

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет машинобудування та транспорту

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра галузевого машинобудування

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

**«РОЗРОБЛЕННЯ ФОРМИ ДЕФОРМУЮЧОГО ЕЛЕМЕНТУ ДЛЯ
КОМБІНОВАНОЇ ОБРОБКИ ГЛАДКИХ ОТВОРІВ»**

08-62.БКР.03.000.000 ПЗ

Виконав: студент 4 курсу, групи 1ГМ-216

спеціальності 133 – галузеве машинобудування

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

БАЛАГУР Данило

(прізвище та ім'я)

Керівник: д. т. н., проф., проф. каф. ГМ

СИВАК Роман

(прізвище та ім'я)

« » _____ 2025 р.

Рецензент: д. т. н., проф., професор каф. АТМ

МАКАРОВ Володимир

(прізвище та ім'я)

«16» 06 _____ 2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри А. Косенко

«16» червня 2025 р.

Вінниця ВНТУ - 2025 рік

Вінницький національний технічний університет

Факультет машинобудування та транспорту
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра галузевого машинобудування
(повна назва кафедри)

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

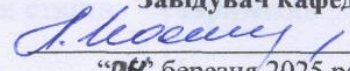
Галузь знань – 13 «Механічна інженерія»
(шифр і назва)

Спеціальність – 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва спеціальності)

Освітньо - професійна програма – Галузеве машинобудування
(назва освітньо - професійної програми)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



“04” березня 2025 року

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Балагуру Данилу Віталійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розроблення форми деформуючого елемента для комбінованої обробки гладких отворів»

Керівник роботи Сивак Роман Іванович, д. т. н., професор,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “20” березня 2025 року
№97

2. Термін подання студентом роботи 10 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: повздовжня подача – 0,07-0,23 мм/об; глибина – 0,78-0,9 мм; радіальний натяг – 0,05-0,20 мм; частота обертання заготовки – 80-315 об/хв; матеріал – Сталь 45; діаметр отвору – 30-80 мм; кут робочого конуса – 4°; методичні вказівки до виконання дипломних проєктів.

4. Зміст текстової частини: обсяг пояснювальної записки – 72 стор., рисунків – 29, таблиць – 5.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Дослідження методів підвищення якості при обробці отворів (формат А1) – 1 лист; дослідження процесу комбінованої обробки гладких отворів (формат А1) – 5 листів; імітаційне моделювання впливу конструктивних параметрів комбінованого інструменту і режимів обробки на якість поверхні (формат А1) – 3 листа

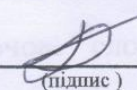
6. Консультанти розділів роботи

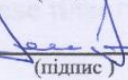
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технічний розділ (основна частина)	д. т. н., проф. Роман СИВАК	25.03.25	10.06.25
Охорона праці, безпека життєдіяльності	к. т. н., доц. Олександр ПОЛІЩУК	06.05.24	27.05.25

7. Дата видачі завдання 25.03.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Теоретичний огляд	8.04.2025 р.	Виконано
2	Дослідження процесу комбінованої обробки гладких отворів	22.04.2025 р.	Виконано
3	Імітаційне моделювання впливу конструктивних параметрів комбінованого інструменту і режимів обробки на якість поверхні	6.05.2025 р.	Виконано
4	Моделювання комбінованого інструменту	20.05.2025 р.	Виконано
5	Охорона праці	27.05.2025 р.	Виконано
6	Оформлення текстової та графічної частини проекту	10.06.2025 р.	Виконано
7	Перевірка на плагіат	11.06.2025 р.	Виконано
8	Нормо контроль БКР	12.06.2025 р.	Виконано
9	Попередній захист БКР	13.06.2025 р.	Виконано
10	Рецензування БКР	16.06.2025 р.	Виконано
11	Захист БКР	за графіком	Виконано

Студент  Д. В. Балагур
(підпис) (ініціали і прізвище)

Керівник роботи  Р. І. Сивак
(підпис) (ініціали і прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з 74 стор. формату А4, на яких є 29 рисунків, 5 таблиць, список використаних джерел містить 24 найменування.

Метою даної роботи є розробка інноваційної технології обробки внутрішньої поверхні гільзи гідроциліндра із застосуванням комбінованого інструменту для підвищення її якості, шляхом зменшення шорсткості поверхні гільзи та збільшення твердості поверхневого шару.

Для досягнення цієї мети проведено аналіз досліджень методів підвищення якості при обробці отворів, який включає аналіз особливостей остаточної обробки отворів, класифікацію методів обробки та інструментів для остаточної обробки отворів, аналіз способів забезпечення експлуатаційних властивостей та сучасні напрямки досліджень з питань підвищення якості поверхневого шару.

Виконано дослідження процесу комбінованої обробки гладких отворів, який включає оцінку перспективності обробки комбінованим інструментом, аналіз основних параметрів процесу обробки, дослідження силових залежностей при комбінованій обробці, аналіз зміцнення поверхневого шару при обробці поверхневим пластичним деформуванням, дослідження глибини наклепу, аналіз зміцнення металу поверхневого шару при обробці різанням, дослідження механізму утворення мікронерівностей обробленої поверхні.

Здійснено імітаційне моделювання впливу конструктивних параметрів комбінованого інструменту і режимів обробки на якість поверхні, розробка оптимальної форми деформуючого елемента, дослідження впливу подачі на якість поверхні, дослідження впливу натягу на зміну розмірів деталі, моделювання комбінованого інструменту.

Ключові слова: комбінований інструмент, шорсткість, твердість, зміцнення, поверхнєве пластичне деформування.

ABSTRACT

The bachelor's qualification work consists of 74 pages of A4 format, which include 29 figures, 5 tables and the list of sources used contains 24 names.

The purpose of this work is to develop an innovative technology for processing the inner surface of a hydraulic cylinder sleeve using a combined tool to improve its quality by reducing the roughness of the sleeve surface and increasing the hardness of the surface layer.

To achieve this goal, an analysis of research methods for improving quality in hole processing was conducted, which includes an analysis of the features of final hole processing, a classification of processing methods and tools for final hole processing, an analysis of methods for ensuring operational properties, and modern research directions on improving the quality of the surface layer.

The study of the combined machining process of smooth holes was carried out, which includes an assessment of the prospects of machining with a combined tool, analysis of the main parameters of the machining process, study of force dependencies during combined machining, analysis of surface layer strengthening during surface plastic deformation machining, study of the depth of hardening, analysis of surface layer metal strengthening during cutting machining, study of the mechanism of formation of micro-roughnesses of the machined surface.

Simulation modeling of the influence of the design parameters of the combined tool and machining modes on the surface quality was carried out, development of the optimal shape of the deforming element, study of the influence of feed on the surface quality, study of the influence of tension on the change in the dimensions of the part, modeling of the combined tool.

Keywords: combined tool, roughness, hardness, strengthening, surface plastic deformation.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПРИ ОБРОБЦІ ОТВОРІВ.....	9
1.1 Аналіз особливостей остаточної обробки отворів	9
1.2 Класифікація методів обробки та інструментів для остаточної обробки отворів	11
1.3 Аналіз способів забезпечення експлуатаційних властивостей.....	13
1.4 Сучасні напрямки досліджень з питань підвищення якості поверхневого шару.....	16
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОЇ ОБРОБКИ ГЛАДКИХ ОТВОРІВ.....	20
2.1 Перспективність обробки комбінованим інструментом	20
2.2 Аналіз основних параметрів процесу обробки	21
2.3 Дослідження силових залежностей при комбінованій обробці.....	24
2.4 Аналіз зміцнення поверхневого шару при обробці поверхневим пластичним деформуванням.....	26
2.5 Дослідження глибини наклепу.....	27
2.6 Аналіз зміцнення металу поверхневого шару при обробці різанням.....	29
2.7 Механізм утворення мікронерівностей обробленої поверхні.....	31
3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМБІНОВАНОГО ІНСТРУМЕНТУ І РЕЖИМІВ ОБРОБКИ НА ЯКІСТЬ ПОВЕРХНІ	35
3.1 Розробка оптимальної форми деформуючого елемента	35
3.2 Дослідження впливу подачі на якість поверхні	37
3.3 Дослідження впливу натягу на зміну розмірів деталі.....	38
3.4 Моделювання комбінованого інструменту.....	42
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	44

4.1 Аналіз умов праці	44
4.2 Організаційно – технічні рішення щодо забезпечення безпечної роботи.....	45
4.2.1 Електробезпека	45
4.3 Організаційно-технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	45
4.3.1 Санітарні вимоги до приміщення	46
4.3.2 Мікроклімат	46
4.3.3 Опалення приміщень	47
4.3.4 Вентиляція	47
4.3.5 Освітлення.....	48
4.3.6 Шум	49
4.3.7 Вібраційна безпека (ГОСТ 12.1.012-90).....	49
ВИСНОВКИ.....	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	52
ДОДАТОК А – ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ.....	55
ДОДАТОК Б – ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА.....	60
ДОДАТОК В – ПРОТОКОЛ ПЕРЕРЕВІРКИ НА ПЛАГІАТ.....	71

ВСТУП

Розвиток машинобудівної галузі є одним із важливих показників технологічного рівня промисловості по всьому світу. Машинобудування надає ефективний вплив на розвиток інших суміжних галузей промисловості, забезпечуючи зайнятість більшої частини населення і конкурентоспроможність економіки як регіонів, так і держави загалом.

Розвиток машинобудівної галузі відіграє важливу роль в економічному зростанні. Розвиток машинобудування підвищує продуктивність у ряді інших секторів промисловості та покращує технологічний та технічний рівень діючих промислових організацій.

Модернізація діючих підприємств сучасним обладнанням, створення нових підприємств для випуску конкурентоспроможної продукції міжнародного стандарту, вирішення питань щодо вдосконалення ремонтних виробництв є основним для промислового машинобудування.

Розвиток сучасного машинобудування та промислових підприємств регіонів передбачає спільний розвиток сучасних технологій у всіх наукових напрямках, а також підготовку кваліфікованих кадрів на всіх рівнях виробництва.

В роботі вирішується питання щодо аналізу та подальшої розробки технології та методики для виготовлення гідравлічних силових циліндрів з виробничої та наукової точок зору.

Аналіз досліджень в галузі гідравліки в машинобудуванні, показав, що розробка технологічних рішень для поліпшення та підвищення експлуатаційних властивостей гідравлічних циліндрів у механізованих підйомних пристроях із застосуванням спеціальних оздоблювально-зміцнювальних методів є актуальною.

1 Дослідження методів підвищення якості при обробці отворів

1.1 Аналіз особливостей остаточної обробки отворів

Обробка внутрішніх циліндричних поверхонь є найбільш складним процесом, ніж аналогічна обробка зовнішніх поверхонь різанням. Це пов'язано з внутрішньою циліндричною утворюваною поверхнею, що створює складності при орієнтації ріжучого лезового інструменту щодо оброблюваної поверхні, з подачею мастильно-охолоджувальної рідини, вимірами, контролем мікрогеометрії та розмірів, спостереженням за процесом, використанням складнішого інструменту та інших особливостях. Основні методи чистової обробки різанням, які найбільше широко використовуються в промисловості, не тільки мають низьку продуктивність, але й технологічно недостатньо досконалі і при використанні стандартних інструментів забезпечують середні значення точності.

Незважаючи на те, що вони забезпечують точність обробки на рівні технологічних вимог, форми і розмірів отворів, вони не повністю забезпечують відповідні характеристики на рівні мікрогеометрії. В результаті, у технологічному процесі при обробці внутрішніх поверхонь після чистового розточування виникає питання додавання операції доведення для забезпечення необхідної якості поверхневого шару. Ці деталі зазвичай виготовляються з пластичних матеріалів і доцільніше досягати необхідної якості поверхні за допомогою поверхневої пластичної деформації.

При пластичному деформуванні поверхневого шару металу є ряд переваг, порівняно з традиційною обробкою на верстатах: точінням, шліфуванням, хонінгуванням та поліруванням [1]:

- зберігається цілісність волокон металу з утворенням дрібнозернистої структури на поверхневому шарі;
- відсутність насичення обробленої поверхні частинками шліфувального кола та полірувальних або притиральних паст;

- відсутність на поверхні термічних дефектів;
- досягнення мінімального параметра шорсткості поверхні (R_a , мкм) за один робочий прохід;
- створення сприятливих напружень (залишкових стискаючих) у поверхневому шарі металу;
- більш плавне підвищення мікротвердості поверхні без перепадів.

Керування процесом чистової обробки отворів тиском значно ускладнюється тим, що поверхневий шар матеріалу заготовки гранично неоднорідно деформований в результаті обробки її різанням, його мікрогеометрія хаотична [2].

Оскільки всі технічні метали є складними сплавами, в яких містяться розчинні та нерозчинні домішки хімічних речовин та характеризуються неоднорідністю структури, деякі дослідники заперечують встановлення певних кількісних закономірностей між внутрішніми напруженнями і деформаціями в реальному неоднорідному металі [3]. В результаті застосування математичної та прикладної теорії пластичності матеріалів нехтують реальною будовою та фізико-хімічною неоднорідністю металу з властивостями, що змінюються в процесі деформування, і розглядають метал як однорідне тіло в просторі. За підсумком обмежуються якісним вивченням процесів обробки тиском і в результаті застосування прикладної теорії пластичності отримують чисельні залежності, які недостатньо точні для практичного використання. Це положення погіршується особливо великою вихідною неоднорідністю в поверхневих шарах деформівного металу при чистовій оздоблювально-зміцнювальній обробці. Необхідно визнати, що неминучі у переважній більшості випадків обробки тиском експериментальні дослідження та налагодження процесів фінішної обробки порівняно з формотворчою обробкою потребують менших витрат часу та коштів.

Проблема вивчення процесів поверхневого пластичного деформування обумовлена тим, що із заданих механічних властивостей металу, величина

опору пластичному деформуванню постійно змінюється разом із зміною механічних властивостей [4] і ці зміни за характером неоднорідні.

При розрахунках числових значень режимів обробки металів тиском обов'язково необхідно попередньо експериментально та на комп'ютерній моделі встановлювати характерну для даного металу залежність, яка пов'язує опір пластичного деформування з величиною деформації.

Таким чином, завдання створення прикладної теорії пластичності має вирішуватися комплексно, тобто шляхом встановлення якісних залежностей та кількісних закономірностей між напруженнями та деформаціями в реальному металі на підставі результатів теоретичних та експериментальних досліджень, а також узагальнень із накопиченого виробничого досвіду.

1.2 Класифікація методів обробки та інструментів для остаточної обробки отворів

Відповідно до табл. 1.1, для обробки отворів гідроциліндрів використовуються наступні способи:

Розкочування - використовується кочення інструменту по робочій поверхні. Інструмент – розкочувальні ролики або кульки.

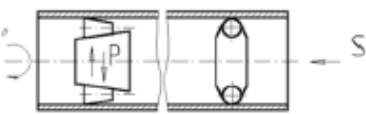
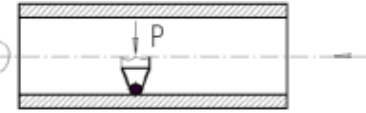
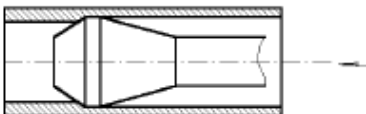
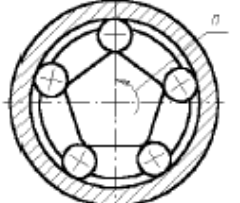
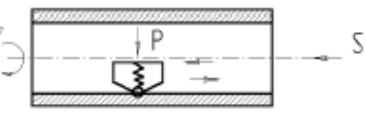
Вигладжування – використовується ковзання інструменту по поверхні, що локально контактує з інструментом. Інструмент – твердий наконечник чи кулька.

Дорнування (деформуюче протягування) - використовується поступальне ковзання вигладжувального інструменту по охоплюваній поверхні. Інструмент – деформуюча протяжка (дорн).

Ударне розкочування – використовується удар роликів у момент проходження виступаючих частин опори, удар забезпечується обертанням опори.

Вібраційна обробка – використовується накочування або вигладжування при вібрації інструменту щодо деформівної поверхні. Інструмент – куля або вигладжувальний наконечник.

Таблиця 1.1 Характеристики способів фінішної обробки отворів методами поверхневого пластичного деформування

Принципова схема		Шорсткість, Ra_{max}	Глибина наклепу, мкм	Ступінь наклепу, %
Розкочування		0,08-0,32	До 15000	20-50
Вигладжування		0,08-0,04	1000	20-25
Дорнування		0,32-0,16	5000	20-50
Ударне розкочування		0,32-0,08	5000	20-50
Вібраційна обробка		0,32-0,08	2000	20-40

При аналізі характеристик способів фінішної обробки отворів методами поверхневого пластичного деформування можна зробити висновок про середні значення режимів обробки циліндричних отворів.

1.3 Аналіз способів забезпечення експлуатаційних властивостей

Як вказувалося, раніше більш прийнятною для забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик виробу є обробка робочих поверхонь поверхневим пластичним деформуванням. Визначено декілька способів обробки отворів: вібраційна обробка, ударне розкочування, протягування (дорнування), вигладжування та розкочування:

1. Вібраційна обробка не може бути застосована за даних умов через неможливість забезпечення необхідної точності – необхідна точна попередня обробка різанням.

2. Ударне розкочування має обмеження за мінімальним розміром діаметра отвору, граничний розмір становить 70 мм. Крім того, має той же недолік що вібраційна обробка - неможливість забезпечення необхідної точності.

3. Використання дорнування неможливе через велику довжину деталей. Деформуюча протяжка – складний та трудомісткий у виготовленні інструмент, що використовується на спеціальних верстатах. Протягування є ефективним і продуктивним способом фінішної обробки, але не для невеликих програм випуску виробів.

4. Розкочування та вигладжування розрізняються за характером роботи та впливом на оброблювану поверхню. Контакткування інструменту із заготовкою у першому випадку відбувається з тертям кочення, у другому випадку із тертям ковзання. Ефективність практично за всіма техніко-економічними показниками при терті кочення вище. Однак для нашого випадку процес розкочування не дає забезпечення експлуатаційних характеристик.

Враховуючи конкретні умови обробки, програму випуску та вимоги до деталей або виробів, можна сказати, що прийнятними є такі операції: розкочування та вигладжування (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 - Зношування гільз гідроциліндрів при різних методах її обробки

Вид обробки	Шорсткість, мкм	Наклеп, %	Зношування гільзи	
			мГ	%
Хонінгування	0,63	180	440	74
Доведення	0,2 - 0,32	160	530	98
Розкочування	0,32	210	420	78
Вигладжування	0,32	230	390	72

Таким чином, при виготовленні деталей зі сталі, найкращими, з точки зору зносостійкості деталей гідроапаратури, методами обробки, в даних умовах, виявилися методи, що створюють найбільше зміцнення поверхневого металу шару. Шорсткість поверхні в даному випадку має менше значення, ніж наклеп металу поверхневого шару. Однак слід зазначити, що в тих випадках, коли ступінь наклепу металу поверхневого шару при різних видах обробки виявляється близькою, а шорсткість поверхні значно відрізняється, менше зношування дають види обробки, що створюють менш шорсткі поверхні.

З наведених прикладів опису методів обробки здається несподіваним велике зношування обкатаних деталей. Мікроскопічне дослідження дозволило виявити на їх поверхні тріщини, що виникають в результаті перенаклепу металу поверхневого шару. Висока зносостійкість деталей, оброблених вигладжуванням, пояснюється наявністю негативних залишкових напружень [5].

