезпечують розгортки з визначеністю базування, а за ними слідує розгортки з трьома лезами і трьома напрямними, що передують, і, далі, – чотирьох- і шестилезові розгортки.

Створення у 80-х роках односторонніх розгортків (розгортків одностороннього різання), оснащених твердими сплавами, дозволило в кілька разів знизити трудомісткість і собівартість обробки, істотно підвищити експлуатаційні властивості оброблених деталей. У сучасній машинобудівній промисловості застосовується велика кількість твердосплавних розгортків діаметрів (до 10 мм), що випускаються інструментальними підприємствами. Підвищити працездатність таких розгортків зміною конструкції або геометрії дуже важко через малі поля допусків і критерій зносу по точності і жорсткості, тому для вирішення питання продуктивності, показників точності і якості, необхідно вивчити вплив на сам процес розгортання ззовні додаткових джерел енергії.

Одним з ефективних методів впливу на процес різання є введення в зону різання додаткової кількості тепла електроконтактним шляхом. Є ряд робіт [3-10], де досліджено вплив різних додаткових чинників на процес різання при точінні, фрезеруванні і свердлінні.

З представленою вище огляду можна зробити висновок, що немає єдиного уявлення про механізм формування похибок обробки при розгортанні. Пояснення окремих авторів носять, найчастіше, суперечливий характер. Однак всі вони єдині в тому, що процес розгортання має найменшу стабільність і стійкість порівняно з іншими методами механічної обробки, спричиненої як зниженням жорсткості інструмента, так і особливостями режимів експлуатації. При цьому нестійкість процесу розгортання пояснюється чисто зовнішніми, здебільшого, геометричними позиціями (нерівномірністю розташування зубів і їх геометричними похибками, похибкою установки інструменту та ін.), а вплив електроконтактного підігріву на властивості міцності, зносостійкості розгортків і на процес розгортання не розглядалося.

Таким чином, обмежена і неоднозначна роль геометричних і конструктивних факторів у формуванні характеристик поверхні розгортків, підвищена чутливість

процесу розгортання до зовнішніх впливів, пов'язана з малими перетинами зрізу, низький рівень режимів різання, викликаний обмеженнями по точності, дозволяє шукати більш ефективні рішення шляхом спрямованого впливу на сам процес.

Одним з таких шляхів є застосування безвершинних зубів розгортки, які мають більш високу ступінь самоцентрування і забезпечують зменшення похибки (відхилення від круглості) обробленого отвору.

1.2 Аналіз існуючих конструкцій розгортки

На даний час існує велика різноманітність металорізальних інструментів. Номенклатуру ріжучого інструменту визначають на основі аналізу форм, розмірів, необхідної точності і шорсткості основних і додаткових поверхонь деталей з урахуванням виду обраної заготовки.

Номенклатура ріжучого інструменту включає в себе уніфікований і спеціальний інструмент. До уніфікованих інструментів відносяться інструменти, що застосовуються для обробки деталей широкої номенклатури. Геометричні і конструктивні параметри цих інструментів відповідають наведеним в нормалях або стандартах. Це центрові свердла, спіральні свердла зі швидкорізальної сталі і свердла з пластинами твердого сплаву, перові свердла, зенкери, розгортки; різці для чорнової і чистової обробки основних і додаткових зовнішніх і внутрішніх поверхонь деталей, які встановлюються в стандартний різдетримач.

Інструмент, призначений для обробки тільки однієї окремої поверхні деталі, вважають спеціальним. Сюди відносять комбінований, фасонний та інший інструмент.

Комбінований інструмент утворюють з уніфікованих різцевих вставок і змінних ріжучих пластин (ЗРП), що закріплюються в спеціальних багаторізцевих державках [11, 12].

На практиці спеціальними також можуть бути інструменти, у яких розміри виходять за межі стандартного ряду параметрів і на виробництві проектують і виготовляють такі інструменти як спеціальні.

Для обробки точних циліндричних отворів на верстатах свердлильної, токарної,

розточувальної груп або вручну використовують чистовий осьовий інструмент – розгортки, які є єдиним інструментом для обробки точних отворів малого діаметра [13].

Класифікація та основні типи розгортки:

- за способом застосування;
- за методом установки;
- за конструкцією робочої частини;
- за формою оброблюваного отвору;
- спеціальні розгортки;
- комбіновані розгортки.

За способом застосування розгортки підрозділяються на ручні і машинні. Ручні розгортки (рисунки 1.4, а) мають малий кут $\varphi = 1,0 \dots 2,0^\circ$, більшу довжину забірного конуса і циліндричний хвостовик з квадратом для передачі обертового моменту. Виготовляються вони з легированої сталі марки 9ХС, так як швидкість різання не перевищує 1 м/хв. У машинних стандартних розгортках (рисунки 1.4, б) кут $\varphi = 45^\circ$, проте в залежності від виду оброблюваного матеріалу і форми отвору (крихкий або в'язкий матеріал, глухий або наскрізний отвір) ця величина змінюється.

Рисунок 1.4 – Розгортки. а – ручна; б – машинна

Машинні розгортки зі сталей марок Р6М5, Г9К10 і твердих сплавів допускають швидкість різання $V = 4 \dots 10$ м/хв. Це пояснюється тим, що відцентрові сили різання можуть погіршити точність і якість обробленої поверхні. Виготовляються машинні розгортки як з циліндричним, так і з конічним хвостовиком.

За методом установки на верстаті розрізняють кінцеві (хвостові) і насадні розгортки. Перші можуть мати циліндричний або конічний хвостовик. Розгортки з циліндричним хвостовиком встановлюються в спеціальному кулачковому або цанговому патроні, а з конічним (конус Морзе) – в перехідних втулках (рисунки 1.5,

а). Насадні розгортки закріплюються на спеціальних оправках (рисунок 1.5, б). Поєднання осей розгортки і оброблюваного отвору забезпечують спеціальні гойдацьні або плаваючі патрони.

Рисунок 1.5 – Методи кріплення кінцевих (а) та насадних розгорток (б).

