

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему:

“Підвищення експлуатаційної стійкості деталей зміцненням робочого шару”

Виконав: студент VI курсу, групи Маш-62

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

Андрій БАС
(Ім'я та прізвище)

Керівник: д.т.н., проф. Віталій ВЛАСОВЕЦЬ
(Ім'я та прізвище)

Дубляни 2024

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри _____
(підпис)

д.т.н., професор Власовець В.М.
“28” квітня 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту
Басс Андрій Сергійович

1. Тема роботи: **«Підвищення експлуатаційної стійкості деталей зміцненням робочого шару»**

Керівник роботи: Власовець Віталій Михайлович, д.т.н., проф.

Затверджена наказом по університету від 28.04.2023 року № 133/к-с

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 15.01.2024 року

3. Вихідні дані: Літературні джерела за тематикою кваліфікаційної роботи відомих технологічних процесів виробництва та розрахунків технологічного обладнання; Матеріали навчальної, методичної довідкової та наукової літератури; Методики визначення економічної ефективності впровадження нового технологічного рішення.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

1. Огляд інформаційних матеріалів та завдання дослідження;

2. Методологія, матеріал та методи досліджень;

3. Основний розділ досліджень;

Висновки;

Список використаних джерел.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

Ілюстративний матеріал представити у вигляді презентації у застосунку Microsoft PowerPoint: результати досліджень нестационарної задачі пластичності; загальний вигляд кривої розтягу; вигляд кривої, отриманий моделюванням; розподіл деформацій по поверхні зразка; розподіл напружень по поверхні зразка.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
	Власовець В.В.. д.т.н., проф. кафедри машинобудування			

7. Дата видачі завдання: 28.04.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1.	<i>Виконання розділу: «Огляд інформаційних матеріалів та завдання дослідження»</i>	<i>28.04.23- 15.06.23</i>	
2.	<i>Виконання другого розділу: «Методологія, матеріал та методи досліджень»</i>	<i>16.06.23- 15.08.23</i>	
3.	<i>Виконання розділу: «Основний розділ досліджень»</i>	<i>16.08.23- 08.11.23</i>	
4.	<i>Виконання підрозділу: «Розробка оціночних критеріїв для забезпечення необхідного рівня властивостей після термічної обробки»</i>	<i>09.11.23- 11.12.23</i>	
5.	<i>Завершення оформлення пояснювальної записки. Завершення роботи в цілому</i>	<i>4.01.24- 15.01.24</i>	

Студент _____
(підпис)

Андрій БАС

Керівник роботи _____ Віталій ВЛАСОВЕЦЬ
(підпис)

УДК 621.43

Підвищення експлуатаційної стійкості деталей зміцненням робочого шару
Бас А.С Кваліфікаційна робота. – Дубляни, Львівський національний університет природокористування, 2024р.

52 с. текст. част., 12 рис., 4 табл., 20 джерел інформації.

Метою роботи є Підвищення експлуатаційної стійкості деталей зміцненням робочого шару. Розроблено критерії неруйнівного контролю матеріалу.

Відповідно до поставленої мети в роботі вирішені наступні задачі.

- Виконано аналіз інформаційних джерел;
- Обґрунтована методика та зразки для досліджень;
- Оцінено причини пошкодження;
- Оцінено вплив на якість деталі комплексу технологічних факторів.

ЗМІСТ

	Стор
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	8
1.1 Види і способи наплавлення колінчастих валів	8
1.2 Технологія наплавлення	8
1.3 Наплавлення різних видів металу	25
1.4 Висновки та задачі дослідження	32
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ, МАТЕРІАЛ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	33
2.1 Методологія досліджень	33
2.2 Матеріал досліджень	35
2.3 Обґрунтування прийнятих методів і типів зразків для оцінки і ідентифікації фазового складу покриття і перехідної зони	37
2.4 Магнітний контроль властивостей	42
2.5 Вплив товщини вимірюваного матеріалу на показники магнітного контролю	44
2.6 Вплив внутрішнього дефекту деталі на коерцитивну силу	46
РОЗДІЛ 3. ОСНОВНИЙ РОЗДІЛ	49
3.1 Оцінка впливу вібраційної обробки на зміцнення поверхневого шару деталей	49
3.2 Встановлення характеру розподілу напружень та деформацій при пластичному деформуванні матеріалу	58
ВИСНОВКИ	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	69

ВСТУП

Технологічний процес нанесення шару металу на поверхню деталі або виробу зварюванням плавленням називається наплавленням. Метал, що наноситься наплавленням на поверхню деталі, називається наплавленим, метал деталі або виробу - основним. Наплавлення застосовується як при ремонті зношених деталей (ремонтне, відновне), так і при виготовленні нових (виготовче).

Ремонтне наплавлення може бути відновлювальним або зносостійким, виготовче наплавлення - завжди зносостійке.

Наплавлення називається відновним, якщо виконується з метою відновлення розмірів зношеної деталі до номінальних. При цьому хімічний склад і інші характеристики наплавленого металу не відрізняються (або незначно відрізняються) від основного.

Значення відновного наплавлення полягає у тому, що відновлена деталь частіше дешевша нової при еквівалентності службових властивостей. Якщо за допомогою наплавлення розв'язується задача забезпечення особливих властивостей поверхні: високої зносостійкості, корозійної, ерозійної, навігаційної стійкості, жаростійкості і т.д. - таке наплавлення називається зносостійким.

При зносостійкому напавленні наплавлений метал відрізняється від основного по хімічному складу, механічним і фізичним властивостям. Умови служби деталей визначають вибір матеріалів, наплавлення яких забезпечує отримання біметалічних виробів, таких як: валки прокатних станів, конуса і чаші завантажувальних пристроїв доменних печей, клапани двигунів внутрішнього згорання, деталі арматури, ріжучий і буровий інструмент, деталі в гірському і транспортному машинобудуванні і ін.

Як правило, маса високолегованого наплавленого металу не перевищує 10-15% маси деталі, що в поєднанні з його спеціальними властивостями забезпечує ефективність і економічну доцільність застосування наплавлення.

У більшості промислово розвинених країн працюють спеціалізовані підприємства як по виготовленню наплавлювальних матеріалів і устаткування, так і по виробництву наплавлювальних робіт при ремонті і виготовленні автомобілів,

тракторів, будівельних машин, металургійного і гірського устаткування. Широко відомі фірми Кастоллін, Плазмодайн, Перма, УТЛІЙ, ЕСАБ і ін., важливою частиною продукції яких, є матеріали для наплавлення, устаткування і технологічні процеси.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Види і способи наплавлення колінчастих валів

В даний час запропонована і розроблена велика кількість способів наплавлення колінчастих валів. Серед чисельних способів наплавлення завжди можна знайти аналоги відповідним зварювальним процесам, табл.1.1.

Слід зазначити, що, як і будь-яка класифікація, запропонований розподіл в якійсь мірі умовний. У основу класифікації встановлене утворення зварного з'єднання (зв'язки металевого характеру) між наплавленим і основним металом, що і відрізняє наплавлення від так званих суміжних процесів; детонаційних, гальванічних, дифузійних, металізаційних та інших покриттів.

Як по номенклатурі деталей, що наплавляються, так і по масі наплавленого металу провідна роль належить дуговому наплавленню. Більше 70% від загальної маси наплавленого металу наплавляється дуговими способами.

Форсування режимів експлуатації існуючого устаткування, розробка новітніх технологічних процесів, заснованих на використанні прогресивних конструкцій і матеріалів, посилюють вимоги, як до наплавленого металу, так і способам його нанесення. Останніми роками знаходять все більше застосування процеси плазмового, електрошлакового, індукційного, контактного і дифузійного наплавлення.

1.2. Технологія наплавлення

Основні параметри, представлених в табл.1 способів наплавлення, аналогічні відповідним способам зварювання, тому нижче будуть розглянуті окремі, характерні для наплавлення особливості процесів.

Таблиця 1.1

Класифікація видів і способів наплавлення колінчастих валів

Вид наплавлення	Спосіб наплавлення
Дугове	Ручне: а) неплавким електродом; б) покритими електродами; Автоматичне і напівавтоматичне: а) під флюсом; б) самозахисним дротом і стрічкою; в) плавким електродом в захисному газі або суміші газів; г) неплавким електродом; д) лежачим електродом;
Плазмове	Плазмово-порошкове: з фіксованою присадкою; з рухомою присадкою; з частковим плавленням (армування); мікроплазмове
Електрошлакове	Із застосуванням кристалізаторів Стрічками Стикошлакове
Газове	З присадкою прутків, дроту або стрічок Газопорошкове
Індукційне	З твердим присадним матеріалом З рідким присадним матеріалом З частковим плавленням (армування);
Плакування	Вибухом Куванням і площенням Контактне наварювання (наплавлення) Дифузійне у вакуумі
Інші процеси	Електроіскрове зміцнення Пічне наплавлення (просочення тугоплавких зерен сплавом-зв'язкою) Металізація з подальшим оплавленням Магнітно-порошкове зміцнення

Ручне дугове наплавлення неплавким електродом виконується на повітрі вугільними або графітними електродами на постійному або змінному струмі. На ту, що наплавляється, переважно плоску, поверхню насипають наплавловальну су-

міш або наносять шар пасти, які потім розплавляють теплом дуги. Товщина наплавленого металу складає звичайно 1-2 мм. У ряді випадків замість цього процесу застосовують наплавлення неплавким вольфрамовим електродом в аргоні.

На відміну від наплавлення вугільним електродом застосування вольфрамового електроду забезпечує вищу якість наплавленого металу, робить процес маневренішим і прецизійним.

При наплавленні покритими електродами застосовують як зварювальні, так і спеціальні наплавлювальні електроди (електроду з легованим сердечником або з легуючим покриттям). Процес застосовують, як правило, для відновлення і зміцнення зношених деталей складної геометричної конфігурації (штампи, пресформи, інструмент), коли об'єм наплавленого металу невеликий [1].

Автоматичне наплавлення під флюсом - найпоширеніший і найбільш вивчений процес

Наплавлення під флюсом вельми ефективний процес виготовлення біметалічних деталей і добре випробуваний спосіб відновлення зношених. Найбільше поширення він набув при відновленні коштовних деталей з великими робочими поверхнями; де вимагається наплавити з високою продуктивністю велику кількість металу високої якості.

Забезпечення високої продуктивності при одноелектродному наплавленні за рахунок підвищення зварювального струму недоцільне. Із збільшенням струму, різко зростає тиск потоку металевої пари і дії електродинамічних сил на поверхню ванни (тиск пропорційний квадрату зварювального струму) збільшується глибина проплавлення і, отже, частка основного металу в наплавленому. Небажаною особливістю одноелектродного наплавлення на підвищених режимах є збільшена довжина зварювальної ванни, великий об'єм розплавлених металу і шлаку, що може приводити до таких дефектів, як несплави, погане формування, набрякання металу і шлаку при наплавленні тіл обертання [2].

Усунення перерахованих дефектів можливе шляхом як застосування певних технічних прийомів, так і різновидів самого процесу. Прикладом прийому, що дозволяє зрівноважити тиск дуги є зсув електроду із zenіту при наплавленні тіл обе-

ртання. При цьому тиск дуги врівноважується зміною рівня рідкого металу у області поверхні нормальної осі електроду.

До різновидів дугового наплавлення під флюсом відносяться: наплавлення стрічкою, наплавлення з поперечними коливаннями електроду, багатоелектродне і багатодугове наплавлення (рис.1.1). Відповідно до теорії розповсюдження тепла чим більше ширина стрічки, тим менше глибина проплавлення, тим ширша і коротше ванна розплавленого металу.

Застосування наплавлення з поперечними коливаннями електроду також сприяє отриманню меншої частки основного металу в наплавленому, збільшенню ширини і зменшенню довжини ванни. Багатоелектродне наплавлення здійснюється декількома електродами, розташованими в лінію перпендикулярно напрямку руху. Електроди підключаються до одного полюса джерела струму. В процесі наплавлення дуга, переміщаючись з одного електроду на іншій з великою швидкістю, утворює загальну ванну. Багатоелектродне наплавлення дає результати, близькі з тими, які виходять при наплавленні стрічкою або однодуговим наплавленням з поперечними коливаннями. У всіх цих прикладах збільшення продуктивності досягається за рахунок переміщення дуги по поверхні ванни, що дозволяє проводити наплавлення на великих струмах при оптимальній частці основного металу в наплавленому.

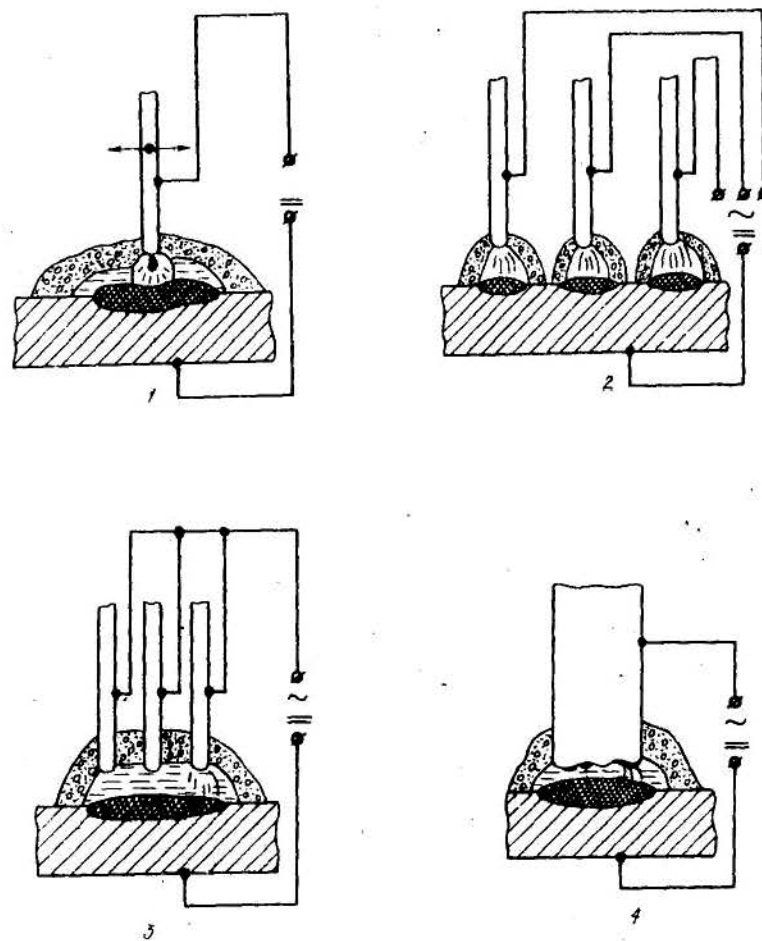


Рис. 1.1. Варіанти наплавлення шийок колінчастих валів під шаром флюсу (зліва направо):

1-електродною стрічкою; 2-електродне; 3-дугове; 4-з поперечними коливаннями (широкошарове)

Багатодугове наплавлення передбачає застосування одночасно декількох наплавлювальних апаратів або одного апарату з декількома, ізольованими один від одного, подаючими пристроями. Кожен електрод має живлення від окремого джерела, наплавлення ведеться без утворення загальної ванни, кожна дуга формує свій вал на стандартному режимі. Збільшення продуктивності в цьому випадку пов'язане з обслуговуванням декількох дуг одним оператором.

Наплавленням під флюсом, як правило, наплавляють шар металу від 3 мм і більше, досить однорідного по складу з мінімальною кількістю металургійних дефектів.

Умови праці при автоматичному наплавленні під флюсом кращі, ніж при ручному.

До недоліків наплавлення під флюсом слід віднести обмежені можливості управління переміщенням дуги по траєкторії через нездійсненність точного візуального контролю, необхідність застосування різних підформуючих і флюсоутримуючих пристроїв, складність або неможливість здійснення процесу наплавлення в різних просторових положеннях, відсутність надійних технічних рішень по механізації процесу видалення шлакової кірки.

Наплавлення відкритою дугою і в захисних газах покликане усунути відмічені недоліки наплавлення під флюсом. Наплавлення відкритою дугою порошковим дротом здійснюється без додаткового захисту зони горіння дуги флюсом або інертними газами, стабілізація дугового розряду і захист розплавленого металу від азоту і кисню повітря забезпечується введенням в електродний матеріал комплексу розкислювачів і мінералів.

Застосовується як автоматичне, так і напівавтоматичне наплавлення відкритою дугою. При напівавтоматичному наплавленні самозахисний порошковий дріт подається в зону горіння дуги по гнучкому шлангу, траєкторію переміщення дуги в потрібному напрямі і оптимальну швидкість переміщення забезпечує наплавлювальник вручну.

Простота, маневреність, можливість наплавлення деталей складної геометричної конфігурації, візуальний контроль, за формуванням наплавленого шару, можливість наплавлення в різних просторових положеннях - основні переваги цього процесу. Істотно і те, що при наплавленні відкритою дугою самозахисним порошковим дротом наплавлений метал покритий тонкою плівкою шлаку, яка при накладенні наступних валів переплавляється дугою, не перешкоджаючи їх нормальному формуванню. Ця особливість добре використовується для автоматизації процесу наплавлення, оскільки відсутня необхідність в безперервному видаленні шлакової кірки.

Останнім часом широке поширення набуло автоматичне наплавлення порошковою самозахисною стрічкою. Цей процес забезпечує велику продуктивність.

Для наплавлення відкритою дугою використовується також і активований дріт, що містить в невеликих кількостях легуючі і модифікуючі елементи.

Автоматичне і напівавтоматичне наплавлення в середовищі захисних газів найчастіше використовує плавкий електрод. Як плавкі електроди застосовуються дроти малого діаметру з низьколегованих сталей, у ряді випадків - порошкові. Наплавлення виконується в середовищі вуглекислого газу, аргону, азоту або різних сумішей цих газів.

Автоматичне наплавлення неплавким електродом (вольфрамовим) здійснюється в середовищі аргону або гелію, присадний матеріал у вигляді прутків або дроту малого діаметру подається в зону горіння дуги спеціальними пристроями (подаючими механізмами). По продуктивності цей процес значно поступається наплавленню самозахисним порошковим дротом. До переваг процесу можна віднести можливість наплавлення тонкого шару ($\delta = 0,5$ мм) при меншій частці основного металу.

Плазмове наплавлення відноситься до прецизійних процесів наплавлення, оскільки дозволяє наплавити шар заданої товщини (від 0,5 до 5,0 мм), як на всю деталь, так і на певну ділянку з лімітованою часткою основного металу (5-10%). Відомі декілька різновидів наплавлення плазмовою дугою, особливостями яких є: використовуваний вид присадного матеріалу (порошок, дріт, пруток і т.д.), спосіб його транспортування в плазмову дугу і ступінь закінченості процесу розплавлення [3].

На рис.1.2. приведена схема плазмово-порошкового наплавлення. Гранульований порошок (фракція 80-160 мкм) певного хімічного складу транспортується газом в дугу по спеціальних каналах сопла 3 і розплавляється (або нагрівається до температур, близьких до температури плавлення) в стовпі плазми. Стовп плазми утворюється за рахунок тепла дугового розряду, стабілізованого і сфокусованого потоком плазмоутворюючого газу в соплах 2 і 3. Захисний газ подається через сопло 4 і оберігає зону плавлення від контакту розплавленого металу з повітрям. Джерело 5 служить для живлення дуги між електродом I і соплом 2 (допоміжна або непряма дуга); джерело 6 формує основну дугу, або дугу прямої дії.