Для деталей гідроапаратури, що мають велику довжину, важливе значення має точність обробки вздовж отвору. Зміна розміру при вигладжуванні та розкочуванні за інших рівних умов залежить від вихідної шорсткості і приблизно визначається за формулою [6]:

$$\Delta d \approx 2/3(Ra_{\text{поч}} - Ra) \quad (1.1)$$

де $Ra_{\text{поч}}$ та Ra – відповідно висоти нерівностей до та після обробки.

Ця формула забезпечує цілком прийнятну точність за умови, що вихідна шорсткість не перевищує висоти нерівностей відповідно не вище за $Ra = 0.63$.

Дослідження [7] підтверджують дані про те, що вигладжування та розкочування при пружному контакті заготовок та інструменту практично не змінює точність вихідної форми заготовки, так само, як і точність розмірів. А це означає, що така характеристика як хвилястість залишається не виправленою і значно знижує зносостійкість гільз. Для виправлення форми закріплення інструмента має бути жорстким.

Висока жорсткість системи інструмент – заготовка в радіальному перерізі під час роботи інструментами поверхневого пластичного деформування і, як наслідок, висока чутливість цієї системи до незначних коливань основного параметра обробки – натягу, призводить до утворення ділянок з різною якістю поверхні, наприклад «плямистості» або кришення поверхні. Неоднорідність матеріалу неминуха у промислових умовах, для виключення коливань натягу при контакті з твердими або м'якими включеннями, попередня обробка повинна виключити велику відмінність у висоті гребінців нерівностей та виправити дефекти макрогеометрії.

Підвищені вимоги до попередньо отриманого отвору – основний недолік методів поверхневого пластичного деформування. Виключити цей недолік можна при суміщенні операцій попередньої обробки різанням з подальшою калібрувально-оздоблювально-зміцнювальною обробкою тиском.

Дослідження та промислові випробування показали, що у більшості випадків виконання умов, що забезпечують підвищення точності при одночасному обробленні різанням та тиском, на практиці не викликає труднощів. Перевага способу комбінованої обробки особливо наочно ілюструється досвідом поєднання напівчистої та чистої обробки сталевих східчастих штоків. Переконливо підтвердився цей результат дослідженнями [8], які показали що:

- суміщена обробка точінням та обкочуванням диференціальними обкатниками з конічними роликами успішно застосовується замість кінцевої операції шліфування при обробці сталей, чавунів, кольорових металів та сплавів твердістю до 45 HRC;

- зниження висоти вихідних нерівностей відбувається з 10 до 0,63 мкм;
- підвищення поверхневої твердості становить до 50%;
- відбувається утворення та стабілізація сприятливих для більшості умов експлуатації стискаючих залишкових напружень;
- продуктивність суміщеної обробки різанням та тиском у 2...7 разів вища за абразивну, а за трудомісткістю нижчою за шліфування.

Поєднання кількох видів механічної обробки деталей можливе при обробці різанням та холодним пластичним деформуванням із застосуванням комбінованих інструментів. Особливості та переваги такого підходу спрямовані на вдосконалення металообробки шляхом скорочення циклу обробки та збільшення продуктивності праці, а також підвищення якості оброблюваних деталей.

1.4 Сучасні напрямки досліджень з питань підвищення якості поверхневого шару

Напрямок досліджень в області пластичного деформування використовувався у промисловості, насамперед, для виготовлення заготовок, далі для – формоутворення і третій напрямок - оздоблювально-зміцнювальна обробка. Створено напрямок досліджень – кінето-пластичне формоутворення.

З сучасних знань і теорій у розділах механічної обробки та об'ємної деформації, що пояснюють природу пластичної деформації та об'ємного зміцнення металів і сплавів, визнаною і більш повною вважається дислокаційна теорія. В описі дислокаційних теорій аналізується та розглядається кристал, вихідний стан якого містить максимальну кількість дислокацій, які розташовані в заданому вигляді, як просторова сітка. Існування сіток можна знайти під електронним мікроскопом, а також рентгенівськими методами дослідження. Поверхнева пластична деформація є

процесом утворення нових просторових дислокацій та їх переміщення по кристалу.

Для вирішення задач поверхневої пластичної деформації допускається застосування законів найменшого опору, закону сталості об'ємів, закону найменшого периметра тощо.

Багато наукових праць [9] присвячені аналізу, розробці і розрахунку обробних інструментів та аналізу поверхонь при деформації.

У роботах [9] процес різання розглянуто як процес холодного пластичного деформування з точки зору механіки. Обговорено питання еквівалентності деформацій, можливості існування єдиної кривої течії металів під час різання та інших процесах деформування. Введено єдину фундаментальну механічну характеристику оброблюваного матеріалу, створено теорію, яка знайшла широке практичне застосування в промисловості при проектуванні процесу ріжучо-деформуючого протягування.

Хронологічна систематизація досліджень показала, що основним із напрямів є розвиток формоутворення пластичним деформуванням, а в області комбінування методів обробки переважно ведуться дослідження процесів деформуючого протягування і редукування.

Є велика кількість патентів на комбінований інструмент, що поєднує у своїй конструкції ріжучу головку і деформуючий елемент у вигляді кулькового або роликового розкатника.

Останнім часом були виконані нові теоретичні та експериментальні дослідження, метою яких було уточнення механізму холодної пластичної деформації, розширення можливостей способів поверхневого пластичного деформування, поліпшення управління цими процесами з тим, щоб підвищити якість поверхні і необхідні експлуатаційні властивості деталей машин, зробити їх більш економічними і надійними.

У роботі [10] наведено досить повний огляд робіт у галузі вивчення механізму та законів розподілу контактних тисків, деформацій та напружень

при поверхневій пластичній деформації і зроблено висновок про те, що саме ці фактори визначають зміни якості поверхні оброблюваних способами поверхневого пластичного деформування деталей та практично всі його характеристики. Відповідно до цього ставиться завдання встановлення законів розподілу контактних тисків, деформацій та напружень, виходячи з відомого положення про неможливість встановлення цих законів для способів обробки поверхневим пластичним деформуванням, використовуючи теорію пружності та пластичної течії. Пропонується методика визначення законів розподілу, на основі якої складно скласти відповідний алгоритм.

Експериментальна перевірка підтвердила той факт, що при поверхневій пластичній деформації оброблюваний матеріал не можна вважати ні абсолютно пружним, ні гранично пластичним, тому відповідно не можна визначати розподіл контактних тисків, деформацій та напружень за теоріями пружності та пластичної течії.

У переважній більшості випадків у промисловій практиці проводиться експериментальне відпрацювання оптимальних значень режимів поверхневої пластичної деформації: насамперед зусилля деформування на основі планування одного або багатofакторного експерименту. Результати таких досліджень призводять до частинних, проте найбільш достовірних та надійних результатів, що забезпечують досягнення необхідних експлуатаційних властивостей деталей.

На якісні показники результатів та отримані результати числових величин для параметрів і характеристики значення мікрогеометрії поверхні матеріалу, найбільший вплив, як показав експеримент, надає пікове максимальне значення величин нормальних, а так само дотичних напружень при обробці, що виникають в осередку деформацій, і відношення значень даних величин, що у свою чергу є визначальним для направлення вектора деформуючого кулькового елемента з циліндричною оброблювальною поверхнею. В результаті, це завдання підводиться до визначення значень величин і основних напрямів визначальних напружень у матеріалі, в

пластичності матеріалу та теорії пружності для металів. Це задача вирішувалася в комп'ютерному додатку для моделювання пружного та пластичного деформування нерівностей поверхні на мікрорівні технічних поверхонь, які можуть бути оброблені різними інструментами поверхневим пластичним деформуванням для чистової обробки, але повністю не була вирішена.

При роздачі осесиметричних заготовок вивчали питання силових навантажень [11]. Однак у них закінчені рішення мають лише питання роздачі нескінченних труб рівномірно розподіленим внутрішнім тиском, причому з використанням низки припущень (плоский навантажений стан, відсутність осевого навантаження, ідеально пластичний матеріал). Однак процес деформування при роздачі осесиметричної заготовки досить трудомісткий. У вузькій зоні контакту деформуючого елемента із заготовкою, що переміщається в процесі деформування по довжині заготовки, виникають контактні тиски, які в залежності від умов деформування можуть збільшуватися на два порядки і в багатьох випадках досягати кількох гігапаскалів. При цьому тертя викликає утворення на обробленій поверхні, суттєвого по товщині, шару текстури, ступінь деформації в якому може досягати багатьох десятків і навіть сотень відсотків.

В результаті, поставлена задача щодо вдосконалення технологічного процесу комбінованої обробки наскрізних отворів за допомогою поєднаної розгортки, що поєднує в інструменті різання та пластичне деформування кульками, є дуже актуальною. Перевагою є вивчення особливостей технологічного процесу та вплив даного процесу на якість поверхні у отримуваних деталей, а також етапна розробка нових та вдосконалення діючих конструкцій металорізальних інструментів. Як результат — складання та обґрунтування загальних рекомендацій щодо раціональної експлуатації отриманого інструменту.

2 Дослідження процесу комбінованої обробки гладких отворів

2.1 Перспективність обробки комбінованим інструментом

В даний час знайшли виробниче застосування деформуючі протяжки та збірні конструкції розкочувальних головок з ріжучим блоком.

Ріжучо-деформуючі протяжки (рис. 2.1) широко використовуються в машинобудівному виробництві для обробки точних отворів з низькою шорсткістю поверхні та порівняно грубих операцій виправлення трубних заготовок перед подальшою обробкою. При цьому можуть здійснюватися як малі поверхневі, так і великі пластичні деформації, що досягають 20%, що охоплюють всю товщину стінки деталі, змінюють її розміри та механічні характеристики металу.

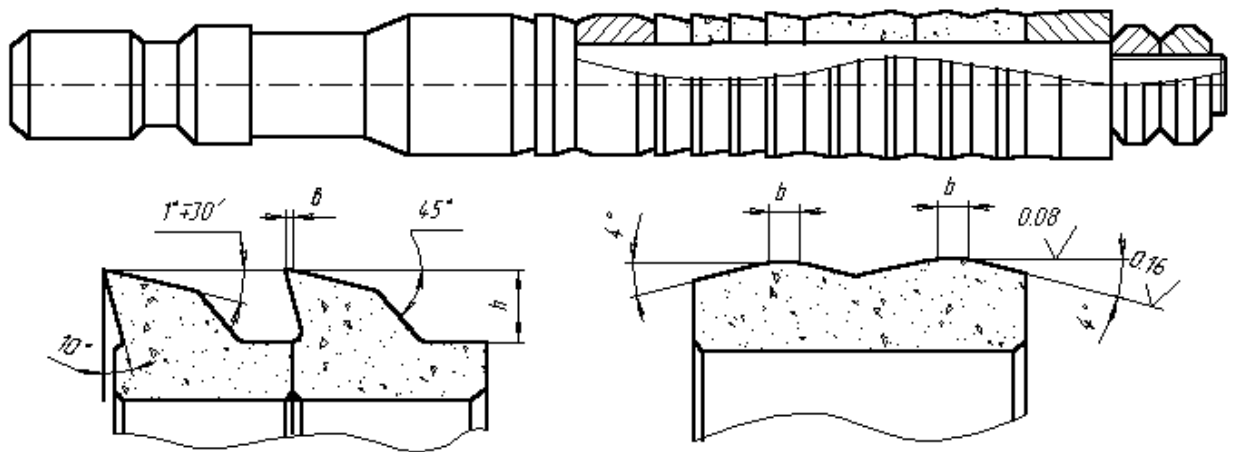


Рисунок 2.1 – Комбінована ріжучо-деформуюча протяжка

Класична комбінована обробка - одночасне розточування і розкочування отворів пристроєм, що має різцеву 1 і розкочувальну головки 2 з розташованим між ними імпелером 3 для запобігання попаданню стружки під розкочувальні ролики (рис. 2.2). При цьому необхідне підведення змащувально-охолоджувальної рідини і обов'язковий вихід стружки у бік вектора швидкості.

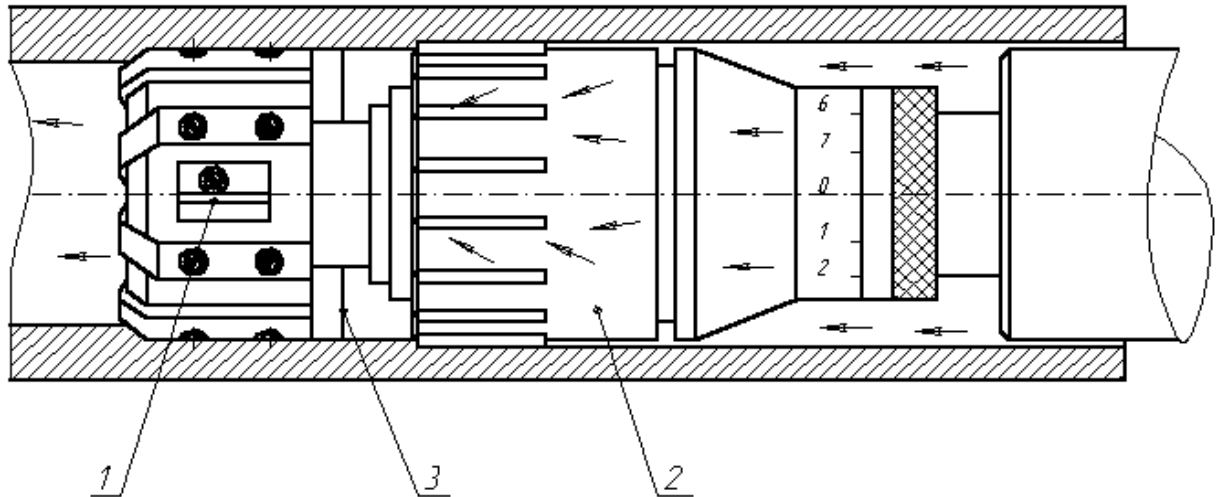


Рисунок 2.2 – Схема одночасного розточування та розкочування

Для вдосконалення конструкції інструментів відкривається велика можливість при застосуванні та комбінуванні різних способів обробки різанням, тому що в результаті з'являється можливість застосування при одній операції обробки використання безлічі переваг, які властиві окремим технологічним процесам та інструментам. Прикладом даного металорізального інструменту може бути розгортка з ущільнюючими бічними стрічками (рис. 2.3).

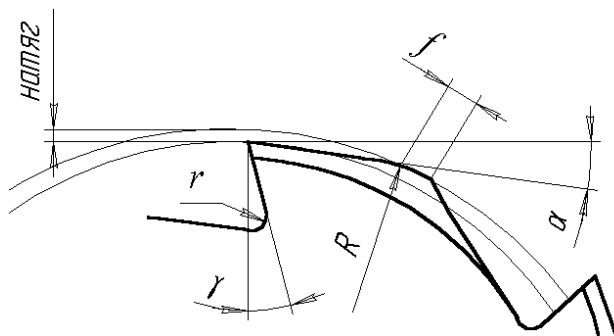


Рисунок 2.3 – Зуб із додатковою ущільнюючою стрічкою

2.2 Аналіз основних параметрів процесу обробки

В роботі [12] розроблено кінцево-елементну 3D-модель у програмному продукті (рис. 2.4) процесу поверхневого пластичного деформування

кулькою ($\varnothing$ 6 мм) зразка з підшипникової низьколегованої хромової мартенситної сталі (AISI52100). Отримані дані були зіставлені з результатами кінцево-елементного моделювання процесу поверхневого пластичного деформування кулькою в 2D постановці.

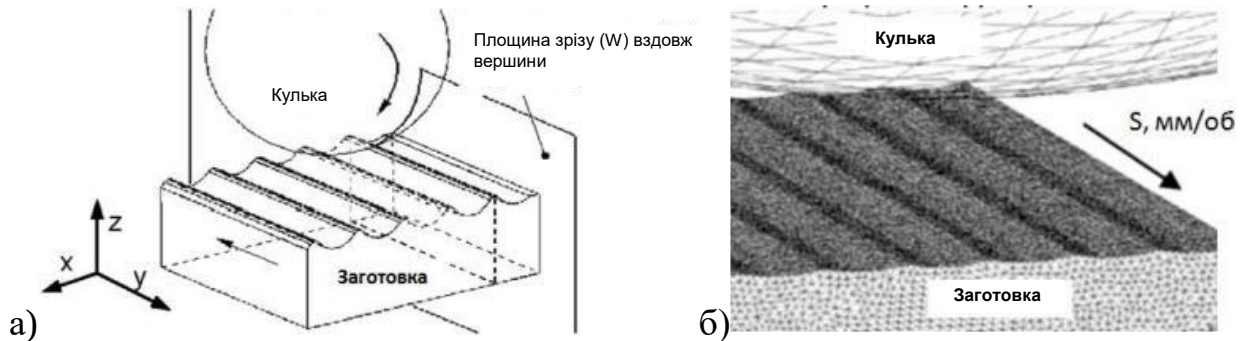
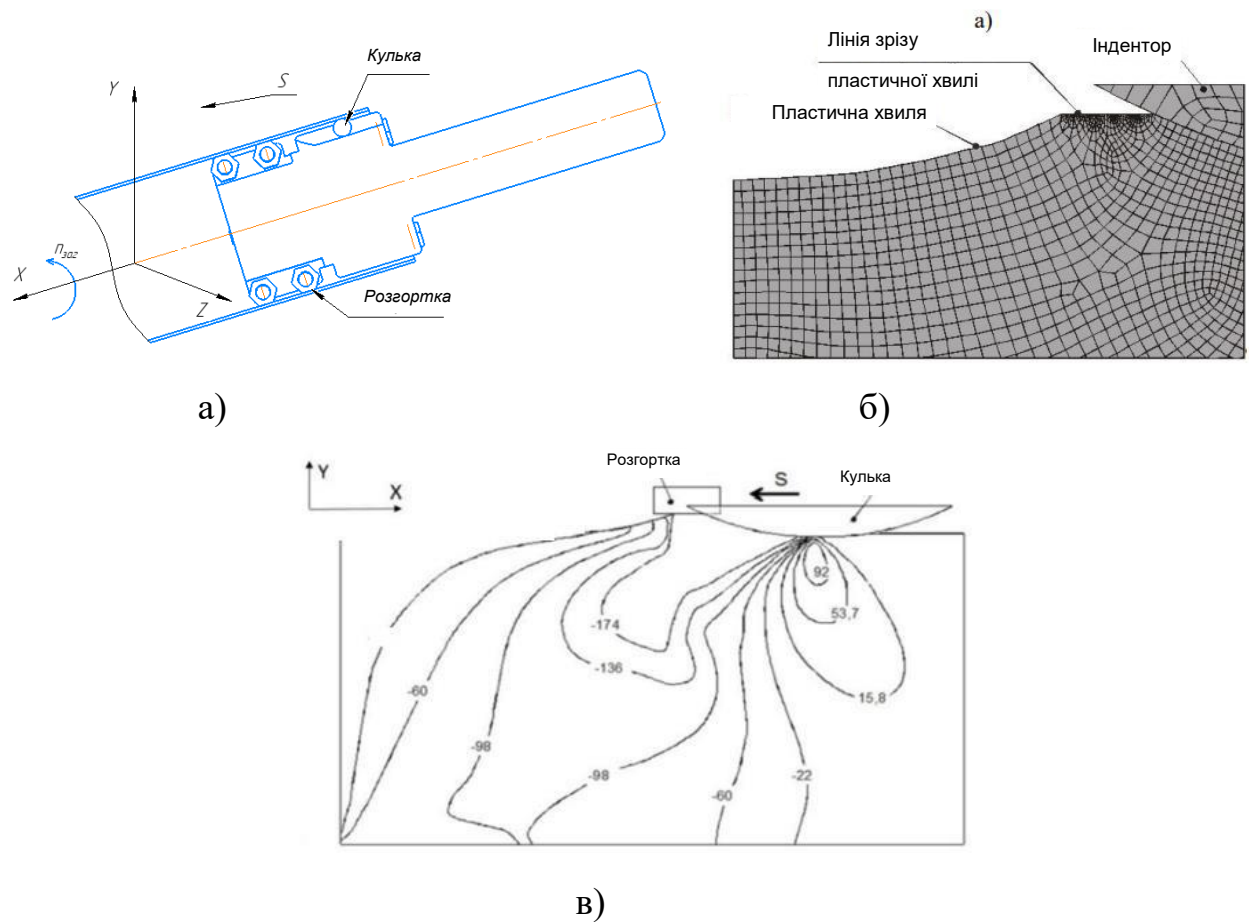


Рисунок 2.4 – Постановка задачі (а) та кінцево-елементна модель поверхневого пластичного деформування кулькою (б)

Відповідно до рис. 2.5, б, найбільшу концентрацію елементів модель може мати безпосередньо в зоні пластичної течії металу в осередку деформації, а також у зоні зрізання пластичної хвилі [13]. Результати моделювання дозволили визначити напружено-деформований стан, що характеризується тензорами напружень та відносних деформацій у вузлах кінцево-елементної моделі та вздовж ліній току. Найбільший перепад всіх компонентів напружень спостерігається в зоні при вершині деформуючого ролика. Тут високі значення стискаючих напружень в районі передньої контактної поверхні переходять в нульові або (рис. 2.5, в) напруження розтягу в районі задньої контактної поверхні ролика. Розмір градієнта сягає - 2200 МПа на 1 мм довжини осередку деформації [13]. Таким чином, можна сказати, що процес розмірного суміщення обкочування дозволяє інтенсифікувати напружено-деформований стан в осередку деформації [14].

