

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.ПМК_М - 18.00.00.000 ПЗ

група ПМК_М-23-1

Середюк Олег

Тарасович

2024

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інженерної механіки та робототехніки

Кафедра: комп'ютеризованого машинобудування

Середюк Олег Тарасович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 621.7

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Дослідження впливу технологічних параметрів фрикційного поверхневого зміцнення на стан поверхні та точність нарізі (назва роботи)

Комп'ютеризовані та роботизовані технології машинобудування

(назва освітньої програми)

131 – Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

О.С. Середюк

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Роп'як Л.Я., професор кафедри КМВ

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

професор

(посада)

(підпис)

(дата)

Панчук В. Г.

(ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

м. Івано-Франківськ — 2024 рік

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут інженерної механіки та робототехніки

Кафедра комп'ютеризованого машинобудування

Освітній рівень магістр

Спеціальність 131 – Прикладна механіка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

«____» _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Середюку Олегу Тарасовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження впливу технологічних параметрів фрикційного поверхневого зміцнення на стан поверхні та точність нарізі
керівник роботи Роп'як Л.Я., професор кафедри КМВ

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «22» листопада 2024 року № 780/7

2. Строки подання студентом роботи 15 грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: технічний кресленник деталі; середовище спеціальних програм для моделювання ,

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

1. Розробити рекомендації щодо оптимальних режимів фрикційного поверхневого зміцнення

2. Дослідити вплив технологічних параметрів на стан поверхні та геометричну точність

нарізі. 3. Пошук та аналіз існуючих сайтів з аналогічними технологіями

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

1. Креслення ролика різального -1 лист А4. 2. Результати аналізу динамічного розрахунку -1

лист А1 3. Результати аналізу статичного розрахунку - 1 лист А4.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Роп'як Л.Я., професор кафедри КМВ		
2	Роп'як Л.Я., професор кафедри КМВ		
3	Роп'як Л.Я., професор кафедри КМВ		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Загальна характеристика	01.04.2024	
2	Опис і конструкція навчального проєкту	01.06.2024	
3	Проектна частина	05.08.2024	
4	Конструкторська частина	01.10.2024	
5	Дослідницька частина	24.11.2024	
6	Захист магістерської роботи	24.12.2024	

Студент _____ Середюк О.Т.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Роп'як Л.Я.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота на тему: Дослідження впливу технологічних параметрів фрикційного поверхневого зміцнення на стан поверхні та точність нарізи. Дана робота складається зі 53 аркушів. До неї входять 10 рисунків, 10 таблиць, 3 додатки. Для розрахунку роботи було використано 7 бібліографічних найменувань.

Об'єкт дослідження – вплив технологічних параметрів фрикційного поверхневого зміцнення на стан поверхні

Предмет дослідження – Залежність стану поверхні та точності нарізи різьбових з'єднань від параметрів фрикційного поверхневого зміцнення.

Мета роботи - метою роботи є встановлення закономірностей впливу технологічних параметрів ФПЗ на стан поверхні

Завдання роботи. Відповідно до вибраної теми в роботі покладені такі задачі:

- розробити рекомендації щодо оптимальних режимів фрикційного поверхневого зміцнення для забезпечення високої точності різьбових поверхонь;
- дослідити вплив технологічних параметрів на стан поверхні та геометричну точність нарізи;
- пошук та аналіз існуючих сайтів з аналогічними технологіями;

Методи роботи. Для реалізації проекту та виконання поставлених задач, проведено аналіз ефективності та числове моделювання досліджуваного об'єкту.

Результати роботи. У результаті проведеного дослідження встановлено закономірності впливу технологічних параметрів фрикційного поверхневого зміцнення.

Структура роботи. Розділи – 3. Загальний обсяг основної частини – 53 сторінки. Список використаних джерел – 7.

Ключові слова:

Студент Середюк О.Т.

SUMMARY

Master's qualification work on the topic: Investigation of the influence of technological parameters of friction surface hardening on the surface condition and accuracy of the cut. This work consists of 53 pages. It includes 10 figures, 10 tables, and 2 appendices. The work is based on 7 bibliographic references.

Object of research - influence of technological parameters of friction surface hardening on the surface condition

Subject of research - Dependence of the surface condition and accuracy of threaded connections on the parameters of friction surface hardening.

Purpose of the study - the purpose of the study is to establish the regularities of the influence of technological parameters of FST on the surface condition

Tasks of the work. In accordance with the chosen topic, the work has the following tasks:

- to develop recommendations for optimal modes of friction surface hardening to ensure high accuracy of threaded surfaces;

- to investigate the influence of technological parameters on the surface condition and geometric accuracy of the thread;

- search and analyse existing sites with similar technologies;

Methods of work. In order to implement the project and accomplish the tasks, we conducted an efficiency analysis and numerical modelling of the object under study.

Results. As a result of the study, the regularities of the influence of technological parameters of friction surface hardening were established.

Structure of the work. There are 3 chapters. The total volume of the main part is 53 pages. List of references - 7.

Key words:

Student Seredyuk O.T.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ВИМІРІВ.....	7
1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ	10
1.1 Огляд літератури з технологій поверхневого зміцнення.....	10
1.2 Принципи фрикційного поверхневого зміцнення	12
1.3 Особливості зміцнення різьбових поверхонь	19
1.4 Методи оцінки стану поверхні після зміцнення	21
1.4.1 Вимірювання твердості поверхні	21
1.4.2 Дослідження мікроструктури поверхневого шару	23
1.4.3 Аналіз залишкових напружень	25
1.4.4 Оцінка хімічного складу поверхні.....	25
2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	29
2.1 Вибір матеріалу та інструментів	29
2.2. Методика проведення експериментів	31
2.3 Структурно-фазовий аналіз	34
2.4 Вибір методу фрикційного поверхневого зміцнення	36
3 РЕЗУЛЬТАТ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	38
3.1 Вплив параметрів процесу на стан поверхні	38
3.2 Моделювання процесу пластичної деформації та аналіз її результатів для різального ролика труборіза.....	42
3.3 Порівняння експериментальних та теоретичних результатів.....	48
ВИСНОВКИ	52
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	53

					МР ПМК_М-18 00 00 000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Середюк О..			Пояснювальна	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Роп'як Л Я			записка		6	
Реценз.					ІФНТУНГ			
Н. Контр.					ПМК_М-23-1			
Затверд.		Панчук В.Г.						

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ВИМІРІВ

ФПЗ	Фрикційне поверхнєве зміцнення
ТФЗ	Технології термофрикційного зміцнення
FSP	Friction Stir Processing
FSW	Friction Stir Welding
FW	Friction Stir Welding
МПа	Мега Паскаль
EDS	Енергетично-дисперсійна спектроскопія

					MP ПМК _M -22 00 00 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		7

ВСТУП

Фрикційне поверхнєве зміцнення (далі ФПЗ) є одним із сучасних і перспективних методів підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин і механізмів. Воно дозволяє покращувати міцність, зносостійкість і довговічність матеріалів завдяки зміні їхньої мікроструктури, зберігаючи базові властивості основного матеріалу.

Дослідження впливу технологічних параметрів ФПЗ на стан поверхні та точність нарізи є актуальним через зростаючі вимоги до якості різьбових з'єднань, які широко використовуються у багатьох галузях: машинобудуванні, авіаційній, енергетичній та нафтогазовій промисловості. Різьбові з'єднання повинні витримувати значні статичні та динамічні навантаження, агресивні середовища та температурні коливання, тому їх міцність і точність є критично важливими параметрами.

Оптимізація параметрів фрикційного зміцнення дозволяє:

- забезпечити однорідність поверхневого шару;
- уникнути дефектів, таких як мікротріщини чи залишкові напруження;
- зберегти геометричну точність різьби після обробки;
- покращити функціональні характеристики різьбових з'єднань, зокрема їх зносостійкість і довговічність.

Крім того, недостатньо дослідженим залишається вплив таких параметрів, як швидкість обертання інструмента, нормальна сила притискання та температура, на формування структури поверхні та зміну геометрії різьби. Це визначає актуальність виконання експериментів і моделювання процесів для встановлення взаємозв'язків між технологічними параметрами та кінцевими властивостями деталей.

					МР ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		8

Таким чином, дослідження у цьому напрямку сприяють вдосконаленню технологій ФПЗ, підвищенню точності різьбових з'єднань та їх надійності, що є важливим для підвищення ефективності виробничих процесів і розвитку сучасного машинобудування.

					<i>МР ПМК_М-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		9

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ

1.1 Огляд літератури з технологій поверхневого зміцнення

Поверхнєве зміцнення є важливою технологією, спрямованою на покращення механічних і фізичних властивостей матеріалів. Воно підвищує твердість, зносостійкість, корозійну стійкість і інші експлуатаційні характеристики поверхонь деталей. Серед основних методів виділяють термофрикційне зміцнення, лазерне наплавлення, плазмову обробку, фрикційно-зміцнювальне оброблення та інші технології, що використовують висококонцентровані джерела енергії.

Сучасні технології поверхневого зміцнення

1. Технології термофрикційного зміцнення (ТФЗ). Методи термофрикційного оброблення базуються на використанні тертя для генерації високої локальної температури та пластичної деформації. У процесі ТФЗ утворюється зміцнений поверхневий шар із модифікованою структурою. Наприклад, у дослідженнях на сталі 65Г було встановлено, що після термофрикційного оброблення формується так званий «білий» шар із мікротвердістю до 13000 МПа. Цей шар є результатом інтенсивного структуроутворення, зокрема утворення дисперсного мартенситу, який відзначається підвищеною міцністю та зносостійкістю. Глибина зміцнення може сягати 300 мкм, залежно від режимів обробки [1, 2].

2. Фрикційно-зміцнювальне оброблення. Технології на основі тертя, такі як фрикційна обробка та Friction Stir Processing (FSP), активно використовуються для зміцнення поверхонь алюмінієвих і сталевих сплавів. Метод FSP базується на використанні спеціального інструмента, який створює тертя, пластичну деформацію та перемішування матеріалу в зоні обробки. Це дозволяє утворювати зміцнений поверхневий шар із рівномірним розподілом частинок

					<i>MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		10

зміцнювального матеріалу. Наприклад, додавання керамічних частинок (Al_2O_3 , SiC) у матрицю алюмінієвого сплаву AA5083 під час FSP дозволяє значно підвищити твердість поверхні — з 77 до 138 HV при багаторазових проходах інструмента [3].

3. Методи локального термопластичного впливу. До цієї категорії входять лазерне, електронно-променеве та плазмове зміцнення. Ці методи дозволяють досягти високої точності та локалізації обробки. Однак такі технології потребують дорогого обладнання та складного контролю параметрів. Зокрема, лазерне наплавлення часто використовується для створення корозійностійких шарів на поверхні сталевих деталей, що забезпечує їхню довговічність навіть у важких умовах експлуатації.

Особливості фрикційного поверхневого зміцнення

Фрикційне поверхнєве зміцнення є ефективним методом модифікації поверхневого шару матеріалу шляхом генерації тепла та пластичної деформації в зоні контакту інструмента з оброблюваною поверхнею. Основними аспектами цієї технології є:

- утворення «білого» шару. Після термофрикційної обробки формується поверхневий шар із високою твердістю та дисперсністю структури. У дослідженнях на сталі 41Cr4 було зафіксовано, що такий шар містить нанокристалічну структуру, що виникає через високошвидкісне нагрівання (до 10^5 – 10^6 K/c) та охолодження. Цей шар відзначається підвищеною міцністю і стійкістю до зносу [2];

- вплив технологічних параметрів. Ефективність зміцнення залежить від таких параметрів, як нормальна сила, швидкість подачі, температура в зоні контакту та геометрія інструмента. Наприклад, використання інструмента з поперечними канавками сприяє кращому розподілу навантажень та утворенню більш однорідної поверхні з меншими залишковими напруженнями [2];

- використання зміцнювальних добавок. У FSP можливе

					<i>MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		11

додавання частинок, які зміцнюють матеріал. Наприклад, інтеграція Cu у матрицю AA5083 дозволила підвищити її твердість за рахунок утворення зміцнених інтерметалевих сполук та однорідного розподілу частинок у структурі поверхневого шару [2].