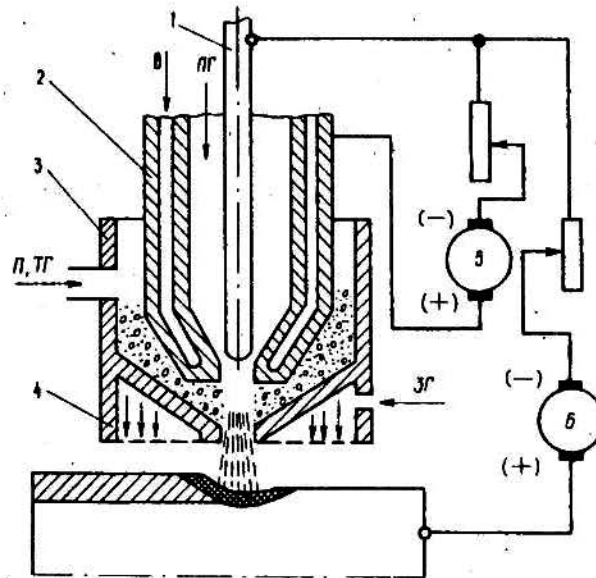


Рис. 1.2. Плазмово-порошкове наплавлення: В - вода; ПГ – плазмоутворюючий газ; П - порошок; ТГ - транспортуючий газ; ЗГ - захисний газ (опис схеми даний в тексті);

Процес плавлення порошку починається в допоміжній дузі і закінчується в основній. Дуга прямої дії є основним джерелом тепла, як для плавлення присадного порошку, так і для оплавлення поверхні виробу. Змінюючи величини струму обох дуг, кількість вдуваного порошку, розміри сопел, витрату плазмоутворюючого газу, регулюють частку основного металу в наплавленому, продуктивність процесу і параметри наплавленого валу.

Останнім часом намітилися тенденції відмови від джерела 5 і робота тільки за допомогою дуги прямої дії, що при незначному зниженні надійності приводить до істотного спрощення конструкції плазмотронів.

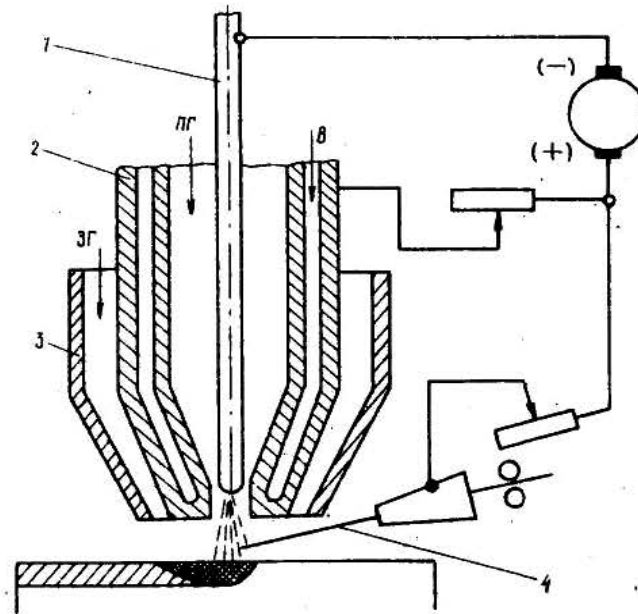


Рис. 1.3. Плазмове наплавлення з токоведучим присадним дротом:
1-електрод; 2 - плазмоутворююче сопло; 3 - захисне сопло; 4 - дріт

Спосіб плазмово-порошкового наплавлення набув найбільше поширення при нанесенні жаростійких сплавів на основі нікелю і кобальту і деяких типів швидкорізальних сталей.

Застосовуються і інші способи плазмового наплавлення, в яких як присадка використовується порошок, так звані способи наплавлення з нерухомою або фіксованою присадкою. При цьому порошок заздалегідь насипається на виріб і потім розплавляється плазмовою дугою прямої дії або з порошку (або суміші порошків) виготовляються кільця або пластини, форма і розміри яких відповідають профілю, що наплавляється. Технологія виготовлення при наплавленні з нерухомою присадкою - пресування з подальшим спіканням, точне литво або штампування.

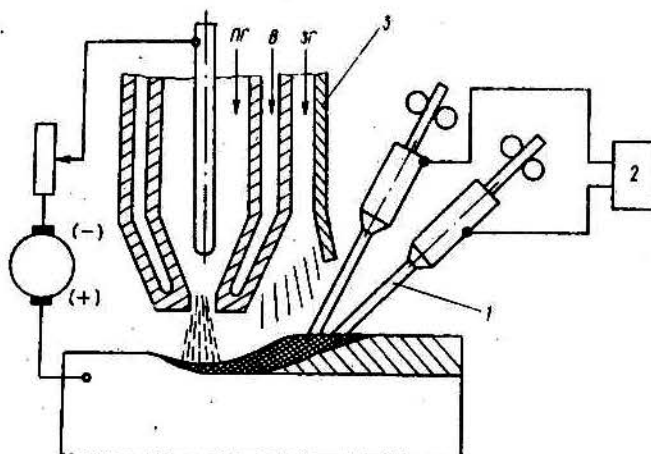


Рис. 1.4. Плазмове наплавлення з подачею у ванну двох плавких електродів:
1 - дріт; 2 - джерело підігріву; 3 - захисне сопло

На рис.1.4. показана схема плазмового наплавлення з рухомою присадкою. Як присадний матеріал можна використовувати як звичний, так і порошковий дріт і стрічку. Присадка може бути як нейтральною, так і токоведучою. По цій схемі найчастіше наплавляють нержавіючі сталі і кольорові метали і сплави (мідь, бронза і латунь).

Різновид процесу плазмового наплавлення з рухомою присадкою приведений на рис.1.4. В цьому випадку в хвіст ванни подаються дві електродні дроти, що підігріваються майже до температури плавлення проходячим струмом від додаткового низьковольтного джерела.

Плавлення дроту відбувається в хвостовій частині ванни, підігріті електроди і хвостова частина ванни захищаються газом, що поступає з сопла спеціальної конструкції. В цьому випадку продуктивність процесу плазмового наплавлення з 5-10 кг наплавленого металу в годину збільшується до 30 кг/год.

Мікроплазмова дуга застосовується для розплавлення заздалегідь нанесених металізацією покриттів, переважно на деталях малої товщини. Товщина наплавленого шару 0,3-1,5 мм, товщина стінки деталі 1-6 мм. Можливий варіант використання мікроплазмової дуги для наплавлення з присадкою звичного або порошкового дроту малого діаметру.

У тих випадках, коли плавлення присадного матеріалу недоцільне, його у вигляді гранульованого або роздробленого порошку подають в хвіст ванни. Присадний матеріал, наприклад реліт, оплавляється з поверхні, тоне у ванні основного металу, армуючи останній.

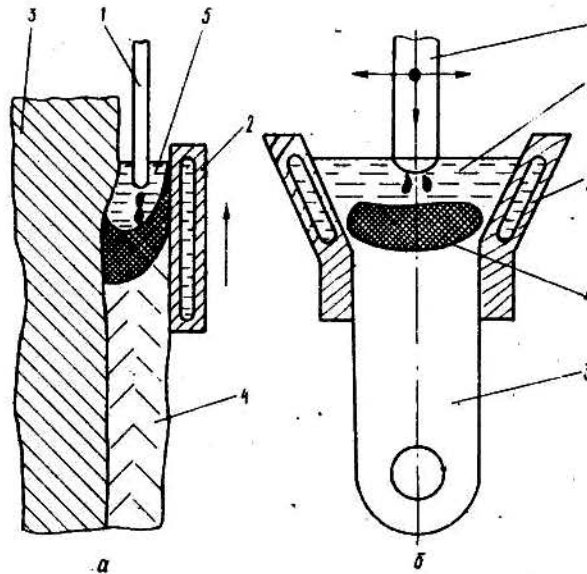


Рис. 1.5. Електрошлакове наплавлення плоскої (а) і торцевої (б) поверхонь:
 1 - електрод; 2 - кристалізатор; 3 - деталь, що наплавляється; 4 - наплавлений метал; 5 - шлакова ванна

Електрошлакове наплавлення є найбільш високопродуктивним технологічним процесом. В більшості випадків застосовується примусове формування наплавленого металу, тому формуючі пристрої є найважливішим технологічним елементом і конструюються, як правило, індивідуально для кожної серії однотипних деталей. Традиційні схеми (рис.1.5-1.7.) електрошлакового наплавлення забезпечують товщину наплавленого шару не менше 15-20мм і застосовуються для наплавлення плоских, циліндрових і торцевих поверхонь [4].

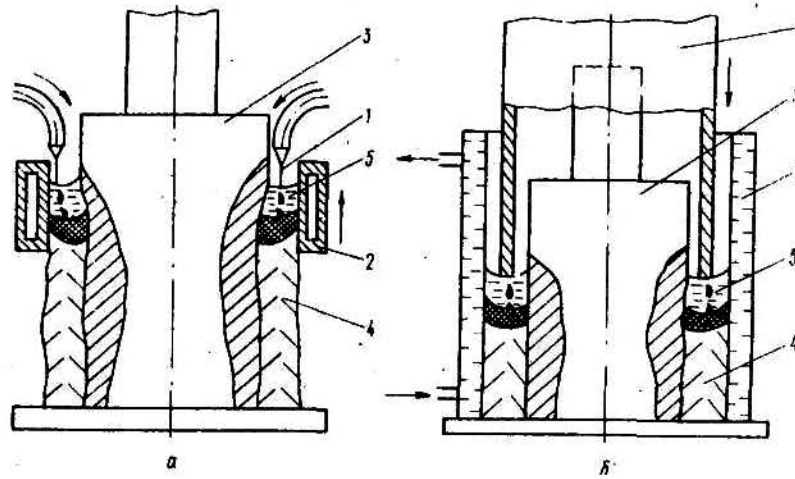


Рис. 1.6. Електрошлакове наплавлення циліндрової поверхні шийок колінчастого валу проволоками (позначення ті ж, що на рис. 1.5.)

Електродними матеріалами є: дріт, катанні або литі пластини, труби, стрічки, дріб. Електрошлаковим наплавленням проволоками, трубою або дробом наплавляють шийки колінчастих валів високофорсованих двигунів. Вельми перспективним процесом електрошлакового наплавлення циліндричних деталей вважається наплавлення дробом із застосуванням струмопровідного кристалізатора, рис. 1.7.

У кільцевий простір між внутрішньою стінкою кристалізатора і деталлю, що наплавляється, заливається порція рідкого шлаку, після чого включається зварювальна напруга. Після витримки деталі в шлаковій ванні протягом 20-30 хв (витримка необхідна для прогрівання деталі і очищення її поверхні від оксидів) починається подача спеціальним дозатором дробу. Дозатор, скоюючи поворотно-обертальні рухи, подає рівномірно в кільцевий простір присадний матеріал. Продуктивність процесу може варіюватися від 60 до 200 кг/ч.

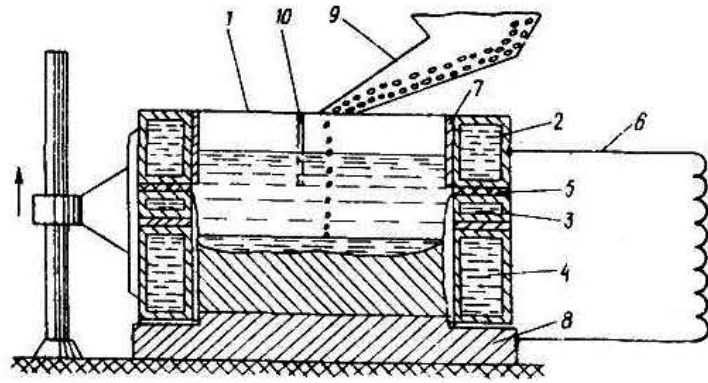


Рис. 1.7. Електрошлакове наплавлення зернистим присадним металом:

- 1 - верхній кристалізатор; 2 - охолодження; 3 - середній кристалізатор;
 4 - нижній кристалізатор; 5 - ізолююча прокладка; 6 - джерело живлення;
 7 – вставка 8 - виріб

Електрошлакове наплавлення плоских поверхонь може здійснюватися при вертикальному, нижньому і похилому положеннях деталі. Електродними матеріалами є литі стрижні, пластини, прокат різного профілю, дріт, стрічка.

Істотно важливим кроком в розвитку електрошлакового наплавлення є наплавлення стрічками, розроблене в 1974 р. в ІЕС ім. Е.О.Патона. Принциповою відмінністю цього процесу від відомих раніше є відсутність формуючих пристроїв. Шлакова ванна утворюється і обмежується простором між паралельними стрічками і виробом. Струм нагріває шлак до температур, що перевищують 2250°K . Особливістю процесу є надзвичайно інтенсивна теплопередача від шлаку до стрічок, що забезпечує істотно велику швидкість їх плавлення в порівнянні з дуговим наплавленням. Розплавлений метал у вигляді дрібних крапель переноситься через шлак на виріб переважно з торців стрічок.

Шлакова ванна розчиняє оксиди на поверхні основного металу, прогріває його до температур рівних або близьких до температури плавлення.

Вказані особливості процесу електрошлакового наплавлення стрічками сприяють отриманню: малої частки основного металу в наплавленому, великої продуктивності процесу, щодо невеликої товщини наплавленого металу, майже повної

відсутності металургійних дефектів.

Стикошлакове наплавлення - один з прикладів (різновидів) електрошлакового наплавлення.

Схема процесу приведена на рис. 1.8.

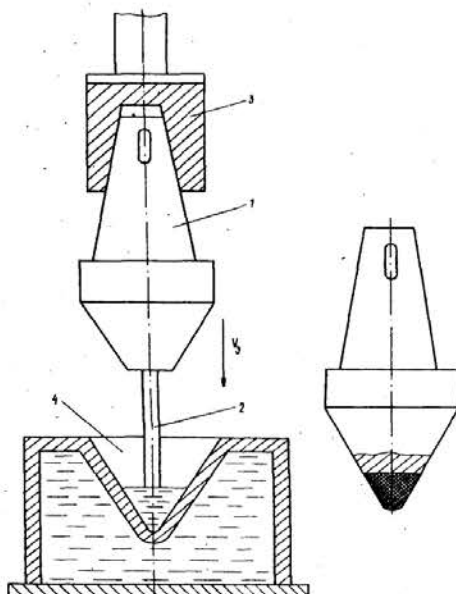


Рис. 1.8. Стикошлакове наплавлення:

1 - виріб; 2 - легований електрод; 3 - утримувач; 4 - кристалізатор; справа - наплавлений виріб

Процес починається наведенням шлакової ванни у водоохолоджуваному кристалізаторі спеціальної форми. Форма кристалізатора, заповнюється металом, що переплавляється, вибирається близькою до конфігурації готової деталі, електродом служить литий або катаний пруток (пластина) з легованого металу, заздалегідь зварений з торцевою поверхнею, що наплавляється.

Після розплавлення прутка (пластини) виріб поволі подається в шлакову ванну, витримується в ній певний час, необхідний для прогрівання торцевої поверхні і розчинення оксидів, після чого швидко занурюється в металеву ванну. Відбувається зварювання відливки з виробом.

Газове наплавлення. Використовує для нагріву металу тепло, що виділяється,

при горінні суміші ацетилену і кисню. Характер полум'я - відновний (з надміром ацетилену). Газове полум'я - якнайменше інтенсивне джерело нагріву, тому його застосування обумовлює більшу, ніж в інших випадках, зону термічного впливу. Випаровування металу при використуванні цього джерела нагріву відсутнє. Особливістю процесу є можливість отримання малої частки основного металу в наплавленому (5-10%), що пов'язане з відсутністю значного тиску струменя газу на поверхню ванни. Тиск потоку газу оцінюється прямо пропорційно квадрату кількості газу, що закінчується з сопла в секунду, і його густину, і обернено пропорційний до відстані від зрізу сопла до поверхні ванни. Ця об'єктивна залежність дозволяє оператору легко керувати процесом. Присадний метал у вигляді прутків, стрічки, дроту подається уручну або спеціальними механізмами [5].

При газопорошковому наплавленні у якості присадних матеріалів використовуються гранульовані порошки легкоплавких сплавів певних фракцій і спеціальні конструкції пальників, що дозволяє здійснювати два різновиди процесу: попереднє нанесення шару легкоплавкого порошку на поверхню виробу з подальшим оплавленням покриття; власне наплавлення - одночасне нанесення і оплавлення малих порцій порошку на поверхні деталі.

Індукційне наплавлення використовує явище наведення в провідниках, поміщених в змінне магнітне поле високої частоти, струмів Фуко. Висока частота магнітного поля зумовлює необхідність застосування відповідних джерел - лампових або змішаних генераторів. Струми, що нагрівають метал, індуються в його поверхневих шарах і, отже, глибина нагріву виробу, що наплавляється, залежатиме від частоти джерела, а також від магнітної проникності і електроопору матеріалу деталі. Частота струму і глибина нагріву зв'язані назад пропорційною залежністю [6].

Із сказаного виходить, що при індукційному наплавленні нагрів присадного матеріалу здійснюється за рахунок теплопередачі від основного, володіючого більшою магнітною проникністю і меншим електроопором. Тому індукційне наплавлення припускає застосування присадних матеріалів, що мають, в порівнянні з основним, знижену температуру плавлення. У ряді випадків для створення напра-

вленої кристалізації наплавленого металу і попередження утворення в ньому усадкової раковини застосовують спреєрне охолодження основного металу. Прикладами такої технології є наплавлення клапанів двигунів внутрішнього згорання, штовхачів, деяких типів арматури.

Технологічні прийоми індукційного наплавлення вельми різноманітні. Промислове застосування знайшли такі способи індукційного наплавлення: а) з використанням твердого присадного матеріалу, що нанесений або розміщений на поверхні, що наплавляється, у вигляді порошку, пасти, пресованих брикетів, литих кілець або пластин; б) з використанням рідкого присадного металу, який плавиться в окремій індукційній печі і подається на розігріту і оброблену шлаками поверхню, що наплавляється, дозованими порціями; в) з частковим плавленням присадного матеріалу (армування).

При наплавленні з використанням твердого присадного матеріалу на поверхню виробу наноситься механічна суміш флюсу і гранульованого порошку сплаву. Нагрів здійснюється індуктором, підключеним до лампового генератора.

У міру розігрівання деталі за рахунок теплопередачі починає плавитися флюс, який розчиняє оксиди на поверхні деталі і змочує гранули зерна сплаву, сприяючи подальшому розтіканню присадного матеріалу.

У разі наплавлення клапанів присадний метал у вигляді литих кілець укладається в заздалегідь проточену на тарілці клапана канавку і потім розплавляється в спеціальному індукторі.

Наплавлення рідким присадним матеріалом одержало останнім часом істотний розвиток, завдяки технології відновлення зношених катків гусеничних машин.

Катки з нанесеним на них шаром флюсу нагріваються на спеціальних установках в індукторах до 1050-1100°K. Одночасно в окремій індукційній печі, плавиться хромовий чавун, що є присадним металом. Присадний метал порційно заливається в щілину між поверхнею катка і піщаною формою. Всі основні процеси виконуються автоматично. Достоїнствами процесів індукційного наплавлення є: отримання мінімальної частки основного металу в наплавленому, можливість на-

несення як тонких шарів (менше 3 мм), так і шарів великої товщини (при наплавленні з рідким присадним металом); хороше формування наплавленого металу.

До числа недосконалості процесу слід віднести утруднення, пов'язані з наплавленням матеріалів, температура плавлення яких перевищує температуру основного металу і труднощі, пов'язані з наплавленням деталей складної конфігурації.

Процес армування полягає в розплавленні поверхні основного металу з утворенням ванни певної глибини, зерна $WC+W_2C$ (так званий зернистий реліт) тонуть у ванні, що утворилася. Замість реліта можливе застосування зерен спеченого твердого сплаву. Для успішного здійснення процесу армування обов'язковими є дві умови: присадний метал повинен бути більш тугоплавким і мати високу густину.

Плакування від розглянутих вище процесів наплавлення відрізняє, перш за все, відсутність розбавлення основним металом робочого шару. Робочий шар може з'єднуватися з основним металом вибухом, куванням, пліщенням і іншими способами, але завжди в основі плакування лежить застосування способів зварювання тиском або її різновидів. Властивості робочого шару визначаються переважно способами термообробки, яку проходить заготовка або деталь в процесі виготовлення.

1.3. Наплавлення різних видів металу

Залежно від призначення застосовують наплавлений метал різного складу: сталі, чавуни, сплави на основі заліза, нікелю, кобальту і т.д.

Низьковуглецеві і низьколеговані сталі застосовуються переважно для відновного наплавлення. Твердість і мікроструктура напавленого металу тісно зв'язані із швидкістю охолодження напавленого металу в діапазоні температур розпаду аустеніту. Високі швидкості охолодження приводять до утворення мартенситу, присутності голчатого трооститу, що супроводжується зростанням твердості і пов'язаними з цим процесом окрихчуванням і можливістю утворення тріщин.