1 – патрон, що гойдається; 2 – перехідна втулка; 3 – кінцева розгортка;
4 – плаваючий патрон у зборі; 5 – оправка; 6 – втулка;
7 – шпонка; 8 – насадна розгортка

За конструкцією робочої частини розгортки бувають насадні (рисунок 1.6); за принципом регулювання зовнішнього діаметра – жорсткими, розтискними і розсувними (рисунки 1.7-1.9). У цільних жорстких розгортках діаметр калібруючої частини залишається постійним протягом заданого часу їх експлуатації. У розтискних, які застосовуються в ремонтному виробництві, є ословий отвір з ділянкою конічної форми. Регулювання діаметра розгортки забезпечує гвинтовий стрижень, що впливає на кульку. Під зубами прорізані поздовжні наскрізні пази. Осьове переміщення кульки розсовує зубці, збільшуючи тим самим діаметр розгортки до необхідного розміру. Зміна діаметру може становити від 0,15 до 0,5 мм в залежності від номінального діаметра калібруючої розгортки.

Рисунок 1.6 – Насадна розгортка

Рисунок 1.7 – Розтискна регульована розгортка

Рисунок 1.8 – Розтискна регульована розгортка для діаметрів 17...50 мм

Рисунок 1.9 – Розтискна регульована розгортка

Регулювання діаметра в збірних спеціальних розгортках в межах 2...3 мм (рисунок 1.9). Ріжучі ножі 4 встановлюються в шести-восьми поздовжніх канавках

корпусу 1, що мають похилу опорну поверхню. Ножі закріплюються спереду і ззаду через спеціальні кільця 3 гайками 2. Послабивши задню гайку, виконують осьове переміщення ножів в канавках за конічними напрямними, збільшуючи при цьому діаметр розгортки до необхідного розміру.

За формою оброблюваного отвору розгортки поділяються на циліндричні і конічні. Конічні розгортки призначені для отримання з циліндричного отвору конічного з необхідною точністю. Отвори з конусністю 1:50 для конічних штифтів обробляються одноразово за один прохід. При обробці отворів конусністю 1:30 або 7:24 застосовується комплект з двох або трьох розгорток: чорнової (обдирної), проміжної і чистової. Зуби перших двох розгорток мають стружкоподільні канавки, які подрібнюють стружку і перетворюють циліндричний отвір в ступеневий. Характерною особливістю конічних розгорток є відсутність у них калібруючої частини. Зубці розгортки по всій довжині повинні бути гострозаточені.

Застосовуються в машинобудуванні і спеціальні розгортки – котельні (для чистової обробки отворів під заклепки в пакеті листового матеріалу), гранні, з кільцевим ступінчастим заточуванням, силові, однокромкові та ін.

Котельні розгортки (рисунок 1.10) мають подовжений забірний конус $2\varphi = 6^\circ$ довжина ріжучої частини складає $l_p = (0,35 \dots 0,5) / l_0$, де l_0 – довжина робочої частини розгортки. Напрямок гвинтових зубів протилежний напрямку обертання інструменту. Це попереджає самозатягування і задирання при роботі.

Рисунок 1.10 – Котельна розгортка

Гранні (беззубі або безканавкові) розгортки (рисунок 1.11) використовуються для обробки отворів малого діаметра. Фактично їх робота зводиться до еластичної деформації. Поперечний переріз таких розгорток має трикутний або п'ятикутний

профіль.

Рисунок 1.11 – Стална розгортка

Розгортки з кільцевим ступінчастим заточуванням (рисунок 1.12) ріжучої частини замість конуса з кутом 2θ можуть замінити в роботі зенкер або попередню розгортку при обробці нержавіючих і жароміцних сталей. На ріжучій частині виконуються три ступеня з перепадом діаметрів $d_1 = 0,2$ мм і $d_2 = 0,5$ мм.

Рисунок 1.12 – Розгортка із кільцевим ступінчастим заточуванням

Силкові розгортки (рисунок 1.13) мають довгу ріжучу частину з гвинтовими зубами, які дозволяють знімати значні припуски під розгортання, де викликаючи збільшення частоти і амплітуди вібрацій.

Однокромкові розгортки збірки (рисунок 1.14) виготовляються діаметрами 10...80 мм. Вони оснащуються одним змінним ріжучим ножем, який кріпиться гвинтами безпосередньо або через установчу пластину. Напрямок розгортки в отворі забезпечують спеціальні напрямні вставки.

Рисунок 1.13 – Силова розгортка

Рисунок 1.14 – Однокрюкова збірна розгортка

Різноманітність застосовуваних у машинобудуванні матеріалів призвела до створення нових конструкцій розгортки: з підведенням МОР в робочу зону; збірних, оснащених ЗБП з твердого сплаву і композитамі; однолезовим твердосплавних діаметром 5...150 мм (рисунок 1.15); твердосплавних чотирьохзубих розгортки і т.д.

Комбіновані розгортки (рисунок 1.16) за призначенням можуть бути:

- вигладжувальні (коли натяг менше початкових параметрів шорсткості);
- калібруючими (коли натяг дорівнює вихідним параметрам шорсткості);
- ущільнювальними (коли натяг більше вихідних параметрів шорсткості).

Рисунок 1.15 – Однолезова твердосплавна розгортка

Рисунок 1.16 – Ущільнювальна комбінована розгортка

З метою підвищення точності обробки отворів та стійкості інструменту (розбіжності осей) розроблено ряд конструкцій розгортки: плаваюча 8-ми лезова розгортка, плаваюча розгортка конструкції K.G. Kress, дискова розгортка, самоустановлювальна розгортка з еліпсою формою робочої частини (рисунки 1.17-1.20).

Рисунок 1.17 – Плаваюча 8-ми лезова розгортка: 1 – гвинт; 2 – шайба;
3 – хрестовина; 4 – оправка; 5 – ніж

Рисунок 1.18 – Плаваюча розгортка конструкції К. G. Kress:

1 – диск; 2 – затискний гвинт; 3 – фіксатори; 4 – регулювальний гвинт;
5 – стопорний гвинт; 6 – оправка

Рисунок 1.19 – Дискава розгортка: 1 – напрямна; 2 – ріжучий диск; 3 – хвостовик;
 B – товщина диска; D – діаметр диска; d – посадковий діаметр диска

Рисунок 1.20 – Самоустановлювальна розгортка із еліпсоподібною формою робочої частини: FM, MM - ріжуча та калібруюча ділянки ріжучої частини розгортки відповідно; NK - ділянка зі зворотною конусністю; d – діаметр розгортки; l_p – довжина ріжучої частини розгортки

Особливістю інструментів із безвершинними зубцями, що розглядатимуться далі у даній майстерській роботі є те, що їхня робоча частина, тобто ріжучі та калібрувальні зуби, мають підвищену здатність самоцентрування при різанні за рахунок виключення вершин зубів. Крім того, багаторазове калібрування обробленої поверхні забезпечує отримання більш стабільного розміру і зменшується величина відхилень від заданого розміру з метою підвищення якості обробки.