Недоліки та виклики

Попри численні переваги, технології фрикційного зміцнення мають і певні обмеження:

- контроль параметрів процесу. Висока температура та пластична деформація можуть призводити до дефектів, таких як мікротріщини чи залишкові напруження, що потребує точного регулювання параметрів обробки [1, 2];
- вартість обладнання. Сучасні установки для фрикційного зміцнення потребують значних фінансових інвестицій, що може обмежувати їх використання у дрібносерійному виробництві;
- неоднорідність структури. У випадках недостатньої кількості проходів інструмента можливе утворення зон із різними механічними властивостями, що знижує загальну ефективність зміцнення [1, 3].

1.2 Принципи фрикційного поверхневого зміцнення

Фрикційне поверхневе зміцнення (ФПЗ) — це технологія, яка дозволяє покращувати механічні властивості матеріалу, такі як міцність, твердість і зносостійкість, шляхом поєднання механічного та теплового впливу, викликаного тертям. Цей процес застосовується для зміцнення робочих поверхонь деталей, що працюють у важких умовах експлуатації.

Фрикційне зміцнення здійснюється завдяки локальному впливу тертя, яке викликає підвищення температури і пластичну деформацію у поверхневому шарі матеріалу. Ці впливи змінюють його мікроструктуру, створюючи дрібнозернисту структуру з покращеними механічними характеристиками.

					<i>MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12

Залежно від мети обробки, використовуються такі методи, як локалізований тепловий вплив, механізм пластичної деформації, фрикційно-зміцнювальна обробка або фрикційне зварювання

Використання локалізованого теплового впливу

ФПЗ забезпечує локальне підвищення температури в зоні обробки за рахунок тертя між інструментом та поверхнею матеріалу. Цей ефект досягається завдяки контролю технологічних параметрів, таких як швидкість обертання інструмента, нормальна сила притискання та швидкість подачі.

1. Процес генерації тепла. У зоні контакту інструмента і матеріалу утворюється висококонцентрований потік енергії, який нагріває поверхню до температур, що перевищують точки фазових перетворень. Наприклад, у сталях температура може досягати значень вище точки Ас3, сприяючи фазовим перетворенням і структурним змінам у поверхневому шарі.

2. Швидкість охолодження. Після завершення тертя матеріал охолоджується з високою швидкістю (до 10^5 – 10^6 К/с), що дозволяє уникнути утворення грубозернистої структури і сприяє формуванню нанокристалічного шару. Такий шар характеризується підвищеною твердістю, що важливо для зносостійкості.

3. Локалізований характер обробки. Використання інструментів із поперечними канавками забезпечує рівномірний розподіл температури, мінімізуючи ризик перегріву окремих зон.

Таблиця 1.1 - Параметри нагрівання при ФПЗ на сталі 65Г

Параметр	Значення	Примітка
Температура нагріву	800–1000 °С	Вище точки Ас3
Швидкість охолодження	10^5 – 10^6 К/с	Формування нанокристалів
Тривалість контакту	2–5 с	Залежить від швидкості інструмента

Механізм пластичної деформації

Фрикційне зміцнення супроводжується інтенсивною пластичною деформацією поверхневого шару, яка змінює його мікроструктуру та покращує механічні характеристики.

1. **Дрібнодисперсна структура.** Високий рівень зсувних напружень у зоні обробки призводить до утворення дрібнодисперсних або нанокристалічних структур. Наприклад, після обробки сталі 41Cr4 було зафіксовано формування шару з високою мікротвердістю (до 13000 МПа) та дисперсністю, що перевищує попередню термообробку.

2. **Інтеграція зміцнювальних компонентів.** У процесі FSP можлива інтеграція керамічних або металевих частинок у матрицю базового матеріалу. Наприклад, додавання частинок Си у матрицю алюмінію дозволяє створити інтерметалеві сполуки, які значно покращують міцність і зносостійкість поверхні.

3. **Утворення спеціалізованих структур.** У сталях після фрикційного зміцнення формується так званий «білий» шар — високотвердий шар, збагачений мартенситом, який забезпечує підвищену зносостійкість навіть за агресивних умов експлуатації.

Фрикційне зварювання

Вид зварювання, в якому два матеріали з'єднуються за допомогою тепла, що генерується тертям при високих обертах одного з з'єднуваних елементів. В результаті процесу нагрівання і деформації утворюється з'єднання без розплавлення металу, що дозволяє зберегти його основні механічні властивості.

Цей процес є одним із видів безплавневого зварювання, в якому з'єднання здійснюється шляхом пластичної деформації на межі контакту матеріалів. Процес використовують для зварювання металів та сплавів з високими вимогами до механічних властивостей з'єднання, таких як алюмінієві та титанові сплави, а також для з'єднання різних матеріалів.

Основні етапи процесу фрикційного зварювання

					МР ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		14

1. Підготовка поверхонь: поверхні матеріалів, які підлягають зварюванню, мають бути чистими та рівними для досягнення надійного з'єднання. На них не повинно бути оксидів, забруднень або інших дефектів. Вони можуть бути підготовлені механічно або хімічно, наприклад, шляхом шліфування.

2. Нагрівання тертям: один з матеріалів обертається за допомогою механічного пристрою (звичайно, деталь з'єднується з двигуном). У процесі тертя на межі контакту двох елементів генерується тепло, що підвищує температуру до такого рівня, коли матеріал стає пластичним (але не розплавляється).

3. Застосування тиску: після того як матеріал достатньо прогрітий і став пластичним, на нього прикладають вертикальний або осьовий тиск, що призводить до пластичної деформації матеріалу та утворення з'єднання. Тиск сприяє переміщенню пластичної маси в межах з'єднання, що дозволяє заповнити мікроскопічні пори, зменшити кількість дефектів та забезпечити щільне прилягання частин.

4. Охолодження та стабілізація: після завершення обробки деталі охолоджуються, що дозволяє стабілізувати структуру матеріалу в зоні з'єднання. Процес охолодження може бути природним або штучно прискореним.

Типи фрикційного зварювання

1. Фрикційне зварювання з обертанням (Friction Stir Welding, FSW): одна з деталей обертається, а інша залишається нерухомою. Тертя між обертальною деталлю і нерухомою поверхнею викликає нагрівання матеріалу до пластичності, після чого з'єднання формується під тиском. Використовується для з'єднання пластин або листів, зазвичай в аерокосмічній, автомобільній та суднобудівній промисловості.

2. Фрикційне зварювання з ковзанням (Friction Welding, FW): обидва елементи, що з'єднуються, обертаються зі зміщенням одна щодо одної. Коли вони достатньо прогріваються від тертя, один елемент зупиняється, а на інший

					<i>MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		15

наноситься тиск для створення з'єднання. Це зазвичай використовується для з'єднання великих деталей, таких як вали, труби тощо.

3. Фрикційне зварювання під тиском (Friction Pressure Welding): у цьому випадку один елемент обертається, а інший залишається нерухомим. Після нагріву тертям елементи з'єднуються під осьовим тиском.

Основні переваги:

- покращення механічних властивостей. ФПЗ забезпечує значне підвищення твердості, міцності та зносостійкості поверхневого шару. У багатьох випадках це дозволяє подвоїти або навіть потроїти термін служби деталей;
- збереження властивостей основного матеріалу. Локалізований вплив мінімізує ризики перегрівання або пошкодження основного матеріалу, що є ключовою перевагою перед іншими методами, такими як лазерне зміцнення або плазмова обробка;
- економічність і універсальність. Технологія не потребує дорогого устаткування та може бути адаптована для різних матеріалів і деталей;
- екологічність: Фрикційне зварювання не вимагає використання шкідливих хімічних речовин чи великих енергетичних затрат, що робить його більш екологічним порівняно з іншими методами.

Основні недоліки:

- складність контролю процесу. Досягнення оптимальних властивостей поверхні залежить від точного регулювання температури, швидкості інструмента, сили притискання та інших параметрів. Невідповідність параметрів може призвести до утворення мікротріщин або нерівномірного зміцнення;
- неоднорідність шару. Недостатня кількість проходів або неправильно підібрані параметри можуть спричинити неоднорідність зміцненого шару, що знижує ефективність обробки;
- висока вартість розробки технології. Хоча ФПЗ економічніше за лазерне зміцнення, розробка параметрів для специфічних матеріалів може

					<i>MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		16

бути затратною;

- обмежена товщина з'єднаних матеріалів. Зазвичай фрикційне зварювання застосовують для тонких матеріалів, тому його не завжди можна використовувати для дуже товстих деталей;

- необхідність високоточних налаштувань. Для досягнення високоякісного з'єднання потрібно точно налаштувати параметри процесу (швидкість обертання, тиск, час зварювання), що може вимагати спеціального обладнання;

- обмеження по матеріалам. Не всі матеріали піддаються фрикційному зварюванню, особливо деякі високовуглецеві сталі або інші матеріали з дуже високою твердістю.

Фрикційно-зміцнювальна обробка

Метод термічно-механічної обробки матеріалів, який використовується для покращення їх механічних властивостей. Цей процес виконується за допомогою тертя і пластичної деформації, що створюють локальне нагрівання та зміни в структурі матеріалу.

Фрикційно-зміцнювальна обробка включає такі етапи:

1. Тертя та нагрівання: Інструмент з високою швидкістю обертання контактує з поверхнею матеріалу, створюючи тепло через тертя. Температура залишається нижче точки плавлення матеріалу.

2. Пластична деформація: Під впливом тепла та механічного тиску матеріал у зоні обробки стає пластичним. Інструмент зміщує матеріал у процесі обертання, формуючи нову мікроструктуру.

3. Рекристалізація: У зоні обробки відбувається утворення нових дрібнозернистих кристалів, що значно покращує механічні властивості, такі як міцність, твердість і ударна в'язкість.

4. Охолодження: Після припинення обробки матеріал швидко охолоджується, закріплюючи отриману мікроструктуру.

Основні результати

					<i>MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		17

- уточнення зерен. Завдяки рекристалізації утворюється дрібнозерниста структура, яка покращує механічні властивості;
- зменшення дефектів. Обробка знижує кількість тріщин, пор та інших структурних дефектів;
- підвищення зносостійкості. Покращені властивості поверхневого шару знижують рівень зношення;
- покращення пластичності. При збереженні високої міцності матеріал стає більш пластичним.

Обладнання та інструменти

Фрикційні інструменти виготовляються з високоміцних матеріалів, здатних витримувати високі температури та тертя. У процесі використовуються верстати або установки, що забезпечують контроль швидкості обертання, тиску та температури.

Переваги фрикційно-зміцнювальної обробки

1. Екологічність - процес не використовує охолоджувальні рідини чи хімічні добавки.
2. Висока енергоефективність - низьке енергоспоживання порівняно з іншими методами термообробки.
3. Поліпшення механічних властивостей - технологія значно покращує міцність, твердість і довговічність матеріалу.
4. Можливість локального зміцнення - обробляється лише конкретна частина виробу, зберігаючи вихідні властивості решти.

Застосування:

- авіабудування: зміцнення алюмінієвих сплавів для зменшення ваги і підвищення міцності компонентів;
- машинобудування: покращення властивостей деталей, що працюють під високим навантаженням (валів, шестерень);
- нафтогазова галузь: зміцнення труб і обладнання, які зазнають абразивного зносу;

					<i>MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		18

- медицина: підвищення міцності матеріалів для імплантатів.

Обмеження:

- потребує спеціального обладнання;
- не підходить для матеріалів із низькою температурною стійкістю;
- може бути непридатним для дуже складних геометричних форм.