Надмірне зменшення швидкості охолодження приводить до розпаду значної частини аустеніту при високих температурах з утворенням перліту, що знаходить віддзеркалення в зниженні твердості і зносостійкості.

Оптимальна структура низьковуглецевого і низьколегованого металу виходить при охолодженні з швидкістю від 10 до 40 град/с у області температур 825 К. Із цього слідує основні рекомендації по напавленню: необхідність попереднього підігріву масивних деталей до 300-550°C; його необов'язковість при напавленні деталей з незначною масою. Матеріали для напавлення: традиційні зварювальні дроти, флоси, електроди.

Вуглецеві і низьколеговані сталі, що містять більше 0,40%С і сумарна кількість легуючих до 5% - найпоширеніший тип напавленого металу, поєднуючий достатньо високу зносостійкість з малою вартістю.

Структура напавленого металу - переважно мартенсит, голчатий троостит і залишковий аустеніт.

Твердість після напавлення, залежно від хімічного складу і технологічних прийомів, від 46 до 62 HRC.

Характерною особливістю при напавленні цього типу металу є необхідність попереднього підігріву до 620-700°K, що в більшості випадків гарантує відсутність тріщин.

Необхідна інформація про типи і види цих напавлювальних матеріалів, а, у

ряді випадків, і вказівки по технологічних прийомах наплавлення містяться у відповідних каталогах і проспектах фірм-виготівників матеріалів.

Високомарганцеві аустенітні сталі, що містять близько 13% Mn застосовуються для наплавлення деталей, що піддаються в процесі експлуатації дії сильних ударів.

Якнайкращі властивості має наплавлений метал, якщо забезпечена чисто аустенітна структура. Це досягається за рахунок достатньо великих швидкостей, охолоджувальних від 1220 К. При повільному охолодженні в межах зерен виділяється цементит, що приводить до різкого зниження в'язкості.

Тому при ручному дуговому напавленні регламентуються перетин валу і потужність дуги, при механізованому напавленні обов'язковими умовами є: підвищена швидкість напавлення, періодичні зупинки процесу, зміна місця напавлення, іноді - примусове охолодження.

З метою забезпечення більшої стабільності аустеніту напавлений метал додатково легують нікелем. Характерною особливістю цього типу напавленого металу є його схильність до зміцнення за рахунок утворення мартенситу деформації і фазового наклепу.

Твердість напавленого металу при цьому змінюється від 200 НВ (після напавлення) до 550 НВ (після зміцнення). Для напавлення сталей типу Г13 (сталь Гатфільда) розроблені електроди, суцільні і порошкові дроти.

Стійкість хромонікелевих сталей проти загальної корозії в окислювальних агресивних середовищах висока, висока стійкість в умовах міжкристалітної корозії досягається зниженням змісту вуглецю до 0,02%. Оптимальною мікроструктурою є аустенітно-ферритна із змістом дельта-фериту від 2 до 8%. Напавлений метал в цьому випадку якнайменше схильний до утворення тріщин і малочутливий до подальших дій "небезпечних" температур 720-920°К, при яких відбувається частковий розпад аустеніту, супроводжуваний виділенням по межах кристалів складних карбідів хрому і заліза, що приводить до високої схильності до міжкристалітної корозії.

Для напавлення хромонікельових аустенітних сталей розроблені електроди,

суцільні і порошкового дроту, холоднокатані, порошкові і спечені стрічки.

Хромові сталі, що містять більше 10% хрому, мають ряд цінних властивостей: стійкість проти корозії, висока міцність при звичних і високих температурах, висока зносостійкість та ін.

Низьковуглецевий (0,1-0,3% C) хромовий наплавлений метал має мартенситно-ферритну структуру. Залежно від характеру виробу, що наплавляється, і необхідної товщини шару наплавлення виробляють без підігріву або з підігрівом до 420-520°K.

Високовуглецеві (1-2% C) хромові сталі, дозволяють одержати надзвичайно високу зносостійкість. Після наплавлення мікроструктура - ледебуритна евтектика і залишковий аустеніт.

Наплавлення цих сталей виконується з попереднім підігрівом до 680-830°K і обов'язковим подальшим сповільненим охолодженням наплавлених деталей.

Залежно від умов експлуатації наплавлених деталей у ряді випадків проводять повну термообробку: відпал, та гартування з подальшою відпусткою по режимах інструментальних сталей. Наплавлення металу цього типу виконується електродами, самозахисними порошковими проволочками і стрічками, суцільними проволочками під флюсом і в захисних газах.

Хромовольфрамкові і хромомолібденові сталі мають високу міцність і в'язкість, для них характерні високі теплостійкість і термічна витривалість. При змісті вуглецю 0,8-1,2% наплавлений метал наближається по властивостях до класичної швидкорізальної сталі P18, що має значну зносостійкість при абразивному зносі з помірними ударами, як при звичних, так і при підвищених температурах.

Особливістю мікроструктури сталей цього типу є те, що карбіди в цих сталях коагулюють надзвичайно повільно, завдяки чому, навіть при тривалому контакті з розжареним металом, наплавлена поверхня зберігає твердість і добре протистоїть зносу.

При наплавленні цих сталей необхідний попередній і супутній підігрів 770-870°K і подальше сповільнене охолодження.

Наплавлювальними матеріалами є: прутки, електроди, суцільного і порошко-

вого дроту, гранульовані порошки.

Високохромові чавуни - найпоширеніший тип наплавленого металу, ефективно використовуваний для підвищення зносостійкості деталей, що працюють при звичних і підвищених температурах, що випробовують абразивний, газо- і гідроабразивні види зносу.

Основними складовими мікроструктури наплавленого металу є: карбіди хрому Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, залишковий аустеніт і ледебурітна евтектика. Зносостійкість наплавленого металу тісно пов'язана із співвідношенням карбідів і матриці, а також з розподілом карбідів. При надмірній кількості карбіди коагулюють і зносостійкість виявляється недостатньою.

Заевтектичні наплавлені сплави містять надмірні первинні карбіди з дуже високою зносостійкістю, введення в ці сплави бору ще більше збільшує зносостійкість за рахунок утворення вельми твердих карбоборидів.

В більшості випадків наплавлений метал працює з помірною кількістю тріщин, запобігти утворенню яких дуже важко.

Оскільки ці тріщини звичайно не переходять в метал деталі (локалізуються в наплавленому) і роблять неістотний вплив на працездатність деталі, їх мале розкриття і спрямованість регулюється технологією, то цей дефект вважається допустимим.

Для зменшення вірогідності утворення холодних тріщин наплавлення необхідно виконувати на основний метал або підшаровий з можливо низькою межею текучості. Попередній підігрів до $670-870^{\circ}K$ і подальше сповільнене охолодження дозволять зменшити, а у ряді випадків і усунути утворення холодних тріщин.

Для наплавлення застосовують покриті електроди, прутки, гранульовані порошки, суміші, порошкові дроти і стрічки.

Хромокобальтові сплави (стеліти) - важлива і широко поширена група жароміцних сплавів. Вони мають високий опір зносу і окисленню при температурах до $1300^{\circ}K$, мають хорошу корозійну і ерозійну стійкість.

Специфікою наплавлення стелітів є необхідність забезпечення в наплавлен-

ному металі змісту заліза на мінімальному рівні $\leq 3\%$.

Тому, якщо застосовують як присадні матеріали литі прутки або покриті електроди, багатошарове наплавлення є обов'язковим.

Багато труднощів усуваються при плазмово-порошковому або газопорошковому наплавленні. Частка основного металу в наплавленому може бути, в цих випадках, обмежена 5-10%, що робить реальною можливість одношарового наплавлення.

Щоб попередити виникнення тріщин, стеліти наплавляють з попереднім (у ряді випадків і супутнім) підігрівом до 870-970°K і подальшим сповільненим охолодженням.

Нікелеві сплави з хромом і бором поєднують високу твердість при температурах до 870-970 K, зносостійкість, корозійну і ерозійну стійкість з цінними технологічними властивостями. Ці сплави легкоплавкі, мають властивості припоїв, що самофлюсуються. У структурі наплавленого металу, разом з складною евтектикою, є борид нікелю і хрому, а також і карбобориди.

Для попередження тріщин при наплавленні застосовується, попередній підігрів до 570-670 K.

Наплавлення здійснюється газопорошковим, плазмово-порошковим і іншими способами, а також газовим полум'ям з присадкою литих прутків.

Якість наплавленого шару істотно залежить від вмісту кисню в присадних матеріалах, зміст кисню не повинен перевищувати 0,1%.

У композиційних наплавлювальних сплавах (псевдосплавах) найчастіше застосовується як твердий компонент евтектичний сплав WC і W₂C, а як зв'язка - сплави на основі заліза, нікелю або міді.

Карбіди вольфраму W₂C і особливо WC значно перевершують решту твердих матеріалів по міцності і модулю Юнга. Інші важливі переваги - висока температура плавлення і висока густина, завдяки якій зерна карбідів вольфраму тонуть в розплавленій сталі.

Карбіди вольфраму швидко розчиняються в розплавлених металах при температурах вище 1470-1770°K, що зумовлює недоцільність їх використання в

дугових процесах наплавлення і необхідність захисту їх поверхні від розчинення. Тому композиційні сплави наплавляють переважно газовим полум'ям або індукційним наплавленням, а поверхню зерен покривають шаром кадмію або нікелю.

Залежно від призначення, наперед приготовані зерна твердого компоненту потрібного розміру і форми або упаковуються в сталеву трубчасту оболонку з різним коефіцієнтом заповнення (наприклад, Hayetellite 38 і Hayetellite 60), або готуються у вигляді порошку, що містить, наприклад, 60% карбідів вольфраму і 40% стелліта Nb. Чим крупніше зерно карбіду і менше частка об'єму, зайнята зв'язкою, тим вище зносостійкість псевдосплавів.

Важливе значення має форма і структура твердих зерен. Використання сферичних зерен, одержаних методом порошкової металургії і методом відцентрового розпилювання збільшило, довговічність наплавлених деталей за рахунок досконалішої мікроструктури твердого компоненту і пов'язаними із структурою механічними властивостями зерен.

Замість литих зерен карбідів вольфраму, можливо, використовувати роздроблені спечені сплави, що містять невелику кількість кобальту.

Технологія і техніка наплавлення композиційних сплавів передбачає розплавлення поверхні основного металу і подачу у ванну частинок зносостійкої фази, що утворилася, із забезпеченням їх мінімального розчинення.

Різновидами цього процесу є засипка зносостійких частинок в хвіст ванни при плазмовому наплавленні, і просочення зерен карбіду вольфраму легкоплавкими сплавами типа ХН80СРЗ або Г20Н20Д60 з використанням пічного нагріву [8].

На підставі проведеного аналізу, враховуючи необхідність роботи колінчастих валів в умовах знакозмінних навантажень в якості основного матеріалу для наплавлення під шаром флюсу приймаємо середньовуглецевий матеріал дроту, легований хромом, марганцем, кремнієм типу Нп 30ХГСА. Для покращення зносостійких властивостей наплавлюємого матеріалу при нанесенні покриття додатково у флюс будемо вводити шлак, виконуючи таким чином мікролегування.

1.4 Висновки та задачі дослідження:

На підставі дослідження умов роботи колінчастих валів, зміни їх якісних характеристик в процесі експлуатації і після відновлення, а також на підставі огляду літературних джерел можна зробити наступні висновки:

1. Розглянуто традиційні та сучасні методи відновлення деталей, що найшли своє застосування при відновленні деталей сільськогосподарської техніки. Визначено, що одним з найбільш поширених методів, що гарантує високу міцність зчеплення нанесеного покриття з основою є метод наплавлення під шаром флюсу.

2. Проаналізовано матеріали, що використовуються при напавленні деталей в залежності від типу металу. Визначено їх структурні особливості та відмінності технологічного процесу нанесення, що гарантує високу якість наплавленого металу.

3. На підставі аналізу літературних джерел встановлено, що найбільш придатною для відновлення колінчастих валів напавленням під шаром флюсу є використання дроту типу 30ХГСА з плавним флюсом АН348.

Виходячи з вищевикладеного, метою роботи є підвищення експлуатаційних властивостей колінчастих валів шляхом нанесення покриття. Обґрунтування вибору складу мікролегуючої добавки, що забезпечує підвищення твердості нанесеного покриття. Окрім того необхідно встановити вплив дефектів на рівень магнітного показника за яким планується прогнозувати властивості матеріалу.

Відповідно до поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні задачі:

- розглянути основні способи легування наплавленого металу, проаналізувати процеси, що при цьому відбуваються;
- дослідити фізико-хімічні властивості шлаку;
- визначити найбільш раціональні співвідношення мікро легуюча добавка – флюс для підвищення твердості покриття;
- розробити технологічну схему мікролегування.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ, МАТЕРІАЛ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Методологія досліджень

Основні оцінюючі критерії, що дозволили прогнозувати і забезпечити підвищення експлуатаційних властивостей покриття, розробляли на основі аналізу його міцності зчеплення з основою, відносної зносостійкості, вивчення кінетики і механізму формування шару, що наплавляється.

Для отримання відомостей про можливість застосування даного покриття для відновлення колінчастих валів, використовували апріорні дані і результати власних експериментальних досліджень.

Методом розрахунку на міцність колінчастого валу як абсолютно жорсткої розрізної балки одержана модель, що зв'язує межу адгезійної міцності покриття з нормальними і дотичними напруженнями змінного циклу валу, що дозволило спрогнозувати стійкість рекомендованого матеріалу покриття, а також відновленої деталі в цілому при експлуатації.

Пошук найдостовірніших і оптимальних оцінних критеріїв властивостей, що забезпечують необхідні характеристики найбільш навантажених і дорогих деталей двигуна, управління їх якістю, привів до розгляду відомих і нових залежностей, що зв'язують повноту протікання дифузійних процесів із завершеною реакцією топохімічної взаємодії, і, як наслідок, з міцністю зчеплення наплавленого шару з основою. На базі аналізу умов експлуатації деталей і що пред'являються до них вимогам, запропоновані спеціальні методи випробувань наплавленого шару.

Методологія досліджень і послідовність проведення експериментів, теоретичних оцінок для вирішення поставлених задач і досягнення мети роботи приведена на рис. 2.1.

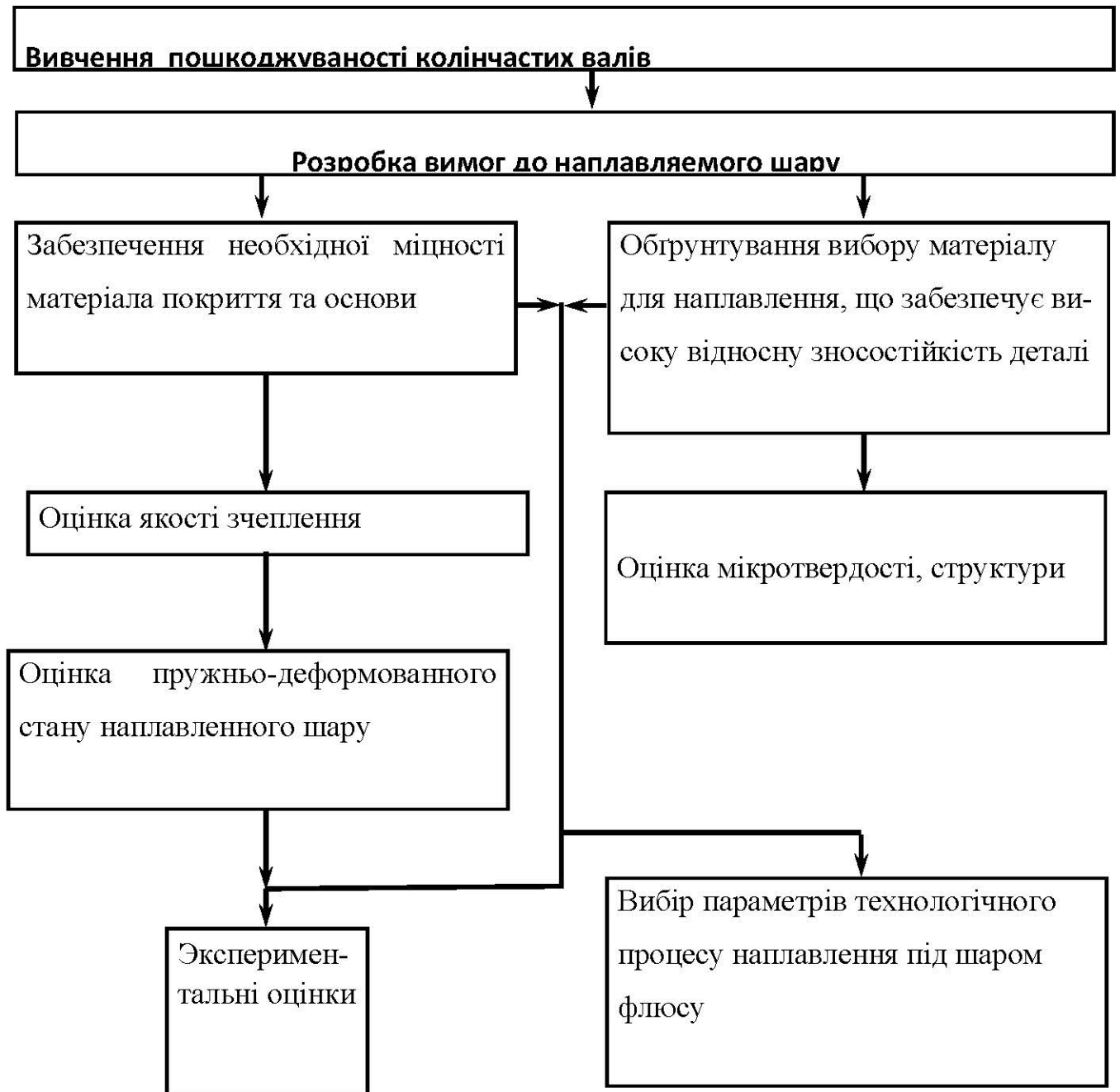


Рис. 2.1 Методологія досліджень

2.2. Матеріал досліджень

Для досліджень якісної технології відновлення найбільш навантажених деталей двигунів методом наплавлення під шаром флюсу із застосуванням рекомендованого матеріалу покриття були вибрані колінчасті вали тракторних двигунів сімейства СМД. Вибір даних дизельних двигунів був обумовлений тим, що вони працюють у важчих умовах, в порівнянні з карбюраторними.

Хімічний склад досліджуваних матеріалів колінчастих валів, а також покриття приведений в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Хімічний склад матеріалу колінчастих валів і
матеріалу покриття для відновлення

Матеріал	Склад хімічних елементів, % мас.					
	<i>З</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Mg</i>
Сталь 45 ¹	0,45-0,50	0,17-0,37	0,5-0,8	до 0,04	До 0,04	-
Покриття для відновлення ^{2,3}	0,25-0,32	0,9-1,2	0,8-1,1	до 0,025	До 0,025	-

Примітка: 1. Додатково містить 0,3-0,4% *Al*, 0,08-0,15% *Ti*; 2. Містить до 0,30% *Cr*. 3. Флюс АН-348-А ГОСТ 9087 містить SiO_2 41-44%, MnO 34-38%, CaO 10%, MgO 7%, Al_2O_3 6%, CaF_2 4-6%, Fe_2O_3 2%

Таблиця 2.2

Хімічний склад % шлаку Нікопольського феросплавного заводу

№ про- би	<i>Si</i>	<i>Al</i>	<i>Fe</i>	<i>Mg</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Ti</i>	<i>V</i>	<i>P</i>
1	57	14,2	19,3	2,0	0,6	0,45	0,12	1,5	0,12	0,02
2	62	12,7	20,0	1,9	1,0	0,6	0,15	1,2	0,17	0,03

Основні і супутні матеріали, вживані при наплавленні під шаром флюсу дріт: Нп-30, Нп-40, Нп-80, Нп-50Г, Нп-10ГЗ, Нп-30Х5, Нп-30ХГСА, Нп-2Х14, Нп-3Х13, Св-08, Св-08А, Св-08ГА, Св-08ГС та ін.