З метою інтенсифікації напружено-деформованого стану, розроблена модель процесу поверхневого пластичного деформування кульковим інструментом за схемою багаторазового навантаження-розвантаження металу деталі (рис. 2.5, а), що максимально враховує феноменологію процесу

поверхневого пластичного деформування, і отримано розподіл параметрів напружено-деформованого стану для сталі 45 [15].



а - модель процесу розмірного поєднаного обкочування; б - зона зрізання пластичної хвилі (фрагмент кінцево-елементної моделі); в – розподіл компонент напруженого стану, МПа

Рисунок 2.5 – Модель процесу розмірного поєднаного обкочування

Головним технологічним параметром для проведення та розрахунку комбінованого процесу є припуск для деформування, який дорівнює різниці між основним діаметром деформуючого елемента (d) та діаметром отриманого отвору (d_0 , що дорівнює номінальному діаметру різальної частини комбінованої розгортки)

$$i = d - d_0 \quad (2.1)$$

2.3 Дослідження силових залежностей при комбінованій обробці

У поздовжній подачі рівнодійну діючих сил можна розкласти на складові за координатними осями:

$$R = \sqrt{P_n^2 + P_t^2 + P_0^2} \quad (2.2)$$

де P_n – нормальна складова; P_t – тангенціальна складова; P_0 – осьова складова.

Величину нормальної сили рекомендують визначати за формулою [1]

$$P_H = \pi \cdot q_N (R \sin \alpha)^2 \quad (2.3)$$

де q_N – середній контактний тиск; R – радіус деформуючого інструменту; α – кут вдавлювання, що залежить від властивостей матеріалу, розмірів деталі та інструменту.

Нормальну силу при вигладжуванні можна також визначити за формулою [6]:

$$P_B = \pi \cdot \varepsilon \cdot HV \cdot R^2 \quad (2.4)$$

де $\varepsilon = 0,0015-0,007$ – відносна глибина впровадження; HV – твердість за Віккерсом.

Однак величина деформації у формулах виражена по-різному і контактну площу інструмента з деталлю прийнято приблизно.

Більш точний вираз для контактної площі має такий вигляд:

$$F_k = \frac{8}{3} R \sqrt{\frac{Rd}{Rd \pm R}} \left[\sqrt{(h+w)w} + w + \frac{1}{4} \sqrt{wh} \right] \quad (2.5)$$

де R – радіус робочої частини інструменту; R_d – радіус деталі; h – залишкова деформація; w – місцева пружна деформація деталі та інструменту.

Механічна операція поверхневого пластичного деформування можлива при контактних робочих напруженнях, які викликають пластичну деформацію матеріалу (металу). При виникненні між деталлю гільзи гідроциліндра та комбінованого інструменту пружного зв'язку обробка не буде проводитися. Для нормального перебігу процесу поверхневого

пластичного деформування робоча частина інструменту впроваджується на певну глибину в оброблювану поверхню деталі з дотриманням необхідної умови:

$$\varepsilon_2 > \varepsilon > \varepsilon_1 \quad (2.6)$$

де $\varepsilon = h/R$ – відносна глибина впровадження; ε_1 – відносна глибина впровадження, при якій робоче напруження викликає пластичну деформацію; ε_2 – відносна глибина впровадження, за якої припиняється пластична течія і починається руйнування поверхні деталі.

Зміцнення та зменшення поточної шорсткості в мкм визначають заданою величиною зусилля при якому розкочувальні елементи інструменту вдавлюються в поверхню.

$$P_H = q_N \cdot F \quad (2.7)$$

де P_H - нормальна складова сили, Н; F – площа контакту, м²; q_N - контактний тиск, МПа.

Теоретичний аналіз процесу залежності контактного тиску від технологічних факторів для створення умов процесу може бути виконаний із застосуванням основних законів теорії пружності та пластичності матеріалу (металу). За основу взято безмоментну теорію оболонок, згідно цієї моделі, величина контактного тиску може бути обчислена на основі наступної формули:

$$q_N = \frac{i}{\frac{2r}{E_2} \left(\frac{r_H^2 + r^2}{r_H^2 - r^2} + \mu_2 \right) + \frac{2r}{E_1} (1 - \mu_1)} \quad (2.8)$$

де i – натяг; r – радіус обробки; r_H – зовнішній радіус деталі; μ_1 , μ_2 – коефіцієнти Пуассона інструменту та деталі; E_1 , E_2 – модулі пружності матеріалів інструменту та деталі.

2.4 Аналіз зміцнення поверхневого шару при обробці поверхневим пластичним деформуванням

Встановлена залежність підвищення поверхневої твердості від нормальної сили відбувається до певної межі, після якої спостерігається її певне зниження (рис. 2.6).

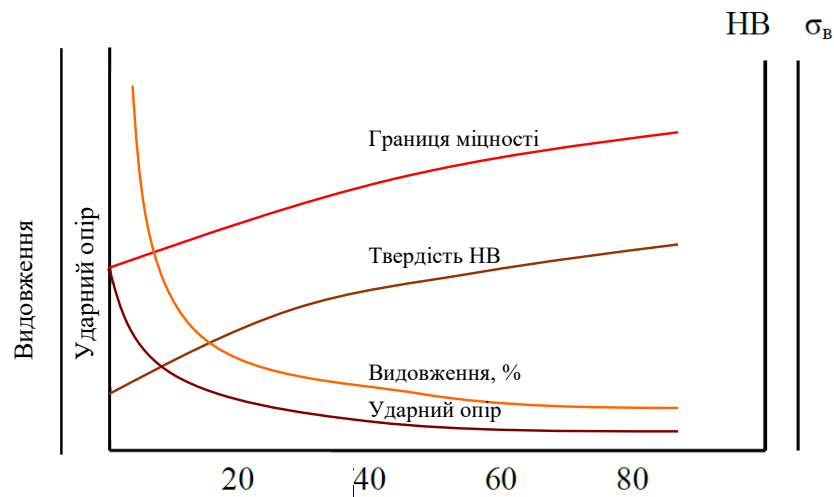


Рисунок 2.6 – Характер зміни механічних властивостей металу поверхневого шару від ступеня деформації

В роботі [7] досліджувався ряд вуглецевих сталей феритно-перлітною структурою. Результати дослідження показують, що при поверхневому деформуванні максимальне зміцнення досягається у кожного матеріалу за певного тиску (рис. 2.7). У м'якіших і пластичних – при меншому, а у твердих і менш пластичних, навпаки, при більшому тиску. У АРМКО-заліза приріст твердості припиняється при тиску: 160 кгс/мм², чому відповідає нормальна сила $P_n = 50$ кгс, а у сталей 20, 45 і У8 відповідно при тиску 180, 210 і 220 кгс/мм², або силах 100, 180 і 200 кгс.

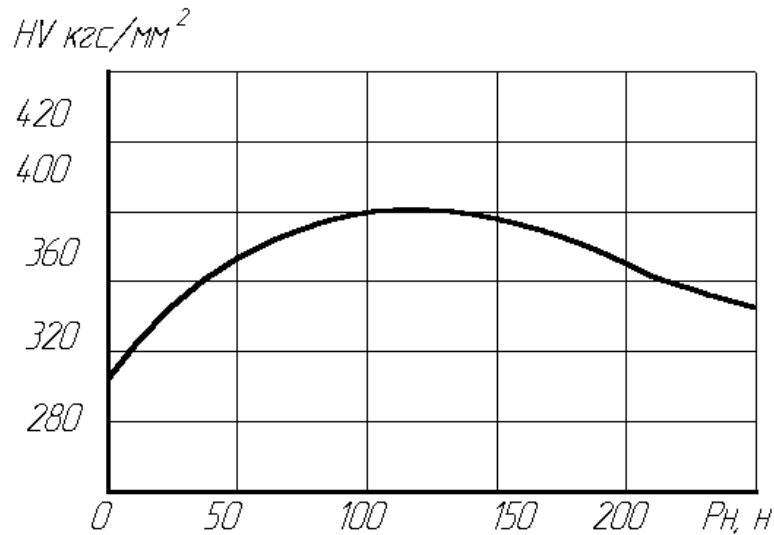


Рисунок 2.7 – Підвищення твердості поверхні від нормальної сили

2.5 Дослідження глибини наклепу

При навантаженні статичною або ударною силою інструмент вдавлюється в оброблюваний матеріал. Спочатку відбувається пружна деформація поверхневого шару, після чого відбувається пластична (лінія ОАВ рис. 2.8). В результаті пластичних деформацій зворотний процес відбувається по лінії ВС. Залишкова пластична деформація виражається розміром відбитка d , що відповідає ділянці ОС. Поверхнева пластична деформація під відбитком елемента поширюється плавно, рівномірно та копіює власну поверхню інструменту з невеликими спотвореннями [8].

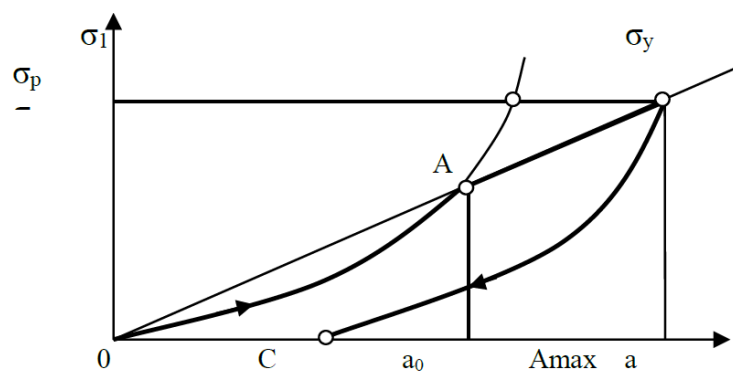
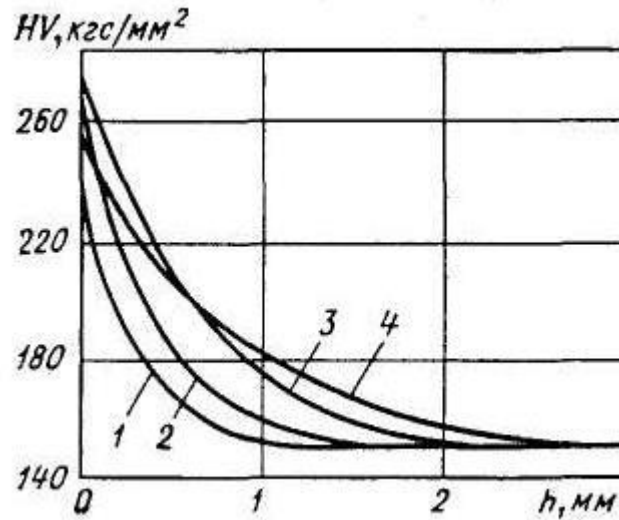


Рисунок 2.8 – Пластична та пружна деформації залежно від напруження

Відповідно до рис. 2.9, глибина наклепу h пропорційна глибині відбитка h_1 тобто $h = m \cdot h_1$. Для різних умов обробки коефіцієнт $m = 2 \dots 20$.



1 - 25 кгс; 2 - 75 кгс; 3 - 100 кгс; 4 - 150 кгс

Рисунок 2.9 – Розподіл твердості в поверхневому шарі зразків із сталі 20, обкатаних з різними силами

Зв'язок між діаметром відбитка (d) та навантаженням (P), коли куля впроваджується в пружну та пластичну області, описується рівнянням Герца та Мейєра:

$$P = \frac{1}{3D \left(\frac{1-\mu^2}{E} + \frac{1-\mu_1^2}{E_1} \right)} d^3$$

$$P = a d^n \quad (2.9)$$

де D – діаметр кулі; E , E_1 – модулі пружності розкочувальної кульки та оброблюваного матеріалу; μ ; μ_1 – коефіцієнт Пуассона для розкочувальної кульки та металу; a , $n = 2$ - константа пластичності матеріалу.

Величина глибини наклепу визначається за формулою:

$$h = k \cdot \sqrt[n]{F} \quad (2.10)$$

де k і n - коефіцієнти, які залежать від розмірних параметрів інструменту, розмірів і марки матеріалу деталі.

Глибина наклепу h пов'язана із силою деформування P може бути визначена за формулою

$$h = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}} \quad (2.11)$$

де σ_T – границя текучості матеріалу.

В роботі [9] запропонували ввести коефіцієнт m , що побічно враховує розміри контактної площі:

$$h = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}} \quad (2.12)$$

2.6 Аналіз зміцнення металу поверхневого шару при обробці різанням

При послідовній обробці отворів розгортанням наклеп поверхневого шару матеріалу збільшується при збільшенні параметрів режиму різання - глибини різання, подачі, радіуса заокруглення ріжучого леза і при переході від позитивних до негативних передніх кутів і тощо (рис. 2.10-2.12).

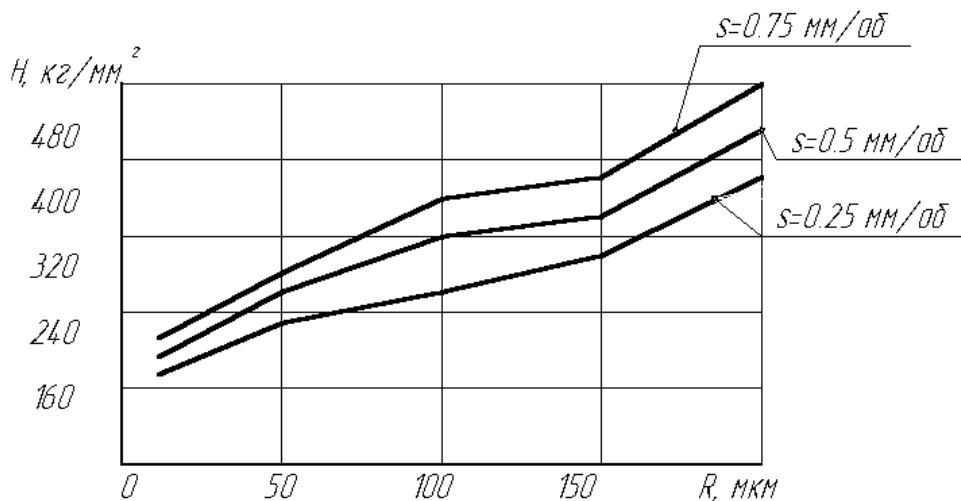


Рисунок 2.10 – Вплив радіусу заокруглення леза на наклеп металу поверхневого шару

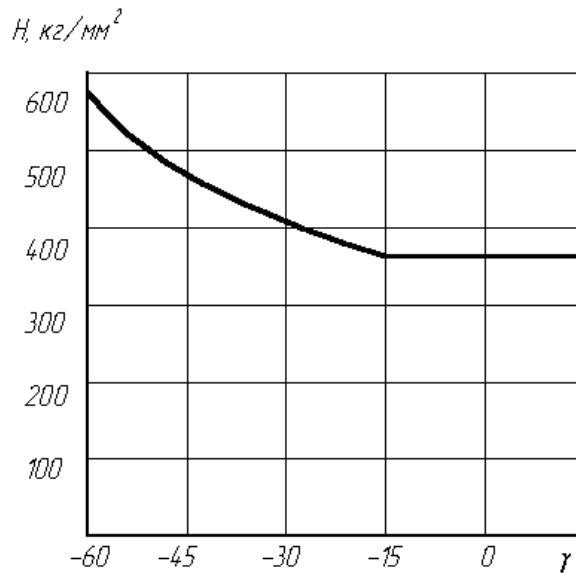


Рисунок 2.11 – Вплив переднього кута на наклеп металу поверхневого шару

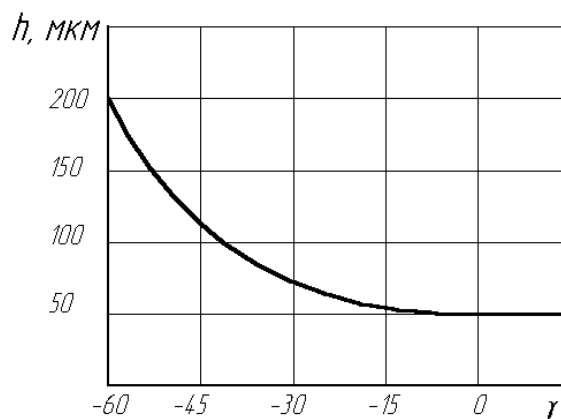


Рисунок 2.12 Вплив переднього кута на глибину наклепу металу
поверхневого шару

При збільшенні швидкості різання значно скорочується час, протягом якого деформівні сили впливають на основний метал. Це, своєю чергою, має призвести до зменшення шару глибини наклепу. Однак слід враховувати, що при підвищенні швидкості різання також зростає тертя та відбувається підвищене виділення тепла у зоні обробки, що може прискорити процес зношування інструменту. Тому при збільшенні швидкості різання для металів, які не сильно схильні до структурних змін при різанні (леговані та високолеговані), слід очікувати зниження глибини наклепу h , але також

варто врахувати отримані можливі негативні наслідки, через підвищене тертя та нагрівання.

Швидкість різання з одного боку бажано збільшувати. Це сприяє зниженню виділення тепла, з іншого знижується глибина наклепу, але це можна компенсувати кількістю працюючих ущільнюючих стрічок. Отже – високі швидкості нас влаштовують.

За результатами вимірювання мікротвердості поверхневого шару можна оцінити не тільки ефект зміцнення, а й глибину наклепанного шару і розподіл мікротвердості перерізу зміцненої деталі поверхневим пластичним деформуванням при базових режимах зміцнення. Встановлено, що вихідна мікротвердість заготовки після механічної обробки різанням на токарному верстаті становить 80-85 HRB.