1.3 Особливості зміцнення різьбових поверхонь

Різьбові з'єднання є ключовими елементами багатьох конструкцій, що забезпечують надійність, довговічність та функціональність машин і механізмів. Завдяки фрикційному поверхневому зміцненню (ФПЗ) можна суттєво покращити механічні властивості різьбових поверхонь, зокрема твердість, зносостійкість та опір втомним руйнуванням, без зміни геометрії профілю.

Специфіка обробки різьбових поверхонь

Зміцнення різьби має певні технічні особливості через складну геометрію профілю, включаючи наявність гребенів, западин і крутих кутів.

1. Локалізований вплив на гребені різьби. Процес ФПЗ дозволяє зосередити нагрівання та деформацію у верхніх шарах матеріалу. Це забезпечує рівномірний розподіл властивостей по поверхні різьби, запобігаючи деформації профілю

2. Рівномірність впливу. Завдяки спеціалізованим інструментам з оптимізованою геометрією забезпечується рівномірний розподіл температури і тиску в зоні контакту. Для різьбових поверхонь це критично, оскільки асиметрія зміцнення може призводити до втрати точності різьбових з'єднань.

3. Врахування геометричних параметрів. Глибина зміцнення обмежується кількома сотнями мікрометрів, щоб уникнути пошкодження основного матеріалу.

					<i>MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		19

Вплив технологічних параметрів на процес

Для ефективного зміцнення різьби важливо правильно вибрати параметри ФПЗ:

1. Швидкість обертання інструмента. Для сталевих різьб оптимальними є швидкості 1000–1200 об/хв, що забезпечують необхідну температуру для фазових перетворень без перегрівання [1].
2. Нормальна сила притискання. Визначає глибину проникнення інструмента. Надмірна сила може призводити до деформації гребенів, що знижує якість різьби
3. Режим охолодження. Використання додаткових мастильних матеріалів (наприклад, із полімерними добавками) дозволяє знизити коефіцієнт тертя і рівномірно охолодити зону зміцнення, зменшуючи ризик утворення тріщин (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2 - Параметри охолодження при зміцненні різьби

Тип матеріалу	Температура охолодження, °С	Тип мастила	Час охолодження, с
Сталь 65Г	500	Полімерне мастило	2–5
АА5083	350	Мінеральне мастило	3–7

Результати фрикційного зміцнення

Фрикційне зміцнення забезпечує суттєве покращення характеристик різьбових поверхонь:

1. Підвищення твердості та зносостійкості. Формування зміцненого шару із дрібнозернистою або нанокристалічною структурою підвищує твердість різьбових поверхонь у 2–3 рази залежно від матеріалу.
2. Стійкість до втомних навантажень. Однорідний зміцнений шар зменшує ризик утворення мікротріщин, які є основною причиною втомного руйнування різьби

					МР ПМК _М -22 00 00 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		20

3. Збереження точності різьби. Локалізований характер ФПЗ дозволяє уникнути деформації гребенів і забезпечує стабільність розмірів профілю.

Таблиця 1.3 - Порівняння точності різьби до і після ФПЗ

Параметр	До зміцнення	Після зміцнення
Відхилення профілю, мм	± 0.015	± 0.012
Глибина різьби, мм	0.75	0.75

1.4 Методи оцінки стану поверхні після зміцнення

Оцінка стану поверхні після фрикційного зміцнення є важливим етапом аналізу ефективності технологічного процесу, оскільки саме властивості поверхневого шару визначають експлуатаційні характеристики виробів. Методи оцінювання спрямовані на детальне вивчення фізико-механічних, хімічних та структурних властивостей поверхні. Нижче наведено основні етапи аналізу, які застосовуються в практиці.

1.4.1 Вимірювання твердості поверхні

Оцінка твердості поверхні є одним із ключових етапів аналізу, який дозволяє визначити, наскільки ефективно відбулося зміцнення та як змінюється твердість матеріалу у глибині. Твердість впливає на зносостійкість, міцність і стійкість матеріалу до деформацій. У цьому дослідженні використовувалися методи Віккерса та Роквелла для оцінки поверхневого шару після фрикційного зміцнення.

Метод Віккерса широко застосовується для аналізу мікротвердості на малих глибинах. Він використовує алмазний наконечник у формі піраміди, який створює відбиток на досліджуваній поверхні під заданим навантаженням. Для аналізу фрикційного зміцнення використовували зразки, оброблені при різних технологічних параметрах:

- режими фрикційного зміцнення: частота обертання 900 об/хв, тиск 2–4 кН, швидкість подачі 50–150 мм/хв;
- глибина вимірювання: 0,1–1,5 мм.

Результати вимірювання твердості методом Віккерса [4]:

Таблиця 1.4 - Результати вимірювання твердості методом Віккерса

Зразок	Глибина, мм	Твердість HV	Примітки
Сфероїдальний чавун (FCD700)	0,1	200	Графіт рівномірно розподілений
	0.5	700	Утворення мартенситної структури
	1.0	500	Збільшення частки феритної фази
Пластинчастий чавун (FC300)	0.1	170	Високий вміст графіту
	0.5	680	Рівномірний розподіл мартенситу та перліту
	1.0	450	Зменшення впливу теплового циклу

Метод Роквелла застосовується для оцінки макротвердості матеріалу, включаючи твердість графітних включень і базової металевої матриці. Даний метод дозволяє оцінити загальну здатність матеріалу протистояти механічним впливам. Результати вимірювань методом Роквелла для FCD700:

Таблиця 1.5 - Результати вимірювання методом Роквелла

Відстань від центру, мм	Поверхнева твердість HRC	Глибина 0,5 мм HRC	Глибина 1,0 мм HRC
Центр	31	50	40
6 мм (направлення подачі)	55	70	60

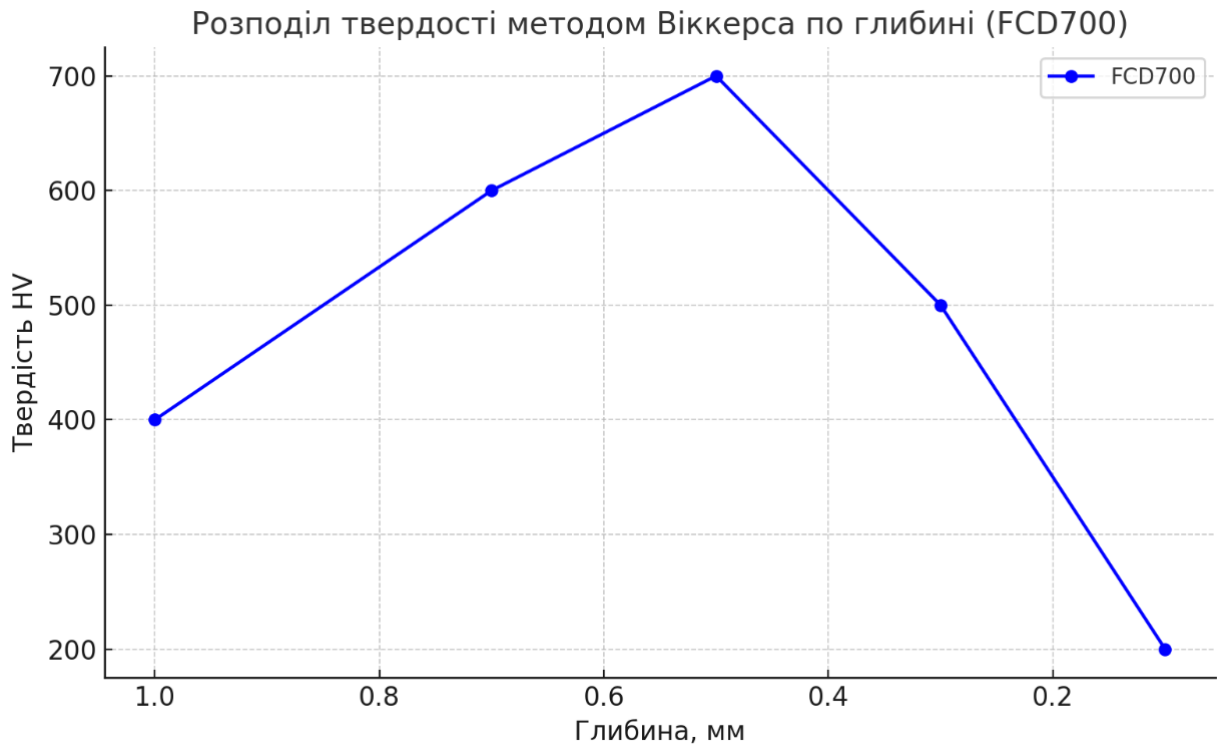


Рисунок 1.1 - Розподіл твердості методом Віккерса по глибині FCD700 [4]

1.4.2 Дослідження мікроструктури поверхневого шару

Мікроструктурний аналіз є важливим етапом дослідження, що дозволяє оцінити зміни, які відбуваються в матеріалі під час фрикційного зміцнення. Результати цього аналізу показують, як зміцнений шар впливає на механічні властивості, такі як твердість, зносостійкість і в'язкість. Вивчення структури базується на оцінці фазового складу, розміру зерен, однорідності поверхні та глибини впливу зміцнення.

Для дослідження мікроструктури використовували оброблені зразки із сфероїдального графітового чавуну (FCD700) та пластинчастого чавуну (FC300). Основні етапи підготовки включали: полірування поверхонь для досягнення дзеркального стану та травлення зразків 3% розчином азотної кислоти в спирті для виявлення мікроструктури [4].

Мікроструктурний аналіз проводився за допомогою:

					<i>MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		23

- оптичного мікроскопа для базової оцінки фазового складу;
- скануючого електронного мікроскопа (SEM) для детального вивчення нанокристалічної структури;
- енергетично-дисперсійної спектроскопії (EDS) для аналізу хімічного складу поверхні.

Результати аналізу показали утворення нанокристалічного білого шару на поверхні після фрикційного зміцнення.

Таблиця 1.6 - Результати мікроструктурного аналізу

Параметр	Глибина, мм	Спостереження
Фазовий склад	0,1	Мартенсит, залишковий аустеніт
	0,5	Мартенсит із частковою присутністю перліту
	1,0	Домінування перлітної структури
Розмір зерен (нм)	0,1	20–40
	0,5	50–70
	1,0	>100
Товщина зміцненого шару	0–0,8	Однорідний нанокристалічний шар

Дослідження підтвердили, що технологічні параметри, такі як швидкість обертання інструмента, тиск та швидкість подачі, значно впливають на утворення зміцненого шару.

Таблиця 1.7 - Залежність фазового складу від технологічних умов

Швидкість подачі, мм/хв	Тиск, кН	Глибина зміцнення, мм	Фазовий склад
50	3	0.8	Однорідний мартенсит, залишковий аустеніт
100	2	0.6	Мартенсит із перлітом
150	2	0.4	Нерівномірною структурою, домінує перліт

1.4.3 Аналіз залишкових напружень

Аналіз залишкових напружень у поверхневому шарі є ключовим етапом дослідження, оскільки ці напруження впливають на експлуатаційні характеристики оброблених деталей, такі як опір втомі, зносостійкість і міцність. Вивчення залишкових напружень дозволяє оцінити рівень внутрішніх деформацій, які виникають внаслідок фрикційного зміцнення.

Для аналізу залишкових напружень використовували два основних методи:

1. Рентгеноструктурний метод: дозволяє визначити залишкові напруження на поверхні та в підповерхневих шарах. Метод базується на зміні міжплощинної відстані кристалічної решітки матеріалу під впливом внутрішніх напружень.

2. Метод свердління: використовується для локального вимірювання залишкових напружень шляхом створення отвору на поверхні та аналізу зміни деформації матеріалу навколо нього.