При експериментальному нанесенні покриттів використовували тільки стандартний флюс АН-348А, а також цей флюс з добавками 5; 10; 15 і 20% шлаку Нікопольського феросплавного заводу. Покриття наносили на спеціально обладнаній установці, що включає токарний верстат і комплект устаткування для автоматичного нанесення покриттів на циліндрову заготовку із сталі 45 діаметром 90 мм дротом Нп-30ХГСА. Потім із заготовок, з різною часткою присадок вирізали зразки для дослідження твердості і хімічного складу.

Таблиця 2.3

Режими наплавлення шийок колінчастих валів під шаром флюсу

Діаметр деталі, що наплавляється, мм	Діаметр електродного дроту, мм	Сила струму, А	Напруга дуги, В	Швидкість подачі електродного дроту, м/ч	Швидкість наплавлення, м/ч	Виліт електроду, мм	Зміщення електроду із зеніту, мм	Крок наплавлення, мм/об
80-100	2	170-200	26-29	120-150	20-24	15-25	6-7	3,5-4,5

При проведенні експлуатаційних випробувань аналізували зміну структури, мікротвердості, величини зносу і міцності зчеплення.

2.3. Обґрунтування прийнятих методів і типів зразків для оцінки і ідентифікації фазового складу покриття і перехідної зони

Відповідно до поставлених задач і прийнятих методів дослідження готували зразки, що характеризують властивості основного матеріалу і покриття на різних ділянках шатунних шийок колінчастих валів, виготовлених з високоміцного чавуну і сталі 45 дизельних двигунів сімейства СМД, а також карбюраторних сімейства ВАЗ. Вирізку зразків виробляли механічним способом тонкими відрізними абразивними кругами при рясному охолодженні.

Для оцінки мікроструктури і кінетики формування шару при проведенні досліджень відбір проб здійснювали з ділянок з площею поверхні 3-6 см², заввишки 2 см, що включають області з наплавленим шаром, перехідною зоною і основним матеріалом. Приготування шліфів здійснювали по методиках, широко освітлених в літературі [9]. Як реактив для травлення використовували 4%-ний розчин пікринової кислоти в етиловому спирті.

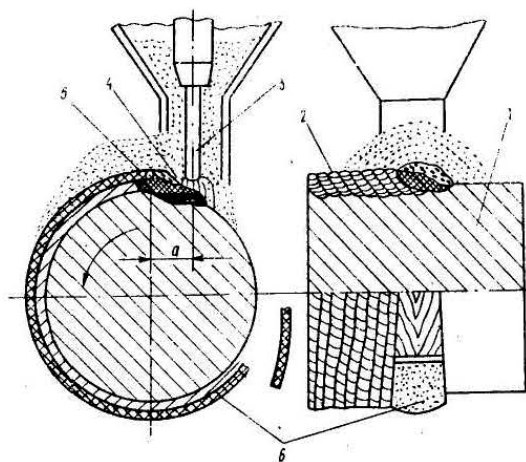


Рис. 2.2. Схема нанесення покриття під шаром флюсу: 1 - виріб; 2 - наплавлений метал; 3 - електрод; 4 - ванна рідкого металу; 5 - плавлений шлак; 6 - шлакова кірка; а - зсув з зеніту.

При наплавленні під шаром флюсу в зону дуги подають флюс, який закриває дугу і плавиться під впливом її тепла. Навколо зони наплавлення утворюється

своєрідний захисний шар, що оберігає розплавлений метал від дії навколишнього середовища: окислення, розбризкування, утворення пор.

З огляду на те, що структура і фази, що формуються, в наплавленому шарі багато в чому визначають експлуатаційні властивості матеріалу, то особливий інтерес представляло отримання достовірної інформації про їх склад. Інтегральну характеристику фізико-механічних властивостей наплавленого шару визначали методом вимірювання мікротвердості.

Ідентифікацію структурних складових здійснювали методами оптичної (мікроскоп МІМ-8М) і електронної растрової мікроскопії (РЕММА-101А), мікрорентгеноспектральним, хімічним і рентгенівським (дифрактометр - ДРОН-3М) аналізами.

Методи відбору зразків, апаратура і порядок проведення досліджень по виміру твердості визначали відповідно методичних даних. При оцінці твердості використовували закон механічної подібності, який вимагає отримання геометрично подібних відбитків при будь-якій глибині вдавлювання. Цій умові задовольняють в більшій мірі конічні і пірамідальні наконечники. Випробування на твердість по методу Брінелля за допомогою вдавлювання сферичного наконечника, те, що відбувається із зміною форми відбитку у міру поглиблення кульки унаслідок шаруватої структури покриття не може забезпечити отримання геометрично подібних відбитків, а, отже, і не забезпечує точності вимірювань. Оскільки товщина досліджених покриттів більш ніж в 8 разів перевершувала глибину проникнення індентора після зняття основного навантаження, то як метод виміру твердості використовували метод Роквелла, з використанням алмазного конуса з кутом при вершині в 120° . Числа твердості визначали за шкалою відліку *C*.

У зв'язку з тим, що пластична деформація навколо відбитків в покриттях відбувається в об'ємах великого числа виділень різних фаз, структурних складових і по їх межах, то метод вимірювання макротвердості є інтегральною характеристикою покриття і не є в даному випадку аддитивною властивістю матеріалу відновленого шару.

В той же час дослідження монокристалних структурних складових нанесеного покриття методом вимірювання мікротвердості дозволило виробити їх диференціювання і оцінити внесок кожної складової в комплекс набутих властивостей.

Вимірювання мікротвердості виконували по методу відновленого відбитку. Для випробувань застосовували алмазний наконечник з формою робочої частини у вигляді чотиригранної піраміди з квадратною підставою в оправі типа НПМ по ГОСТ9377. При цьому прагнули, щоб допустимі погрішності не перевищували 2% для навантаження в 0,098 Н і 1% для навантаження в 0,196 Н.

У зв'язку з тим, що проведення тільки досліджень металографії і використання методу мікротвердості не дозволило з достатньою мірою достовірності визначити величину і характер перехідної зони, а також ідентифікувати фази, що формуються в покритті, то до виконання поставлених задач доцільним представилося залучення методів аналітичної електронної мікроскопії з використанням рентгеноспектрального мікроаналізу. До переваг останнього слід віднести інформативність щодо об'ємного складу заглиблених шарів, високу абсолютну чутливість, локальність, можливість проведення як якісних, так і кількісних вимірювань. Оскільки наголошується близька схожість механізмів формування контрасту зображення, то інтерпретацію електронно-оптичних мікрофотографій, одержаних за допомогою РЕМ, засновували на практиці трактування оптичних мікрофотографій. На відміну від оптичних використання растрового електронного мікроскопа дозволило одержати відображення топографії поверхні при великих збільшеннях і з кращою якістю зображення. Перевагою перед електронним мікроскопом даного приладу, що просвічує, є можливість вивчення з його допомогою масивних об'єктів, не вдаючись до методики реплік, що має ряд суттєвих недоліків.

Дослідження складу фаз, що кристалізуються, розподілу дисперсних фаз і протяжності перехідної зони здійснювали на растровому електронному мікроскопі-мікроаналізаторі РЭММА 101А. Як об'єкт дослідження використовували нетравлені шліфи з площею поверхні $1,2 \text{ см}^2$ і завтовшки 1 см. Поліровку виконували алмазною пастою. Якість підготовки поверхні контролювали за допомогою оптичного мікроскопа.

Для отримання загальної картини поверхні використовували режим сканування растрового електронного мікроскопа за площею прямокутника лежачого в межах наплавленого шару і основи, використовуючи збільшення $\times 40$, $\times 50$, $\times 100$, при аналізі структури фаз, міжфазних меж використовували збільшення $\times 200$, $\times 300$ і $\times 400$, $\times 7000$ аж до $\times 20000$. Визначення складу фаз, що формуються, в покритті, а також концентраційного розподілу елементів по глибині наплавлення проводили в автоматичному режимі покрокового сканування електронним зондом з кроком 300 мкм, при збільшенні $\times 1200$. В цілому було виконано більше 70 вимірювань. При цьому, виходячи з міркувань отримання якнайкращої контрастності, мінімальний розмір досліджуваної локальної неоднорідності, відтворної на екрані, обмежувався, відповідно до рекомендацій розміром 0,1 мкм на поверхні зразка.

Для визначення середнього змісту вуглецю в наплавленому шарі були відібрані три проби з різних ділянок покриття відновленого колінчастого валу. Вирізані зразки очищали від механічних забруднень, промивали в етиловому технічному спирті. Відбір проб виробляли струганням.

Визначення середнього змісту вуглецю проводили газооб'ємним методом відповідно до ГОСТ 11930.1. Для аналізу використовували три навішування по 0,50 гр. Зважування виробляли на аналітичних вагах АДВ-200 з точністю до 0,2 міліграм. Титр розчинів встановлювали по трьох навішуваннях. За остаточний результат приймали середнє арифметичне результатів трьох визначень.

Масову частку вуглецю у відсотках обчислювали по формулі

$$X = \frac{(A - A_0)KK_1}{m}, \quad (2.1)$$

де A - свідчення шкали евідметра газооб'ємного аналізатора, відповідні масовій частці вуглецю, %; A_0 - свідчення шкали, відповідні контрольному досвіду; K - поправочний коефіцієнт на температуру і атмосферний тиск, знайдений по таблиці, прикладеній до приладу; K_1 - коефіцієнт вигорання стандартного зразка, що є відношенням процентного змісту вуглецю за свідченням на стандартний

зразок до процентного змісту, одержаного по евідіометру; m - маса навішування, р.

Абсолютні розбіжності результатів проведених визначень середнього змісту вуглецю, що допускаються, для трьох навішувань не перевищували 0,05%.

Для підтвердження результатів ідентифікації структурних складових наплавленого шару, виконаних методами мікрорентгеноспектрального, хімічного аналізу і шляхом виміру мікротвердості, визначення фазового складу зразка проводили методом рентгеноструктурного аналізу. Виявлення структурних складових виконували за даними про тип кристалічних решіток. Дослідження проводили на дифрактометрі ДРОН-3М з виведенням інтенсивності дифракції у вузькому кутовому інтервалі на ЕОМ і обробці її за програмою для зменшення погрішності експерименту. При проведенні рентгеноструктурного аналізу було застосоване фокусування від плоского зразка, вирізаного з матеріалу покриття з зоною для дослідження 1,22 см, по Бреггу-Брентано і використана K_{α} серія характеристичного рентгенівського випромінювання міді. У зв'язку з невеликим дозволом ліній K_{α_1} і K_{α_2} розрахунок вели по довжині хвилі

$$K_{\alpha} = \frac{K_{\alpha_1} + K_{\alpha_2}}{2} = \frac{1.5374 + 1.5412}{2} = 1.5393 \quad (2.2)$$

Обробку найвірогідніших фаз вели по формулах:

- для кубічної сингонії

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4\alpha^2} (H^2 + K^2 + L^2) \quad (2.3)$$

- для тетрагональної сингонії

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4\alpha^2} \left(H^2 + K^2 + L^2 + \frac{\alpha^2}{c^2} \right) \quad (2.4)$$

- для гексагональної сингонії:

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4\alpha^2} \left[\frac{4}{3} (H^2 + HK + K^2) + L^2 \frac{a^2}{c^2} \right], \quad (2.5)$$

де θ - кут ковзання; a, b, c - параметри елементарного осередку в Å або μX ; H, K, L - індекси інтерференції площини; λ - довжина хвилі рентгенівського проміння в μX ($\lambda = 1,5393 \mu\text{X}$).

Набуті розрахунковим шляхом значення кута ковзання 2θ порівнювали з експериментальними з урахуванням відносної інтенсивності дифракційного максимуму I/I_1 . Ідентифікацію фазових складових зразка проводили на підставі зіставлення міжплощинних відстаней трьох найсильніших дифракційних ліній.

2.4 Магнітний контроль властивостей

Спосіб структуроскопії феромагнітних матеріалів за коерцитивною силою, полягає в тому, що контрольований виріб піддають взаємодії з електроіндуктивним перетворювачем магнітної проникності в електричні сигнали. Це дає можливість визначати стан металу по всій довжині його “життя” і по розподілу H_c судити про зміну властивостей в структурі матеріалу.

Метод діагностики, заснований на вимірюванні коерцитивної сили H_c , і дозволяє виконати інтегральну оцінку стану ділянки металу з обліком до фактичних умов експлуатації.

Зафіксовану коерцитивну силу H_c можливо успішно використовувати для якісного опису закономірностей зміни магнітних властивостей при структурно-фазових перетвореннях у сталях.

Основою оцінки напружено-деформованого (втомного) стану металу різних деталей є вимір магнітної характеристики металу – коерцитивної сили (H_c). При цьому приладова реалізація коерцитиметра (рис. 2.3) проста й недорога. Така оцінка стану металу дає відчутний ефект. З меншим ризиком продовжується термін служби деталей та оцінюється ефективність термічної обробки та нанесення захи-

сних покриттів. Вчасно виводиться з експлуатації механізми з неприпустимим ступенем надійності й цим попереджаються аварійні ситуації.



Рис. 2.3 Зовнішній вигляд коерцитиметрів: а – портативний імпульсний КІМ–2М; б – напівавтоматичний КРМ–Ц; в – магнітний структуроскоп КРМ–Ц–К2М

Коерцитиметричні методи контролю завдяки високій чутливості до структурних змін і фазових перетворень металу, достатній простоті, значній точності, слабкій залежності від геометричних розмірів і можливості проведення вимірів у локальних ділянках контрольованих деталей одержали найбільш широке поширення із усіх магнітних методів неруйнівного контролю.

Незважаючи на значну кількість публікацій, присвячених застосуванню коерцитивної сили для оцінки структури матеріалів певне коло питань є маловивченим. Зокрема в літературі відсутні дані, що дозволяють визначити за H_c стан деталей після експлуатації без їх руйнування. Неясним є і вплив поверхневих дефектів (зокрема тріщини при наплавленні) та таких, що знаходяться під поверхнею.

2.5 Вплив товщини вимірюваного матеріалу на показники магнітного контролю

Для проведення дослідження були виготовлені експериментальні зразки у вигляді прямокутних пластин розмірами $270 \times 70 \times 7$ мм зі сталі 45 та Ст. 3. Поперек, у середині пластини виконаний паз шириною 3 мм і глибиною 4 мм, що імітує тріщину в металоконструкції. Попередньо, за допомогою ультразвукового дефектоскопа УД-4Т була підтверджена контрольованість даного виду дефекту (рис. 2.4).

Вимір коерцитивної сили (H_c) виконувалося уздовж і поперек зразків по обидві сторони щодо паза в крапках контролю із кроком 10 мм (рис. 2.5). Результати виміру наведено в таблицях 2.4 і 2.5 та на рис. 2.6.

Отримані результати показали, що при вимірі уздовж зразка значення коерцитивної сили (H_c) по середині зразка відбивають наявність паза (штучного дефекту) на відміну від значень сили обмірюваних поперек зразка. Таким чином, при напрямку виміру коерцитивної сили (H_c) перпендикулярному до напрямку розвитку дефекту, можливо, його ідентифікація за значенням магнітного параметру.

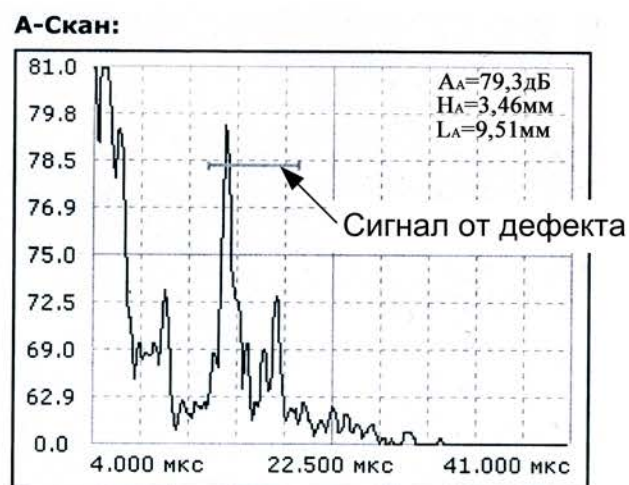


Рис. 2.4 Діаграма ультразвукового контролю експериментального зразка

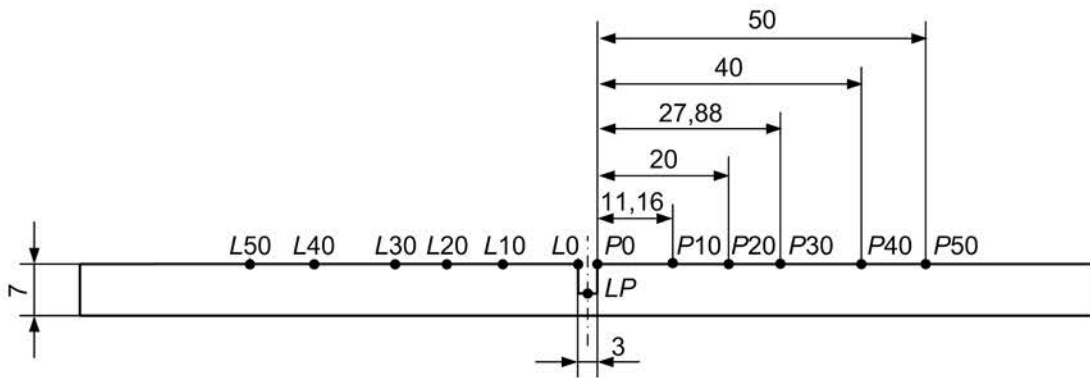


Рис. 2.5 Конструкція експериментального зразка з пазом по середині та точки контролю коерцитивної сили (H_c): LP – по середині паза; L_i і P_i – ліворуч і праворуч від паза, де i – ціле число від 0 до 50 із кроком 10

Таблиця 2.4

Залежність коерцитивної сили (H_c) від відстані до паза на зразку зі сталі 45, А/см

Напрямок виміру	Точка контролю												
	L50	L40	L30	L20	L10	L0	LP	P0	P10	P20	P30	P40	P50
Уздовж зразка	6,7	6,9	6,6	6,5	6,4	6,4	8,2	6,2	6,1	6	6	6	5,7
Поперек зразка	6,7	6,8	6,7	6,7	6,6	6,6	6,7	6,7	6,8	6,7	6,6	6,6	6,3

Примітка. Позначення згідно наведеним на рис. 2.5

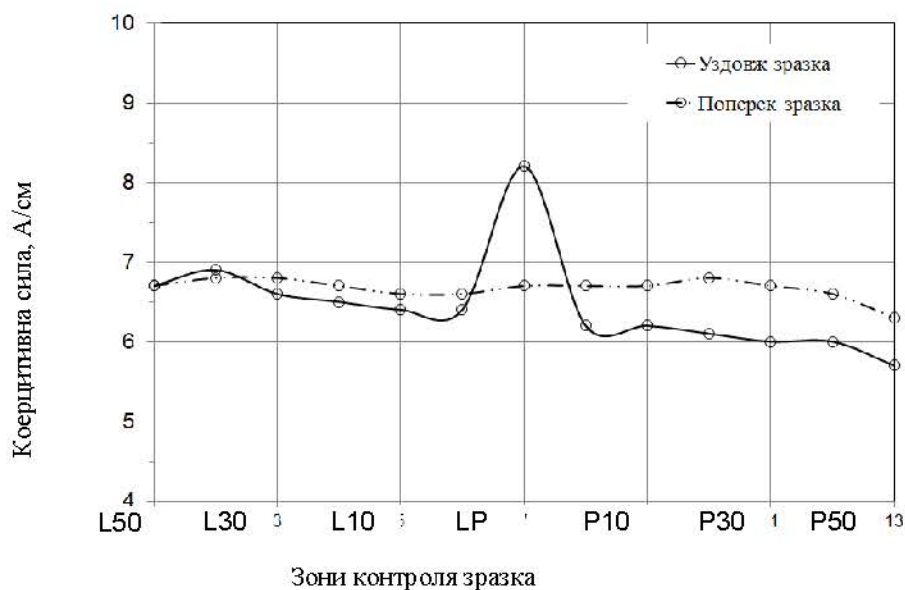


Рис. 2.6 Залежність коерцитивної сили (H_c) від відстані до паза в зразку зі сталі 45 по напрямках виміру – уздовж та поперек зразка

У зоні дефекту значення сили збільшується щодо результатів виміру в бездефектних зонах. Тому що можливість виявлення дефектів деталей за коерцитивною силою (H_c) залежить від напрямку виміру, необхідним є проводити вимір в напрямку перпендикулярному до ймовірного напрямку розвитку дефекту, наприклад, перпендикулярно до тріщини в деталі.