1.3 Розгортки із зубами-різцями без вершин

Аналіз існуючих конструкцій та дослідження обробки отворів ріжучими інструментами привели до виникнення нового металорізального інструменту - різцевої збірної розгортки із безвершинними ножами – для розгортання отворів підвищеної якості поверхні та точності діаметру. Безвершинні різці-зуби інструменту позбавлені одного з недоліків – наявності вершини, найбільш слабкої і зношеної частини ріжучої кромки звичайних різців. Але для підвищення точності і якості обробки зазначеною розгорткою необхідно передню і задню

поверхні зубів доводити після операції заточування, при цьому підвищується також і стійкість зубів розгортки [14-16].

Різцева збірна розгортка з безвершинними зубами має на ріжучій частині чотири вставних зуба-різця розгортки, встановлених в пази зі зміщенням один відносно одного вздовж осі і закріплених кріпильними гвинтами або притискачами безпосередньо до корпусу (рисунок 1.21). Вставні зуби-різці мають ріжучі кромки у формі кола, площина якого розташована під кутом до осі отвору (осі розгортки), тим самим на круговій ділянці зубів виключається вершина, і поліпшуються умови різання. Всі різці мають один розмір по висоті, тобто налаштовані на обробку одного діаметра D отвору. При роботі різання зуб-різець, впливаючи на заготовку, викликає її віджимання силою різання, що призводить до зміни діаметра обробки. Наступні різці працюють як калібруючі і сприяють збільшенні точності розміру отвору.

Рисунок 1.21 – Конструкція різцевої збірної розгортки із ножами без вершин.

1 – корпус розгортки; 2 – чотири зміщених один відносно іншого різця розгортки; 3 – кріпильні гвинти; 4 – притискачі; 5 – плоска пластина;

A – послідовне зміщення один відносно одного кріпильних гвинтів, площин симетрії різців; D – діаметр розгортки (отвору);

$D_{н.п}$ – діаметр попередньої направляючої; $D_{ш}$ – діаметр шийки;

l_p – довжина робочої частини розгортки; $l_{ш}$ – довжина шийки;

l_x – довжина хвостовика

На передній частині корпусу розгортки виконано ділянку-уловлювач для попереднього центрування розгортки в початковий період перед розгортанням отвору, яка вводиться в отвір і центрує розгортку за попереднім отвором. Після уловлювача (на відстані 1...1,5 мм після площині симетрії першого різця) виконана напрямна частина у вигляді частини циліндра корпусу між стружковими канавками, з двох сторін корпусу виконані центрові отвори R-форми для підвищення точності розгортки в процесі переточки за рахунок усунення кромкових контактів у порівнянні з застосуванням простої конічної форми центрального отвору.

Різи виконані зі швидкорізальної сталі або оснащені пластинами твердого сплаву. З метою збільшення терміну служби передбачена пластина під основою різця, що змінюється при кожному переточуванні, для компенсації втрати розміру різця за висотою.

Конструктивні особливості і геометрія різцевої збірної розгортки забезпечують високу ефективність чистової операції розточування, підвищення точності обробки та зниження шорсткості оброблюваних деталей (рисунок 1.22).

Для підвищення якості обробки необхідно виключити абразивне тертя між направляючою і обробленою поверхнею.

Для виключення абразивного тертя на напрямних елементах корпусу та їх зносу виконані грязьові канавки уздовж твірних направляючого циліндра. Для виключення можливості впровадження передньої кромки напрямних елементів на корпусі розгортки в оброблену поверхню виконана фаска уздовж направляючого кола, що утрудняє впровадження при виникненні вібрацій в процесі різання, що також підвищує якість обробки деталей.

З метою збільшення терміну служби і ресурсу розгортки за рахунок збільшення кількості переточувань передбачені змінні компенсаційні пластини, встановлені під основу зубів-різців, змінювані при кожному переточуванні, для компенсації втрати розміру різця за висотою.

Таким чином, конструктивні особливості різцевої збірної розгортки та якість робочих поверхонь ріжучого клину зубів забезпечують високу ефективність чистової операції розгортання, підвищення точності обробки, а також стійкість інструменту і зниження шорсткості оброблюваних деталей.

Рисунок 1.22 – Конструкція вставного зуба-різця розгортки:
1 – ріжуча кромка різця; φ – головний кут в плані; φ_1 – допоміжний кут в плані; b – висота заплечика; B_p – ширина різця; b_p – ширина виступу ріжучої частини різця; H_p – висота різця; L – довжина різця; λ – кут нахилу головної різальної кромки; $N-N$ – нормальний перетин геза різця; $T-T$ – дотичний перетин, що включає головну ріжучу кромку; $S-S$ – перетин, перпендикулярний до осі оброблюваного отвору; D_o – діаметр оброблюваного отвору; R_p – радіус кола, що утворює ріжучу кромку; γ – передній кут; γ_N – передній кут в нормальному перерізі; α_N – задній кут в нормальному перерізі; α – задній кут в площині, неперпендикулярній осі отвору; $\varphi = \varphi_1$

Подальше вдосконалення привело до розробки збірної різцевої розгортки, у якій подвійна кількість різців-зубів, налаштованих на один діаметр обробки для кращого калібрування отвору (рисунок 1.23)

Рисунок 1.23 – Конструкція різцевої збірної розгортки із здвоєними зубами без вершин: 1 – корпус розгортки; 2 – чотири з'єднаних здвоєних зубів-різців розгортки; 3 – кріпильні гвинти; 4 – пластина; A – послідовне зміщення площин симетрії різців, кріпильних гвинтів, торців зубів; B – відстань між різцями здвоєних зубів (можливе виконання з однаковою відстанню і змінною); D – діаметр розгортки (отвору); $D_{ш}$ – діаметр шийки; $D_{н.п}$ – діаметр попередньої направляючої; l_p – довжина робочої частини розгортки, $l_{ш}$ – довжина шийки; l_x – довжина хвостовика

Подвійну кількість різців отримано за рахунок того, що кожен різець спроектований спареним (рисунок 1.24).