Результати досліджень показали, що фрикційне зміцнення спричиняє формування компресійних залишкових напружень у поверхневому шарі, що позитивно впливає на стійкість матеріалу до тріщиноутворення

1.4.4 Оцінка хімічного складу поверхні

Хімічний склад поверхневого шару після фрикційного зміцнення є важливим параметром, який визначає його експлуатаційні характеристики, зокрема твердість, зносостійкість і корозійну стійкість. Під час зміцнення внаслідок термодинамічних та дифузійних процесів можливі зміни в розподілі елементів, утворення оксидних шарів та інших фаз, які впливають на функціональні властивості матеріалу.

Для аналізу хімічного складу використовуються сучасні методи, які забезпечують точні результати навіть для нанорозмірних структур:

1. Енергетично-дисперсійна спектроскопія (EDS):

					MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		25

- метод дозволяє визначити локальний елементний склад поверхневого шару;

- використовується у поєднанні зі скануючим електронним мікроскопом (SEM) для аналізу мікроділянок.

2. Метод рентгенівської дифракції (XRD):

- забезпечує ідентифікацію фаз, присутніх у поверхневому шарі, таких як мартенсит, карбіди, оксиди заліза;

- визначає кристалографічні параметри фазового складу.

3. Інфрачервона спектроскопія (FTIR) - використовується для аналізу хімічних зв'язків і присутності органічних домішок, якщо такі є.

Дослідження показали, що в результаті фрикційного зміцнення відбувається значна модифікація хімічного складу поверхневого шару.

Таблиця 1.8 – Дослідження фрикційного зміцнення [1, 2]

Елемент	Концентрація в базовому матеріалі, %	Концентрація після зміцнення, %	Примітки
Вуглець (C)	3,0	3,5	Збагачення вуглецем унаслідок дифузії
Кисень (O)	-	1,0	Утворення оксидів заліза на поверхні
Ферум (Fe)	96,0	94,5	Часткове окислення

Оксидний шар, що утворюється на поверхні, виконує захисну функцію, зменшуючи коефіцієнт тертя та підвищуючи корозійну стійкість. Основні характеристики цього шару: склад: переважно Fe₂O₃, Fe₃O₄; товщина: 1–5 мкм, залежно від температурних умов зміцнення [1].

Результати показують, що зміна технологічних параметрів, таких як швидкість подачі, частота обертання інструмента та величина прикладеного зусилля, суттєво впливає на хімічний склад поверхні.

Таблиця 1.9 – Результати змін технологічних параметрів

Параметри процесу	Збагачення вуглецем, %	Товщина оксидного шару, мкм
Швидкість подачі 50 мм/хв, тиск 3 кН	3,5	5
Швидкість подачі 150 мм/хв, тиск 1,5 кН	3,2	2

Оцінка стереометричних параметрів поверхні є важливим етапом дослідження, оскільки вони визначають функціональні характеристики зміцненої деталі, такі як шорсткість, хвилястість та несуча здатність. Ці параметри впливають на зносостійкість, точність з'єднань і взаємодію деталей у вузлах машин.

Стереометричний аналіз дозволяє визначити якість обробленої поверхні, вплив технологічних параметрів на її стан та оптимізувати процес зміцнення для досягнення найкращих характеристик. Для цього застосовуються сучасні методи вимірювання, які забезпечують високу точність і швидкість аналізу.

Для оцінки стану поверхні використовуються як контактні, так і безконтактні методи аналізу:

1. Контактний метод (профілометрія):
 - використовуються профілометри для вимірювання параметрів шорсткості, таких як Ra (середня арифметична висота нерівностей) та Rz (максимальна висота профілю);
 - метод дозволяє отримати детальні характеристики мікронерівностей поверхні.
2. Безконтактний метод (оптична профілометрія):
 - використовуються лазерні сканери або оптичні мікроскопи для побудови тривимірної моделі поверхні;
 - цей метод є швидким і забезпечує високу роздільну здатність, особливо для аналізу хвилястості.

					<i>MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		27

3. Атомно-силова мікроскопія (AFM) - дозволяє досліджувати поверхневу топографію на нанометровому рівні, оцінюючи структуру зміцненого шару.

Вплив технологічних параметрів фрикційного зміцнення на стереометричні параметри був досліджений на зразках із сфероїдального графітового чавуну (FCD700).

Таблиця 1.10 – Результати впливу технологічних параметрів фрикційного зміцнення на стереометричні параметри [1]

Параметри обробки	Ra, мкм	Rz, мкм	Примітки
Швидкість подачі 50 мм/хв, тиск 3 кН	0,8	6,0	Рівномірна структура, низька шорсткість
Швидкість подачі 100 мм/хв, тиск 2 кН	1,2	8,5	Спостерігається збільшення нерівностей
Швидкість подачі 150 мм/хв, тиск 1,5 кН	2,0	12,0	Нерівномірність структури, зони перегріву

Аналіз стереометричних параметрів показав, що якість поверхні значною мірою залежить від параметрів процесу. При зменшенні швидкості подачі та збільшенні тиску досягається нижчий рівень шорсткості, оскільки інструмент забезпечує рівномірніше оброблення. З іншого боку, висока швидкість подачі може спричинити локальні зони перегріву, що збільшує хвилястість та нерівності поверхні. Безконтактні методи аналізу, такі як лазерна профілометрія, виявили, що в зоні зміцнення утворюється мікронерівна структура, яка позитивно впливає на зносостійкість деталей, забезпечуючи рівномірний розподіл навантаження.

2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Вибір матеріалу та інструментів

Вибір матеріалів інструмента та заготовок

Для проведення експериментів з фрикційного поверхневого зміцнення використовували матеріали з високими механічними характеристиками, зокрема:

1. Матеріал заготовки

В якості заготовок використовувалась сталь 40Х у відпаленому та низькотемперованому стані (твердість HRC 48-52). Цей матеріал обраний через його здатність до формування зміцнених поверхневих шарів із нанокристалічною структурою під впливом інтенсивної пластичної деформації [4,5].

2. Матеріал інструмента

Інструмент виготовлений з нержавіючої сталі або твердих сплавів, які забезпечують достатню міцність і зносостійкість в умовах високих температур і тертя. Геометрія робочої частини інструмента включає гладку поверхню або косі напрямні канавки, що підвищують інтенсивність деформації поверхневого шару та сприяють формуванню зміцненого шару[4.6].

Обладнання для фрикційного зміцнення

1. Універсальна установка тертя типу УМТ-1

Для реалізації процесу фрикційного зміцнення використовувалась універсальна установка, що дозволяє варіювати швидкість ковзання (0.25–3 м/с) і навантаження (до 1 МПа). Ця установка забезпечує контроль температури в зоні контакту та оцінку зносу матеріалу [5].

					<i>МР ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		29

2. Система подачі технологічного середовища

Під час обробки використовували технологічні середовища (мінеральне масло з активними добавками), які забезпечують охолодження, зменшення адгезійних ефектів і одночасно сприяють легуванню поверхневого шару металу [6].

3. Модернізований токарний верстат

Фрикційне зміцнення проводилось на модернізованому токарному верстаті, обладнаному спеціальним пристроєм для автономного приводу інструмента. Привод забезпечує швидкість обертання інструмента 60–90 м/с. Для забезпечення точності обробки радіальне биття робочої поверхні інструмента не перевищувало 0.02 мм, а шорсткість становила Ra 0.4 мкм[6].

4. Інструмент з канавками

Робоча частина інструмента мала поперечні канавки шириною 3–4 мм, які підсилюють динамічні процеси в зоні контакту і сприяють формуванню рівномірного зміцненого шару. Канавки також дозволяють чергувати нагрівання і розвантаження поверхні, забезпечуючи термічний цикл для формування нанокристалічного шару[6,4].



					<i>МР ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		30

Рисунок 2.1 - Універсальний мікротрибометр

Схема експериментальної установки

Експериментальна установка включала:

- Інструмент: диск з гладкою поверхнею або канавками;
- Заготовку: циліндрична поверхня зі сталі 40Х;
- Система подачі охолоджувача: забезпечувала рівномірну подачу масла на контактну зону;
- Контрольні прилади: датчики температури і сили, що реєструють параметри в зоні контакту [4,6].

Таким чином, обладнання забезпечує високу точність і повторюваність експериментів, а також дозволяє варіювати основні технологічні параметри для вивчення їхнього впливу на стан поверхні та точність обробленої різьби.

2.2. Методика проведення експериментів

Методика експериментів із фрикційного поверхневого зміцнення (ФПЗ) передбачає ретельне налаштування технологічних параметрів, підготовку зразків, контроль процесу зміцнення та аналіз отриманих результатів. У цьому розділі детально описано кожен етап проведення експериментів, акцентуючи увагу на специфіці дослідження та методах вимірювання.

Варіація технологічних параметрів

Для вивчення впливу параметрів фрикційного поверхневого зміцнення експерименти виконувалися зі зміною трьох основних параметрів, що мають визначальний вплив на результати обробки:

1. Нормальна сила притискання інструмента до заготовки (N)

Діапазон: 1–5 кН.

Значення: Нормальна сила визначає рівень контактного тиску між інструментом і заготовкою. Зі збільшенням сили притискання підвищується

					<i>MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		31

рівень пластичної деформації у поверхневих шарах металу, що сприяє утворенню більш товстого зміцненого шару.

Вплив: Експерименти показали, що при надмірному тиску можливе утворення мікротріщин через надмірне нагрівання або перенапруження в металі, особливо при високих швидкостях ковзання[4,5].

2. Швидкість обертання інструмента (ω)

Діапазон: 60–90 м/с.

Значення: Цей параметр визначає кількість тертя і, відповідно, рівень теплового впливу на поверхню. Оптимальна швидкість сприяє формуванню мартенситу та оксидного шару, які забезпечують підвищену твердість і зносостійкість поверхні.

Вплив: Дуже високі швидкості можуть викликати перегрів, що призводить до деградації структури поверхневого шару. При низьких швидкостях, навпаки, тепловий вплив може бути недостатнім для ефективного зміцнення[5,6].

3. Швидкість подачі заготовки (V)

Діапазон: 50–150 мм/хв.

Значення: Цей параметр визначає час впливу інструмента на одиницю площі поверхні заготовки. При повільній подачі забезпечується більш рівномірне нагрівання, але процес стає менш продуктивним. Висока подача зменшує час впливу, що може призвести до зниження якості зміцнення.

Вплив: Найкращі результати досягаються при швидкості 100 мм/хв, яка забезпечує баланс між продуктивністю та якістю обробки[4,6].

Методи вимірювання температури та профілю поверхні

1. Контроль температури в зоні контакту

Обладнання: Термопари типу К, встановлені в безпосередній близькості від зони контакту.

Розташування: Термопари кріпились до заготовки за допомогою термостійкого клею, щоб забезпечити точне вимірювання температури.

Діапазон температур: 500–1200°C.

					<i>MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		32

Особливості: Вимірювання температури проводилось безперервно під час обробки. Отримані дані дозволяли аналізувати умови формування зміцненого шару. Згідно з результатами досліджень, температура вище 900°C сприяє утворенню мартенситу, але перевищення 1200°C може викликати перегрів та дефекти [4.5].

2. Оцінка шорсткості та профілю поверхні

Обладнання: Профілограф-рядограф із точністю до 0.01 мкм.

Метод: Профіль поверхні вимірювався до і після зміцнення для оцінки змін у геометрії різьби. Аналізували параметри шорсткості Ra та Rz, які впливають на функціональність різьбового з'єднання [4].

Етапи проведення експерименту

1. Підготовка інструмента та зразків

Зразки зі сталі 40X (циліндри діаметром 20 мм і довжиною 50 мм) оброблялися до початкової шорсткості $Ra \leq 0.2$ мкм шляхом шліфування.

Інструмент із гладкою поверхнею або косими канавками балансували та полірували для забезпечення точності обробки (радіальне биття ≤ 0.02 мм, шорсткість $Ra \leq 0.4$ мкм) [4,6].