2.6 Вплив внутрішнього дефекту деталі на коерцитивну силу

Для проведення дослідження був виготовлений експериментальний зразок у вигляді прямокутної пластини розмірами $240 \times 150 \times 30$ мм зі сталі 45, по середині якої з торця виконаний отвір діаметром 6 мм і глибиною 55 мм, що імітує внутрішню порожнину (канал для підводу мастила, тощо).

Вимір коерцитивної сили (H_c) виконувалося уздовж і поперек зразків по обидві сторони щодо отвору в місці контролю із кроком 10 мм (рис. 2.7). Результати виміру наведено в табл. 2.5 і на рис. 2.8.

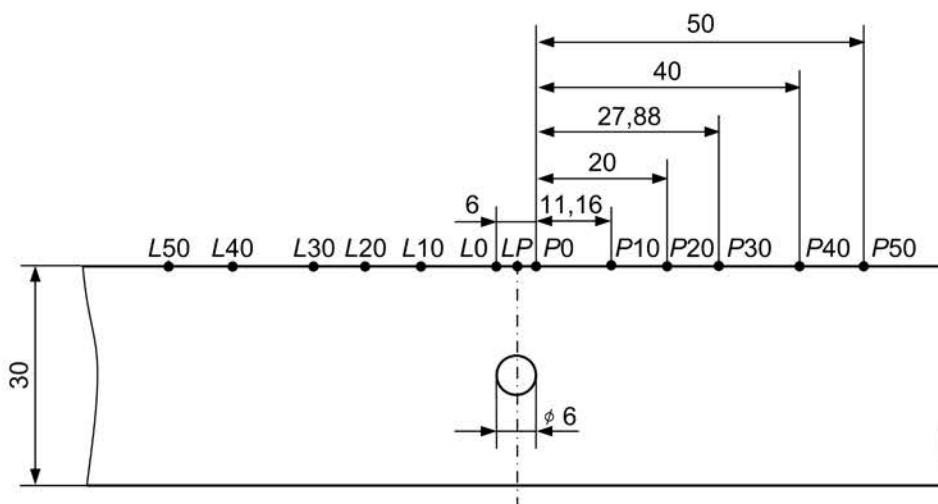


Рис. 2.7 Конструкція експериментального зразка з отвором і точки контролю коерцитивної сили (H_c): LP – по середині зразка (по осі отвору); L_i і P_i – ліворуч і праворуч від отвору, де i – ціле число від 0 до 50 із кроком 10

Таблиця 2.5

Залежність коерцитивної сили (H_c) від відстані до отвору у зразку зі сталі 45, А/см

Напрямок виміру	Точка контролю												
	L50	L40	L30	L20	L10	L0	LP	P0	P10	P20	P30	P40	P50
Уздовж зразка	3,1	3,3	3,4	3,3	3,1			3,3		3,4	3,3		3,4
Поперек зразка	2,7			2,6		2,7		2,5		2,6	2,7	2,8	2,7

Результати виміру показали, що коерцитивна сила (H_c) не залежить від наявності в зразку отвору (штучного внутрішнього дефекту) незалежно від напрямку виміру. Таким чином, ідентифікувати наявність внутрішнього дефекту за значенням коерцитивної сили (H_c) неможливо, якщо він розташований більш ніж на 5 мм від поверхні.

Таким чином, у ході проведення експериментальних досліджень було встановлено, що на результати виміру коерцитивної сили (H_c) великий вплив виявляють різні супутні фактори, а саме геометричні розміри контрольованого зразка, структура матеріалу (анізотропія властивостей через напрямок прокатки листового матеріалу), що приводить до несиметричності магнітного поля в системі “датчик-зразок”, і цим обумовлена різниця показань коерцитиметра при різних напрямках виміру.

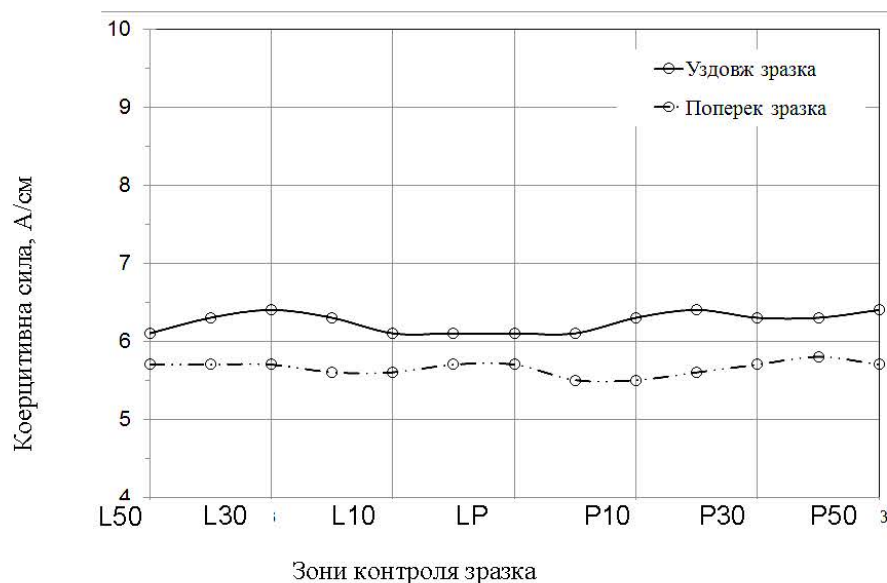


Рис. 2.8 Залежність коерцитивної сили (H_c) від відстані до отвору у зразку зі сталі 45 по напрямках виміру – уздовж та поперек зразка

Встановлено, що коерцитиметр реагує на наявність тріщиноподібних дефектів зразка тільки при напрямку виміру уздовж зразка.

Коерцитиметр нечутливий до дефектів розташованих на глибині більш 5 мм від поверхні контролю, тому при контролі цільності металу доцільно застосування ультразвукового методу контролю.

РОЗДІЛ 3. ОСНОВНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Оцінка впливу вібраційної обробки на зміцнення поверхневого шару деталей

В якості моделі досліджень було використано сталь 10 тонколистового прокату перетином 6 мм. Такий металопрокат використовується для робочих органів сільськогосподарської техніки і містить максимальну частку феритної складової за істотно меншої частки карбідної фази в перліті. Для досліджень важливим було встановити поведінку найбільш м'якої структурної складової - фериту.

Вивчали особливості структуроутворення в такій низьковуглецевій сталі віброзміцненням.

Для дослідження зміцненого шару оптико-математичним методом зображення електронної фотографії розбили на 8 зон (рис. 3.1). Кожну зону розглядали, як окрему фотографію. Потім проводили розрахунок гістограм розподілу кольорів, описуваних функцією і розрахунками за розробленими програмами. Фотографії, пов'язані з цим шаром, наочно представляли в окремих зонах, при цьому розглядали й аналізували їх окремо.

Для зміцнення застосовували вібраційну обробку на спеціально виготовленому стенді з частотою деформації 10-35 Гц (700-2000 циклів на хвилину), амплітудою 0,25-0,75 мм з питомим тиском 1,42 МПа протягом 20-30 с. Конструкція стенда передбачала установку двох дисків - зміцнюваного і того, що створює вібрацію на ріжучу кромку. Перед вібраційною обробкою диск піддавали піскоструминній обробці за загальноприйнятими режимами.

Для дослідження впливу ступеня зміцнення віброобробкою на ферит за мінімальної частки перліту використовували зразки зі сталі 10. Сталь, згідно з Міждержавним стандартом, містить, %: 0,07-0,14 С, 0,05-0,17 Si, 0,35-0,65 Mn, до 0,15 Cr, решта залізо. Досліджені зразки належали одній плавці та містили, %: 0,10 С, 0,05 Si, 0,45 Mn, 0,05 Cr (рис. 3.1). Оцінку ступеня зміцнення такої сталі віброобробкою проводили на поверхні циліндричного зразка.

Під час проведення зміцнення вібраційним методом використовували оптичну, електронну мікроскопію, а також новий підхід оптико-математичної оцінки змін структури та локального спектрального аналізу змін залежно від відстані максимального впливу вібратора.

На першому етапі, методика передбачала мікроструктурний аналіз, який проводили в 7 зонах, що відповідають послідовному зменшенню ступеня деформації.

Для оцінки ступеня зміцнення в окремих зонах відносно циклічної деформації аналізували зображення (див. рис. 3.1).

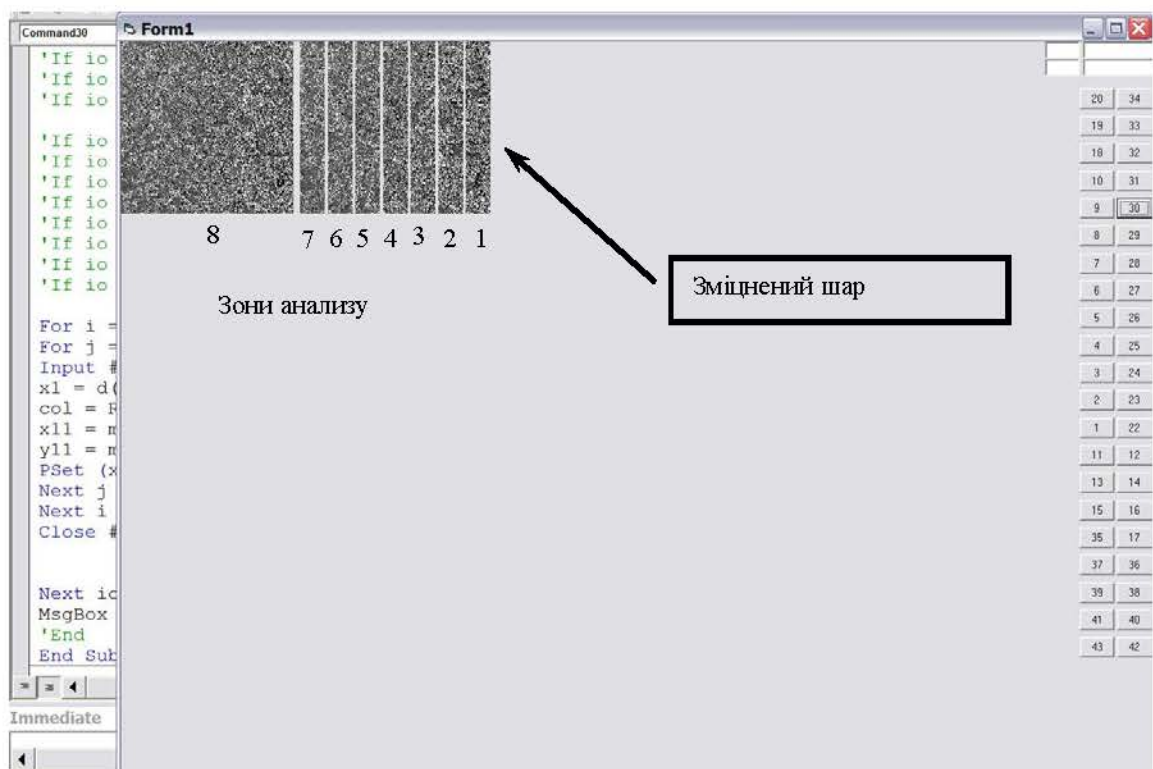


Рисунок 3.1 Схема розбивки перетину зміцненого шару на 8 зон під час оптико-математичного дослідження мікроструктури сталі 10 (зона 1 - поверхня, зона 7 - найдальша зона)

Для оцінки мікроструктур стандартні 256 кольорів розбивали на 16 груп. Номер аналізованої зони відповідає відстані від вібратора вглиб зразка. Встановлено, що кількість недеформованого фериту (номер кольору 1) підвищується до

глибини 100 мкм від 10,6% до 15,1% у середньому з інтенсивністю 0,45% на кожні 10 мкм збільшення відстані від вібратора. Надалі, до глибини 500 мкм від вібратора, інтенсивність знижується до 0,28% на кожні 10 мкм і на глибині, де вібраційний вплив відсутній, становить 40,2% недеформованого фериту. Така кількість структурної складової відповідає металу у похідному стані після прокатки. Для слабкодеформованого фериту (номер кольору 5) характерне збільшення його вмісту на 25% до екстремуму на глибині 100-200 мкм (вміст становить 7,9%) і поступове зниження до 0,8% в основному недеформованому вібратором металі. Такий екстремум може бути пояснений наявністю більшого вмісту фериту (номер 6) на глибині до 100 мкм від вібратора, який має дещо більшу величину деформації порівняно з попереднім. Такий слабкодеформований ферит має максимальний вміст 44,7% біля поверхні на глибині до 50 мкм, а зі збільшенням відстані від вібратора на кожні 10 мкм інтенсивність вмісту фази зменшується на 0,62% аж до 1,7% для основного металу. Аналогічна тенденція характерна і для деформованого фериту, декорованого вуглецем - його вміст знижується зі збільшенням відстані від індентора на кожні 10 мкм з інтенсивністю 0,17% для номера 10 та ще більш інтенсивно 0,21% для номера 11. Велика частка декорованого вуглецем деформованого фериту в поверхневому шарі (до 9,5% і 16,8% відповідно) добре узгоджується зі збільшенням вмісту карбідної фази в міру збільшення глибини. Вібраційна обробка сприяє дробленню карбідної суміші у складі перліту, причому найбільш інтенсивним є руйнування менш стабільної карбідної фази Fe_xC_y , ніж більш близької до стехіометричного складу Fe_3C . Підвищення вмісту карбідної суміші Fe_xC_y , як порівняти з Fe_3C , під час збільшення відстані від індентора інтенсивніше в 5,1 раза (0,32% на 10 мкм для номера 15 і 0,06% на 10 мкм для номера 16).

Порівняння структур зміцненого шару (зона 1) із зоною 7 показує, що біля поверхні міститься значна частка деформованого фериту, декорованого вуглецем (у 5 разів вища, ніж без обробки). Порівняно з вихідною структурою - 3,8% виявлено дуже багато деформованого фериту, декорованого вуглецем - 27,2%.

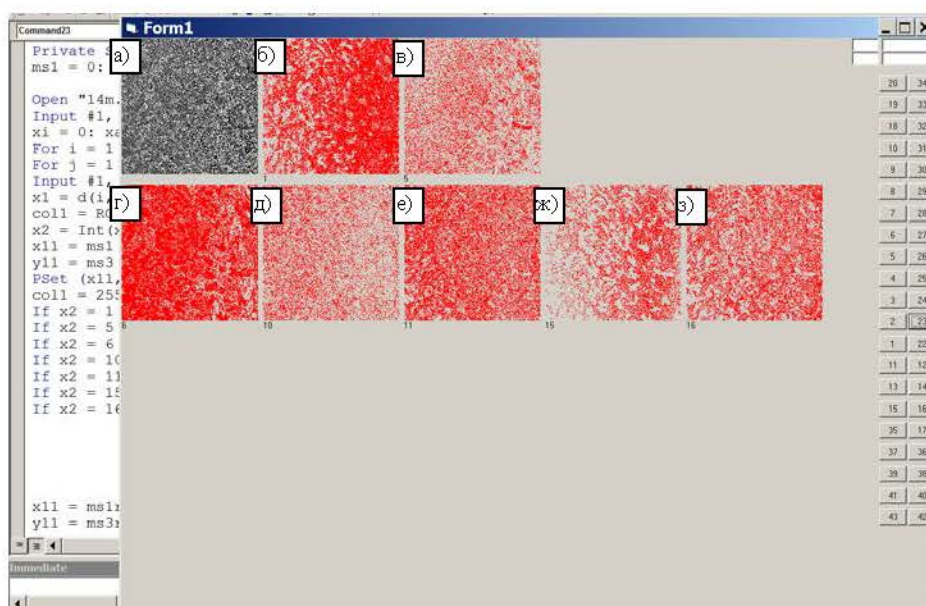


Рисунок – 3.2 Гістограма розподілу кольорів у досліджених зонах зміцненого шару: а - вихідне зображення (№1-16, градації кольору 0-255); б - недеформований ферит (№1, градації кольору 8-24); в - деформований ферит (№5, градації кольору 59-75); г - деформований ферит (№6, градації кольору 76-92); д - деформований ферит декорований вуглецем (№10, градації кольору 144-160); е - деформований ферит декорований вуглецем (№11, градації кольору 161-177); ж - карбідна суміш у складі перліту (№15, градації кольору 229-245, Fe_xC_y); з - карбідна суміш у складі перліту (№16, градації кольору 246-255, Fe_3C).

На рис. 3.2 а показано вихідне зображення. Зони недеформованого фериту (див. рис. 3.2 б) і карбідної суміші у складі перліту (див. рис. 2.1 ж-з) проявляються більшою мірою біля лівого краю в зоні без зміцнювального впливу. Водночас для деформованого фериту характерний підвищений вміст вуглецю біля деформованого - правого краю (підвищення його частки становить більш ніж у 2 рази).

На графіках рис. 3.3 показано гістограми розподілу фаз за аналізованими зонами. Виявлено горизонтальний майданчик у зонах 2 - 3 на відстані 150-180 мкм від поверхні вібраційного оброблення. Вона присутня у функцій, які будуть розглянуті нижче. У раніше виконаних дослідженнях [5] було показано, що така циклічна пластична деформація в цій зоні сприяє дробленню зерна, формує у фериті впорядковану дислокаційну структуру (дислокаційні сітки і смуги). Можна

припустити, що під час впливу циклічної деформації, що відповідає 12,5-15,2 кН, у маловуглецевій пластичній сталі можливий розвиток фазових перетворень. У такому разі є досвід щодо фазових перетворень без переходу в аустенітну сферу у виробках, що працюють в умовах впливу значних питомих тисків (робочий шар прокатних валків). При цьому наявність пошкоджуваності кристалічної решітки визначається появою нестационарних карбідів і твердими розчинами у фериті, а також виділеннями на сформованих дефектах.

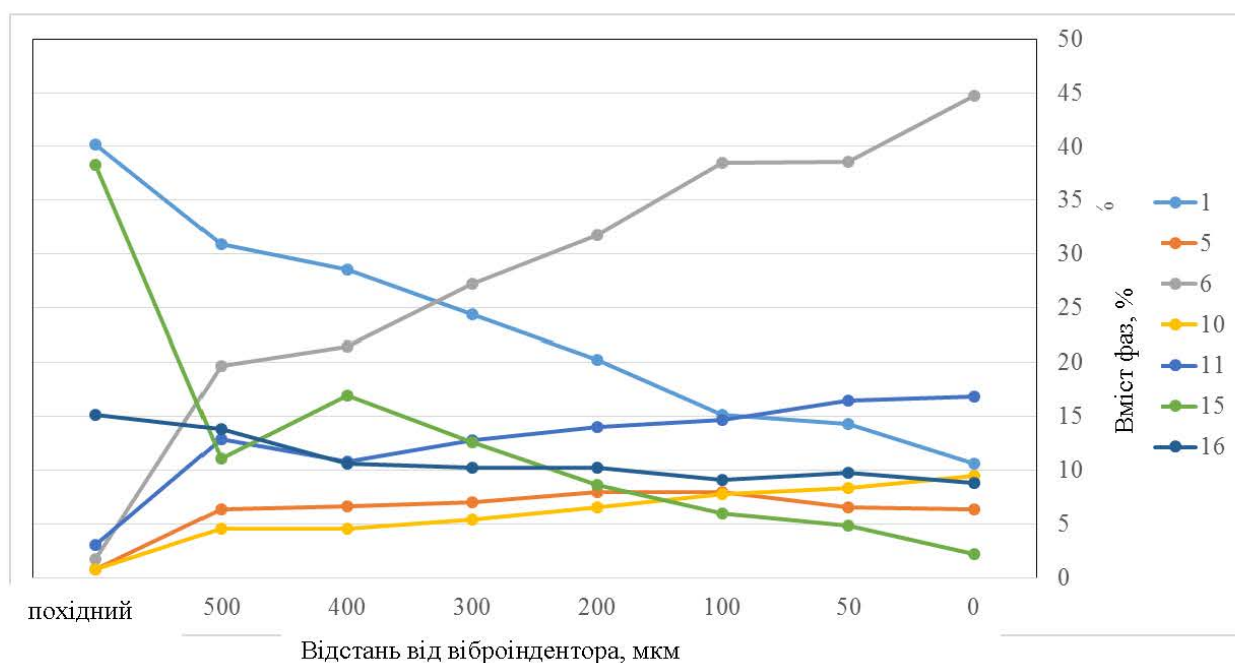


Рис. 3 Зміна фаз (кольорів) за перерізом зміцненого шару (1-16 діапазон фаз)

Оцінкою гістограм встановлено, що за шарами зміцнення найістотніше змінюється відсотковий вміст кольорів 1 і 6 (це ферит з різним ступенем пошкоджуваності та виділенням на дефектах вуглецю). Сумарний вміст цих кольорів змінюється в межах 8%. Для деформованого фериту, декорованого вуглецем (10-й стовпчик) максимальний вміст характерний для зміцненої поверхні (зміна становить 42%) щодо вихідного стану. Для карбідної суміші у складі перліту з кольорами 11 і 16 зміни у вмісті вуглецю становлять практично 60%. Між усіма описаними змінами у вмісті фаз існують регресійні залежності. Порівняння останнього 7-го рядка з гістограмою кольорів зразка Ст. 10 за цією зоною (зона 8) показує, що

навіть такий віддалений від поверхні зміцнений шар істотно відрізняється. По-перше, через те, що в ньому в 24 рази більше деформованого фериту, декорованого вуглецем, по-друге, як впливає з табл. 2, сумарний відсотковий вміст фериту істотно більший, ніж у вихідному в середньому в 2,08 рази, а карбідної суміші - істотно менший (у середньому 4,85 рази).