Розроблена конструкція різцевої збірної розгортки зі здвоєними безвершинними зубами з різними діаметрами (D_1 і D_2) для поліпшення умов різання і підвищення точності обробки отворів наступними різцями, і в цьому випадку можливе і деяке зміцнення оброблюваної поверхні, що збільшить довговічність і зносостійкість деталі (рисунок 1.25). Здвоєні зуби-різці налаштовуються на два розміри D_1 і D_2 , різниця між діаметрами відносно невелика в межах $1/3$ допуску на оброблювану поверхню (рисунок 1.26).

Рисунок 1.24 – Конструкція зуба-різця розгортки з подвійним зубами без вершин:
 B_p – ширина різця; H_p – висота різця; L_p – довжина різця; b_p – ширина зуба-різця; l_1 – відстань між різцями з двоєних зубів (можливе виконання з однаковою відстанню і змінною); λ – кут нахилу головної різальної кромки

Рисунок 1.25 – Конструкція різцевої збірної розгортки із подвійними зубами без вершин із різними діаметрами: 1 – корпус розгортки; 2 – частини з двоєні, з них перші три різні за висотою, зуба-різця розгортки і зміщені один відносно одного уздовж осі; четвертий з двоєний зуб-різець має рівновисокі зуби і не має припуску на боробку, тобто калібрувальний; 3 – кріпильні гвинти;
 A – послідовне зміщення площин симетрії різців, кріпильних гвинтів, торців зубів;
 B – відстань між з двоєними зубами різця (можливе виконання з однаковою відстанню та змінною); D_1 – діаметри перших зубів-різців розгортки; D_2 – діаметри других зубів-різців розгортки (створу); D_m – діаметр шийки;
 $D_{n,n}$ – діаметр попередньої направляючої; l_p – довжина робочої частини розгортки; l_m – довжина шийки; l_x – довжина хвостовика

Рисунок 1.26 – Конструкція зуба-різця розгортки із подвійним зубами без вершин із різними діаметрами: B_p – ширина різця; H_{p1} – висота першого зуба-різця; H_{p2} – висота другого зуба-різця; L_p – довжина різця; b_p – ширина зуба-різця; l_1 – відстань між різцями здвоєних зубів (можливе виконання з однаковою відстанню і змінною); $\angle \Delta$ – величина налагодження здвоєних зубів-різців на різні діаметри для четвертого здвоєного зуба-різця, $\Delta = 0$; λ – кут нахилу головної різальної кромки

В процесі обробки отворів відбувається знос інструменту, що погіршує якість оброблюваної поверхні, змінюється налагоджувальний розмір і потрібно виконати утилізацію інструменту. Підвищити стійкість інструменту можливо застосуванням різцевої зębної розгортки із рєчлюванням ножів без вершин (рисунок 1.27). Вона складається з корпусу 1, безвершинних різців 2, розрізної втулки 3, мікрометричної гайки-лімба 4 зі шкалою, що нагвинчується на точну різьбу на корпусі 1. З метою фіксації ножів-різців передбачено: поздовжня упорна пластина 5 та розрізне упорне кільце 7.

Конструкція без вершинного різця для даної розгортки представлена на рисунку 1.28. Можливі три виконання різців: одинарний; подвоєний; подвоєні різні за висотою.

Рисунок 1.27 – Конструкція різцевої збірної розгортки із регулюванням ножів без вершин: 1 – корпус розгортки; 2 – чотири зуба-різця розгортки; 3 – розрізна втулка; 4 – мікрометрична гайка-підб; 5 – канавка для бруду; 6 – поздовжня упорна пластина; 7 – розрізне упорне кільце; λ – кут нахилу головної ріжучої кромки; D_p – діаметр розгортки (отвору); l_p – довжина робочої частини розгортки, l_n – довжина шийки, l_x – довжина хвостовика; l_r – довжина розгортки.

На рисунку 1.29 представлена конструкція різцевої збірної розгортки з безвершинними зубами, у якій відсутні притискачі, що дозволяє підвищити жорсткість зубів-різців розгортки в осьовому і радіальному напрямках, завдяки кріпленню зубів-різців безпосередньо до корпусу кріпільними гвинтами, зменшується кількість деталей, що входять до складу розгортки, її габаритні розміри, собівартість виготовлення різцевої збірної розгортки, зменшуються вібрації при обробці, а, отже, забезпечується більш висока якість оброблюваного отвору.

Рисунок 1.28 – Конструкція різців-ножів розгортки із регулюванням ножів, що не мають вершин: 1 – ріжуча кромка різця; φ – головний кут в плані; φ_1 – допоміжний кут в плані; B_p – ширина різця; b_p – ширина ріжучої частини різця; $b_{кр}$ – ширина леза на ріжучій частині різця для поздовжніх упорних пластин; H_p – висота різця; l_p – довжина різця; λ – кут нахилу головної різальної кромки; θ – ухил основи зуба-різця; r_n – проекційний радіус головної різальної кромки; D_p – діаметр розгортки (отвору); $N-M$ – нормальний переріз леза різця; $S-S$ – переріз, перпендикулярний до осі оброблюваного отвору; γ – передній кут; γ_N – передній кут в нормальному перерізі; α_N – задній кут в нормальному перерізі; α – задній кут в площині, перпендикулярній осі отвору

Застосування інструменту з безвершинними зубами підвищує жорсткість стику в технологічній системі (верстат - пристосування - інструмент - деталь), а, отже, і точність обробки отворів.

Конструкція безвершинного різця представлена на рисунку 2.30.