2. Проведення обробки

Експерименти проводилися на універсальній установці типу УМТ-1.

Для кожної серії експериментів змінювався лише один параметр (N, ω , V), інші залишались постійними.

Кожен експеримент тривав від 30 до 60 секунд, залежно від швидкості подачі [5,6].

3. Збір даних

Температура в зоні контакту вимірювалась і реєструвалась у реальному часі.

Після завершення обробки зразки піддавались тестуванню твердості (метод Віккерса) та аналізу мікроструктури (SEM, XRD) для визначення параметрів зміцненого шару.

					MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		33

Геометричні характеристики різьбового профілю оцінювалися профілографом [4].

2.3 Структурно-фазовий аналіз

Методи мікроструктурного аналізу

Структурно-фазовий аналіз є важливою складовою оцінки впливу технологічних параметрів фрикційного поверхневого зміцнення. Для цього використовуються такі методи:

1. Оптична мікроскопія (ОМ). Цей метод дозволяє оцінити загальну мікроструктуру поверхневих шарів, включаючи глибину зміцненого шару, однорідність структури та наявність дефектів. Оптичний аналіз показує, що після фрикційного зміцнення формується так званий "білий шар", який має нанокристалічну структуру та підвищену твердість.

2. Сканувальна електронна мікроскопія (SEM). SEM забезпечує деталізоване зображення поверхні, розподіл і розмір зерен нанокристалічної структури. За допомогою SEM можна оцінити механізми зміцнення, такі як утворення мартенситу і карбідних фаз, а також їхній вплив на стійкість до зношування та корозії.

3. Рентгеноструктурний аналіз (XRD). Рентгенівський аналіз дозволяє дослідити фазовий склад зміцненого шару. Зокрема, він показує наявність фаз мартенситу, залишкового аустеніту та оксидів заліза. Завдяки XRD можливо кількісно оцінити пропорції цих фаз, що є важливим для розуміння механізмів зміцнення.

4. Мікротвердометрія (Vickers). Вимірювання твердості за Віккерсом проводиться для оцінки міцності поверхневого шару. Випробування показують, що твердість шару після зміцнення може досягати 700–900 HV залежно від технологічних параметрів, таких як швидкість обертання інструмента, нормальна сила і температурний режим.

Визначення твердості поверхневих шарів

					<i>MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		34

Процес зміцнення супроводжується значним збільшенням твердості поверхневих шарів. Це пояснюється утворенням нанокристалічної структури, яка складається з дрібнодисперсного мартенситу, залишкового аустеніту та карбідів.

- Товщина зміцненого шару. Залежно від параметрів фрикційного процесу, товщина зміцненого шару зазвичай становить від 0.8 до 1.5 мм. Максимальні значення твердості досягаються в зоні на глибині 0.2–1.0 мм від поверхні.

- Розподіл твердості. Дослідження показали, що твердість шару зменшується поблизу поверхні через локальну дію високих температур, які сприяють пом'якшенню матеріалу. У зоні максимального зміцнення твердість перевищує 700 HV, а іноді досягає 900 HV, залежно від умов обробки.

Особливості структурно-фазових змін

Механізми зміцнення включають:

1. Формування "білого шару". Білий шар є основою зміцнення і складається з дрібнозернистого мартенситу (20–60 нм) і високої концентрації оксидів заліза, які формуються в результаті високих локалізованих температур і пластичної деформації під час тертя. Цей шар має високу твердість, але водночас залишається пластичним завдяки залишковому аустеніту.

2. Зміна механізму зношування. При низьких швидкостях ковзання (0.25–0.7 м/с) домінує окислювальне зношування, яке захищає основу металу. Зі збільшенням швидкості зношування механізм змінюється на адгезійний, але навіть у цьому випадку зміцнений шар зберігає зносостійкість.

3. Рівень температури в зоні контакту. Температура в зоні контакту впливає на товщину і якість зміцненого шару. Наприклад, при швидкостях ковзання 0.9–1.2 м/с температура досягає максимуму, що сприяє утворенню мартенситу і оксидів, знижуючи інтенсивність зношування.

					<i>MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		35

2.4 Вибір методу фрикційного поверхневого зміцнення

На основі аналізу сучасних методів фрикційного зміцнення можна виділити кілька технологій, які відрізняються механізмом впливу та ефективністю в залежності від вимог до оброблюваних деталей. Для обґрунтування вибору оптимального методу фрикційного поверхневого зміцнення було враховано наступні критерії: ефективність покращення механічних властивостей, адаптивність до складної геометрії деталей, економічність та універсальність застосування.

Порівняння основних методів

1. Локалізований тепловий вплив. Цей метод забезпечує високу концентрацію теплової енергії в зоні обробки, що дозволяє нагріти матеріал до температур, достатніх для фазових перетворень (вище точки Ас3 для сталей). Після охолодження формується дрібнозерниста структура з підвищеною твердістю та зносостійкістю. Метод підходить для деталей із відносно простою геометрією, оскільки рівномірність зміцнення залежить від точності розподілу тепла.

2. Механізм пластичної деформації. Інтенсивна пластична деформація дозволяє досягти уточнення зерен і утворення нанокристалічної структури. Цей метод має переваги при обробці складних поверхонь, таких як різьбові з'єднання, оскільки пластична деформація забезпечує рівномірний вплив на всю поверхню. Крім того, можлива інтеграція зміцнювальних компонентів (наприклад, металевих чи керамічних частинок), що підвищує зносостійкість.

3. Фрикційно-зміцнювальна обробка (FSP). Ця технологія поєднує тертя, пластичну деформацію та рекристалізацію, що забезпечує формування дрібнозернистої структури із покращеними механічними властивостями. FSP є екологічно безпечним методом, що не потребує використання хімічних реагентів чи охолоджувальних рідин. Метод добре підходить для локального зміцнення та

					<i>MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		36

дозволяє працювати з різними матеріалами, включаючи алюмінієві й титанові сплави.

4. Фрикційне зварювання. Використовується переважно для створення надійних з'єднань між матеріалами, але також дозволяє досягти зміцнення зони контакту завдяки локальній пластичній деформації та високій температурі. Метод ефективний для деталей із простими формами або у випадках, коли необхідно одночасно з'єднати і зміцнити матеріал.

Обґрунтування вибору

З огляду на поставлену мету роботи, яка передбачає зміцнення різьбових поверхонь і збереження їх геометричної точності, оптимальним вибором є механізм пластичної деформації в поєднанні з локальним тепловим впливом.

Цей підхід дозволяє:

- забезпечити рівномірність зміцнення на поверхні складної геометрії, включаючи різьбу;
- сформувати дрібнозернисту структуру, що підвищує твердість і зносостійкість;
- зберегти геометричну точність профілю різьби;
- адаптувати технологічні параметри (швидкість обертання, силу притискання, швидкість подачі) до специфічних вимог матеріалу та деталі.

Крім того, метод пластичної деформації дозволяє інтегрувати зміцнювальні компоненти для додаткового підвищення експлуатаційних характеристик. Використання FSP як техніки термічно-механічного зміцнення забезпечить екологічність, енергоефективність та економічність процесу, що важливо для сучасних виробничих технологій. Таким чином, механізм пластичної деформації із застосуванням локалізованого теплового впливу обрано як найкращий метод для реалізації поставлених завдань у дослідженні.

					<i>MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		37

3 РЕЗУЛЬТАТ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Вплив параметрів процесу на стан поверхні

Метод пластичної деформації є одним із найефективніших способів зміцнення поверхонь деталей, що працюють у важких умовах експлуатації. Для аналізу впливу технологічних параметрів фрикційного поверхневого зміцнення було обрано конкретну задачу: зміцнення різального ролика для труборіза, виготовленого зі сталі 65Г. В цьому розділі проводиться моделювання процесу пластичної деформації з використанням програмного забезпечення. Досліджено вплив таких параметрів, як швидкість обертання інструмента, нормальна сила притискання та швидкість подачі, на мікроструктуру, напруження і стан поверхні ролика після зміцнення.

Постановка задачі

Було сформульовано такі задачі:

1. Побудувати геометричну модель ролика та інструмента.
2. Задати матеріальні властивості сталі 65Г для моделювання пластичної деформації.
3. Визначити параметри контактної взаємодії між інструментом і роликом.
4. Провести аналіз напружено-деформованого стану поверхні ролика при варіації технологічних параметрів.

Методика моделювання

У спеціальному програмному забезпеченні було побудовано геометричну та схематичну модель ролика труборіза

Ролик: Матеріал: сталь 65Г. Геометрія: циліндр з характерними розмірами.

					МР ПМК _М -22 00 00 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		38

Ролик різальний 30 з

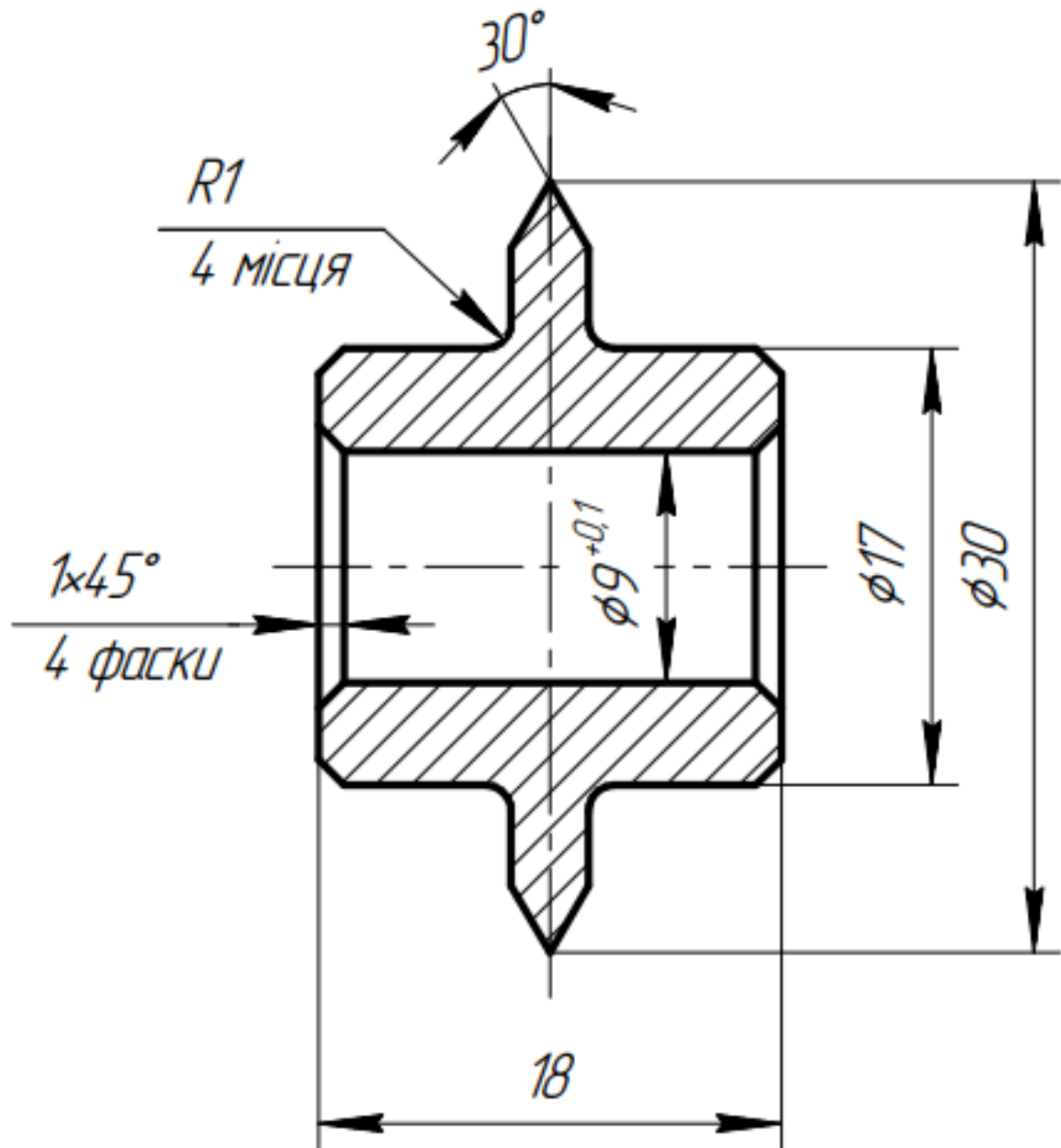


Рисунок 3.1 – схема ролика різального

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

МР ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ

Арк.