2.7 Механізм утворення мікронерівностей обробленої поверхні

Зміна кута φ і ширини стрічки тягне за собою зміну не тільки висоти, а й форми нерівностей. Теоретична висота гребінців шорсткості визначатиметься (рис. 2.13):

$$H = (S - b) \frac{\sin \varphi \cdot \sin \varphi_1}{\sin \varphi + \sin \varphi_1}; \quad (2.13)$$

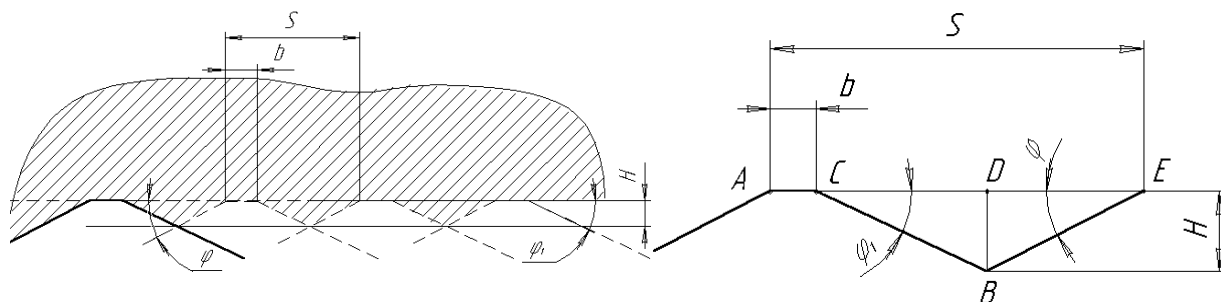


Рисунок 2.13 – Теоретичний розрахунок висоти нерівностей

Щоб усунути захоплювання оброблюваного матеріалу з ущільнюючою стрічкою, ширина стрічки повинна бути меншою за довжину хвилі

позаконтактної деформації (при нескінченній товщині стінки деталі).
Оптимальна ширина стрічки 0,15-0,5 мм для матеріалів з $\sigma_B=0,24\dots1,9$ ГПа,
(рис. 2.14).

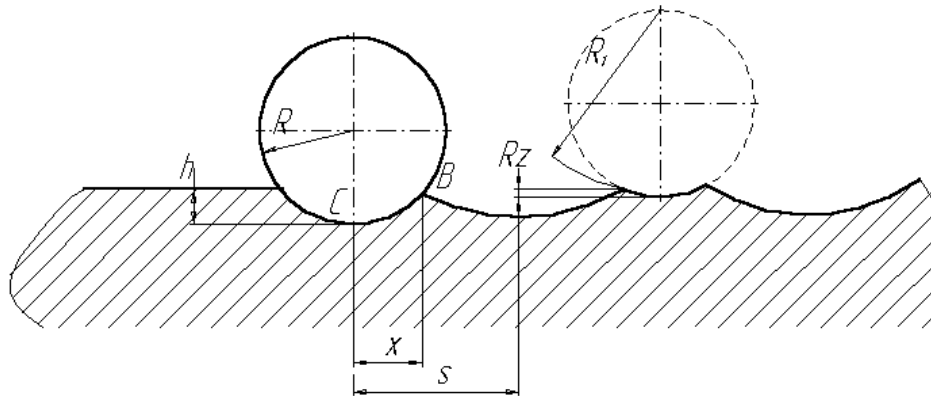


Рисунок 2.14 – Схема для розрахунку висоти нерівностей

Для нашого випадку під час обробки матеріал деталі піддається пружному деформуванню. Максимальна деформація спостерігається у точці С. У той час як у точці, розташованій на вершині нерівності, деформація досягає мінімального значення (рис. 2.13). Тому можна скласти таку рівність:

$$Ra = \left[\frac{s^2}{8R} - (\varpi_C - \varpi_B) \right], \quad (2.14)$$

де ϖ_C та ϖ_B – значення пружної деформації в заданих точках С та В.

Щоб врахувати ступінь спотворення мікропрофілю поверхні при багаторазових деформаціях в формулу слід включити коефіцієнти, що відображають пластичні характеристики матеріалу K_ϵ і тиск на контактній площі K_p . У цьому випадку

$$Rz = \frac{s^2}{8R} \left(1 - \frac{K-1}{2K} \right) K_\epsilon K_p \quad (2.15)$$

Відповідно до рис. 2.14, розглянемо деформацію обробленого поверхневого шару у напрямку подачі. Під час руху розкочувального інструменту вздовж осі оброблюваної заготовки, він поширює матеріал деформованих поверхневих шарів нерівностей за двома напрямками. Це

призводить до формування валика деформованого металу h_B з боку вихідної поверхні. З обробленої сторони утворюється спотворення профілю, яке формується при попередніх обертаннях циліндричної деталі, в результаті пластичної зміни основного металу, що витісняється деформуючим елементом у бік обробленої поверхні. Найбільше спотворюється профіль жолоба, який утворився при попередньому обертанні оброблюваної деталі. Далі, після кожного оберту деталі слід інструменту переміщається в осьовому напрямку на величину заданої подачі S . У процесі подальших обробок деталі її поверхня багаторазово перекривається, оскільки ширина канавки перевищує величину подачі. Взаємодія з оброблюваною поверхнею здійснюється вздовж дуги def . Через утворення валика деформованого металу h_B на необробленій поверхні права частина циліндра (при рухові в напрямку подачі) відчуває значно велике навантаження (контакт відбувається по дузі ef), ніж ліва частина циліндричної поверхні (контакт по дузі de).

Ступінь зміцнення поверхневого шару після поверхневого пластичного деформування визначено за формулою:

$$CH = \frac{HV_2 - HV_1}{HV_1} 100\% \quad (2.16)$$

де HV_1 - вихідна мікротвердість поверхні оброблюваного матеріалу; HV_2 – мікротвердість поверхні після обробки поверхневим пластичним деформуванням.

Поверхневий шар формується в результаті пластичного деформування оброблюваної поверхні. Коли радіальна сила F , що діє на майданчик контакту між деталлю і інструментом, створює контактні тиски, і якщо ці тиску перевищують границю текучості, відбувається пластична деформація тонких шарів поверхні (рис. 2.15, 2.16).

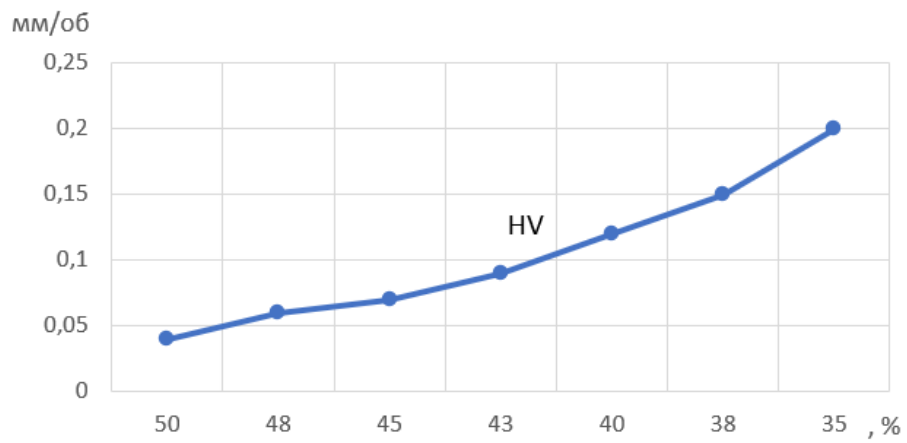


Рисунок 2.15 – Залежність зміцнення від поздовжньої подачі

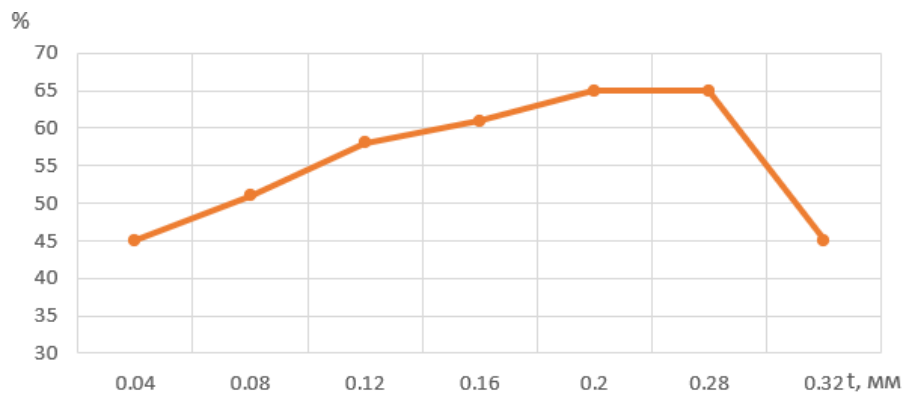


Рисунок 2.16 – Залежність зміцнення від натягу

3 Імітаційне моделювання впливу конструктивних параметрів комбінованого інструменту і режимів обробки на якість поверхні

3.1 Розробка оптимальної форми деформуючого елемента

Вибір діаметра ріжучої частини розгортки на кінці та на циліндричному елементі калібрувальної частини ґрунтується на кількох факторах. Це включає розбивання отвору під час обробки, допуск виготовлення отвору і прагнення максимізувати запас на зношення розгортки по діаметру. На рис. 3.1 представлена схема розташування полів допусків на діаметр інструменту. Ця схема ілюструє ситуацію, коли у процесі розгортання діаметр отвору збільшується порівняно з фактичними розмірами розгортки. У цьому контексті, щоб отримати отвір, що знаходиться в межах поля допуску, максимальний діаметр розгортки повинен дорівнювати максимальному діаметру отвору мінус максимальне розбивання. При виборі допуску на діаметр розгортки необхідно враховувати те, що допуск можливо забезпечити на верстатах шліфувальної групи та верстатах доведення без труднощів.

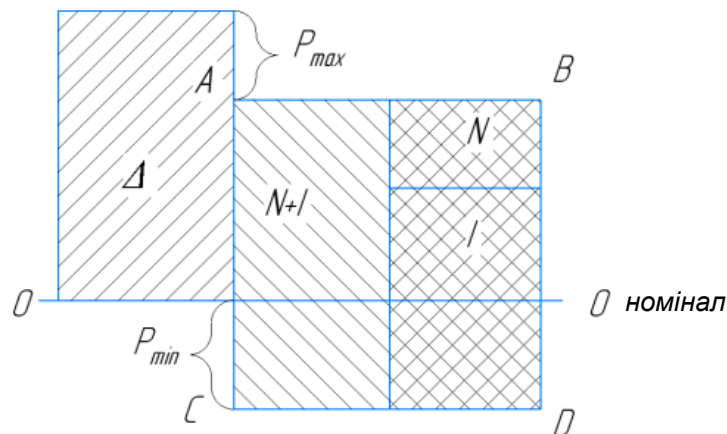


Рисунок 3.1 – Поле допуску на діаметр розгортки

При виготовленні збірного та складового інструменту, у тому числі з використанням зварювання та паяння, технологічний маршрут складається

окремо на кожну деталь та на складальну одиницю зі своєю нумерацією. операцій [2]. Нижче на рис. 3.2 наведено приклади елементів вигладжування поверхні.

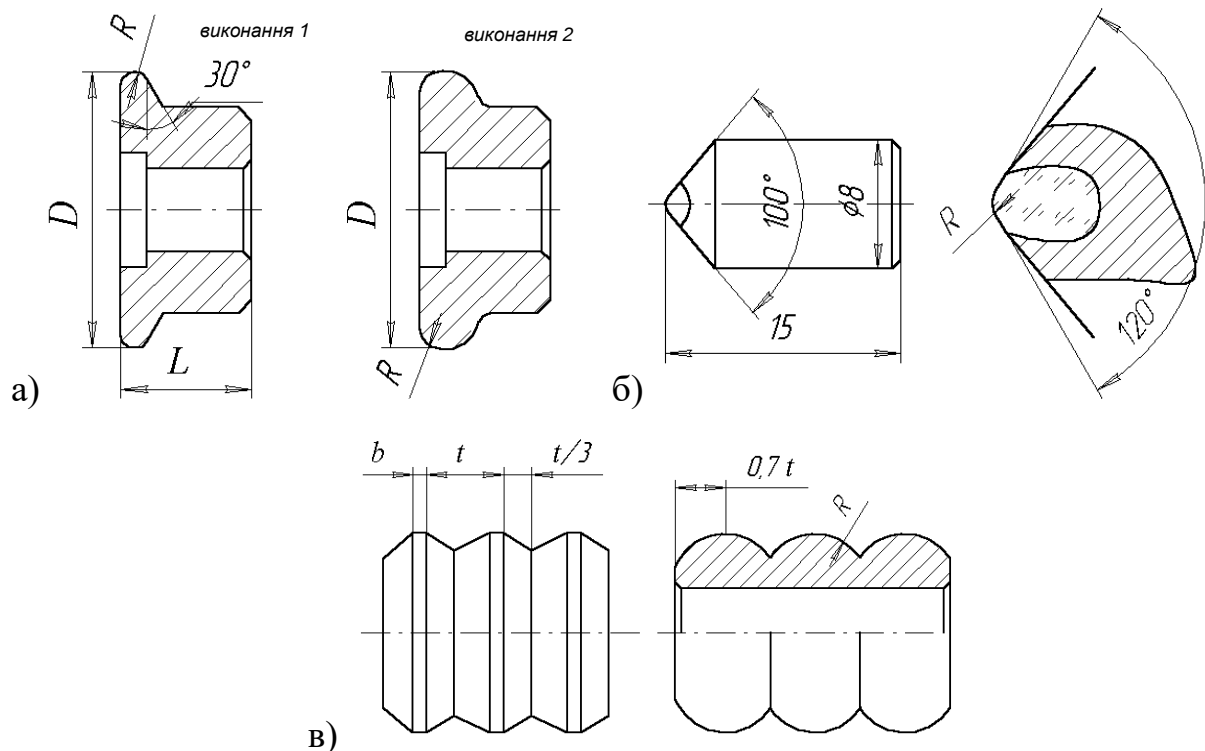


Рисунок 3.2 – Ролики для зміцнювальної обкатки поверхонь (а); алмазний наконечник для вигладжування поверхонь (б); деформуючі частини протяжок (в)

Відповідно до рис. 3.3, 3.4, для закріплення кульок застосуємо закріплення в пазах спеціальної форми з наступним стягувальним елементом.

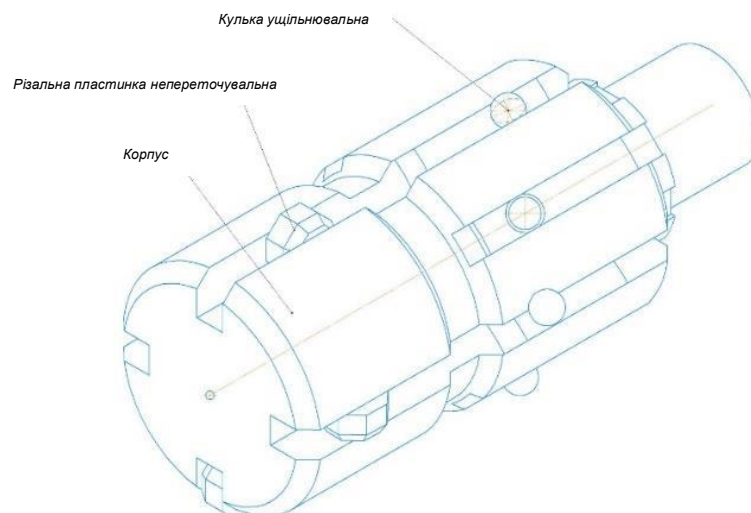
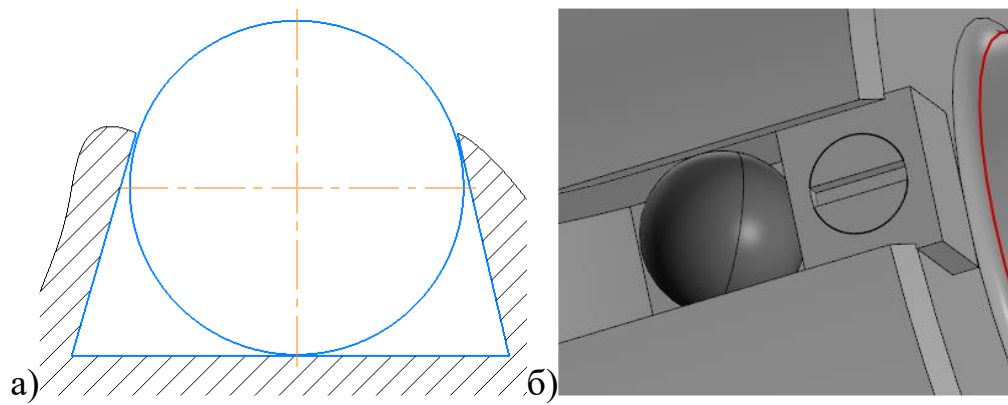


Рисунок 3.3 – Загальний вигляд комбінованої розгортки



а – форма посадкового місця для кульки; б – метод закріплення розкочувальних кульок

Рисунок 3.4 – Розташування розкочувальних елементів

Використовуючи отриману форму інструмента як ескіз у системі автоматизованого тривимірного твердотільного проектування було отримано віртуальну модель розгортки (рис. 3.5).

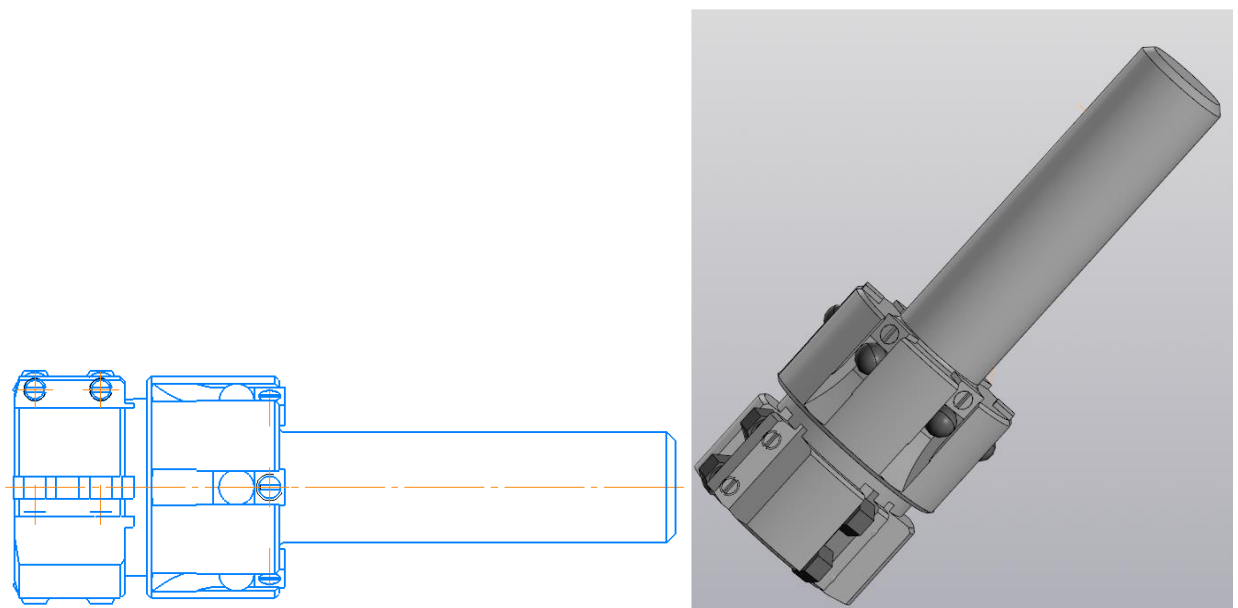


Рисунок 3.5 – Комбінована розгортка

3.2 Дослідження впливу подачі на якість поверхні

Для комбінованих інструментів, що мають кілька видів обробки, приймають подачу $S=0,15\ldots3,0$ мм/об. Середня величина подачі на один

елемент ріжучої частини повинна перевищувати 0,15-0,35 мм/об для розгортання (рис. 3.6).