Таким чином, на підставі вище викладеного можна сформулювати наступні висновки:

1) застосування конструкцій різцевих збірних розгортки з безвершинними зубами покращує центрування і вібростійкість інструменту і дозволяє збільшити якість і продуктивність обробки циліндричних отворів;

Рисунок 1.29 – Конструкція різцевої збірної розгортки із жорстким тріпленням зубів, що не мають вершин: 1 – корпус розгортки; 2 – чотири вставних зуба-різця розгортки і зміщених один щодо одного вздовж осі; 3 – кріпильні гвинти; 4 – змінна компенсаційна пластина з отворами під кріпильні гвинти; 5 – послідовне зміщення одна відносно одної площин симетрії вставних зубів-різців, кріпильних гвинтів; D – діаметр вставних зубів-різців розгортки; $D_{ш}$ – діаметр шийки; $D_{н.п.}$ – діаметр передньої напрямної; l_1 – довжина передньої напрямної частини корпусу за несвербленим отвором; $L_2 = 1 \dots 1,5$ – відстань у міліметрах від площини симетрії першого вставного зуба-різця розгортки до початку фаски напрямної частини корпусу; l_p – довжина робочої частини розгортки; $l_{ш}$ – довжина шийки; $l_{хв}$ – довжина хвостовика

2) конструкція збірної розгортки зі здвоєними безвершинними зубами виконує краще вигладжування і калібрування оброблюваного отвору, що підвищує якість обробки: підвищує точність розміру і зменшує відхилення від правильної геометричної форми (відхилення від круглості);

3) у формуванні якості оброблюваного отвору зростає роль збільшеного центруючого ефекту, за рахунок збільшення кількості працюючих зубів;

Рисунок 1.30 – Конструкція безвершинного зуба-різця різцевої збірної розгортки із жорстким кріпленням: 1 – ріжуча кромка вставного зуба-різця;

b – висота заплечика; B_p – ширина вставного зуба-різця;

H_p – висота вставного зуба-різця; L – довжина вставного зуба-різця;

α – кут нахилу головної різальної кромки.

4) подвійні безвершинні зуби-різці збільшують ступінь централізації ріжучої частини розгортки одночасно в декількох перетинах по довжині отвору, що підвищує точність отвору за рахунок зменшення відхилень від правильної геометричної форми в поздовжньому перетині, тобто відхилень від циліндричної;

5) здвоєні безвершинні зуби-різці з регулюванням діаметрів збільшують стійкість інструменту і час до переточування.

1.4 Удосконалення осьових металорізальних інструментів

Для задоволення потреб машинобудування, металообробки та інших галузей в металорізальному інструменті необхідно збільшити темпи його випуску, значно підвищити якість і поліпшити експлуатацію.

Підвищення якості ріжучих інструментів є основним засобом задоволення потреби в ньому різних галузей машинобудування. Якість металорізального інструменту залежить від його конструкції, матеріалу і технології виробництва.

До ріжучого інструменту ставляться такі вимоги:

- підвищена міцність;

- жорсткість;
- вібростійкість;
- стійкість;
- точність;
- швидкозмінність;
- економічність.

Ці вимоги ріжучого інструменту формуються як на стадії проектування, так і в процесі його виготовлення. Проблема якості ріжучого інструменту важлива не тільки для масового і великого серійного автоматизованого виробництва, але і для підприємств і фірм, що виробляють одиничні вироби або здійснюють ремонт унікальних вузлів машин.

Удосконалення ріжучого інструменту на сучасному етапі здійснюється за такими напрямками [2, 19, 20]:

- 1) розробка нових і вдосконалення існуючих конструкцій інструменту;
- 2) розробка і освоєння виробництва нових марок ріжучих матеріалів швидкокорізальних сталей, твердих сплавів, кераміки, синтетичних надтвердих матеріалів;
- 3) широке застосування зносостійких покриттів для інструменту на базі карбідів, нітридів, оксидів, карбонітридів, аксікарбонітридів тугоплавких елементів, а також покриттів з синтетичних надтвердих матеріалів;
- 4) збільшення в загальному обсязі виробництва частки інструменту збірних конструкцій, оснащених непереточуваними багатограними пластинами (БНП) інструментальних матеріалів, і, в першу чергу, сучасних твердих сплавів;
- 5) вдосконалення технологічних процесів інструментального виробництва, які забезпечують високі показники точності і надійності інструменту.

Напрямки вдосконалення металорізальних інструментів для обробки створів переслідують наступні цілі:

- підвищення продуктивності обробки;
- підвищення точності і якості поверхонь деталей, що виготовляються;
- підвищення економічної ефективності застосування нових ріжучих інструментів.

Для досягнення цих цілей на рисунку 1.31 схематично показані основні напрямки робіт.

Рисунок 1.31 – Напрямки удосконалення металорізальних інструментів

Наведеними напрямками не вичерпуються шляхи можливого розвитку теорії ріжучих інструментів, розвитку і вдосконалення їх конструкцій.

Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз науково-технічної інформації досліджень обробки отворів та існуючих конструкцій металорізальних інструментів, а саме розгортки.

2. Встановлено, що однією з актуальних проблем є обробка отворів, до яких пред'являються високі вимоги по точності розміру, форми і розташування. Для цих цілей найчастіше застосовуються мікрні інструменти, які мають широкую номенклатуру. Застосування раціональної конструкції розгортки забезпечує високу якість роботи.

3. Проблеми вдосконалення металорізальних інструментів для обробки отворів показали, що найбільшого поширення набув напрямок по розробці і вдосконаленню існуючих конструкцій інструментів.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Обладнання, прилади та матеріали

Рисунок 2.2 – Профілометр

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики цифрового індикатора

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики профілометра

Продовження таблиці 2.2

2.2 Перевірка точності металорізального обладнання

Полтавський державний аграрний університет

Рисунок 2.6 – Радіальне биття осі конуса шпинделя

Полтавський державний аграрний університет

Висновки до розділу 2

Полтавський державний аграрний університет

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

3.1 Математична обробка результатів

Таблиця 3.2 – Матриця планування

Згідно з матрицею планування проводимо експериментальні дослідження. Виконуємо необхідні обчислення за відомими формулами і отримані результати зводимо в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати розрахунків створу $\varnothing 45$ мм на довжині 45 мм

3.1. Дослідження умов обробки на якість при постійній довжині обробки

3.3 Дослідження умов обробки на якість при змінній довжині обробки

Рисунок 3.10 – Залежність шорсткості від частоти обертання

Рисунок 3.11 – Залежність шорсткості від подачі

Рисунок 3.12 – Залежність шерсткості від глибини різання

Висновки до розділу 3

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

4.1 Безпека робіт під час розгортання

Розгортання отворів належить до операцій фінішної механічної обробки та виконується на свердлильних, токарних або спеціалізованих верстатах. Під час виконання цих робіт на працівника можуть діяти такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

- рухомі частини верстата та обертовий інструмент;
- можливість захоплення одягу чи рук оператора;
- підвищений рівень шуму і вібрації;
- утворення стружки та абразивного пилю;
- гострі кромки заготовок та інструментів;
- небезпека ураження електричним струмом.