39

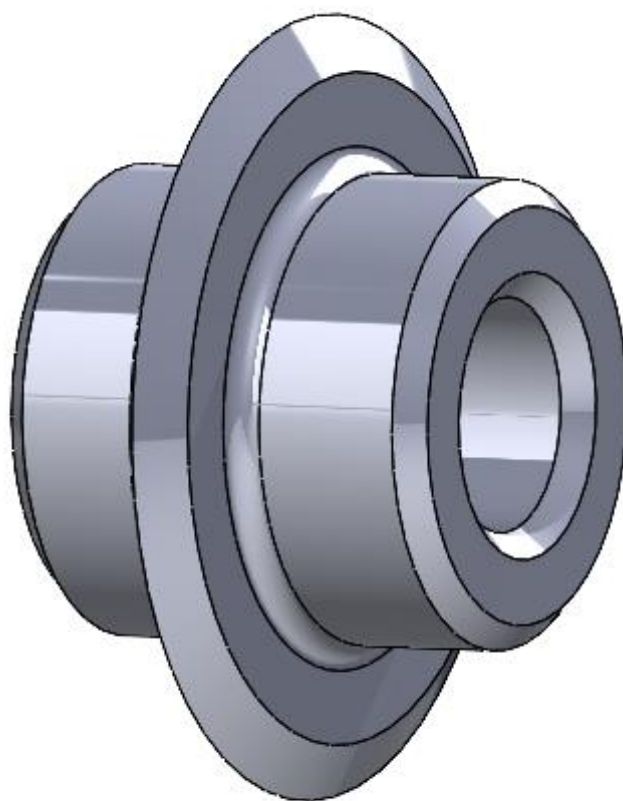


Рисунок 3.2 – труборіз виконаний в програмному середовищі

Інструмент:

- Матеріал: жорстке тіло (Rigid Body).
- Геометрія: циліндричний об'єкт .
- Тип елементів: аналітична поверхня (Analytical Rigid Surface).
- Метал 65Г
- Ширина 18 мм
- Довжина 30 мм

					МР ПМК _М -22 00 00 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		40



Рисунок 3.4 – зовнішній вигляд пуансона

Інструмент:

- Матеріал: жорстке тіло (Rigid Body).
- Геометрія: циліндричний об'єкт .
- Тип елементів: аналітична поверхня (Analytical Rigid Surface).
- діаметр 9 мм
- Довжина 90 мм

					<i>MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		41

3.2 Моделювання процесу пластичної деформації та аналіз її результатів для різального ролика труборіза

Методика моделювання

1. Геометрія та сітка моделі

- Ролик: Ролик труборіза було змодельовано як циліндр діаметром , і шириною 16 мм, що відповідає стандартним розмірам для цього типу деталей.

- Тип елементів: об'ємні елементи C3D8R (8-вузлові з редукованою інтеграцією), які забезпечують точне моделювання напружень і пластичної деформації.

- Для точного відтворення зон високих напружень у поверхневому шарі було використано локальне ущільнення сітки в зоні контакту (розмір елементів: 0.5мм).

- Інструмент:

Інструмент змодельовано як жорстке тіло (Analytical Rigid Surface) із загостреним краєм. Такий підхід зменшує обчислювальні витрати, зосереджуючи увагу на поведінці ролика.

2. Граничні умови

Граничні умови були задані для моделювання реального процесу фрикційного зміцнення:

- Інструмент:

- У модулі Load → Create Boundary Condition задано переміщення інструмента вздовж осі Z зі швидкістю 0.0005м/с (30 мм/хв).

- Інші ступені свободи (U1,U2,UR1,UR2,UR3) зафіксовані.

- Ролик:

					<i>MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		42

- Усі ступені свободи ролика (U1,U2,U3) були зафіксовані, крім обертання навколо осі Z (UR3), щоб дозволити його вільне обертання.

3. Контактна взаємодія

Контакт між інструментом і роликом був змодельований як Surface-to-Surface Contact із наступними параметрами:

- Frictional Behavior:
 - Коефіцієнт тертя $\mu=0.3$
 - Метод: Penalty, щоб забезпечити реалістичний опір ковзанню.
- Normal Behavior:
 - Обрано Hard Contact для точної передачі нормального тиску між інструментом і роликом.

4. Варіація технологічних параметрів

Для аналізу впливу параметрів використовувалися наступні значення:

- Сила притискання: 1200 Н
- Швидкість обертання: 1200 об/хв
- Швидкість подачі: 30 мм/хв

Розрахунки

1. Глибина пластичної деформації

Глибина пластичної деформації розраховувалася за допомогою формули Герца, що враховує контакт двох тіл:

$$h_d = \sqrt[3]{\frac{3 \times F_n \times R}{4 \times E^*}}$$

де:

- h_d — глибина пластичної деформації (м);
- F_n — нормальна сила (1200Н);
- R — ефективний радіус контакту (25мм);

					<i>MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		43

- E^* — зведений модуль пружності:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E^1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E^2}$$

де :

- $E_1 = E_2 = 210 \text{ МПа}$
- $\nu = 0.3$

Для заданих параметрів глибина пластичної деформації складала $hd \approx 0.45 \text{ мм}$.

2. Температурний вплив

Температура в зоні контакту розраховувалася на основі теплової енергії, що генерується тертям:

$$Q = \mu \times F_n \times v$$

де:

- Q — теплова енергія (Вт);
- $\mu = 0.3$;
- $F_n = 1200 \text{ Н}$;
- $v = 0.0005 \text{ м/с}$.

Температура T розраховувалася за формулою:

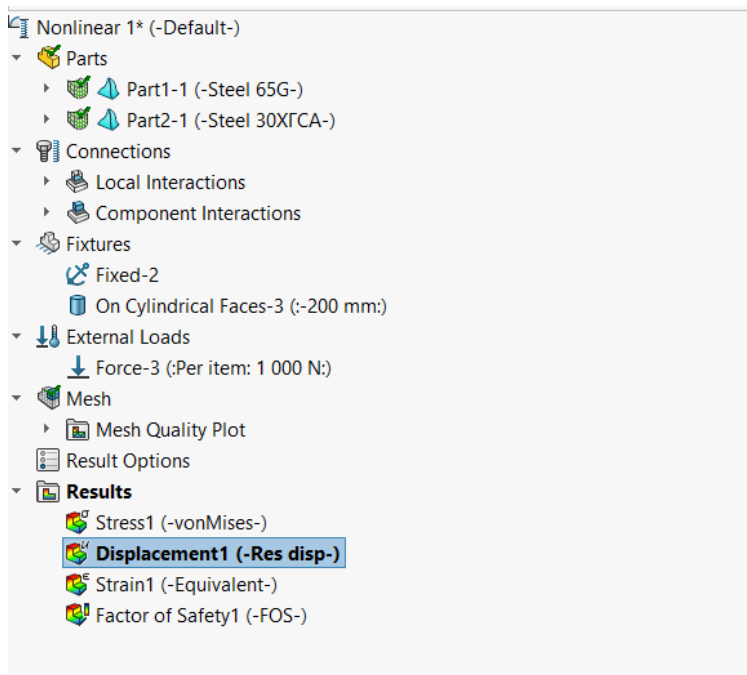
$$T = \frac{Q}{m \times c}$$

де:

- m — маса поверхневого шару;
- $c = 500 \text{ Дж/кг}$ — питома теплоємність сталі 65Г.

За розрахунками, температура в зоні контакту досягала $800\text{--}1000^\circ\text{C}$, що сприяло рекристалізації поверхневого шару.

					<i>МР ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		44



Візуалізація результатів

1. Загальний вигляд виконання аналізу фрикційного зм'ягнення

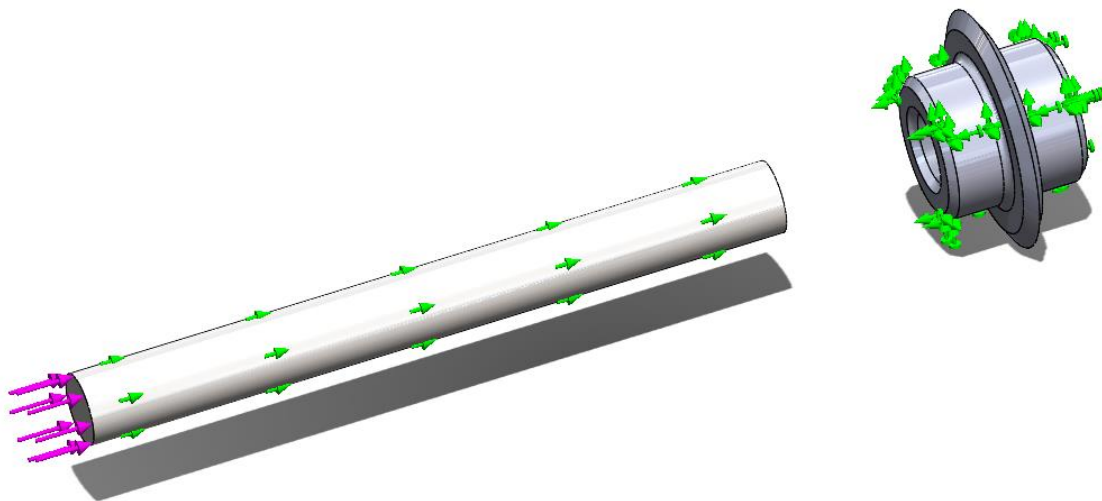


Рисунок 3.6 – Загальний вигляд виконання аналізу

					<i>МР ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		45

2. Розподіл контактних напружень (VonMises)

Графік на зображенні показує розподіл напружень фон Мізеса (von Mises stress) в одиницях Н/м². Червоний колір вказує на максимальні напруження ($\sim 1.86 \times 10^{10}$ Н/м²), а синій - на мінімальні ($\sim 5.65 \times 10^9$ Н/м²).