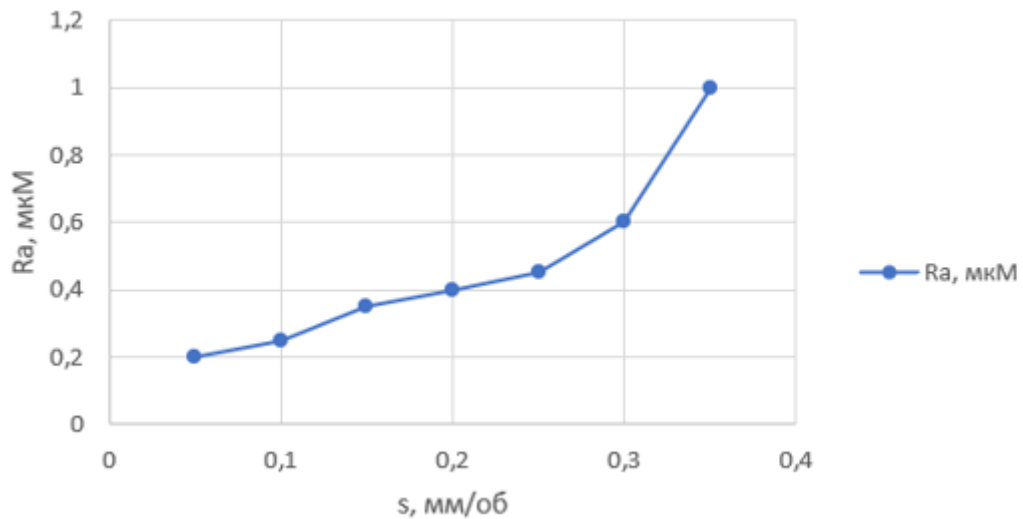


Рисунок 3.6 – Залежність параметра шорсткості від величини подачі під час обробки сталі 45

Тоді подача, що допускається критерієм Ra

$$S_z \cdot \operatorname{tg} \lambda = \frac{\pi(D+2t)\sqrt{Ra(D+2t)}}{\pi(D+2t)/2 - \sqrt{Ra(D+2t)}} \quad (3.1)$$

Значення подачі для параметра шорсткості після роботи розгортки Ra = 1,25 ... 3,2 мкм

$$S = \sqrt{\frac{8R \cdot Ra}{\left(1 - \frac{k-1}{2k}\right) K e K p}} \quad (3.2)$$

Довжина робочої ріжучої кромки визначатиметься

$$l_p = \frac{\sqrt{t(D-t)}}{\sin \lambda} + \frac{S}{2 \cos \lambda} \quad (3.3)$$

3.3 Дослідження впливу натягу на зміну розмірів деталі

Зміни розміру комбінованого інструменту залежать від розмірів заготовки та вимог креслення, умов застосування інструменту та деталі,

геометричних параметрів ріжучих та деформуючих елементів, а також від ступеня деформації поверхневого шару металу [11]. Результати дослідів наведені в роботах [12] розходяться з експериментальними на $\pm 3\%$. Зміна товщини стінки:

$$t/t_0 = 1,5 - 0,5d/d_0 \quad (3.4)$$

Маючи рівняння, можна перейти до залежностей, які дозволяють розрахувати збільшення зовнішнього діаметра деталі D ; $D-d=2t$; $D_0-d_0=2t_0$. Звідси

$$\begin{aligned} D - D_0 &= 2(t - t_0) + (d + d_0); \\ D - D_0 &= (d - d_0) \left(1 - \frac{t_0}{d_0} \right) = \Sigma a \left(1 - \frac{t_0}{d_0} \right). \end{aligned} \quad (3.5)$$

Рівняння з урахуванням сталості об'єму металу при пластичному деформування дозволяє вивести залежність для розрахунку довжини заготовки L_0 за довжиною обробленої деталі L . З умови сталості об'єму:

$$\frac{L}{L_0} = \frac{d_0 + t_0}{d + t} \frac{t_0}{t}, \quad (3.6)$$

де d_0, t_0 - вихідні розміри заготовки; d, t - розміри після протягування. Звідси

$$\frac{L}{L_0} = \frac{1 + \frac{t_0}{d_0}}{\left(1,5 - 0,5 \frac{d}{d_0} \right) \left[\frac{d}{d_0} + \frac{t}{d_0} \left(1,5 - 0,5 \frac{d}{d_0} \right) \right]}. \quad (3.7)$$

В процесі поверхневого пластичного деформування для отворів у деталях, таких як втулки та труби, відбувається зміна всіх розмірів заготовки: діаметри отвору та зовнішні діаметри збільшуються, стінка стає тоншою, а довжина змінюється. Дані зміни багато в чому залежать від параметрів вихідної заготовки, умов обробки інструментом деталі, геометричних параметрів деформуючих кульок та ступеня деформації основної деталі. Встановлено, що у кожному даному випадку лущення настає після приблизно постійного числа циклів деформації, яке залежить від товщини

стілки та твердості металу НВ. Дослідження тонкої структури поверхневого шару, показало, що при деформаціях, що передують лущенню, відбувається перебудова хаотично розподілених дислокаційних скупчень в чітко виражену дрібну структуру з досить високою щільністю дислокацій у внутрішніх зонах осередків. На момент початку лущення осередки витягуються, створюючи яскраво виражену текстуру. У наступних циклах деформації ступінь текстурованості зростає (рис. 3.7, 3.8).

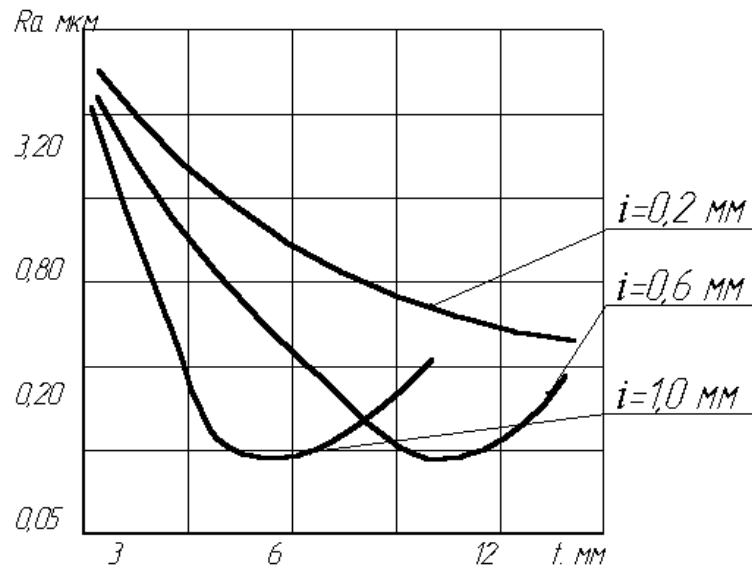


Рисунок 3.7 – Залежність шорсткості обробленої поверхні від товщини стінки

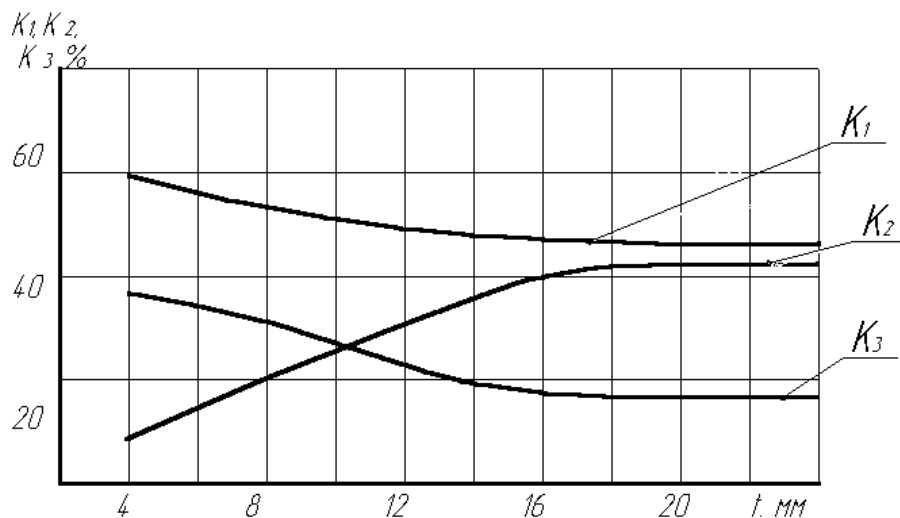


Рисунок 3.8 – Залежність робіт роздачі, тертя та вигину від товщини стінки при обробці втулок із сталі 45 діаметром 50 мм

При проведенні аналізу даних для режимів обробки при впливу натягу на деформацію поверхні заготовки застосовувалися труби з різною товщиною стінки і різним матеріалом. Результат отриманих експериментальних даних показано рис. 3.9.

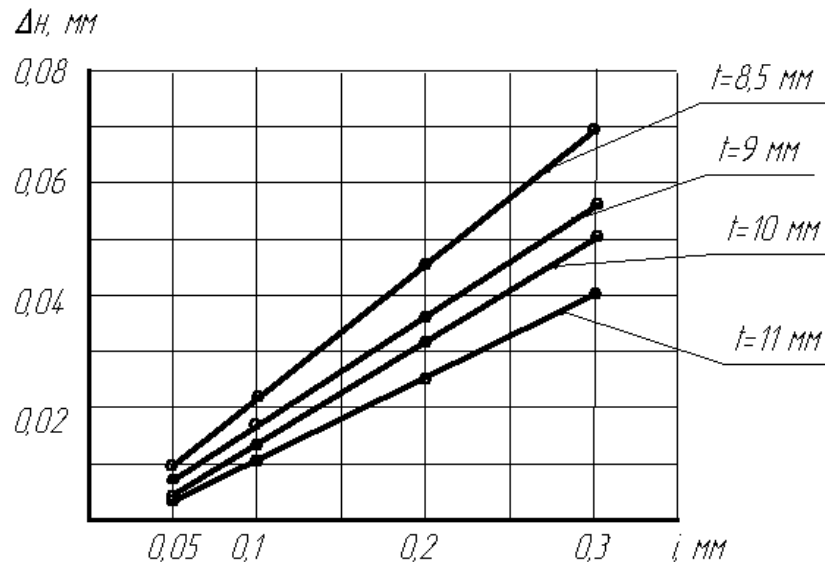


Рисунок 3.9 – Вплив натягу на характеристику обробки

Як можна побачити, зовнішній діаметр прямо залежить від натягу. Коефіцієнт a визначається функцією товщини, тому метою було встановлення зв'язку між цим коефіцієнтом і товщиною оброблюваної стінки деталі (рис. 3.10). З цією метою необхідно вивести аналітичну формулу, що показує залежність основної товщини оброблюваної стінки від коефіцієнта зміни її граничного розміру [13].

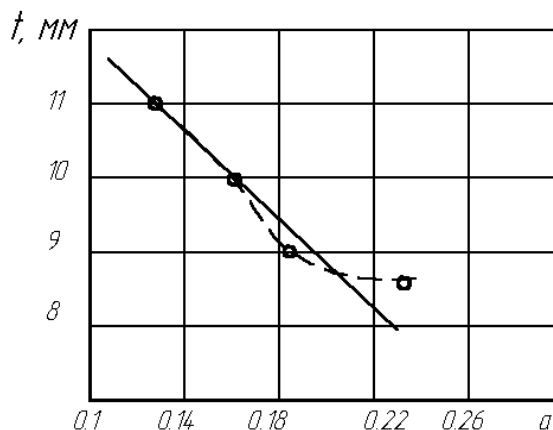


Рисунок 3.10 – Визначення аналітичної залежності товщини стінки від коефіцієнта зміни розміру

Величина товщини стінки

$$t = \frac{1}{0,422a + 0.036} \quad (3.8)$$

У цьому випадку для визначення величини натягу для обробки, можлива зміна величини зовнішнього діаметра інструменту:

$$i = \frac{0,422 \cdot \Delta_n \cdot t}{1 - 0.036 \cdot t} \quad (3.9)$$

3.4 Моделювання комбінованого інструменту

Для моделювання комбінованого інструменту використовувалася програмна система, в якій визначено послідовність складання складових елементів комбінованої розгортки [14], виконано наочне зображення моделі та кріплення робочих частин (рис. 3.11).

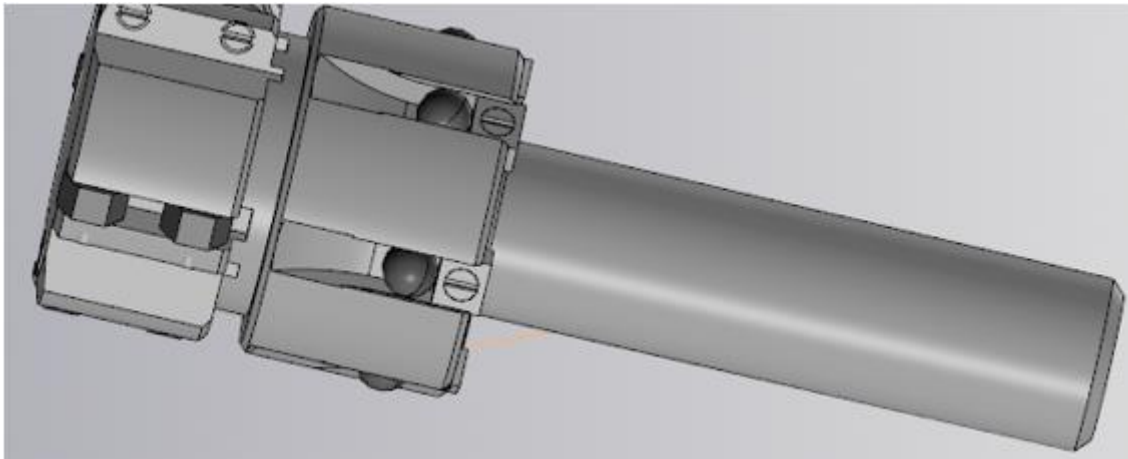
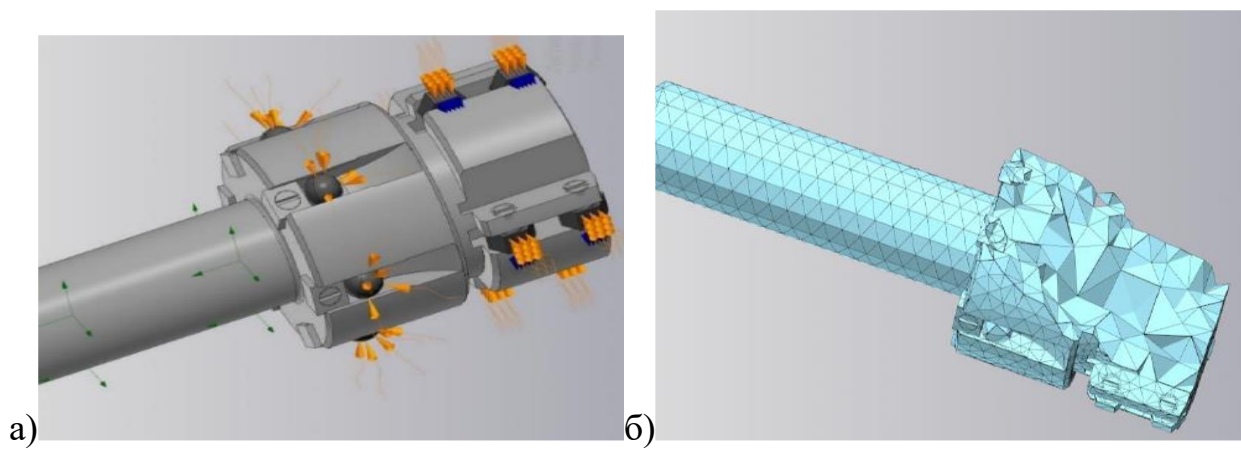


Рисунок 3.11 – Комбінована розгортка

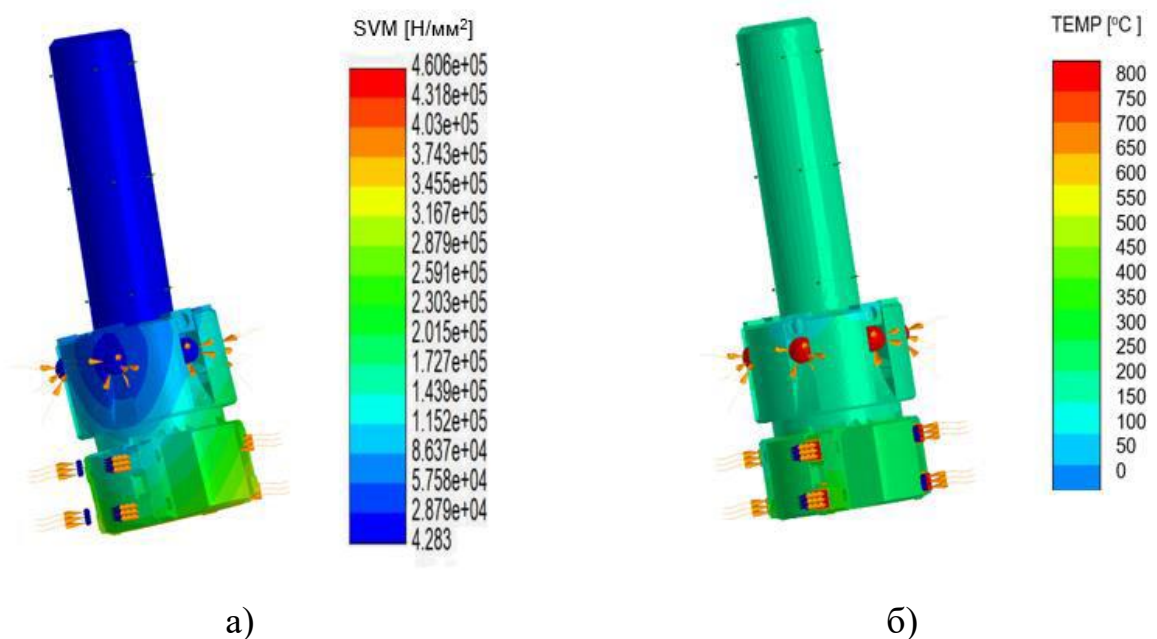
При розрахунку напружено-деформованого стану інструменту використовувалися програмні системи, в результаті отримали такі дані (рис. 3.12).



а – локалізація навантажень; б – кінцево-елементна сітка

Рисунок 3.12 – Процес 3D-моделювання з локалізацією навантажень

При проведенні розрахунків міцності під час моделювання було визначено, що в конструкції можуть виникати згинальні сили при перевищенні режимів обробки (рис. 3.13).



а – напружено-деформований стан із втратою стійкості; б – тепловий розрахунок

Рисунок 3.13 – Результати моделювання міцності

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз умов праці

В даній роботі розглядаються умови праці під час розроблення форми деформуючого елемента для комбінованої обробки гладких отворів. До обладнання, що знаходиться в приміщенні входять робочі столи та обчислювальна техніка. Ту здійснюють наукові роботи, різного роду розробки розрахунки, виконують креслення та інше.

Робочі місця мають розташовуватись так, щоб забезпечити зручні умови праці працюючих. Проходи повинні бути достатньої ширини, щоб можна було пройти не заважаючи працівникам.

Для притоку свіжого повітря використовується природна вентиляція.

В холодний період року використовується система водяного опалення з радіаторами.

Можливий вплив на працівників небезпечних та шкідливих виробничих факторів. До небезпечних виробничих факторів відносять фактори, вплив яких на працюючих приводить до травм, а шкідливих – фактори які приводять до захворювання.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори поділяють за природою дії на фізичні, хімічні, та психофізіологічні.

В приміщенні на працюючих діють тільки дві групи небезпечних та шкідливих виробничих факторів – фізичні та психофізіологічні.