Будова карбідної суміші в складі перліту вихідного металу і зміцненого також відрізняються між собою за 15-м і 16-м кольорами. Це пов'язано з тим, що стабільність карбідів перліту під час вібронавантаження істотно відрізняється від виробництва прокату - під час віброобробки перліт втрачає вуглець. Причому енергетична насиченість цих шарів практично збігається.

З наближенням до найбільш зміцненої зони сумарний вміст карбідної суміші зменшується з 53,4% до 11% (рис. 3.4), а сумарний вміст фериту різного ступеня зміцнення і декорованого вуглецем збільшується.

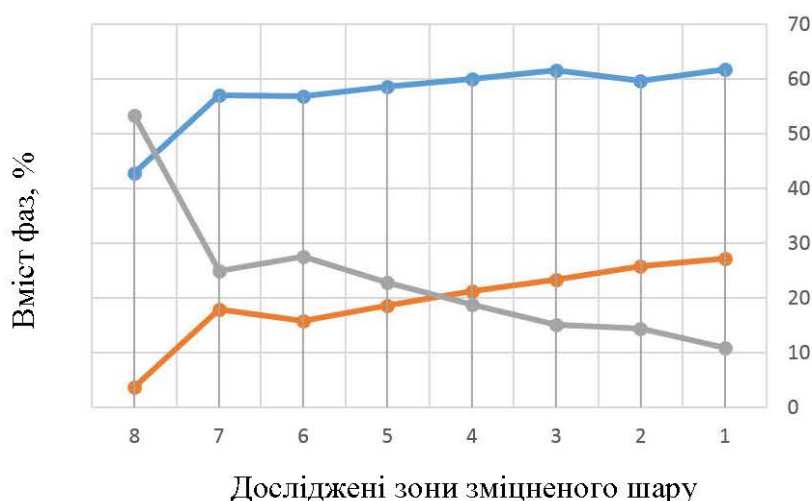


Рисунок 3.4 – Зміна фазового складу за перерізом зміцненого шару: синій колір – недеформований та деформований ферит; помаранчевий колір – деформований перліт, декорований вуглецем; сірий колір – карбідна суміш у складі перліту

Розподіл кольорів по полю фотографії зміцненого шару наведено на рис. 3.5.

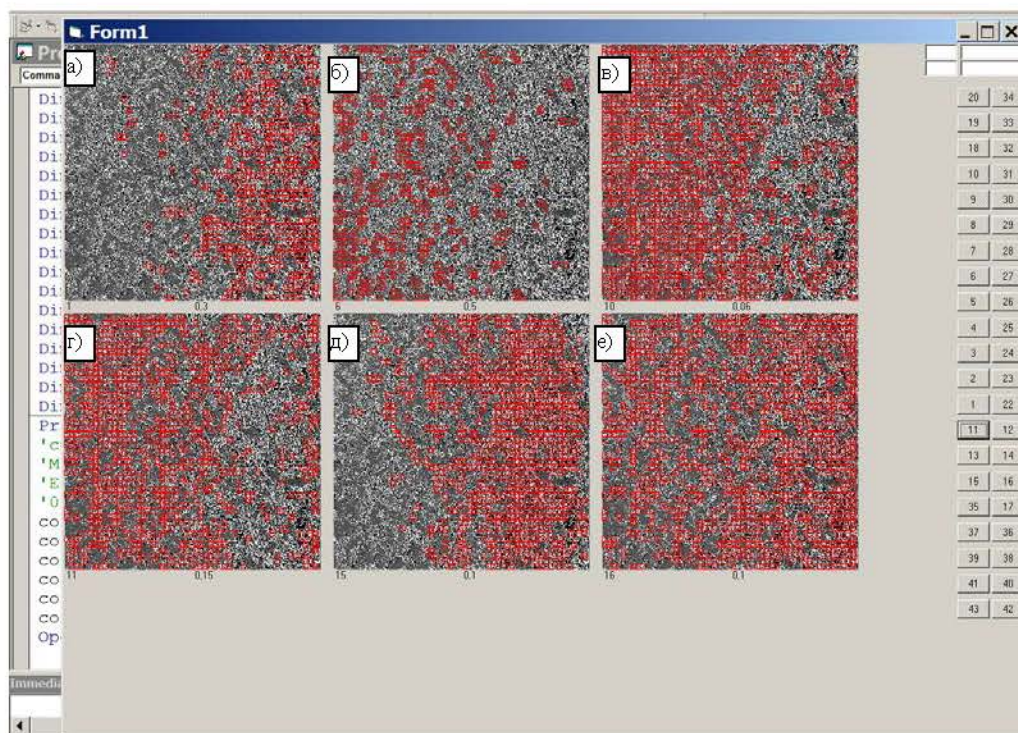


Рисунок 3.5. – Гістограма розподілу кольорів, що найінтенсивніше змінюються, у досліджених зонах зміцненого шару: а - недеформований ферит (№1 понад 30%, градації кольору 0-7); б - деформований ферит (№6 понад 50%, градації кольору 76-92); в - деформований ферит декорований вуглецем (№10 понад 6%, градації кольору 144-160); г - деформований ферит декорований вуглецем (№11 понад 15%, градації кольору 161-177); д - карбідна суміш типу Fe_xC_y у складі перліту (№15 понад 10%, градації кольору 229-245); е - карбідна суміш типу Fe_3C у складі перліту (№16 понад 10%, градації кольору 246-255).

Зверху вниз, зліва направо червоним кольором позначено квадрати, отримані під час сканування 10×10 пікселів, у яких серед 100 точок є такі, колір яких і його частка підписані під малюнком. Наприклад, (див. рис. 5, а), у верхньому лівому кутку під малюнком написано 1 і 0,3. Це означає, що червоним кольором відмічені ті квадратики, в яких кольору з номером 1 більше 30%.

Заздалегідь проявляється неочевидна картина, яка може характеризувати значну частку кольору 1, зміщеного в бік найбільш зміцненої зони. Колір 6, навпаки, у бік менш зміцненої. Деформований ферит, декорований вуглецем

(колір 10) зміщений у бік менш зміцненої зони, а кольори 11 і 16 розподілені рівномірно, колір 15 зміщений також у бік найбільш зміцненої.

Розраховано коефіцієнти рівнянь регресії, що характеризують залежності відсотка вмісту деформованого фериту, декорованого вуглецем (колір номер 10) від частки вмісту кожного кольору.

Так, для кольору 1 рівняння регресії ($R^2 = 0,99$)

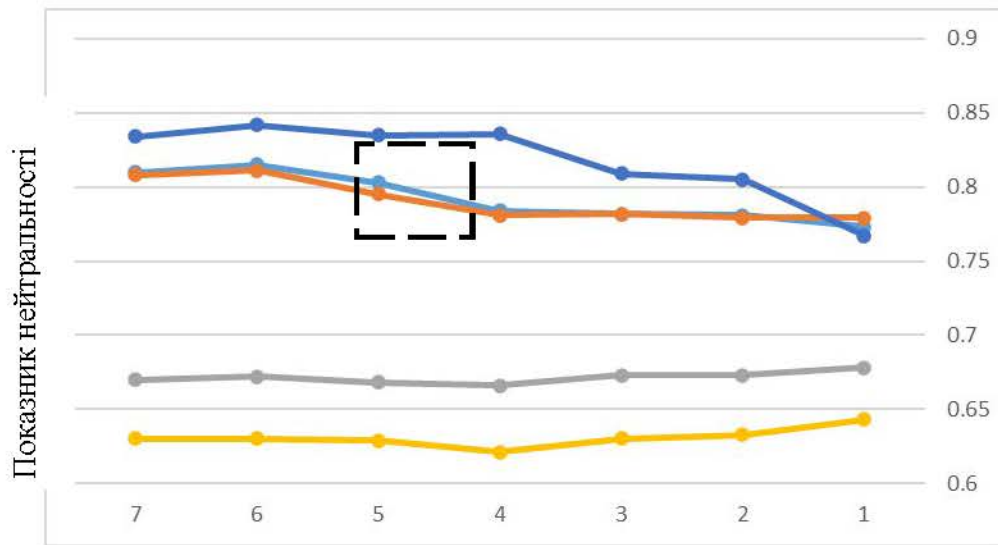
$$Y = 46,37 - 3,88 \times X_1, \quad (3.1)$$

де Y - частка вмісту фази, %, X_i - частка кольору, %. Значення індексу i відповідає номеру кольору.






Коефіцієнти кореляції найвищі для 1-го, 6-го, 11-го, 12-го і 15-го кольорів. Для 5-го кольору практично немає зв'язку з 10-м. Це визначається тим, що у кольору номер 5 практично не відмічається його зміна у змісті за зонами. У раніше виконаних дослідженнях [6] до кольору 2 входить складова, що являє собою точковий графіт. Коефіцієнт кореляції становить 0,76 у кольору номер 16, що може свідчити про близький склад карбідної фази до Fe_3C .

Розглянемо середні значення функцій у 7 аналізованих зонах.

Залежності основного Лапласіана і під кутом 90° мають слабо виражений майданчик у зоні 2-3 (рис. 3.6). Другі 2 нейтральності майже постійні. Виходячи з розрахунків, нейтральність може визначатися зміною коерцитивної сили або дифузії. Для зміцненого шару дифузія виражена слабо.



Досліджені зони зміцненого шару

Рисунок 3.6 – залежності зміни показників нейтральності:  – основний Лапласіан;  – Лапласіан під кутом 90 до основного;  – 3-й Лапласіан;  – 4-ий Лапласіан;  – дивергенція.

На рисунок 3.7 представлено середню неоднорідність за 7 зонами зміцненого зразка, оцінену за зміною ступеня нейтральності.

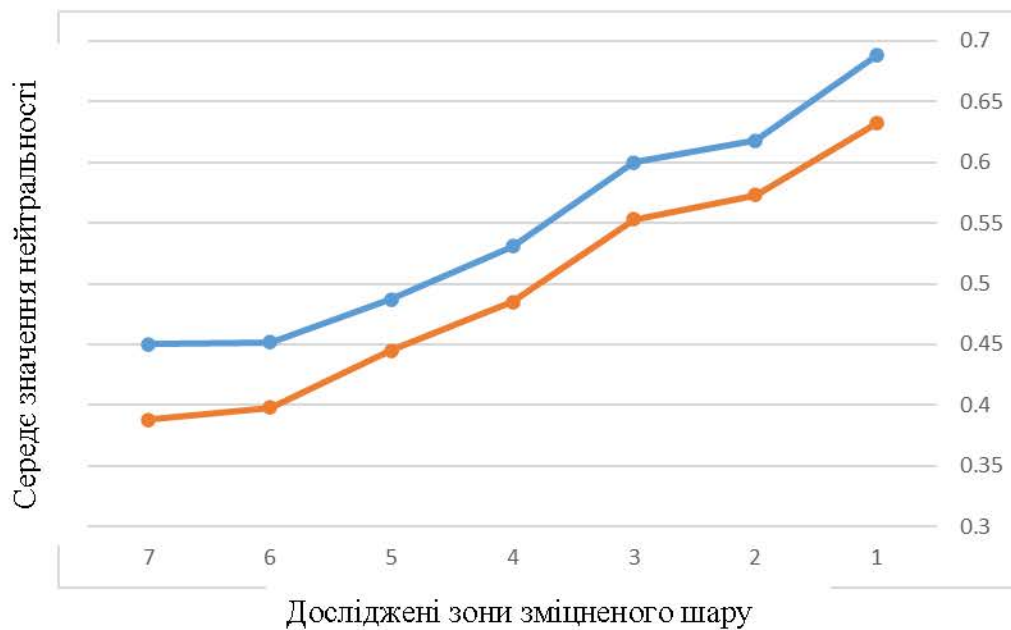




Рисунок 3.7 – Зміна ступеня неоднорідності за перерізом зразка:  – усереднено по горизонталі;  – усереднено по вертикалі;

У міру наближення до зони максимального зміцнення однорідність значно падає. У ній збільшується дифузія вуглецю з утворенням різних поєднань кольорів. Проявляється утворення майданчика між другим і третім шарами, що харак-

теризують підвищену щільність дислокацій. Наявність рівних майданчиків свідчить про те, що ці зони характеризуються найбільшою стабільністю фазового складу, який визначає властивості зміцненого шару.

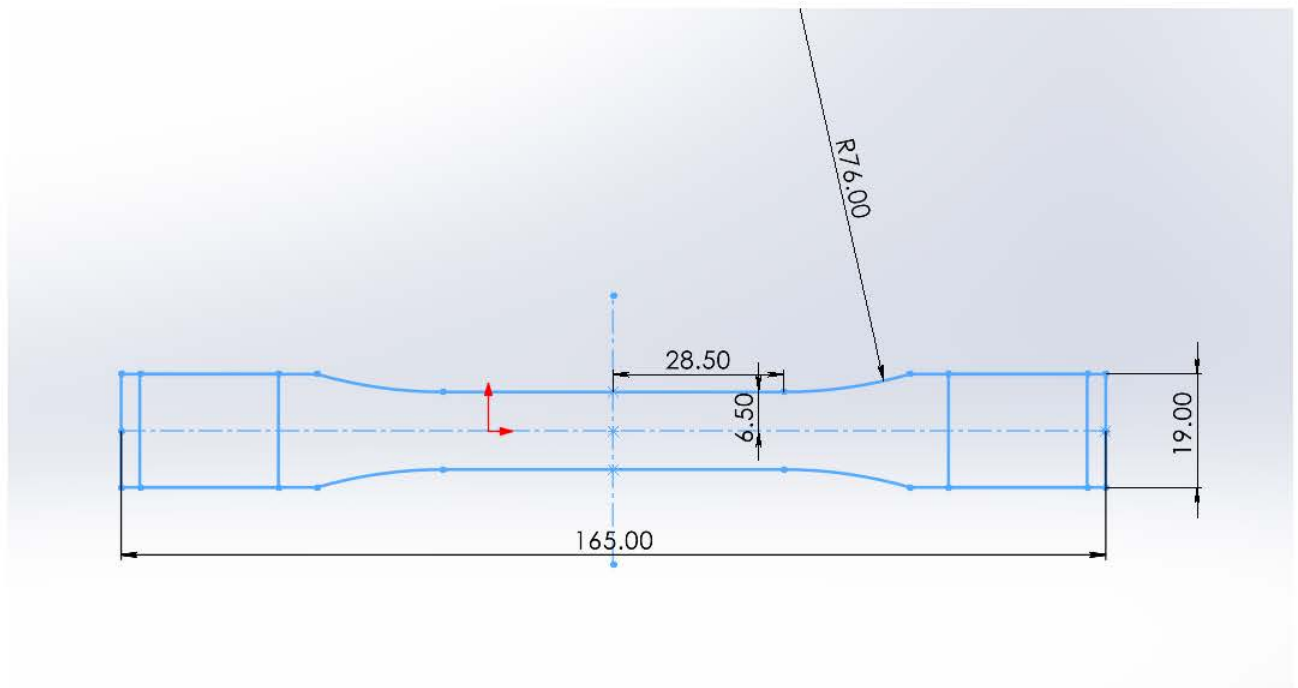
На рис. 8 представлено середні показники абсолютної величини Лапласіана й абсолютної величини дивергенції. У міру наближення до самої зміцненої зони, де мікротвердість фериту підвищується від $H_{\mu} = 138-148$ до $H_{\mu} = 170-180$, а перліт дещо знеміцнюється з $H_{\mu} = 190-221$ до $H_{\mu} = 198-208$, ці показники знижуються в півтора рази. Також формується рівний майданчик між зонами 2 і 3, а також 6 і 7. На графіку середня абсолютна величина 3-го Лапласіана (синя лінія) і середня абсолютна величина 4-го Лапласіана (червона лінія). У міру наближення до самої зміцненої зони ці величини знижуються не менше, ніж у півтора рази.

3.2 Встановлення характеру розподілу напружень та деформацій при пластичному деформуванні матеріалу

Для встановлення характеру розподілу напружень та деформацій при пластичному деформуванні матеріалу вирішували нелінійну задачу пластичності, яка полягає в дослідженні поведінки матеріалів під дією навантажень, що перевищують межу текучості $\sigma_{0,2}$. Нелінійна задача пластичності зосереджується на вивченні механізмів деформування та руйнування, що відбуваються після того, як матеріал вийшов за межі своєї пружної області.

Розрахунок проводили в декілька етапів. Спочатку була підготовлена 3D-модель об'єкта дослідження в SolidWorks. В якості моделі було прийнято зразок для випробувань II типу (ASTM D638 – Type II). Встановили закономірності зміни пластичності при збільшенні навантаження на зразок (рис. 3.9)

Далі виконали закріплення зразків, відповідно до умов, характерних для випробувальної машини для випробувань (3.10).