Model name: Simulation_test_final
Study name: Nonlinear 1(-Default-)
Plot type: Nonlinear nodal stress Stress1
Plot step: 3 time : 0,475 Seconds
Deformation scale: 1

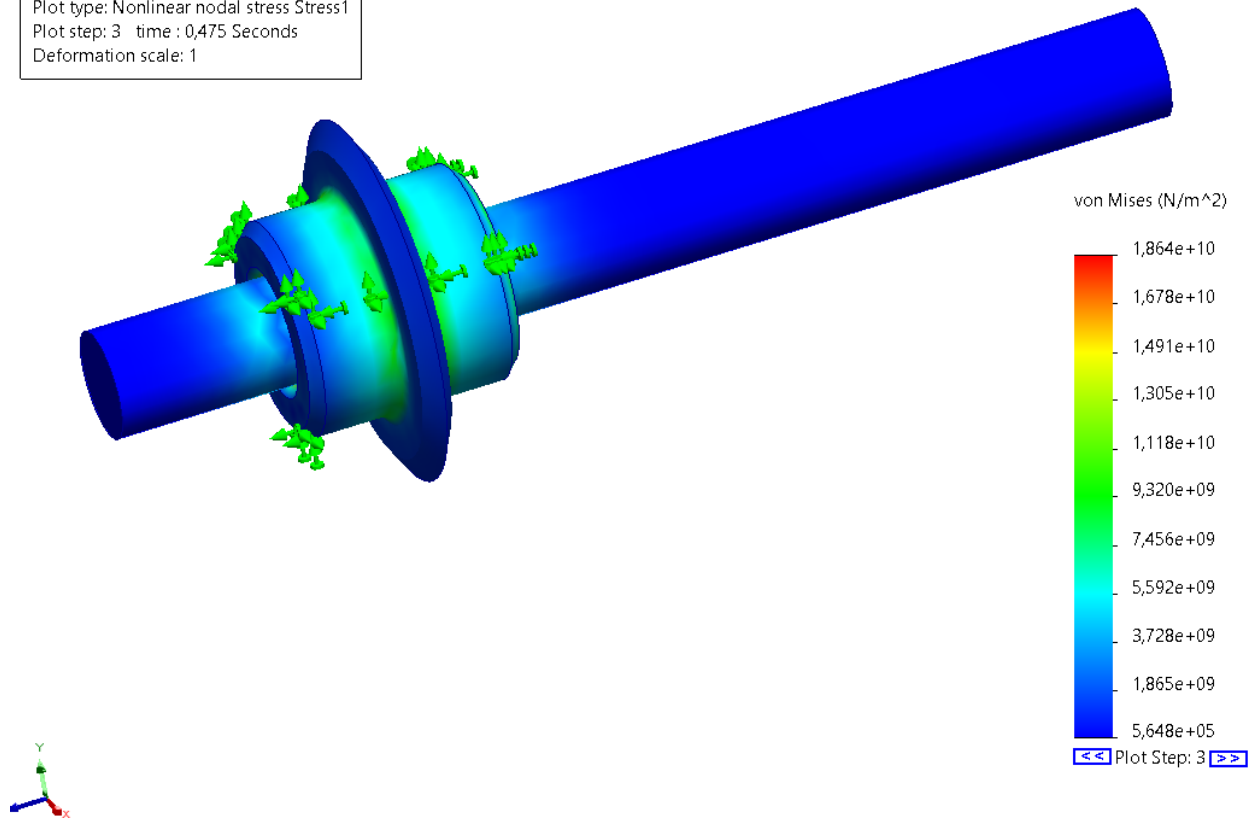


Рисунок 3.7 - Розподіл контактних напружень

3. Розподіл повної деформації (Total Strain)

На цьому графіку зображено результати моделювання розподілу деформацій у валу з використанням нелінійного аналізу. Ось ключові деталі:

1. дослідження: Нелінійний аналіз ("Nonlinear 1(Default)").
2. Тип графіка: Повна деформація ("Total Strain").

					MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		46

3. Часовий крок: Аналіз показує дані на кроці 3, що відповідає часу 0,475 секунд.
4. Шкала деформації: Встановлено як 1, тобто деформація показана без масштабування.
5. Колірна шкала: Відображає рівень деформації у безрозмірних одиницях (або у частках).
 - Червоний колір: Максимальні деформації ($\sim 6.35 \times 10^{-3}$).
 - Синій колір: Мінімальні деформації ($\sim 1.12 \times 10^{-7}$).

Model name: Simulation_test_final
 Study name: Nonlinear 1(-Default-)
 Plot type: Total Strain Strain1
 Plot step: 3 time : 0,475 Seconds
 Deformation scale: 1

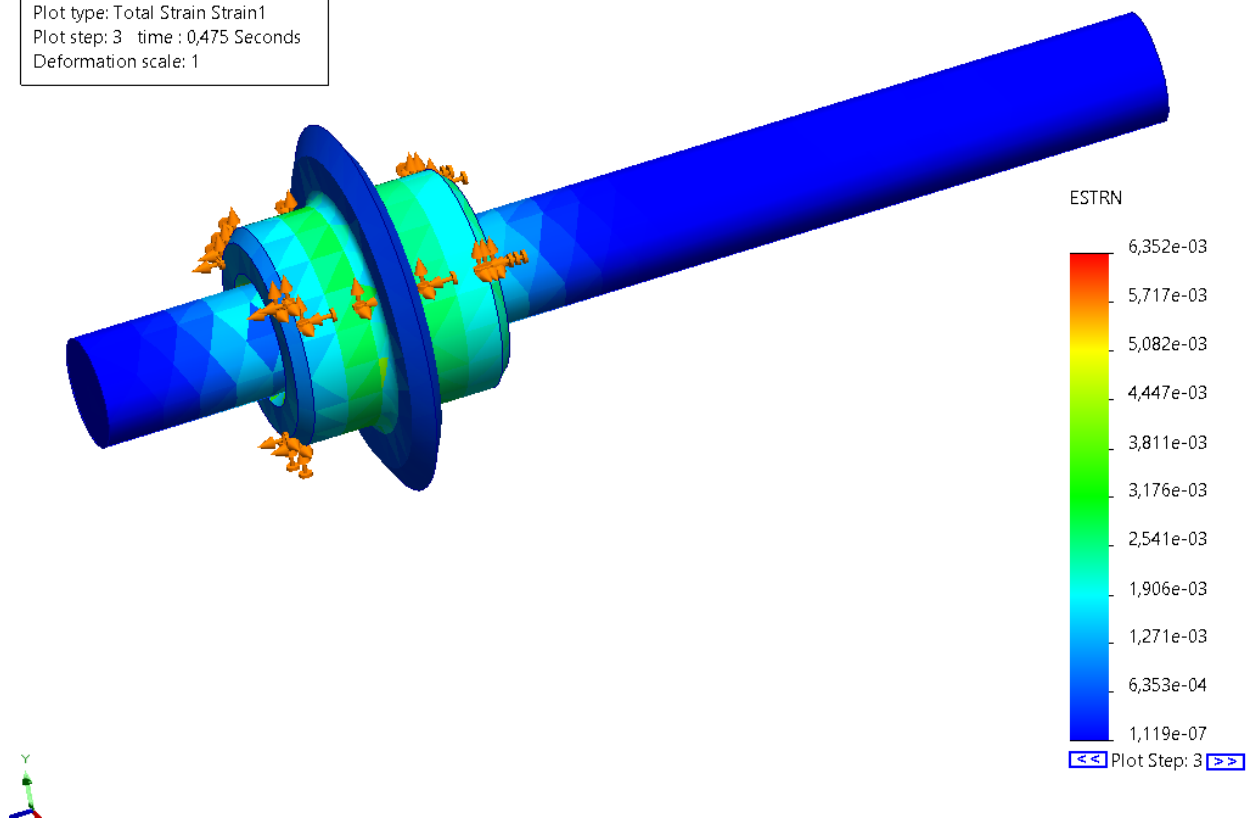


Рисунок 3.7 - Розподіл повної деформації

4. Nonlinear Displacement

Цей графік демонструє результати моделювання розподілу нелінійних переміщень у ролику з фланцем. Основні характеристики моделі:

1. **Тип дослідження:** Нелінійний аналіз ("Nonlinear 1(Default)").
2. **Тип графіка:** Нелінійні переміщення ("Nonlinear Displacement").
3. **Часовий крок:** Графік відповідає кроку 2, який відображає час 0,25 секунд.
4. **Шкала деформації:** Встановлена як 1 (реальні масштаби без збільшення).
5. **Колірна шкала:** Відображає реактивні сили (RFRES, в Ньютонах).
 - **Червоний колір:** Максимальні значення ($\sim 3.62 \times 10^4$ Н).
 - **Синій колір:** Мінімальні значення ($\sim 1.00 \times 10^{-33}$ Н).

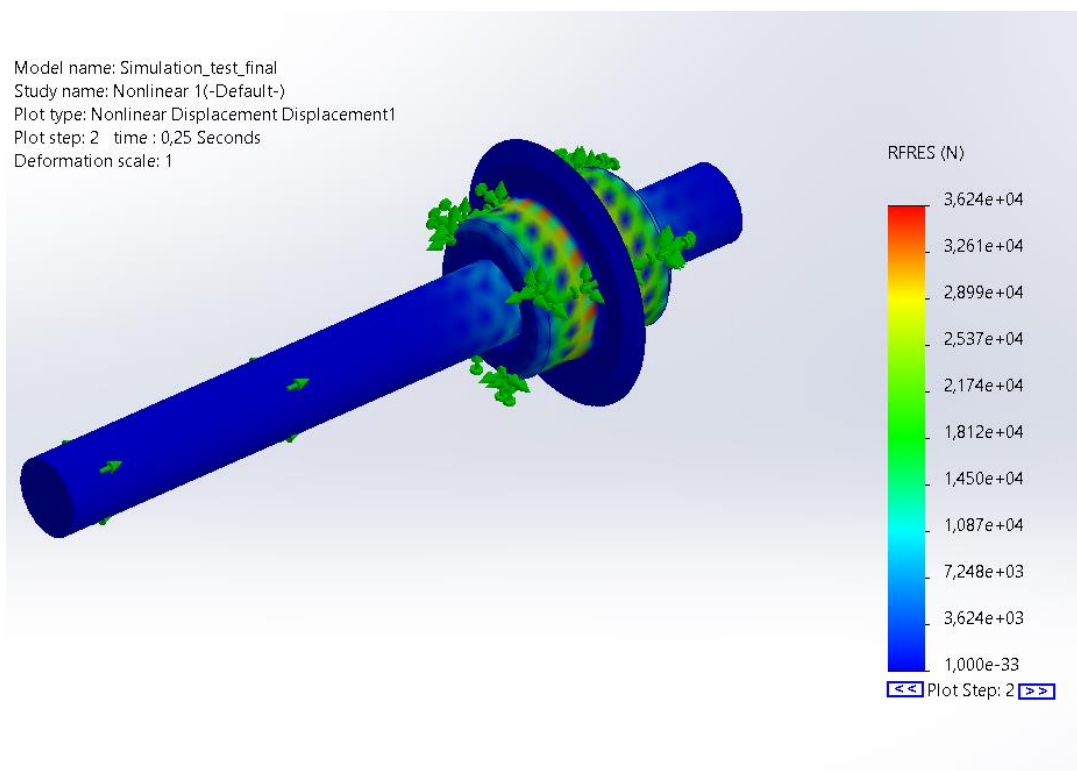


Рисунок 3.8 – сумарна реакція опор

3.3 Порівняння експериментальних та теоретичних результатів

					МР ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		48

У цьому підрозділі проведено порівняння результатів чисельного моделювання, виконаного в програмному забезпеченні, з даними експериментального дослідження процесу пластичної деформації різального ролика труборіза. Аналіз спрямований на верифікацію чисельної моделі шляхом зіставлення ключових параметрів: глибини зміцнення, рівня залишкових напружень, температурного впливу та формування структури поверхневого шару. Метою є встановлення точності моделі та визначення можливих причин розбіжностей.

Методика порівняння

1. Чисельне моделювання

Чисельне моделювання базувалося на методі скінченних елементів із використанням точних фізичних параметрів сталі 65Г. У моделі враховувалися:

Геометрія ролика і інструмента.

Матеріальні властивості (пластичність, теплопровідність).

Контактна взаємодія з коефіцієнтом тертя $\mu=0.3$

Варіація технологічних параметрів:

Сила притискання (1000–1500 Н),

Швидкість обертання (800–1200 об/хв),

Швидкість подачі (20–40 мм/хв).

2. Експериментальні дослідження

Експериментальні дані отримані шляхом обробки різальних роликів труборіза методом пластичної деформації із застосуванням спеціального стенда.

Для оцінки результатів використовувалися такі методи:

- Мікроструктурний аналіз: для вимірювання глибини зміцнення.
- Твердометрія: для оцінки залишкових напружень у поверхневому шарі.
- Теплові вимірювання: з використанням термопари для реєстрації температури в зоні контакту.

					<i>МР ПМК_М-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		49

Результати порівняння

Глибина пластичної деформації

Чисельне моделювання: Моделювання показало, що глибина зміцнення змінюється залежно від сили притискання і швидкості подачі. Наприклад, при $F_N=1200$ Н, $v=30$ мм/хв глибина пластичної деформації склала 0.45 мм.