До групи фізичних небезпечних факторів відносять такі підгрупи небезпечних факторів відносять такі підгрупи небезпечної дії:

- підвищена чи понижена вологість повітря;
- підвищена чи понижена температура повітря;
- недостатність природного освітлення;
- недостатність освітлення робочого місця;
- підвищена чи понижена рухомість повітря.

Групу психофізіологічних небезпечних і шкідливих виробничих факторів по характеру дії поділяють на такі підгрупи: фізичні та нервово – психічні перевантаження. До фізичних перевантажень відносять – статичне; до нервово – психічних – монотонність праці, розумові навантаження, емоційні переживання [16].

4.2 Організаційно – технічні рішення щодо забезпечення безпечної роботи

4.2.1 Електробезпека

В даному приміщенні наявні такі небезпечні фактори:

- а) наявність електричних розеток;
- б) наявність освітлювальних пристроїв;
- в) наявність оргтехніки.

Виходячи з перелічених факторів згідно ГОСТ 2.1.030-81 вибираємо спосіб захисту – занулення.

Вимоги до електрообладнання:

Обладнання занулене, що забезпечує захист від ураження електричним струмом. Відповідністю з ПУЕ занулення застосовується і являється ефективною мірою захисту електрообладнання.

Живлення обладнання здійснюється від трифазної мережі з заземленою нейтраллю. Потужність обладнання до 4 кВт [17].

4.3 Організаційно-технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

Визначається як система організаційних, технічних засобів, які запобігають або зменшують дію на робітника шкідливих факторів.

4.3.1 Санітарні вимоги до приміщення

За санітарними нормами на одного працюючого має припадати не менше $S = 6 \text{ м}^2$ виробничої площі та $V = 15 \text{ м}^3$ об'єму приміщення за кількості персоналу до 20 чоловік [18].

Без урахування обладнання в приміщенні аудиторії на одну людину припадає $S = 5 \text{ м}^2$ та $V = 14 \text{ м}^3$. Враховуючи площу обладнання одержимо $S = 4,4 \text{ м}^2$ та $V = 12,8 \text{ м}^3$.

4.3.2 Мікроклімат

Показниками які характеризують мікроклімат є: вологість, температура та вентиляція.

Оптимальні показники мікроклімату розповсюджуються на всю виробничу зону, допустимі показники встановлюються диференційно для робочих місць.

Витрата енергії працівників складає: $(150 - 200 \frac{\text{ккал}}{\text{год}})$. Робоче місце постійне. Відповідно, категорія робіт: легка 1б. До даної категорії відноситься робота, що виконується сидячи і не потребує переміщення.

Інтенсивність теплового випромінювання працівників від нагрітих поверхонь технологічного обладнання, освітлювальних пристроїв на постійних робочих місцях не повинна перевищувати 100 Вт/м^2 при опроміненні 25% поверхні тіла.

Температура, відносна вологість і швидкість руху повітря на робочому місці приміщення повинна відповідати нормам, вказаним в таблиці 4.1.

В приміщенні повинні підтримуватись оптимальні параметри мікроклімату. Так як робота пов'язана з нервово-емоційною напругою [19].

Таблиця 4.1 – Показники мікроклімату

Період року	Категорії праці	Температура					Відносна вологість		Швидкість руху	
		Оптимальна	max		min		Оптимальна	Допустима не більше	Оптимальна	Допустима не більше
			ппост	непост	ппост	непост				
Холодний	Легка Іб	21-23	25	27	20	17	40-60	75	0,1	0,2
Теплий	Легка Іб	22-24	28	29	21	18	40-60	24-75 25-70 26-65 27-60 28-55	0,2	0,1-0,3

4.3.3 Опалення приміщень

В холодну пору року в приміщенні застосовується комбіноване опалення.

Системи опалення, вид і параметри теплоносія передбачаються з урахуванням теплової інерції огорожуючи конструкцій і у відповідності з характером і призначенням споруд і будівель СНиП II-33-75. Згідно цього вибираємо водяне опалення, для даного приміщення розташування радіаторів вибираємо на стінах або нішах стін, коли стіни не несуть основних навантажень [20].

4.3.4 Вентиляція

Для очищення повітря в приміщенні застосовується вентиляційна система:

- природна (неорганізована).

При природній вентиляції повітрообмін проходить внаслідок різниці температур повітря в приміщенні і зовні, а також в результаті дії повітря. В якості природної вентиляції використовуємо неорганізовану вентиляцію при якій попадання або видалення повітря проходить через нещільності і пори зовнішніх огорожень, через вікна [21].

4.3.5 Освітлення

Освітлення в приміщенні і аудиторії відповідають СНиП II-4-79.

Нормування освітленості і КПО проводимо в горизонтальній площині на висоті 0,8 м від підлоги. Природне освітлення (КПО , e_n^{III} %):

При бічному освітленні $e_n^{III} = 2.0\%$;

Так як місто Вінниця знаходиться в IV світловому кліматі:

$$e_n^{IV} = e_n^{III} \cdot m \cdot c;$$

$$e_n^{IV} = 2.0 \cdot 0.9 \cdot 0.75 = 1.35\%.$$

де $m = 0,9$ – коефіцієнт світлового клімату для IV сонячного поясу;

$C = 0,75$ – коефіцієнт сонячного клімату, азимут 90°

Штучне освітлення.

Загальна освітленість приміщення – 500 лк.

Для збільшення освітленості робочої поверхні слід застосовувати місцеве освітлення. Показник дискомфорту не повинен перевищувати 40.

Для загального штучного освітлення слід передбачити газорозрядні лампи, незалежно від джерела світла місцевого освітлення [22].

Коефіцієнт пульсації освітленості при освітленні приміщення не повинен перевищувати – 10%.

4.3.6 Шум

Походження шумів у даному приміщенні пов'язано з роботами у прилеглих приміщеннях. Дані в таблиці 4.2 відповідають виду трудової діяльності, що потребує сконцентрованості над виконанням всіх видів робіт на постійних робочих місцях [23].

Таблиця 4.2 – Характеристика шумового навантаження

Рівні звукового тиску в октанових полосах з середньо геометричними частотами									Еквівалентні рівні звуку в дБА
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
93	76	70	63	59	54	51	50	40	60

Методи і засоби боротьби з шумом:

Для захисту від шуму в приміщенні, який виникає від неякісної роботи оргтехніки слід застосовувати столи з спеціальним відділенням для встановлення системних блоків.

Зниження шуму на шляху його розповсюдження в значні мірі досягається проведенням будівельно-акустичних заходів з застосуванням звукоізолюючих перегородок між приміщеннями.

4.3.7 Вібраційна безпека (ГОСТ 12.1.012-90)

Причиною збудження вібрації в приміщенні є вібрації, виникаючі при роботі обчислювальних машин і агрегатів, які знаходяться в прилеглих приміщеннях.

Таблиця 4.3 – Характеристика вібраційного навантаження

Категорія вібрації по санітарним нормам і критеріям	Характеристики умов праці	Приклад джерел вібрації
Зв комфорт	Вібрація на робочих місцях працівників розумової праці, персоналу, що незайняті розумовою працею	Обладнання прилеглих приміщень

Вібрація відноситься до факторів, які мають велику біологічну активність. Як загальна так і локальна вібрація несприятливо впливає на організм людини, викликає зміну е функціональному стані вестибулярного апарату. Центральної нервової, серцево-судинної систем, погіршує самопочуття та може призвести до професійних захворювань.

В нашому приміщенні присутня вібрація типу – Зв. Тобто це вібрація на робочих місцях працівників розумової праці і персоналу, що незайняті фізичною працею [24].

Для зменшення шкідливої дії вібрації слід встановити джерела виникнення вібрації на віброізолюючі опори, а також гнучкі вставки в комунікаціях повітропроводів.

ВИСНОВКИ

1. На підставі проведених досліджень встановлено, що застосування нового комбінованого інструменту для обробки внутрішніх циліндричних отворів підвищує якість робочої поверхні: збільшення твердості поверхневого шару з 30 HRC до 45 HRC, зменшення шорсткості Ra до 0,32 мкм.

2. Дослідження матеріалу та його властивостей, що набуваються в результаті комбінованої обробки, показали:

- зміцнення поверхневого шару обробленого отвору спостерігається на глибині до 0,8 ... 1,1 мм;

- твердість поверхневого шару обробленого отвору підвищилася в 1,5 рази;

- була створена модель комбінованого процесу обробки отворів у циліндрах, яка встановлює відповідність між геометричними характеристиками та фізико-механічними властивостями оброблюваної поверхні з конструктивними параметрами інструменту та режимами обробки.

3. Удосконалена технологія виготовлення гільзи гідроциліндра скорочує кількість технологічних операцій, зменшує технологічний час, та кількість використовуваного ріжучого інструменту. Гладка гільза механізму гідравлічного циліндра виконується із заданим припуском для виконання операції розкочування. Цей вид обробки ґрунтується на застосуванні пластичних властивостей металу отримувати залишкову деформацію без руйнування під впливом зовнішніх сил.

Список використаних джерел

1. Subramanya K. Hydraulic Machines. – New Delhi: Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2013. – 599 p.
2. Rajput R. K. A Textbook of Fluid Mechanics and Hydraulic Machines. – New Delhi: S. Chand & Company, 2016. – 1588 p.
3. Yen Y.C., Sartkulvanich P., Altan T. Finite element modeling of roller burnishing process // CIRP annals. – 2005. – Vol. 54, Issue 1. – P. 237-240.
4. Yaman N., Sunay N., Kaya M. et al. Enhancing surface integrity of additively manufactured Inconel 718 by roller burnishing process // Procedia CIRP. – 2022. – Vol. 108, Issue 6. – P. 681-686.
5. Frihat M.H., Al Quran F.M.F., Al-Odat M.Q. Experimental investigation of the influence of burnishing parameters on surface roughness and hardness of brass alloy // Material Science & Engineering. – 2015. – Vol. 5, Issue 1. – P. 1000216.
6. Ebner R., Hellman P., Kooch F. et al. Getting to know special steel. Special metallurgy. – Milano: Edizioni sipiel, 2005. – 135 p.
7. Lee K., Kim M., Lee S. Three-dimensional finite element analysis for estimation of the weld residual stress in the dissimilar butt weld piping // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2013. – Vol. 27. – P. 57-62.
8. Burnley P.C., Getting I.C. Creating a high temperature environment at high pressure in a gas piston cylinder apparatus // Review of Scientific Instruments. – 2012. – Vol. 83, Issue 1. – P. 014501-1-014501-9.
9. Segal V.M. Metal processing by severe plastic deformation // Russian Metallurgy (Metally). – 2006. – №5. – P. 474-483.
10. Hongyun L., Jianying L., Lijiang W. et al. The effect of burnishing parameters on burnishing force and surface microhardness // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2006. – Vol. 28, Issue 7. – P. 707-713.

11. Rothman, D., Sansome D. H. An investigation of rod-drawing with die-rotation. *International Journal of Machine Tool Design and Research*. June 2020. Vol. 10. №2. P. 179–192.
12. G. Hasemann, C. Müller, D. Grüner, E. Wessel, M. Krüger. Room temperature plastic deformability in V-rich V–Si–B alloys. *Acta Materialia*, Volume 175, 2019, Pages 140-147. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.06.007>.
13. Seong-Yong Yoon, Frédéric Barlat, Shin-Yeong Lee, Jin-Hwan Kim, Min-Su Wi, Dong-Jin Kim. Finite element implementation of hydrostatic pressure-sensitive plasticity and its application to distortional hardening model and sheet metal forming simulations. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 302, 2022, 117494. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117494>.
14. Longfei Lin, Wenfei Peng, Viacheslav Titov, Moliar Oleksandr, Xiaocheng Wu, He Li. Interface phenomena and bonding mechanism in the new method of cross wedge rolling bimetallic shaft. *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 24, 2023, Pages 1132-1149. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.049>.
15. Wang Dou, Zejian Xu, Yang Han, Fenglei Huang. A ductile fracture model incorporating stress state effect. *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 241, 2023, 107965. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107965>.
16. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>
17. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>
18. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885
19. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу:

<http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

20. Наказ від 08.04.2014 № 248 Про затвердження Державних санітарних норм та правил Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14._nakazy_ta_rozpor_183575/248+58074-detail.html

21. НПАОП 29.2-1.01-58 Загальні правила техніки безпеки та виробничої санітарії для підприємств і організацій машинобудування.

22. НПАОП 0.00-1.42-83. Правила з техніки безпеки і виробничої санітарії при холодній обробці металів.

23. НПАОП 28.52-1.31-13 Правил охорони праці під час зварювання металів.

24. Наказ МОЗ України № 285 від 13.02.2023 «Про затвердження Граничних та робочих рівнів виробничої вібрації та Порядку проведення оцінки рівня небезпеки впливу вібрації на працівника» - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0535-23#Text>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А
(обов'язковий)

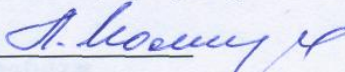
ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

РОЗРОБЛЕННЯ ФОРМИ ДЕФОРМУЮЧОГО ЕЛЕМЕНТУ ДЛЯ
КОМБІНОВАНОЇ ОБРОБКИ ГЛАДКИХ ОТВОРІВ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ГМ

д. т. н., професор Леонід ПОЛЩУК,



(підпис)

«27» березня 2025

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на розроблення форми деформуючого елемента для комбінованої обробки
гладких отворів

Розробив студент

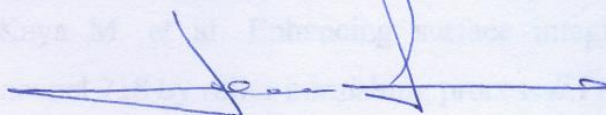
Спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»

Данило БАЛАГУР 

«27» березня 2025

Керівник: д. т. н., професор

Роман СИВАК



1 Найменування і область застосування

Найменування – комбінований інструмент для обробки поверхні гідроциліндра піднімального транспортного обладнання.

2 Підстава для виконання роботи

Підставою для розробки даного дипломного проекту є індивідуальне завдання на бакалаврську кваліфікаційну роботу та наказ ректора по ВНТУ про закріплення тем.

3 Мета і призначення дослідження

Мета: розробка інноваційної технології обробки внутрішньої поверхні гільзи гідроциліндра із застосуванням комбінованого інструменту для підвищення її якості, шляхом зменшення шорсткості поверхні гільзи та збільшення твердості поверхневого шару.

Призначення розробки – виготовлення силових гідравлічних агрегатів підйомно-транспортного обладнання із застосуванням методу комбінованої обробки поверхні.

4 Джерела розробки

Список використаних джерел розробки:

- 4.1 Yaman N., Sunay N., Kaya M. et al. Enhancing surface integrity of additively manufactured Inconel 718 by roller burnishing process // *Procedia CIRP*. – 2022. – Vol. 108, Issue 6. – P. 681-686.
- 4.2 Rothman, D., Sansome D. H. An investigation of rod-drawing with die-rotation. *International Journal of Machine Tool Design and Research*. June 2020. Vol. 10. №2. P. 179–192.
- 4.3 Seong-Yong Yoon, Frédéric Barlat, Shin-Yeong Lee, Jin-Hwan Kim, Min-Su Wi, Dong-Jin Kim. Finite element implementation of hydrostatic pressure-sensitive plasticity and its application to distortional hardening model and sheet metal forming simulations. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 302, 2022, 117494.

4.4 Longfei Lin, Wenfei Peng, Viacheslav Titov, Moliar Oleksandr, Xiaocheng Wu, He Li. Interface phenomena and bonding mechanism in the new method of cross wedge rolling bimetallic shaft. *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 24, 2023, Pages 1132-1149.

4.5 Wang Dou, Zejian Xu, Yang Han, Fenglei Huang. A ductile fracture model incorporating stress state effect. *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 241, 2023, 107965.

5 Вихідні дані для розробки:

1	Повздовжня подача, мм/об	0,07-0,23
2	Глибина, мм	0,78-0,9
3	Діаметр отвору, мм	30-80
4	Радіальний натяг, мм	0,05-0,20
5	Частота обертання заготовки, об/хв	80-315
6	Матеріал	Сталь 45
7	Кут робочого конуса, град	4

5.1 Технічні вимоги

- твердість інструменту – 30-45HRC
- шорсткість робочої поверхні інструменту – Ra=0.32

5.2 Вимоги до надійності: довговічність – не менше 10 тис. год; безвідмовність – напрацювання на відмову – 1 тис. год; збереженість – повинна забезпечуватися працездатність деталі в режимі очікування, роботи, консервації; ремонтпридатність – деталь повинна відповідати вимогам експлуатації.

5.3 Вимоги до технологічності розробки, виробництва і експлуатації – повинна гарантувати надійну і безпечну роботу обладнання, витримувати інтенсивні динамічні навантаження.

5.4 Вимоги до рівня уніфікації і стандартизації, вимоги до використання стандартних, уніфікованих і запозичених складальних одиниць і деталей при

розробці, показники рівня уніфікації – по можливості під час розробки комбінованого інструменту для обробки поверхні гільзи гідроциліндра використовувати уніфіковані деталі, стандартні вироби та загальнодоступні матеріали і речовини.

5.5 Вимоги безпеки життєдіяльності – забезпечується безпека під час монтажу і ремонту. Допустимі рівні вібраційних і шумових навантажень, допустимі випаровування робочої рідини у відповідності з санітарними нормами. Повинні бути розроблені заходи, що забезпечують технічну безпеку під час монтажу, експлуатації і ремонту пристрою.

5.6 Конструкція повинна відповідати естетичним і ергономічним вимогам, повинна бути зручною в обслуговуванні та управлінні.

5.7 Матеріали, що використовуються для деталей слід вибирати відповідно до рекомендацій.

5.8 Умови експлуатації, вимоги до технічного обслуговуванню і ремонту:

- умови експлуатації, при яких повинно забезпечуватися використання продукції з заданими технічними показниками – продукція призначена для використання у середньоширотних кліматичних умовах;

- час підготовки продукції до використання після транспортування і зберігання – 10 год;

- вид обслуговування - періодичний;

- періодичність і орієнтовна трудомісткість технічного обслуговування і ремонту – 2 дні (один раз в три місяці).

5.9 Вимоги по транспортуванню і збереженню

- можливість транспортування на будь-якому виді транспортних засобів;

- захист від ударів під час завантаження і розвантаження;

- зберігання на складі готової продукції;

- зберігання у законсервованому вигляді;

- складування на стелажах.

6 Економічні показники:

- орієнтований термін окупності витрат на розробку – 1,3 роки,
- освоєння виробництва продукції – 1 місяць,
- економічна перевага розробленої продукції у порівнянні з кращими зразками – прогнозований прибуток 1 048 363,79 грн. за три роки.

7 Виконавці НДР: студент спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» Данило БАЛАГУР

8 Етапи НДР і терміни їх виконання:

- теоретичне дослідження проблематики теми БКР;
- патентно-інформаційний огляд по темі БКР
- розробка конструкції комбінованого інструменту для обробки поверхні гільзи гідроциліндра;
- охорона праці;
- висновки.
- оформлення текстових документацій та ілюстративних матеріалів для захисту БКР.