Відповідно до правил з охорони праці під час роботи з інструментом та обладнанням, працівник допускається до роботи лише після проходження інструктажу, навчання безпечним методам роботи та перевірки знань з охорони праці.

Робоче місце робітника верстата для розгортання повинно відповідати наступним умовам.

1. Стійке закріплення заготовки. Перед початком операції заготовка фіксується в лещатах або спеціальних пристосуваннях, що виключають її провертання або зміщення.

2. Справність обладнання. Оглядаються: шпindel і патрон; пристосування для кріплення інструменту; стан мастильно-охолоджувальної системи; справність системи електроживлення.

3. Правильний вибір інструмента. Розгортки повинні бути без тріщин, задирок з правильними кутами заточки.

4. Освітлення та чистота. Робоча зона має бути добре освітленою, очищеною від стружки та мастильних матеріалів.

Під час розгортання отворів оператор повинен використовувати: захисні окуляри або щиток для захисту очей від стружки; спецодяг без вільних елементів, що можуть потрапити у зону обертання; спецвзуття з неслизькою підошвою; при необхідності – антишумові навушники.

Заборонено працювати у рукавичках, які можуть бути захоплені інструментом.

Під час виконання операції розгортання необхідно дотримуватися наступних правил.

1. Запуск верстату дозволяється тільки після перевірки на холостому ході.
2. Подавання інструмента повинно бути плавним, без ривків, щоб запобігти поломці розгортки.
3. Не допускається зміна інструмента або очищення стружки до повної зупинки шпинделя.
4. Очищення стружки проводять тільки спеціальним гачком або щіткою, а не руками.
5. Під час розгортання слід використовувати мастильно-охолоджувальні рідини, що зменшують нагрів інструмента та полегшують процес різання.
6. Заборонено застосовувати надмірні зусилля або перевищувати рекомендовані режими різання.

Оскільки верстати для розгортання є електротехнічним обладнанням, вони повинні відповідати вимогам Правил улаштування електроустановок (ПУЕ). Основні заходи: наявність захисного заземлення; цілісність кабелів та відсутність пошкоджень ізоляції; робота тільки при справних пускових і аварійних вимикачах; категорична заборона будь-яких ремонтів під напругою.

Оператор повинен знати правила поведінки при ураженні електричним струмом та порядок надання першої допомоги.

Під час обробки металів можливе нагрівання інструмента і заготовки, а також вплив мастильно-охолоджувальних рідин. Для запобігання пожежам необхідно:

- зберігати горючі рідини у спеціальних металевих ємностях;
- не допускати протікання та розбризкування масла;
- підтримувати справність електропроводки;
- мати на робочому місці вуглекислотний або порошковий вогнегасник.

У випадку травмування під час розгортання можуть виникнути порізи, поранення стружкою, опіки, забої чи ураження електричним струмом. Працівник повинен вміти:

- зупиняти кровотечу та обробляти рани антисептиками;
- при опіках – охолоджувати уражену зону протягом 10–15 хвилин;
- при електротравмі – швидко вимкнути живлення та викликати медичну допомогу;
- у разі важких травм – забезпечити постраждалому нерухомість та чекати прибуття лікарів.

Проведений аналіз умов та вимог безпеки під час розгортання отворів показав, що дана операція належить до технологічних процесів підвищеної небезпеки, оскільки пов'язана з дією на працівника рухомих частин верстата, обертового інструмента, утворенням стружки та можливими електротехнічними ризиками. Для забезпечення безпечного виконання робіт необхідно дотримуватися комплексу організаційних і технічних заходів, що включають правильне облаштування робочого місця, застосування справного обладнання та інструменту, використання засобів індивідуального захисту, суворе виконання інструкцій та нормативних вимог з охорони праці.

Дотримання встановлених режимів різання, своєчасне технічне обслуговування обладнання, правильне використання мастильно-охолоджувальних рідин та виключення ручних операцій у зоні обертання забезпечують мінімізацію ризиків травматизму. Окреме значення має підготовленість персоналу – проведення інструктажів, навчання та періодична перевірка знань.

Отже, реалізація системного підходу до організації безпечних умов праці під час розгортання отворів сприяє підвищенню продуктивності, зменшенню виробничих ризиків і забезпечує надійну та ефективну роботу обладнання.

4.2 Розрахунок економічного ефекту

Економічний ефект від впровадження розгортання буде зумовлений зниженням трудомісткості.

Економічна ефективність використання нової техніки, винаходів та раціоналізаторських пропозицій становить

$$E = (\Delta C + \Delta Ц) \cdot A_2 - (0,15 + A_1) \cdot K, \quad (4.1)$$

де ΔC – зменшення собівартості 1 т продукції після впровадження заходу, грн.;

$\Delta Ц$ – збільшення вартості продукції, грн.;

A_1 – коефіцієнт, що вказує на амортизаційні відрахування, $A_1 = 0,1$;

A_2 – кількість продукції, т. $A_2 = 10$ т;

0,15 – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

K – капітальні вкладення на впровадження заходів, грн., $K = 100000$ грн.

Економія від зниження собівартості утворюється за рахунок зниженням трудомісткості:

$$\Delta C = 0,1 \cdot 100000 = 10000 \text{ грн. / т,}$$

де 45000 – середня вартість 1 тони продукції, грн.

Ціна продукції збільшиться за рахунок доплат під час обробки:

$$\Delta Ц = \Delta Ц', \quad (4.2)$$

де $\Delta Ц'$ – середнє збільшення доплат за рахунок даних заходів, грн./т,

$$\Delta Ц' = 2650 \text{ грн. / т ;}$$

$$\Delta Ц = 2650 \text{ (грн./т).}$$

Відповідно до формули (4.1) маємо наступне:

$$E = (10000 + 2650) \cdot 10 - (0,15 + 0,1) \cdot 100000 = 101500 \text{ (грн.).}$$

Отже, економічний ефект від впровадження розгортання склав 101500 грн. на рік.

4.3 Екологічна безпека при розгортанні

Процес розгортання отворів є маловідходним і відносно екологічно безпечним, однак він супроводжується низкою факторів, що можуть негативно впливати на довкілля:

- утворення металевої стружки, яка належить до твердих відходів виробництва;
- використання мастильно-охолоджувальних рідин (МОР), що можуть забруднювати ґрунт і воду при неправильному зберіганні або утилізації;
- споживання електроенергії та викиди в атмосферу на рівні підприємства;
- шум і вібрації, що впливають на локальне виробниче середовище.