а)



Model name: 02_ASTMD638
Current Configuration: Default

б)

Рисунок 3.8 – Розрахункова геометрична модель плоского зразка для проведення симуляції: а – геометричні параметри; б – 3D-модель з зонами захвату машини для випробувань Маса зразка: 0.0452175 кг; об'єм: $5.74555e^{-06}$ м³; Density: 7,870 kg/m³; Вага: 0.443 N


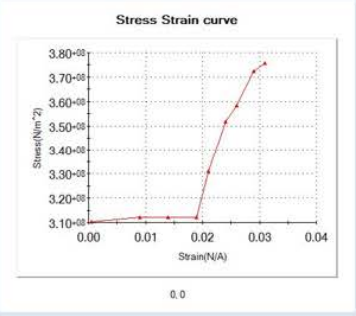
Model Reference	Properties	Components
	Name: AISI 1015 Steel, Cold Drawn (SS) Model type: Plasticity - von Mises Default failure criterion: Unknown Yield strength: 3.25e+08 N/m ² Hardening factor (0.0-1.0; 0.0=isotropic; 1.0=kinematic): 0.85 Elastic modulus: 2.05e+11 N/m ² Poisson's ratio: 0.29 Mass density: 7,870 kg/m ³ Thermal expansion coefficient: 1.2e-05 /Kelvin	SolidBody 1(Split Line2)(02_ASTMD638)
Curve Data:  <p>Stress Strain curve</p>		

Рисунок 3.9 – Властивості пластичності матеріалу плоского зразка для проведення симуляції

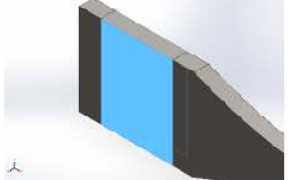
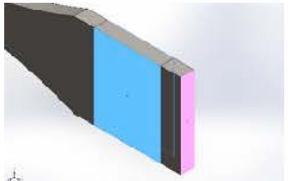
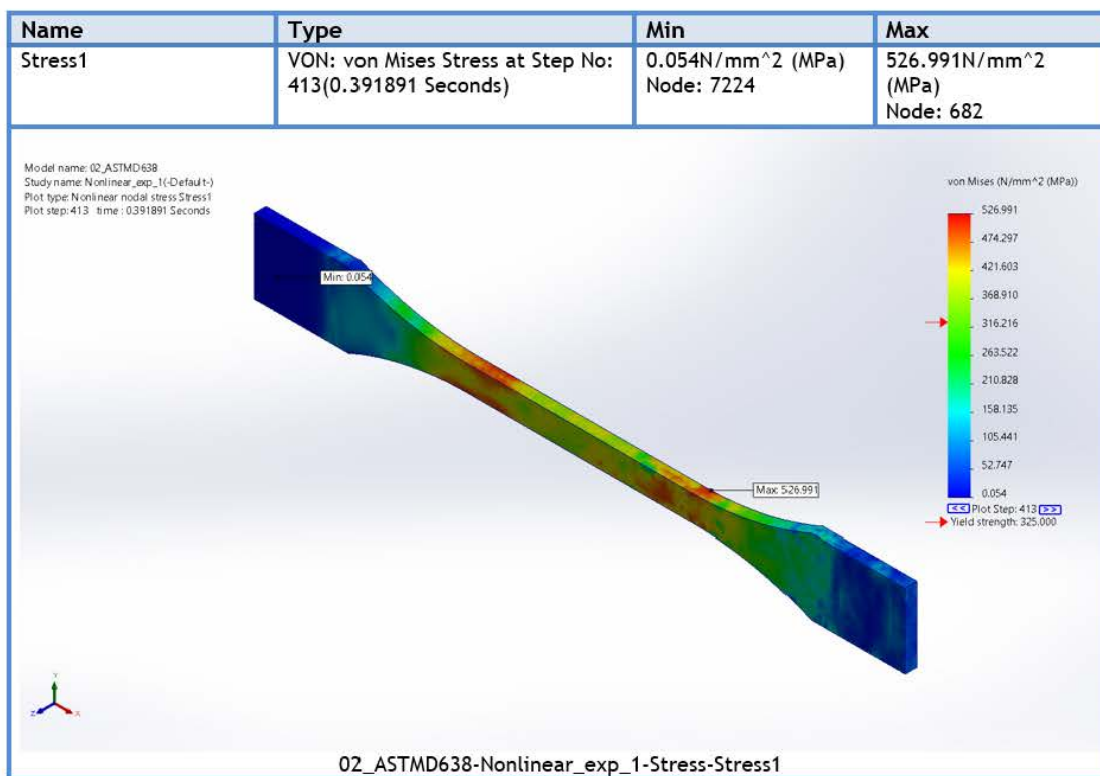
Fixture name	Fixture Image	Fixture Details															
Fixed-1		Entities: 2 face(s) Type: Fixed Geometry															
Resultant Forces <table border="1"> <thead> <tr> <th>Components</th> <th>X</th> <th>Y</th> <th>Z</th> <th>Resultant</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Reaction force(N)</td> <td>-5,281.69</td> <td>-353.923</td> <td>84.7046</td> <td>5,294.22</td> </tr> <tr> <td>Reaction Moment(N.m)</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>			Components	X	Y	Z	Resultant	Reaction force(N)	-5,281.69	-353.923	84.7046	5,294.22	Reaction Moment(N.m)	0	0	0	0
Components	X	Y	Z	Resultant													
Reaction force(N)	-5,281.69	-353.923	84.7046	5,294.22													
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	0													
Reference Geometry-1		Entities: 2 face(s) Reference: Face < 1 > Type: Use reference geometry Translation: ---, ---, -30 Units: mm															
Resultant Forces <table border="1"> <thead> <tr> <th>Components</th> <th>X</th> <th>Y</th> <th>Z</th> <th>Resultant</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Reaction force(N)</td> <td>6,642.12</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>6,642.12</td> </tr> <tr> <td>Reaction Moment(N.m)</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>			Components	X	Y	Z	Resultant	Reaction force(N)	6,642.12	0	0	6,642.12	Reaction Moment(N.m)	0	0	0	0
Components	X	Y	Z	Resultant													
Reaction force(N)	6,642.12	0	0	6,642.12													
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	0													

Рисунок 3.10 – Властивості пластичності матеріалу плоского зразка для проведення симуляції



Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement at Step No: 412(0.391793 Seconds)	0.000e+00mm Node: 1	1.179e+01mm Node: 10

Рисунок 3.11 – Еквівалентні напруження, оцінені за критерієм Мізеса на 413 ітерації зразка (перед руйнуванням)

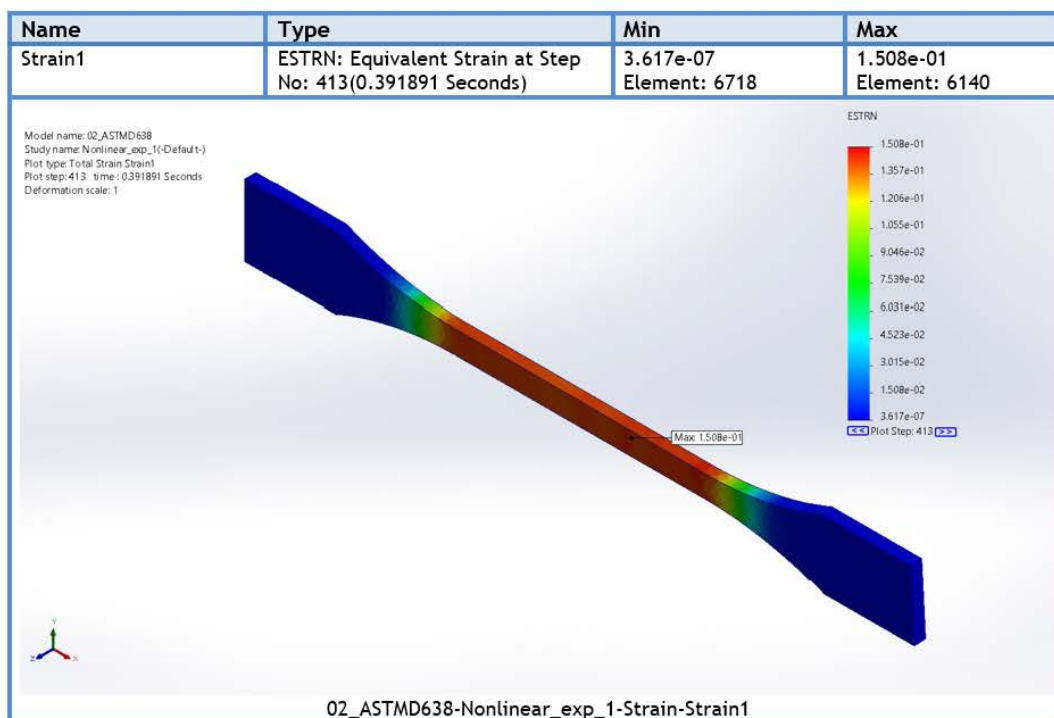
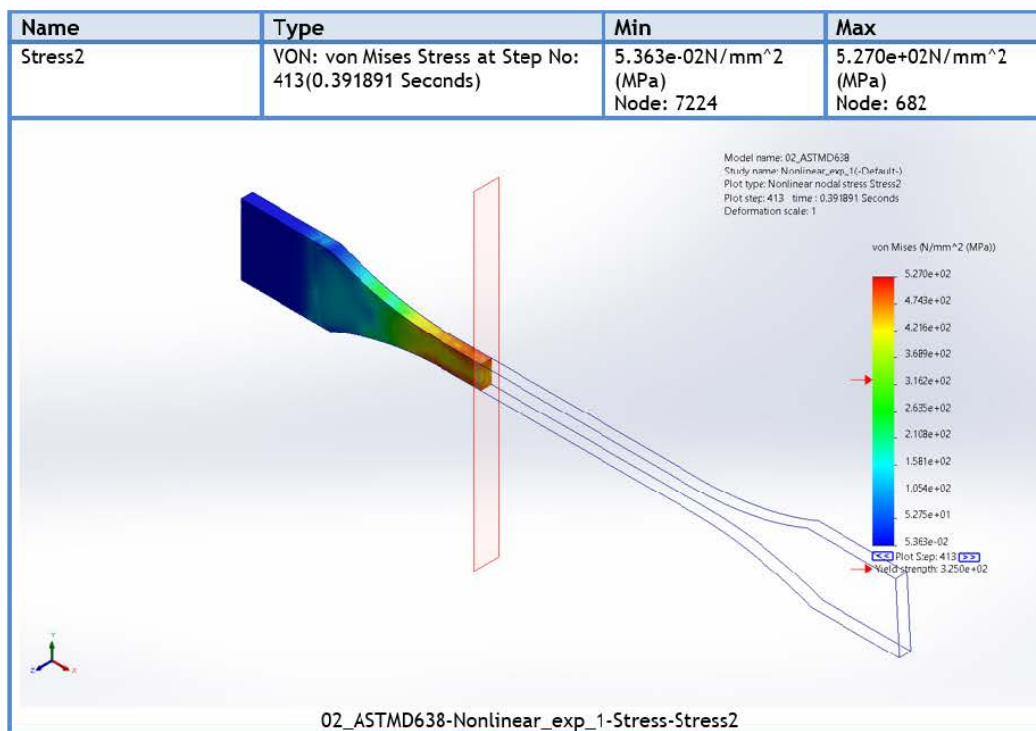
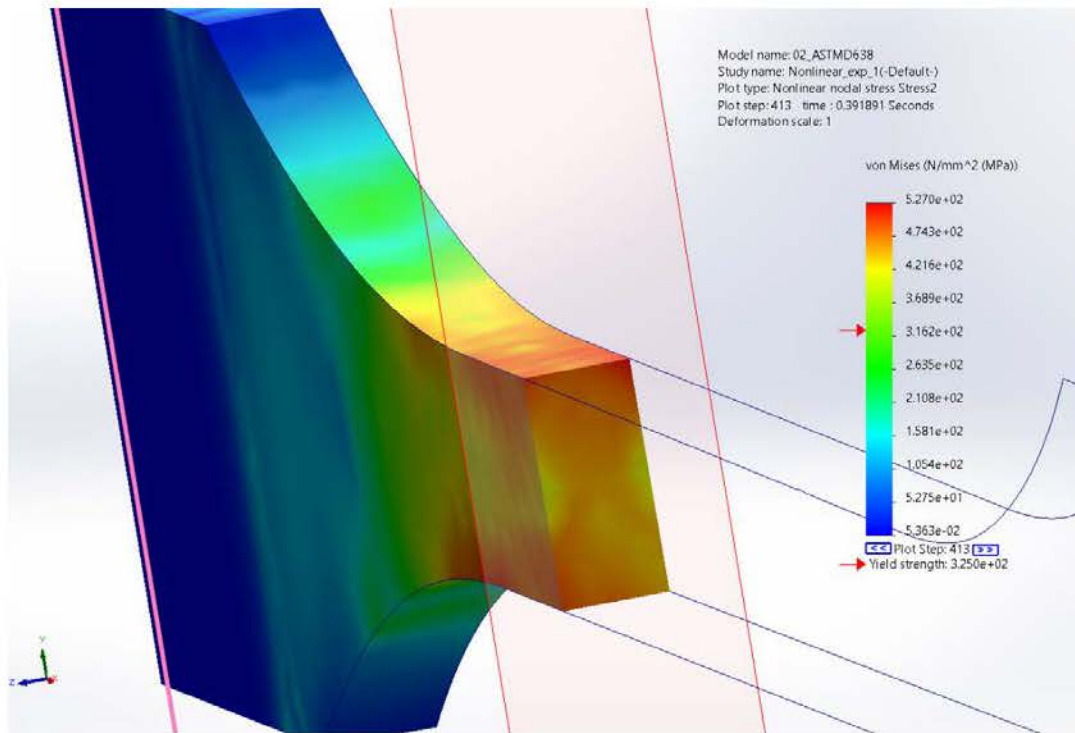


Рисунок 3.12 – Відносне подовження на 413 ітерації зразка (перед руйнуванням)



Name	Type	Min	Max
Stress3	VON: von Mises Stress at Step No: 413(0.391891 Seconds)	5.363e-02N/mm ² (MPa) Node: 7224	5.270e+02N/mm ² (MPa) Node: 682

a)



б)

Рисунок 3.13 – Перетин зразка. Еквівалентні напруження, оцінені за критерієм Мізеса на 413 ітерації зразка (перед руйнуванням): а – результат звіту програми SolidWorks Simulation; б – збільшений фрагмент перетину зразка

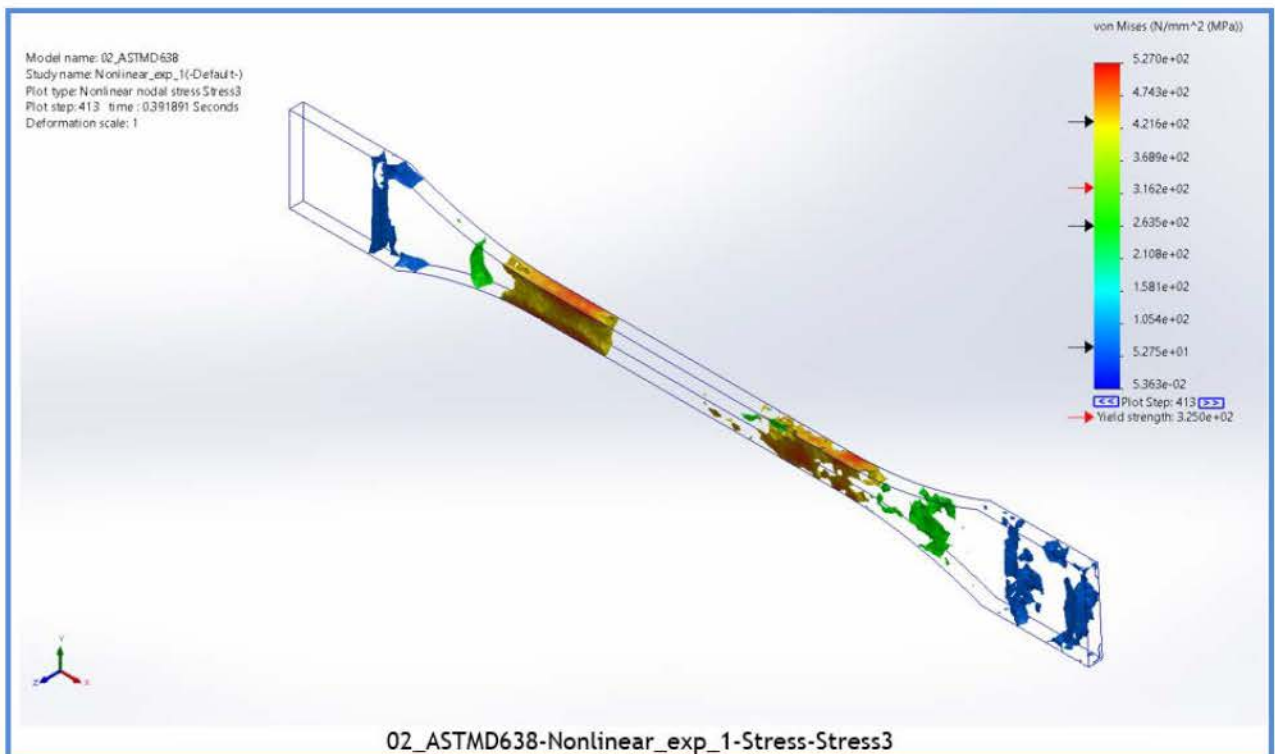


Рисунок 3.14 – Усередненні значення еквівалентних напружень, оцінених за критерієм Мізеса, найбільш типових зон прикладення навантаження на 413 ітерації зразка (перед руйнуванням)

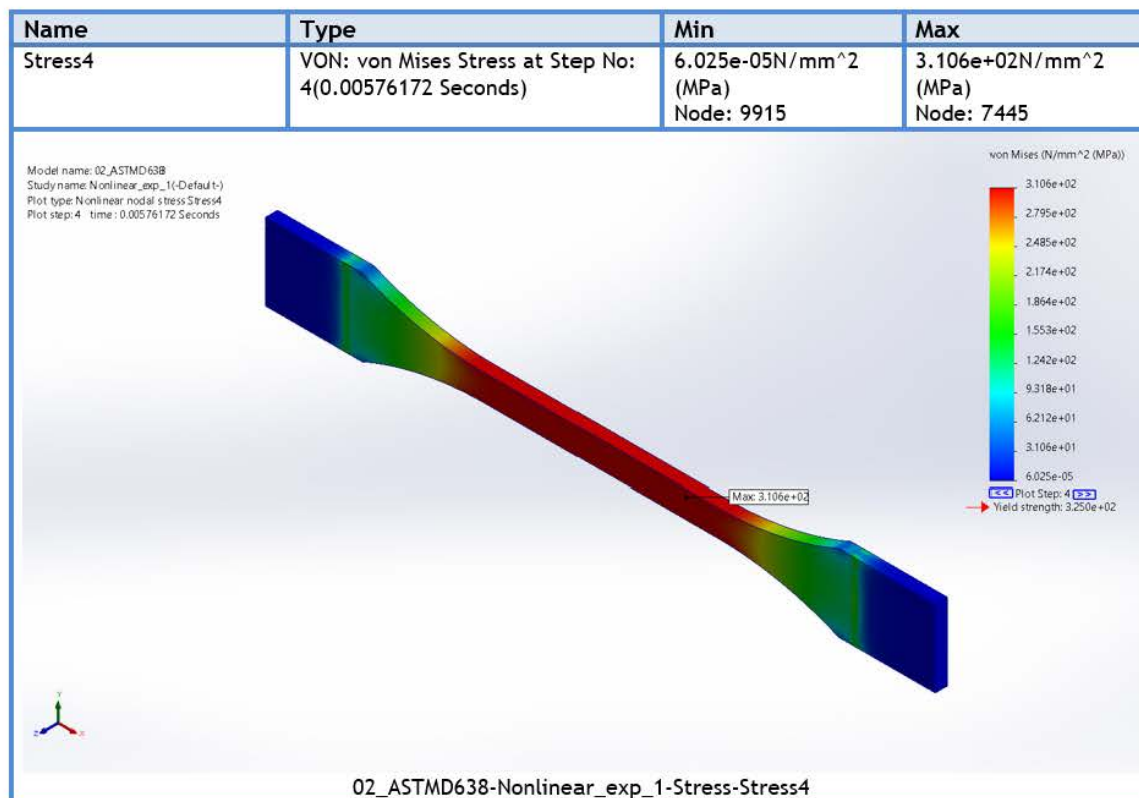


Рисунок 3.15 – Еквівалентні напруження, оцінені за критерієм Мізеса на 4 ітерації зразка (пружня область, початок навантаження)