9 Порядок контролю і прийомки

- попередній захист проекту
- захист проекту перед БКР

ДОДАТОК Б
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

РОЗРОБЛЕННЯ ФОРМИ ДЕФОРМУЮЧОГО ЕЛЕМЕНТУ ДЛЯ
КОМБІНОВАНОЇ ОБРОБКИ ГЛАДКИХ ОТВОРІВ

Дослідження методів підвищення якості при обробці отворів

Таблиця 1 Характеристики способів фінішної обробки отворів методами поверхневого пластичного деформування

Принципова схема		Шорсткість, Ra_{max}	Глибина наклепу, мкм	Ступінь наклепу, %
Розкочування		0,08-0,32	До 15000	20-50
Вигладжування		0,08-0,04	1000	20-25
Дорнування		0,32-0,16	5000	20-50
Ударне розкочування		0,32-0,08	5000	20-50
Вібраційна обробка		0,32-0,08	2000	20-40

Перспективність обробки комбінованим інструментом

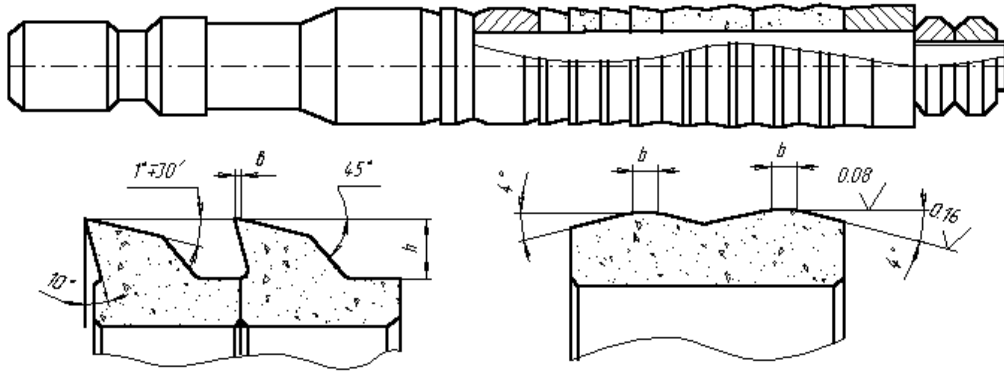


Рисунок 1 – Комбінована ріжучо-деформуюча протяжка

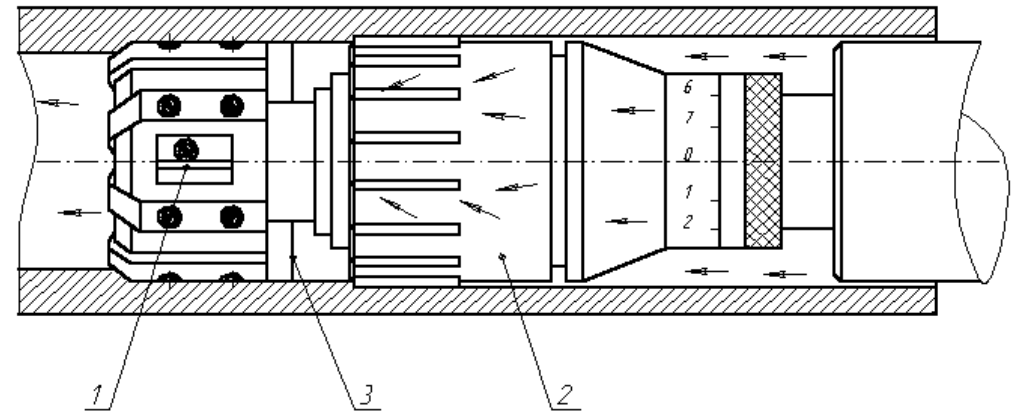


Рисунок 2 – Схема одночасного розточування та розкочування

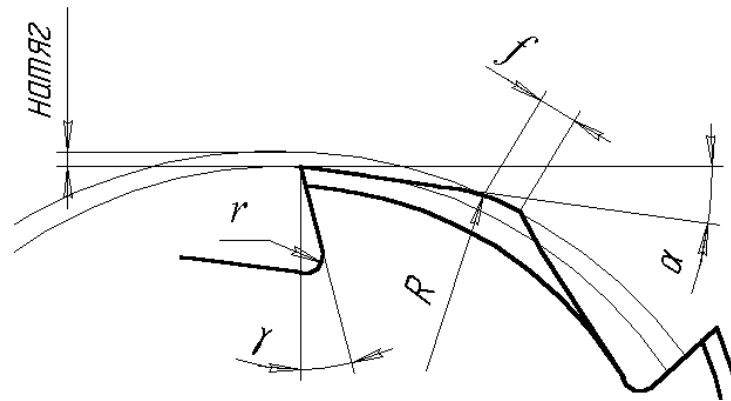
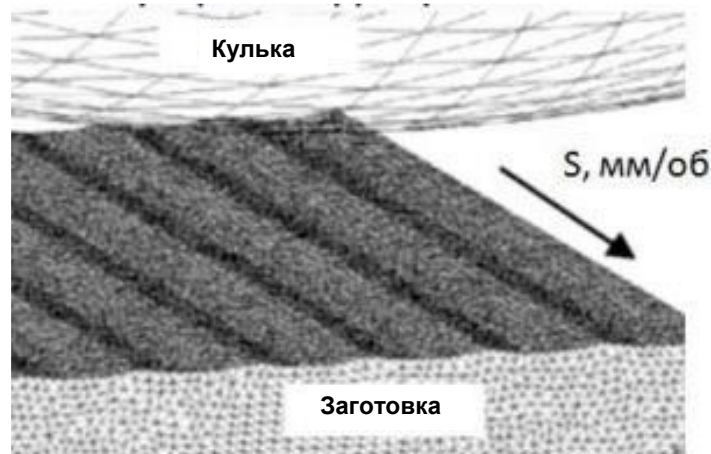


Рисунок 3 – Зуб із додатковою ущільнюючою стрічкою

Аналіз основних параметрів процесу обробки

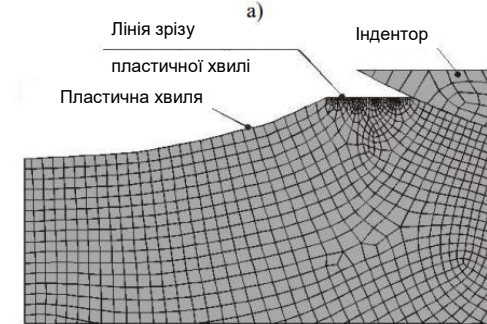
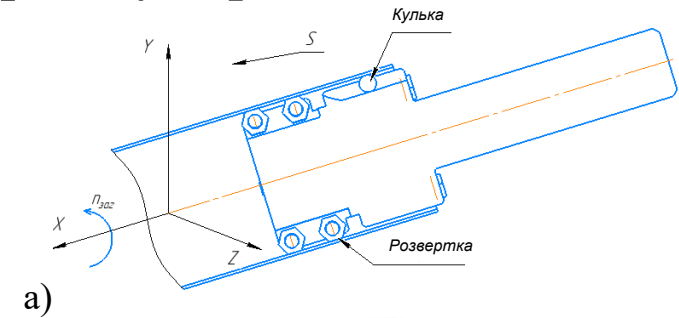


а)

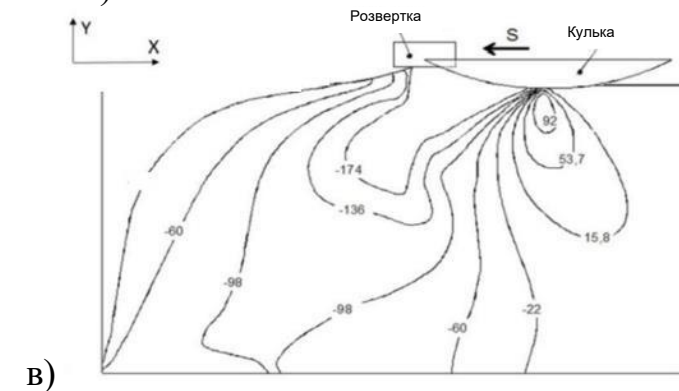


б)

Рисунок 4 – Постановка задачі (а) та кінцево-елементна модель поверхневого пластичного деформування кулькою (б)



б)



а - модель процесу розмірного поєднаного обкатування; б - зона зрізання пластичної хвилі (фрагмент КЕ-моделі); в – розподіл компонент напруженого стану, Мпа

Рисунок 5 – Модель процесу розмірного поєднаного обкатування

Аналіз зміцнення поверхневого шару при обробці поверхневим пластичним деформуванням

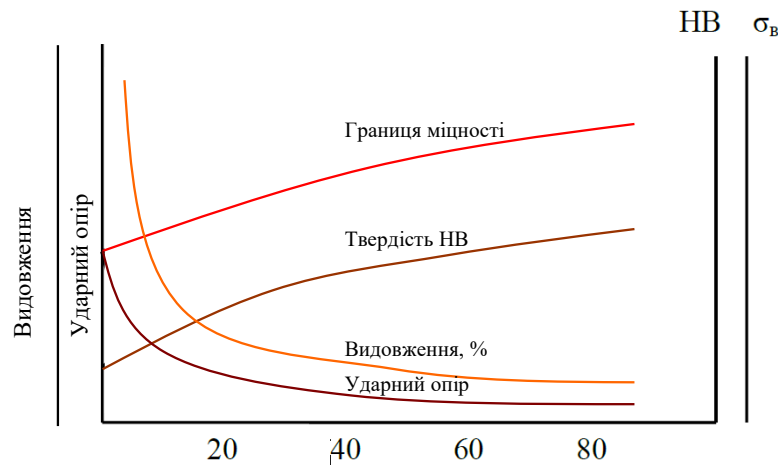


Рисунок 6 – Характер зміни механічних властивостей металу поверхневого шару від ступеня деформації

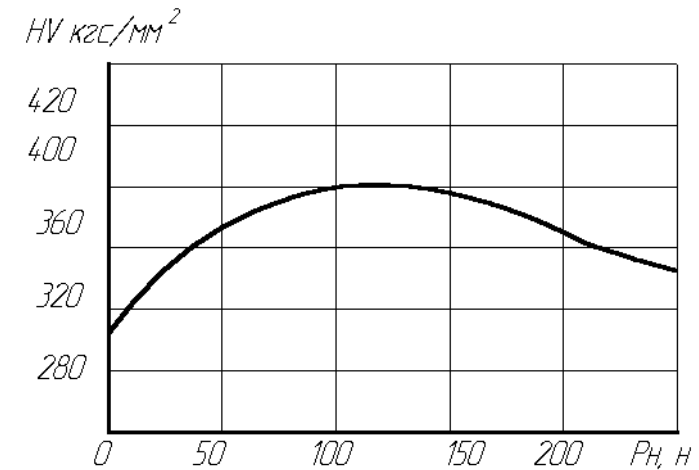


Рисунок 7 – Підвищення твердості поверхні від нормальної сили

Дослідження глибини наклепу

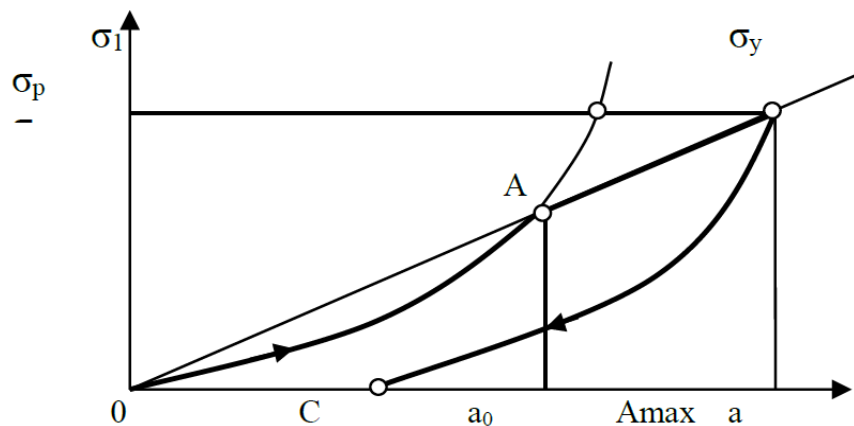
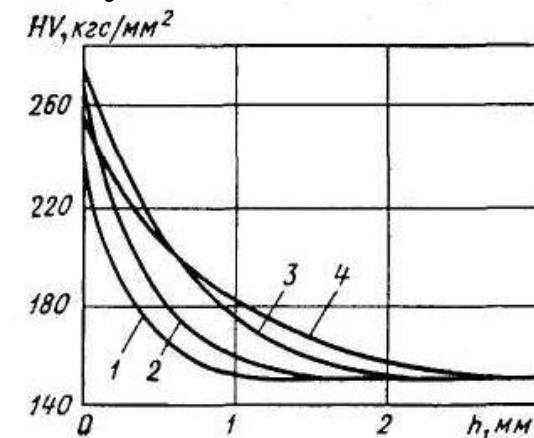


Рисунок 8 – Залежності пластичної та пружної деформації залежно від напруження



1 - 25 кгс; 2 - 75 кгс; 3 - 100 кгс; 4 - 150 кгс

Рисунок 9 – Розподіл твердості в поверхневому шарі зразків із сталі 20, обкатаних з різними силами