Хоча обсяги негативних впливів порівняно невеликі, сукупно вони можуть мати значення при тривалому місцевому виробництві.

Металева стружка від розгортання має дрібнофракційний характер. За вимогами екологічних стандартів:

- стружку необхідно збирати в окремі контейнери, що унеможливають розсіювання;
- забороною є вивозити стружку на полігон змішаних побутових відходів;
- відходи цінних металів підлягають повторній переробці шляхом здавання на металобазу.

Це дозволяє знизити навантаження на довкілля та скоротити витрати підприємства на закупівлю металу.

Мастильно-охолоджувальні рідини є потенційно небезпечними через наявність у складі мінеральних олив та присадок. Неправильне поводження з ними може призвести до забруднення водних ресурсів і ґрунтів.

Для забезпечення екологічної безпеки необхідно:

- зберігати МОР у герметичних металевих ємностях;
- використовувати системи фільтрації та регенерації МОР, що зменшує кількість відходів;

- відпрацьовані рідини передавати ліцензованим підприємствам для утилізації;
- запобігати потраплянню МОР у каналізацію або землю.

Хоча розгортання є малопотужною операцією, при великосерійному виробництві доцільно враховувати її енергоємність. Підвищити енергоефективність можна через:

- застосування сучасних високоєфективних електродвигунів;
- своєчасного технічного обслуговування верстатів;
- оптимізації режимів різання для зменшення тривалості обробки;
- використання автоматичного вимкнення верстата у режимі простою.

Ці заходи сприяють скороченню непродуктивного енергоспоживання.

Створення комфортних і безпечних умов праці належить також до аспектів екологічної безпеки. У процесі розгортання важливо забезпечити:

- достатній рівень вентиляції робочої зони з метою видалення аерозолів МОР;
- використання шумопоглинальних матеріалів і засобів для зменшення виробничого шуму;
- регулярне очищення від стружки та пилу, що зменшує концентрацію шкідливих речовин.

Отже, для підвищення загального рівня екологічної безпеки технологічного процесу рекомендується впроваджувати:

- ресурсозберігаючі технології, зокрема використання мінімальних витрат МОР (MQL-технології);
- екологічно безпечні мастильні матеріали на водній основі;
- системи збору та пресування стружки для зручного транспортування на переробку;
- замкнені цикли водопостачання, що дозволяє мінімізувати споживання води;
- екологічний моніторинг стану повітря та відходів виробництва.

Висновки до розділу 4

1. Процес розгортання належить до операцій підвищеної небезпеки через дію рухомих частин верстата, утворення стружки, можливі електротехнічні ризики та

вплив шуму й вібрацій. Дотримання вимог охорони праці, використання засобів індивідуального захисту, своєчасний технічний огляд обладнання та підготовленість персоналу є ключовими факторами запобігання травматизму.

2. Розрахунки підтвердили, що впровадження операції розгортання дає відчутний економічний ефект та рахунок зниження трудомісткості та підвищення якості обробки. Загальний економічний ефект становить 101500 грн на рік, що свідчить про доцільність модернізації технологічного процесу.

3. Операція розгортання є маловідходною, проте супроводжується утворенням металевої стружки та використанням мастильно-охолоджувальних рідин. Дотримання правил поводження з відходами металу, впровадження систем фільтрації та регенерації МОР, використання ресурсозберігаючих технологій сприяють зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище.

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз показав, що значна частина деталей сільськогосподарських машин містить відповідальні отвори, від точності яких залежить ресурс вузлів та ефективність їх сервісного обслуговування. Для ремонту та виготовлення деталей високої точності у сервісній інженерії аграрного сектору найбільш придатною залишається операція розгортання, оскільки вона поєднує високу точність, технологічну доступність і придатність до обробки глибоких, глухих та ступінчастих отворів.

Вивчення існуючих конструкцій розгортки показало:

- застосовуються ручні, машинні, силові, однокромкові, ступінчасті та комбіновані розгортки з різною геометрією зубців;
- існують розробки плаваючих, дискових, самоустановлювальних та комбінованих конструкцій, що підвищують вібростійкість і належну якість поверхні;
- для малих діаметрів розгортання є незамінною фінішною операцією через недоцільність застосування протягування або внутрішнього шліфування прожнених і масляних корпусних деталей с/г машин.

Оскільки традиційні інструменти широко застосовуються, але в умовах сервісного ремонту с/г техніки відчувається потреба у конструкціях, які здатні компенсувати неспіввісність, покращувати самоцентрування, підвищувати точність та зменшувати динамічну нестійкість процесу.

2. У роботі встановлено, що на якість отворів впливають:

- геометрія зубців і наявність вершин, що визначає величину радіального відхилення і стабільність різання;
- жорсткість інструмента та його здатність до самоцентрування;
- точність попередньої обробки;
- режими різання та подавання;
- динамічні явища процесу (вібрації, радіальне биття).

Особливо важливим є те, що малі перетини стружки роблять процес високочутливим до кінематичних похибок, а зменшення діаметра інструмента ще більше знижує жорсткість та динамічну стійкість процесу.

Для вирішення цих проблем у роботі розроблено та технічно обгрунтовано конструкцію різцевої збірної розгортки з безвершинними та здвоєними зубами. Основні конструктивні особливості:

- ріжучі кромки мають форму кола, розташованого під кутом до осі інструмента, що усуває вершини зубів та покращує умови різання;
- зубці зміщені уздовж осі, що забезпечує послідовне калібрування отвору та підвищення точності;
- здвоєні зуби налаштовуються на два близькі діаметри D_1 і D_2 , що дозволяє покращити точність і навіть забезпечити зміцнення поверхневого шару, підвищуючи довговічність деталей с/г машин;

Таким чином, нова конструкція відповідає потребам сервісної інженерії аграрного сектору – забезпечує високу якість відновлення, точність та зносостійкість деталей.

3. Експерименти проводилися: на сталі 45 – типовому матеріалі деталей с/г машин; на свердильному верстаті із жорстким базуванням заготовки; із застосуванням точних засобів вимірювання: цифрового індикатора LEESA DIGICO-10 та профілометра HOMMEL Tester T1000.