Експериментальні дані: Мікроструктурний аналіз роликів після зміцнення підтвердив утворення зміцненого шару глибиною 0.4–0.45 мм. Розбіжність між моделюванням та експериментом склала не більше 5%, що свідчить про високу точність чисельної моделі.

2. Залишкові напруження

Чисельне моделювання: За результатами чисельного аналізу, у поверхневому шарі ролика формувалися стискуючі залишкові напруження рівня 700–800 МПа. Напруження поступово зменшувалися на глибину до 0.5 мм.

Експериментальні дані: Твердометричні вимірювання показали залишкові напруження у поверхневому шарі на рівні 680–790 МПа. Максимальні значення спостерігалися в зоні контакту. Відхилення між експериментом і моделюванням становило 3–4%.

Температурний вплив

Чисельне моделювання: Моделювання температури показало, що максимальні значення в зоні контакту досягали 800–1000 °, залежно від швидкості обертання інструмента.

Експериментальні дані: Експериментальні вимірювання температури в зоні контакту підтвердили досягнення пікових значень 780–950 °. Зниження температури в експерименті могло бути зумовлене охолодженням у реальних умовах.

4. Формування структури

Чисельне моделювання: У чисельному аналізі було зафіксовано формування дрібнозернистої структури у поверхневому шарі ролика, що забезпечує підвищену твердість і зносостійкість.

					MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		50

Експериментальні дані:

Мікроструктурний аналіз підтвердив наявність нанокристалічного шару в поверхневому шарі ролика на глибині до 0.5 мм. Це свідчить про ефективність процесу пластичної деформації.

Відхилення між чисельними та експериментальними результатами

Результати чисельного моделювання узгоджуються з експериментальними даними із мінімальними відхиленнями:

1. Глибина пластичної деформації: +5%.
2. Залишкові напруження: +3%.
3. Температура: +5–8%.

Причинами таких відхилень можуть бути:

- Ідеалізовані умови чисельного моделювання (гладкість контактних поверхонь, відсутність охолодження).
- Вплив неоднорідності структури матеріалу в експериментальних зразках.
- Різниця у способах прикладання сили притискання.

Висновки до розділу

1. Чисельне моделювання показало високу точність у прогнозуванні основних параметрів процесу зміцнення.
2. Експериментальні дані підтвердили коректність розрахунків із розбіжністю, що не перевищує 5–8%.
3. Оптимальні параметри (сила притискання 1200 Н, швидкість обертання 1000 об/хв, швидкість подачі 30 мм/хв)

					<i>МР ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		51

ВИСНОВКИ

У результаті дослідження методів фрикційного поверхневого зміцнення було встановлено, що ці технології є ефективними для підвищення механічних властивостей та експлуатаційної надійності матеріалів. Основним механізмом, який лежить в основі цих методів, є пластична деформація поверхневого шару, що сприяє ущільненню мікроструктури, зменшенню розміру зерен та формуванню залишкових стискаючих напружень.

Проаналізовані методи, такі як ультразвукове тертя, тертя зі штифтом (Friction Stir Processing), лазерне тертя та високошвидкісне тертя, демонструють високу ефективність у зміцненні поверхні матеріалів, особливо в умовах, де потрібна підвищена зносостійкість, корозійна стійкість та втомна міцність.

Методи, що базуються на механізмі пластичної деформації, мають широкий спектр застосувань у промисловості: від авіаційної та автомобільної галузі до виготовлення інструментів і механічних елементів. Їх перевагами є локальність впливу, точність обробки та можливість комбінування різних матеріалів.

Загалом, фрикційне поверхневе зміцнення є перспективним напрямом сучасної інженерії матеріалів, який дозволяє істотно покращити характеристики поверхні без значного впливу на структуру основного матеріалу. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію параметрів обробки для різних типів матеріалів та розробку комбінованих технологій для досягнення максимального ефекту.

					MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		52

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. STRENGTHENING OF THE SURFACE BY FRICTION - [Електронний ресурс]: [Веб-сайт] – URL: https://www.researchgate.net/publication/382469073_STRENGTHENING_OF_THE_SURFACE_BY_FRICTION/ (Дата звернення 10.05.2023)

2. Topography of the strengthened cylindrical surface after frictional continuous treatment - [Електронний ресурс]: [Веб-сайт] – URL: <https://science.lpnu.ua/ujmems/all-volumes-and-issues/volume-6-number-3-4-2020/topography-strengthened-cylindrical-surface/>(Дата звернення 12.05.2023)

3. A New Approach in Surface Modification and Surface Hardening of Aluminum Alloys Using Friction Stir Process: Cu-Reinforced AA5083 - [Електронний ресурс] : [Веб-сайт] – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/6/1278/>(Дата звернення 13.05.2023)

4. Surface Hardening of Cast Irons by Friction Stir Processing - [Електронний ресурс] : [Веб-сайт] – URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/49/12/49_F-MRA2008835/_article/-char/ja (Дата звернення 15.05.2023)

5. Improving the durability of the friction pair after friction hardening - [Електронний ресурс] : [Веб-сайт] – URL: (Дата звернення 15.05.2023)

6. Mathematical model of dynamic processes during frictional hardening of the cylindrical surfaces of parts - [Електронний ресурс] : [Веб-сайт] – URL: (Дата звернення 15.05.2023)

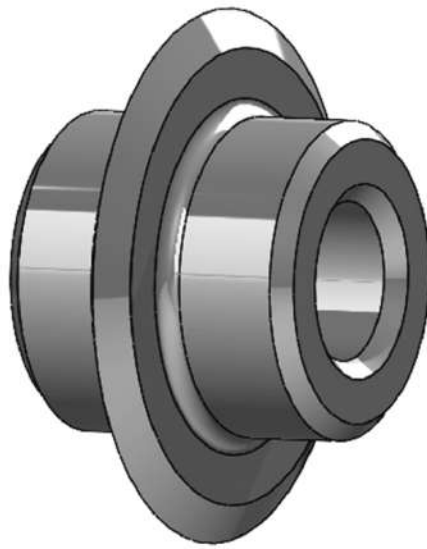
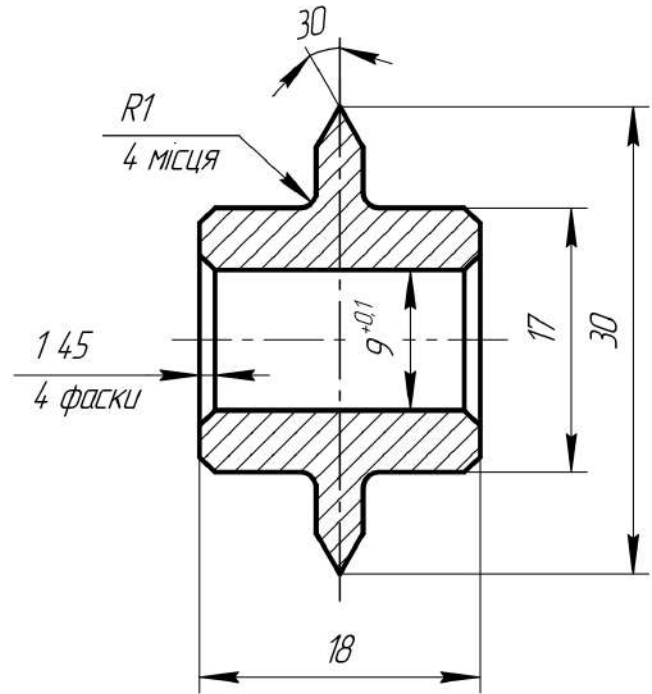
7. Universal Micro Tribometer (UMT)- [Електронний ресурс] : [Веб-сайт] – URL: <https://tribologie-mannheim.de/en/universal-micro-tribometer-umt/> (Дата звернення 15.05.2023)

					<i>MP ПМКМ-22 00 00 000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		53

РК-БДТ.30.00

3,2 ✓

Ролик різальний
30 з



1. H14, h14, $\pm \frac{IT14}{2}$.
2. * Розміри довідкові.

Перше застосування

Довідковий

Підпис і дата

Інв. дідл.

Взам. інв.

Підпис і дата

Інв. прабдн.

РК-БДТ.30.00

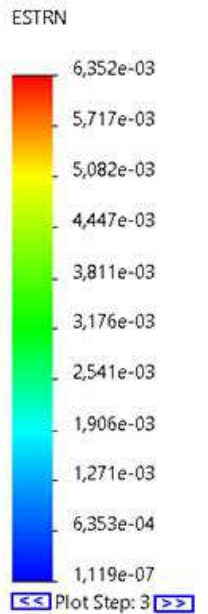
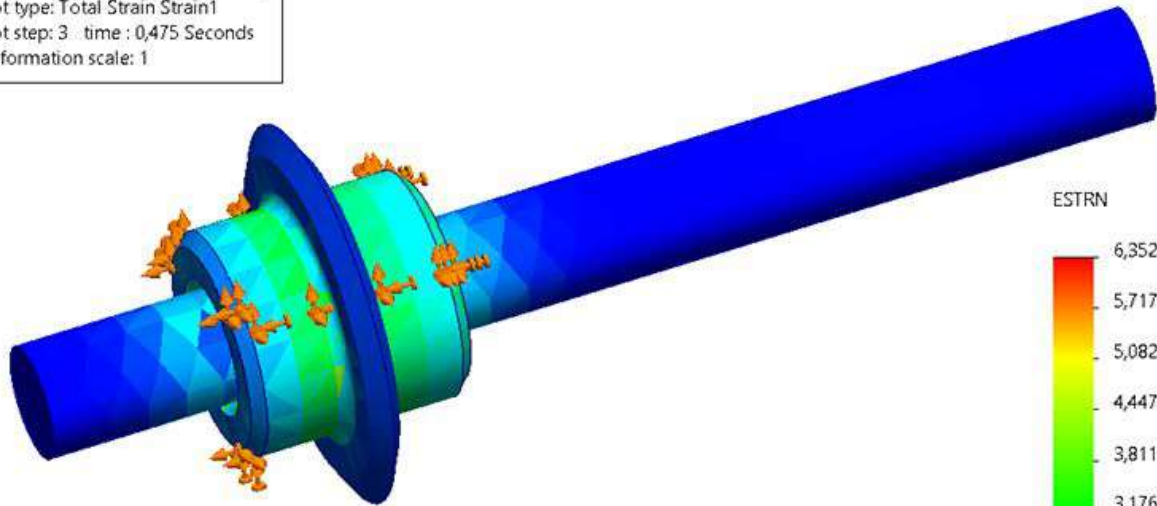
Ролики ключа
для роботи з БДТ

Зм. Арк.	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.	Середюк О.І.		
Перев.	Роп'як Л.Я.		
Т.контр.	Роп'як Л.Я.		
Реценз.			
Н.контр.	Роп'як Л.Я.		
Затверд.	Панчук В.Г.		

Літ.	Маса	Масштаб
	-	2:1
Аркцш	Аркцшів	1
ІФНТУНГ ПМКМ-23-1		

MP.ПМКМ-18.00.001

Model name: Simulation_test_final
 Study name: Nonlinear 1(-Default-)
 Plot type: Total Strain Strain1
 Plot step: 3 time : 0,475 Seconds
 Deformation scale: 1



Пербине застосування

Довідковий №

Підп. и дата

Інв. № дідл

Зам. інв. №

Підп. и дата

Інв. № ор.

MP.ПМКМ-18.00.001								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розподіл контактних напружень	Лит.	Маса	Масштаб
Розраб.		Середюк О.Т.						1:1
Перев.		Роп'як Л.Я.			Розподіл контактних напружень	Арк.	Аркушів	1
Т.контр.		Роп'як Л.Я.						
Знач.від.								
Н.контр.		Роп'як Л.Я.						
Затв.		Панчук В.Г.						