Аналіз зміцнення металу поверхневого шару при обробці різанням

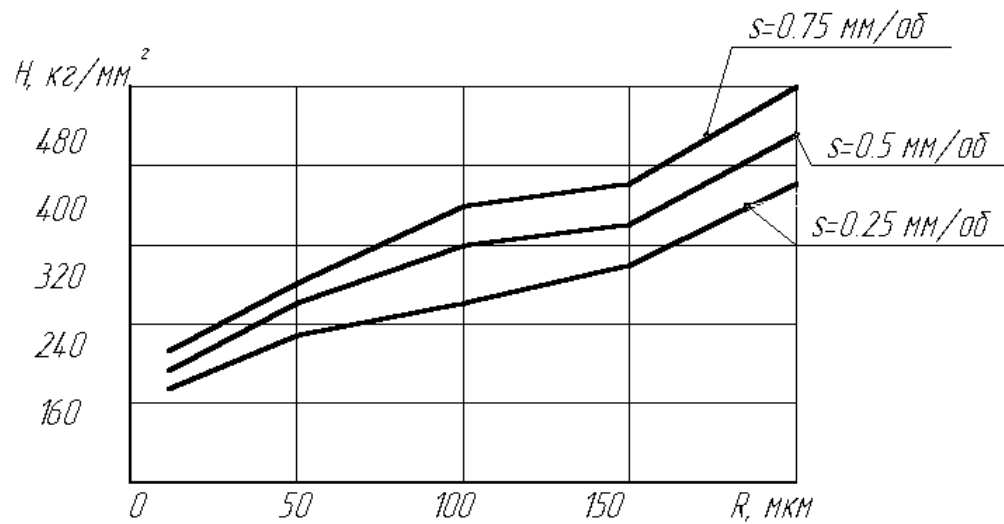


Рисунок 10 – Вплив радіусу заокруглення леза на наклеп металу поверхневого шару

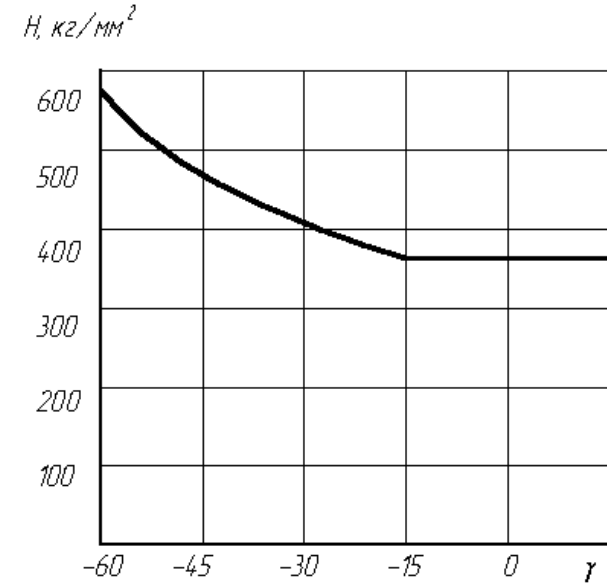


Рисунок 11 – Вплив переднього кута на наклеп металу поверхневого шару

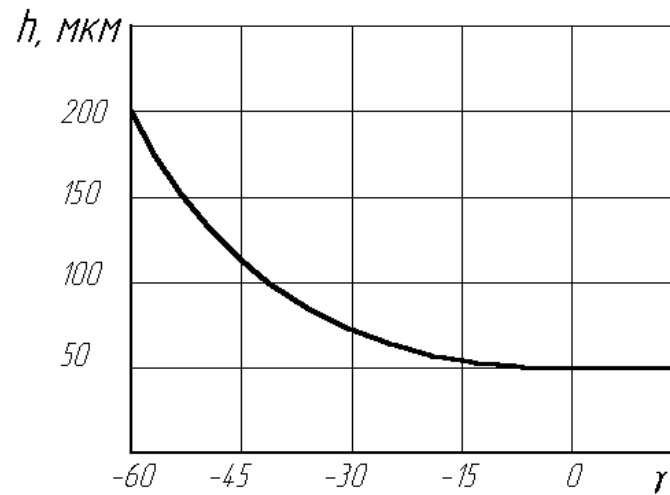


Рисунок 2.12 Вплив переднього кута на глибину наклепу металу поверхневого шару

Механізм утворення мікронерівностей обробленої поверхні

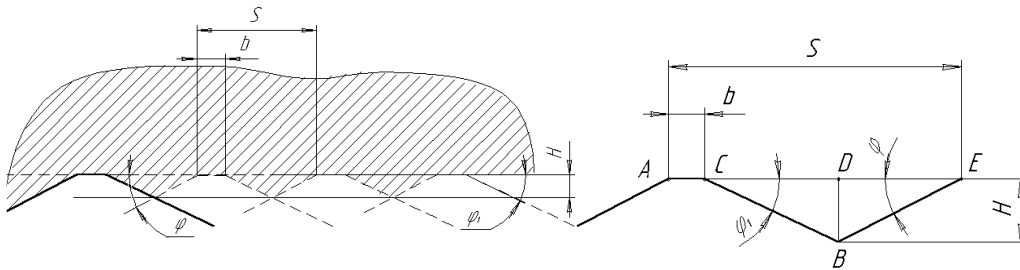


Рисунок 13 – Теоретичний розрахунок висоти нерівностей

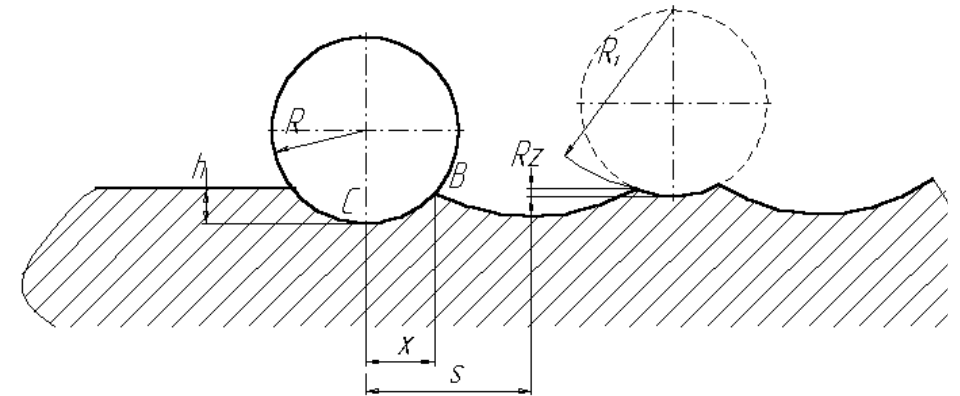


Рисунок 14 – Схема для розрахунку висоти нерівностей

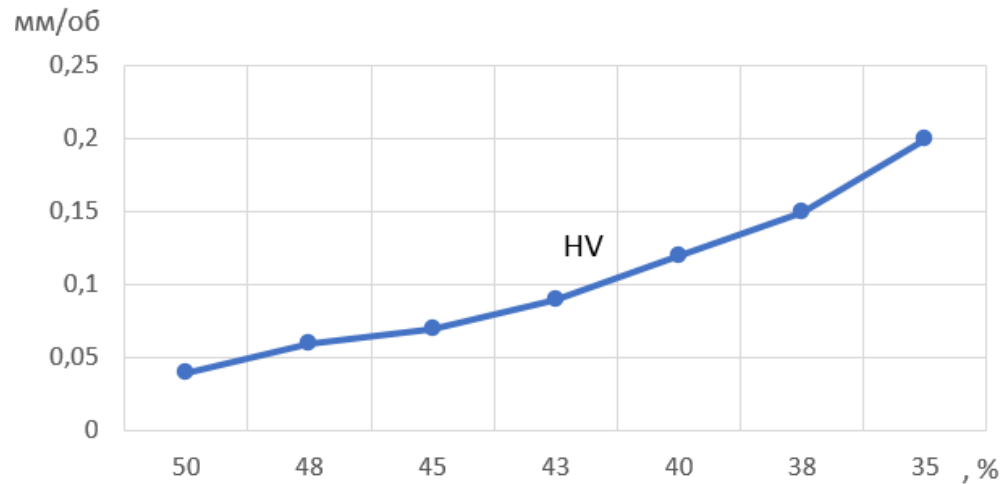


Рисунок 15 – Залежність зміцнення від поздовжньої подачі

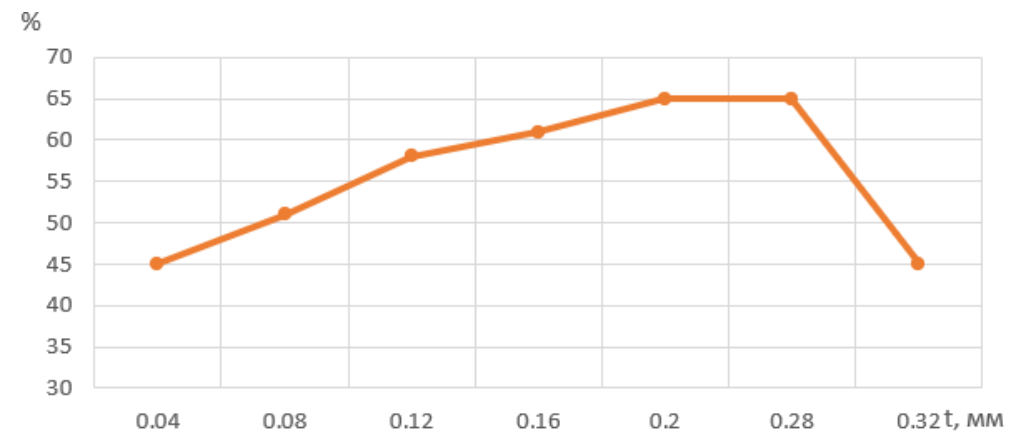
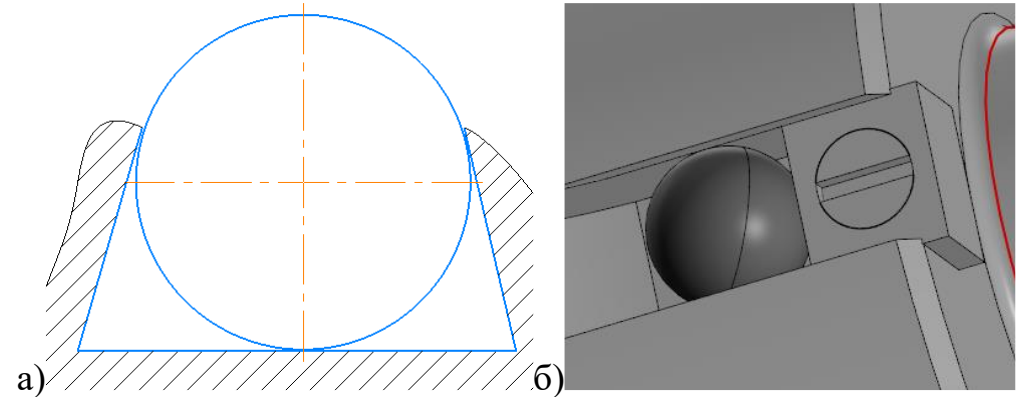
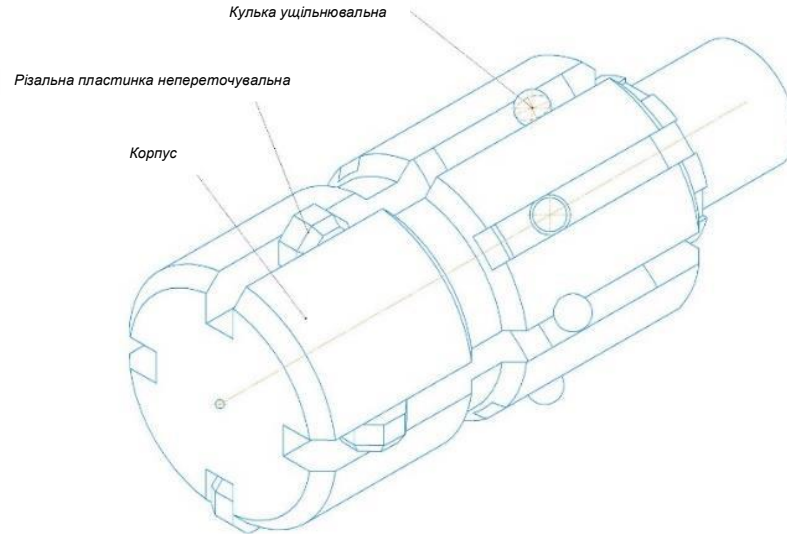


Рисунок 16 – Залежність зміцнення від натягу

Розробка оптимальної форми деформуючого елемента



а) – форма посадкового місця для кульки; б) – метод закріплення розкочувальних кульок

Рисунок 18 – Розташування розкочувальних елементів

Рисунок 17 – Загальний вигляд комбінованої розгортки

Дослідження впливу подачі на якість поверхні

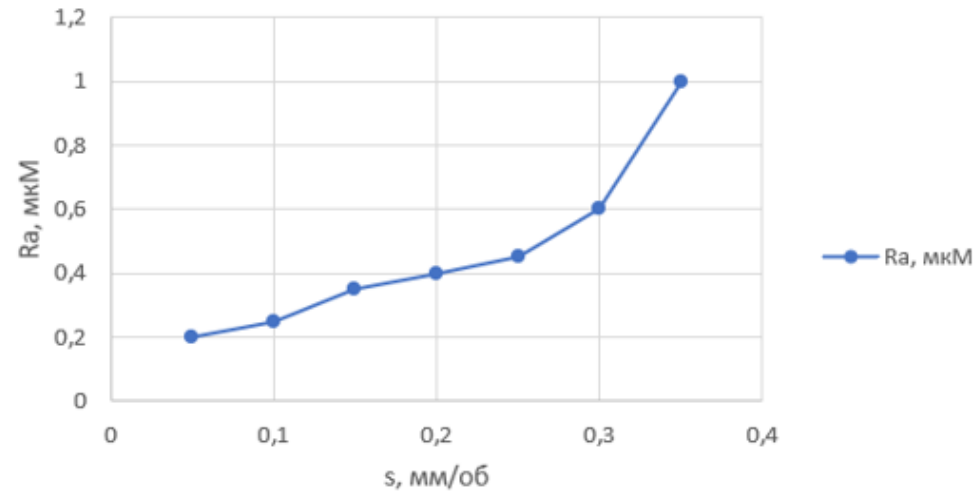


Рисунок 19 – Залежність параметра шорсткості від величини подачі під час обробки сталі 45

Дослідження впливу натягу на зміну розмірів деталі

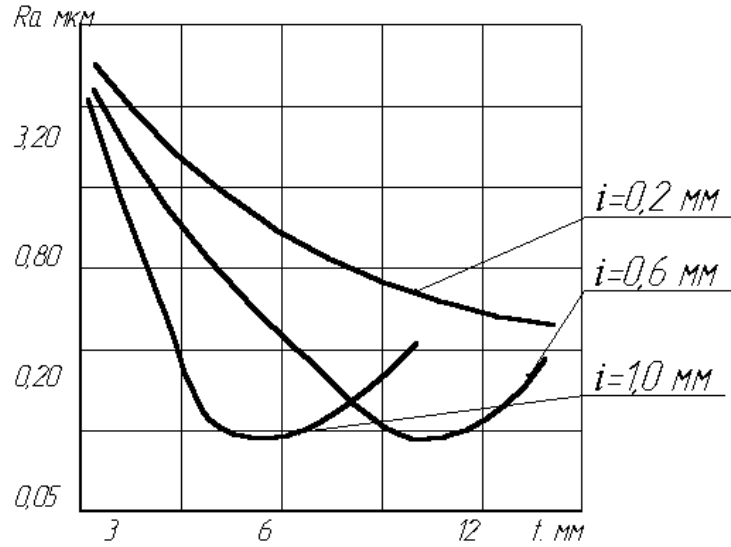


Рисунок 20 – Залежність шорсткості обробленої поверхні від товщини стінки

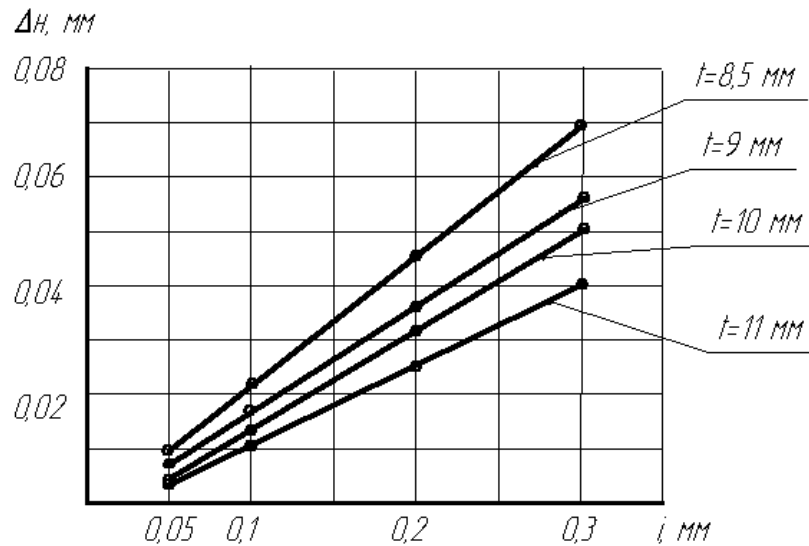


Рисунок 22 – Вплив натягу на характеристику обробки

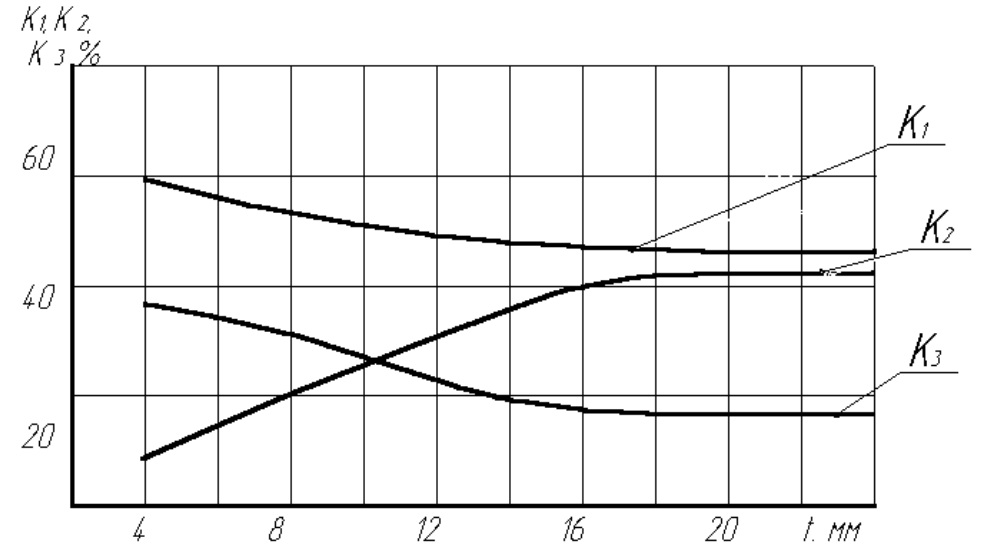


Рисунок 21 – Залежність робіт роздачі, тертя та вигину від товщини стінки при обробці втулок із сталі 45 діаметром 50 мм

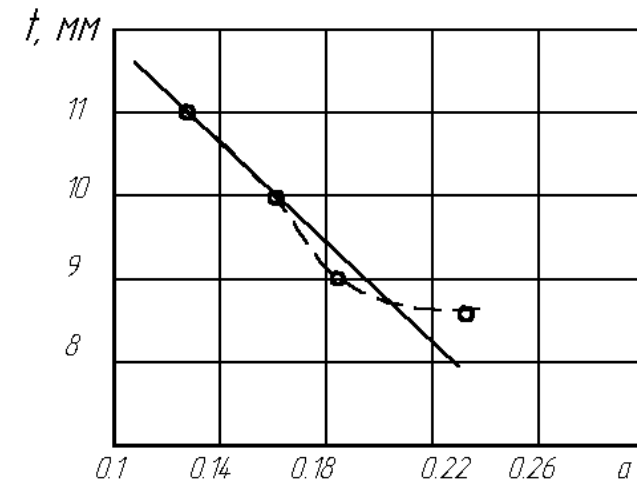
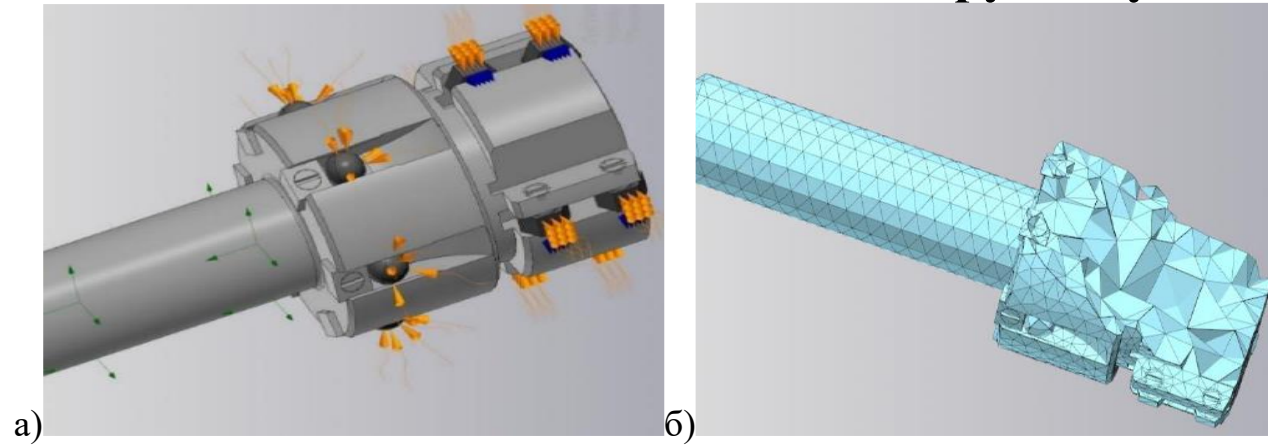
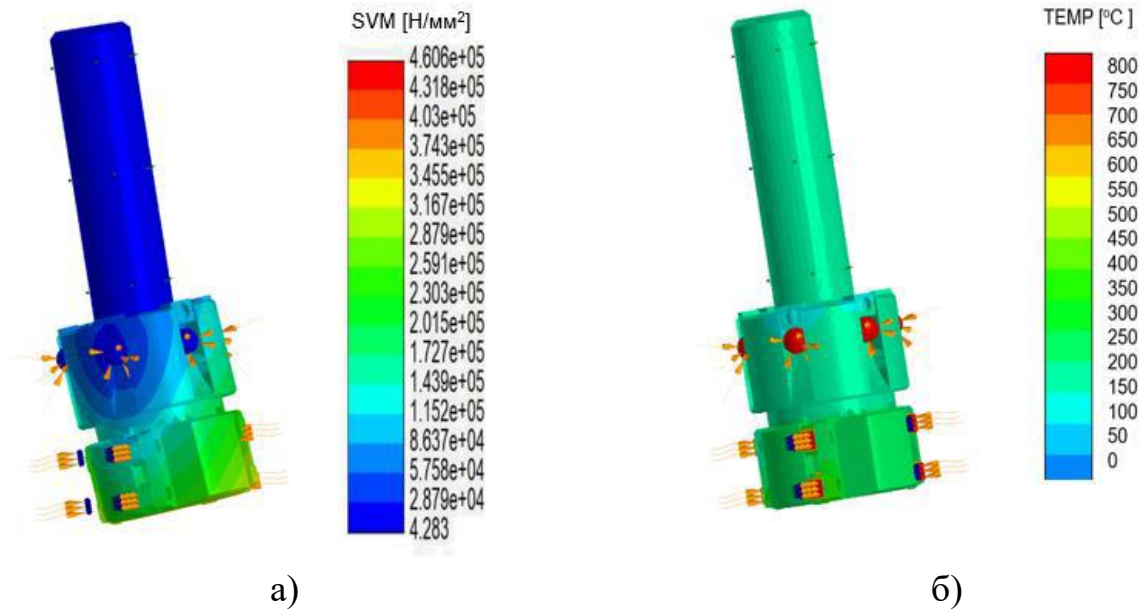


Рисунок 23 – Визначення аналітичної залежності товщини стінки від коефіцієнта зміни розміру

Моделювання комбінованого інструменту



а – локалізація навантажень; б – кінцево-елементна сітка
Рисунок 24 – Процес 3D-моделювання з локалізацією навантажень



а – напружено-деформований стан із втратою стійкості; б – тепловий розрахунок
Рисунок 25 – Результати моделювання міцності

ВИСНОВКИ

1. На підставі проведених досліджень встановлено, що застосування нового комбінованого інструменту для обробки внутрішніх циліндричних отворів підвищує якість робочої поверхні: збільшення твердості поверхневого шару з 30 HRC до 45 HRC, зменшення шорсткості Ra до 0,32 мкм.

2. Дослідження матеріалу та його властивостей, що набуваються в результаті комбінованої обробки, показали:

- зміцнення поверхневого шару обробленого отвору спостерігається на глибині до 0,8 ... 1,1 мм;
- твердість поверхневого шару обробленого отвору підвищилася в 1,5 рази;
- була створена модель комбінованого процесу обробки отворів у циліндрах, яка встановлює відповідність між геометричними характеристиками та фізико-механічними властивостями оброблюваної поверхні з конструктивними параметрами інструменту та режимами обробки.

3. Удосконалена технологія виготовлення гільзи гідроциліндра скорочує кількість технологічних операцій, зменшує технологічний час, та кількість використовуваного ріжучого інструменту. Гладка гільза механізму гідравлічного циліндра виконується із заданим припуском для виконання операції розкочування. Цей вид обробки ґрунтується на застосуванні пластичних властивостей металу отримувати залишкову деформацію без руйнування під впливом зовнішніх сил.

ДОДАТОК В
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НА ПЛАГІАТ
РОЗРОБЛЕННЯ ФОРМИ ДЕФОРМУЮЧОГО ЕЛЕМЕНТУ ДЛЯ
КОМБІНОВАНОЇ ОБРОБКИ ГЛАДКИХ ОТВОРІВ

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Розроблення форми деформуючого елемента для комбінованої обробки гладких отворів

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра галузевого машинобудування, ФМТ, гр. 1ГМ-216
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 14 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Поліщук Л.К., зав. кафедри ГМ
(прізвище, ініціали, посада)

Л.К. Поліщук
(підпис)

Шенфельд В.Й., доцент кафедри ГМ
(прізвище, ініціали, посада)

В.Й. Шенфельд
(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

В.Й. Шенфельд
(підпис)

Шенфельд В.Й.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

Р.І. Сивак
(підпис)

Сивак Р.І., д.т.н., професор

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

Д.В. Балагур
(підпис)

Балагур Д.В.

(прізвище, ініціали)