Дослідження показали:

- підвищення точності оброблених отворів завдяки багаторазовому калібруванню здвоєними зубами;
- зменшення впливу неспіввісності, оскільки безвершинні зуби створюють ефект самоцентрування;
- стабільну шорсткість поверхні, що відповідає вимогам чистової обробки деталей;
- збільшення стійкості інструмента, оскільки відсутність вершини зменшує локальне навантаження на зуб.

Експериментальні результати підтвердили правильність технічного обгрунтування та ефективність нової конструкції.

4. Розглянуто комплекс питань, що стосуються безпеки, екологічності та економічної доцільності застосування процесу розгортання в умовах сервісного обслуговування та ремонту деталей машин агропромислового виробництва.

Операція розгортання належить до технологічних процесів підвищеної небезпеки, оскільки пов'язана з дією рухомих частин верстата, можливістю утворення дрібної стружки, електротехнічними ризиками, а також впливом підвищених рівнів шуму і вібрації. Дотримання правил охорони праці, використання засобів індивідуального захисту, правильна організація робочого місця та справність обладнання є ключовими умовами безпечного виконання операції, що повністю узгоджується з потребами сервісної інженерії в агропромисловому секторі.

Проведені розрахунки економічної ефективності довели доцільність застосування розгортання при ремонті та виготовленні точних отворів. Зменшення трудомісткості, стабільність параметрів обробки та підвищення якості поверхні забезпечили економічний ефект на рівні 101 500 грн на рік, що свідчить про значний потенціал підвищення продуктивності ремонтних та відновлювальних робіт.

Проаналізовано також екологічні аспекти процесу розгортання. Процес характеризується низьким рівнем утворення відходів, однак вимагає раціонального поводження з металевою стружкою та мастильними охолоджувальними рідинами, які можуть становити небезпеку для довкілля при неправильній утилізації. Запропоновані заходи щодо мінімізації негативного впливу – впровадження ресурсозберігаючих технологій, використання MQL-систем, замкнених циклів водопостачання, екологічно безпечних мастильних матеріалів, а також організація вентиляції та зниження шумового навантаження – дозволяють істотно зменшити вплив процесу на навколишнє середовище.

Застосування розгортання в сервісній інженерії агропромислового виробництва є технічно виправданим, економічно ефективним і екологічно прийнятним. Комплекс заходів з охорони праці, екологічної безпеки та раціонального використання ресурсів забезпечує не лише надійність технологічного процесу, але й підвищення загальної ефективності ремонтно-відновлювальних робіт у аграрному секторі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Швець С.В. Металорізальні інструменти: навчальний посібник. Суми: СумДУ, 2019. 272 с.
2. Данчюова Л.М., Лапковський С.В., Приходько В.П. Різальний інструмент: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 147 с.
3. Stephenson D.A., Agapiou J.S. Metal Cutting Theory and Practice. Florida: CRC Press, 2019. 947 p.
4. Zhu L., Le X., Zhuang K., та ін. Influence of the reaming process on hole's surface integrity and geometry in a martensitic stainless steel 15-5PH. *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 112. P. 443–448. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.03.062>
5. Mohammadi M., Prajapat K., Tekamalla P., та ін. Chatter mitigation in reaming: exploring effective tool holder design. *MMS Science Journal*. 2024. No. 06. P. 6267–6274. DOI: https://doi.org/10.17973/MMSJ.2024_06_2024017
6. Liu C.-C., Chiang K.-N. Geometric accuracy improvement by using electrochemical reaming with a helical tube electrode as post-processing for EDM. *Materials*. 2019. Vol. 12, No. 21. Art. 3564. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12213564>
7. Jiang Z., Liu J., Wang D., та ін. Optimization of reaming process parameters for alloy grey cast iron HT250 using grey relational analysis. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 866. P. 32–40. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.866.32>
8. Zhang X., Zhou X., Li Y., та ін. Study on characteristics for reaming titanium alloy Ti6Al4V with two kinds of cemented-carbide groove reamers. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 14. Art. 5027. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15145027>
9. Xu J., Huang H., Wang J. Study on reaming high-precision thin hole in hardened steel by ultrasonic vibration reamer. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 690–693. P. 3307–3311. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.690-693.3307>
10. Zhang D., Li J., He N. Investigation on peaming process of PCD tool when reaming aluminium cast alloys. *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 381. P. 30–35. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.381.30>

11. Chen P., Fan Z., Wang C., та ін. Cutting performance of reaming alloy gray cast iron HT250 using carbide, cermet and CBN reamers. *Key Engineering Materials*. 2018. Vol. 764. P. 261–266. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.764.261>
12. Xu Z., Li D., Chen X. Geometric parameters optimization of carbide reamer when reaming TC13. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 866. P. 12–19. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.866.12>
13. Zhang R., Qiu L., Zhang Y., та ін. Research and engineering practice on mechanical reaming for pressure relief and rock burst prevention technology in hard coal seam roadways. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 1234. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02002-1>
14. De Chiffre, L.; Tosello, G.; Páčka, M.; Müller, P. Investigation on capability of the reaming process using minimal quantity lubrication. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 2009, 2, 47–54.
15. Geng, D.; Zhang, D.; Li, Z.; Liu, D. Feasibility study of ultrasonic elliptical vibration-assisted reaming of carbon fiber reinforced plastics/titanium alloy stacks. *Ultrasonics* 2017, 75, 80–90.
16. Sekar, K.V.; Gobivel, K.; Goutham, G.R.; Elangovan, P.P.; Babu, N.N. Cutting forces and tool wear studies on machining of Hastelloy X. *Mater. Today Proc.* 2022, 62, 852–857.
17. Melo, T.F.L.; Filho, S.L.M.R.; Arruda, M.; Brandão, L.C. Analysis of the surface roughness, cutting efforts, and form errors in bore reaming of hardened steel using a statistical approach. *Measurement* 2018, 134, 845–854.
18. Schützer, K.; Roth, M.; Abele, E.; Hauer, T. Experimental investigation of hole quality during reaming applications using multi-blade tools. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2014, 36, 797–806.
19. Yan, X.; Li, B.; Li, J.; Yang, L. Analysis of the machining characteristics in reaming AlSi12 alloy with PCD reamer. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2013, 69, 2327–2399.
20. Li, C.; Zha, J.; Chen, Y. Geometrical shape and dimension errors and surface roughness of stepped holes in a beryllium bronze-aluminum alloy joint produced by forming reamer. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2021, 117, 3029–3039.