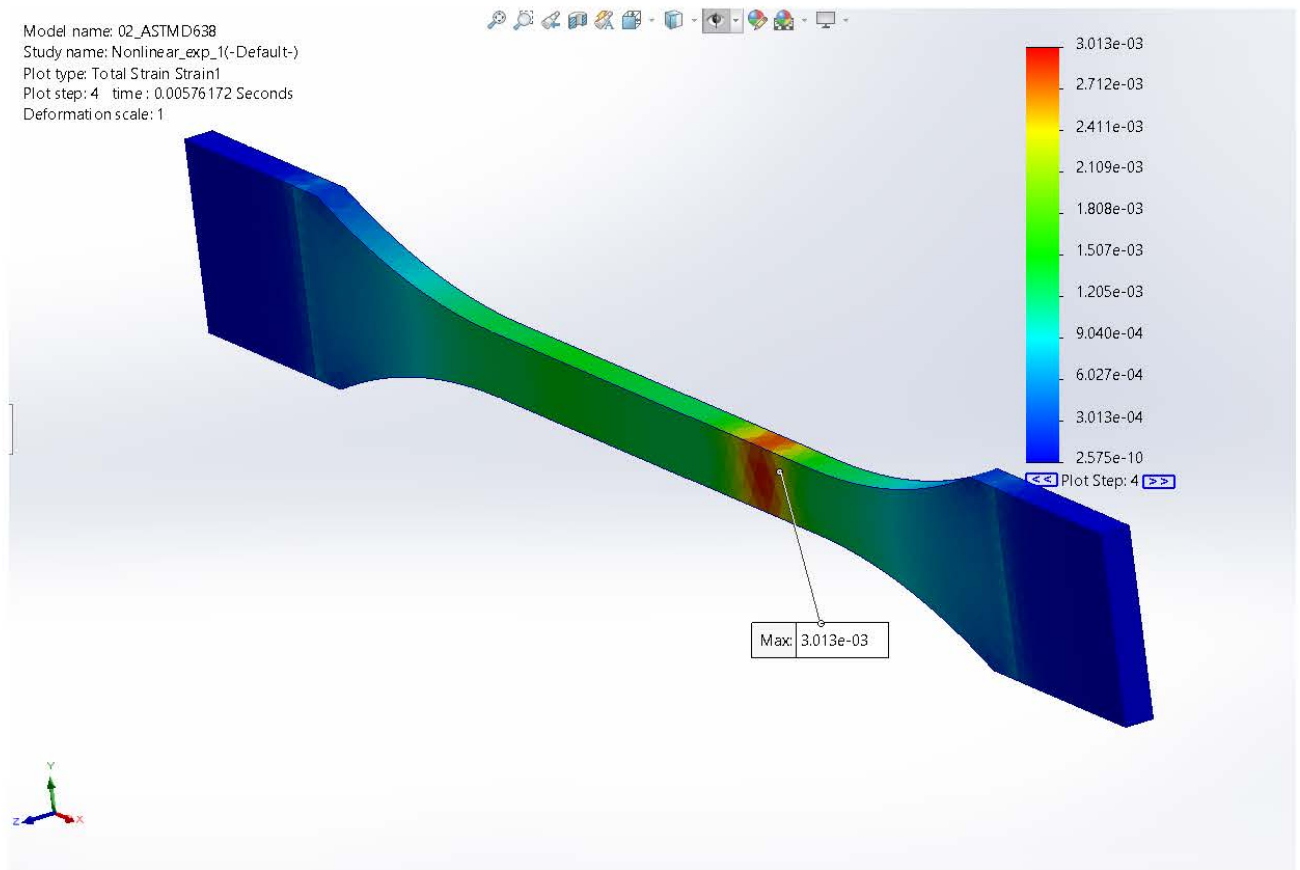


Рисунок 3.16 – Відносне подовження на 4 ітерації зразка (пружня область, початок навантаження)

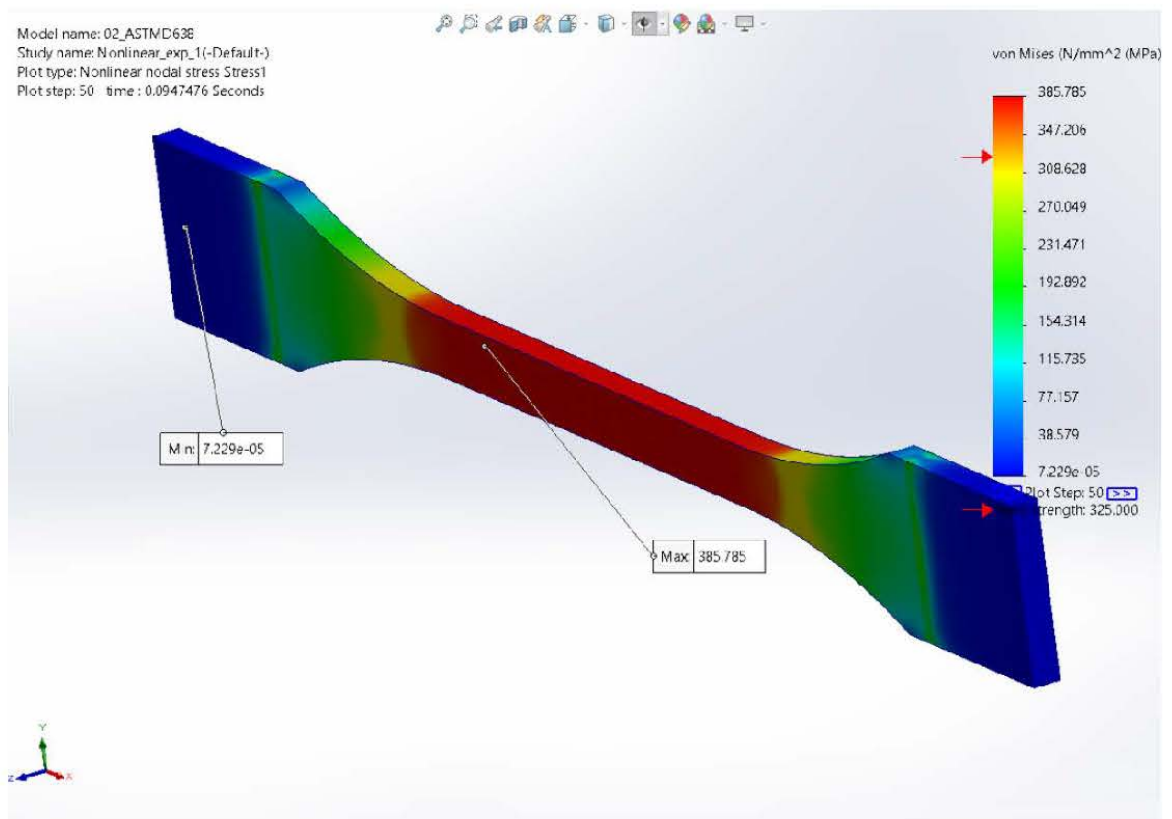


Рисунок 3.17 – Еквівалентні напруження, оцінені за критерієм Мізеса на 50 ітерації зразка (кінець пружної області)

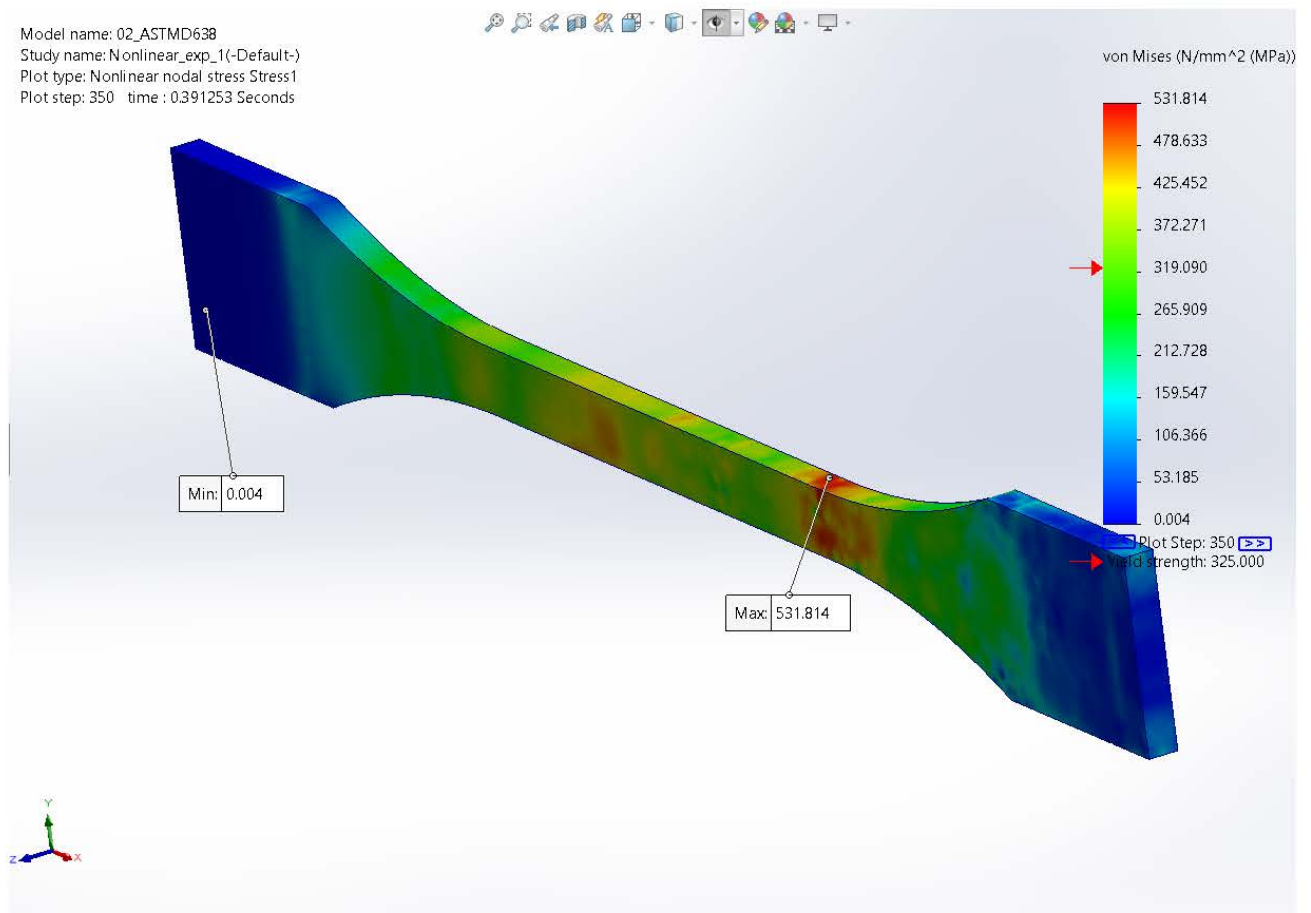
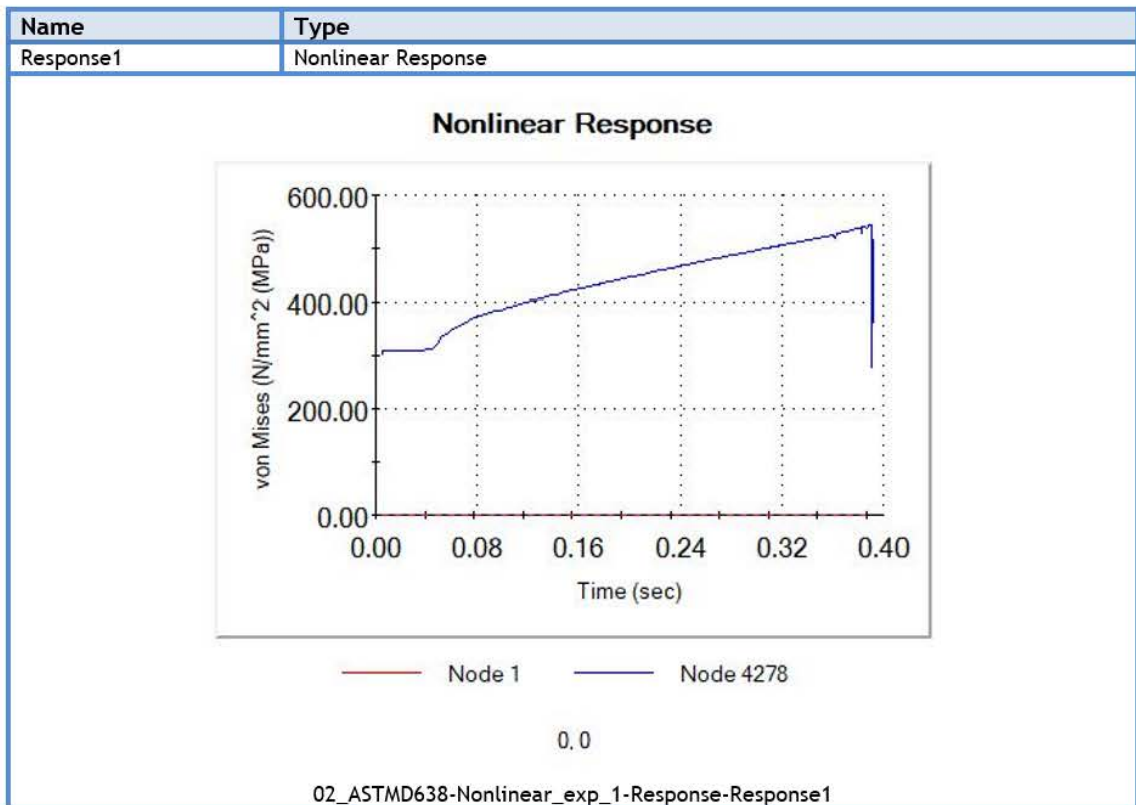
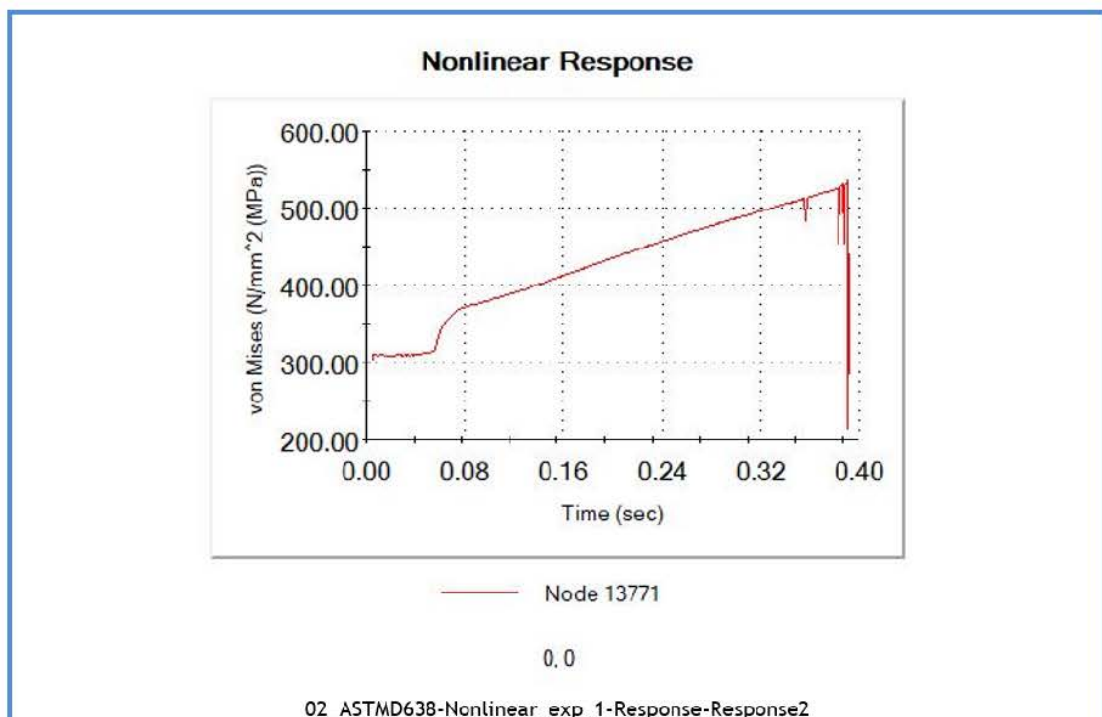


Рисунок 3.18 – Еквівалентні напруження, оцінені за критерієм Мізеса на 300 ітерації зразка

Перевищення межі пластичності (рис. 3.18) спричиняє появі локальних зон перевантаження, що, в свою чергу свідчить про можливість появи локальних мікротріщин в матеріалі.



a)



б)

Рисунок 3.19 – Крива розтягування зразку від напружень, оцінених за критерієм Мізеса: а – перший елемент; б – 13771-ий найбільш навантажений елемент.

ВИСНОВКИ:

1. В роботі проведена оцінка традиційних та нових способів нанесення покриттів, що компенсують знос робочого шару деталей сільськогосподарської техніки. Оцінена можливість використання нанесення покриття наплавленням з захистом під шаром флюсу.

2. Однією з ключових переваг методу наплавлення – є можливість комбінувати наплавлювальні матеріали. Це дозволяє комбінувати дешеву проволочку та легований флюс, або навпаки вартісний порошковий дріт та отримати суттєвий приріст у властивостях.

3. Як показали випробування на розтягування зразка в нелінійній області вже на 300 ітерації при незначному перевищенні межі текучості відбувається локалізація напружень та пластичних деформацій в окремих зонах зразка. Для локалізації такого впливу в роботі запропоновано зміцнити найбільш м'яку феритну складову вібраційною обробкою. Дослідженнями встановлено, що вібраційна обробка має суттєву неоднорідність по перетину зразка, що дозволяє керувати властивостями робочого шару. Проведення такої обробки дозволяє підвищити стійкість деталей на 25%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Mattison, R. Telecom Churn Management: The Golden Opportunity; APDG Pub: Fuquay-Varina, NC, USA, 2001.
2. Payne, A.; Frow, P. A strategic framework for customer relationship management. *J. Mark.* 2005, 69, 167–176.
3. Reinartz, W.; Krafft, M.; Hoyer, W.D. The customer relationship management process: Its measurement and impact on performance. *J. Mark. Res.* 2004, 41, 293–305.
4. Neslin, S.A.; Gupta, S.; Kamakura, W.; Lu, J.; Mason, C.H. Defection detection: Measuring and understanding the predictive accuracy of customer churn models. *J. Mark. Res.* 2006, 43, 204–211.
5. Liu, C.J.; Huang, T.S.; Ho, P.T.; Huang, J.C.; Hsieh, C.T. Machine learning-based e-commerce platform repurchase customer prediction model. *PLoS ONE* 2020, 15, e0243105.
6. Gulc, A. Multi-stakeholder perspective of courier service quality in B2C e-commerce. *PLoS ONE* 2021, 16, e0251728.
7. Abbasimehr, H.; Bahrini, A. An analytical framework based on the recency, frequency, and monetary model and time series clustering techniques for dynamic segmentation. *Expert Syst. Appl.* 2022, 192, 116373.
8. Carbo-Valverde, S.; Cuadros-Solas, P.; Rodríguez-Fernández, F. A machine learning approach to the digitalization of bank customers: Evidence from random and causal forests. *PLoS ONE* 2020, 15, e0240362.
9. Zhou, J.; Zhai, L.; Pantelous, A.A. Market segmentation using high-dimensional sparse consumers data. *Expert Syst. Appl.* 2020, 145, 113136.
10. Van den Poel, D.; Lariviere, B. Customer attrition analysis for financial services using proportional hazard models. *Eur. J. Oper. Res.* 2004, 157, 196–217.
11. Reinartz, W.J.; Kumar, V. The impact of customer relationship characteristics on profitable lifetime duration. *J. Mark.* 2003, 67, 77–99.
12. Lin, S.C.; Tung, C.H.; Jan, N.Y.; Chiang, D.A. Evaluating churn model in CRM: A case study in Telecom. *J. Converg. Inf. Technol.* 2011, 6.

13. Hwang, H.; Jung, T.; Suh, E. An LTV model and customer segmentation based on customer value: A case study on the wireless telecommunication industry. *Expert Syst. Appl.* 2004, 26, 181–188.
14. Larivière, B.; Van den Poel, D. Predicting customer retention and profitability by using random forests and regression forests techniques. *Expert Syst. Appl.* 2005, 29, 472–484.
15. Wei, C.P.; Chiu, I.T. Turning telecommunications call details to churn prediction: A data mining approach. *Expert Syst. Appl.* 2002, 23, 103–112.
16. Xia, G.E.; Jin, W.D. Model of customer churn prediction on support vector machine. *Syst.-Eng.-Theory Pract.* 2008, 28, 71–77.
17. Dietterich, T.G. Ensemble methods in machine learning. In *Proceedings of the International Workshop on Multiple Classifier Systems, Cagliari, Italy, 21–23 June 2000*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2000; pp. 1–15.
18. Van den Berg, M.; Slot, R.; van Steenbergen, M.; Faasse, P.; van Vliet, H. How enterprise architecture improves the quality of IT investment decisions. *J. Syst. Softw.* 2019, 152, 134–150.
19. Kornysheva, E.; Barrios, J. Industry 4.0 impact propagation on enterprise architecture models. *Procedia Comput. Sci.* 2020, 176, 2497–2506.
20. Kotusev, S.; Kurnia, S.; Dilnutt, R. The practical roles of enterprise architecture artifacts: A classification and relationship. *Inf. Softw. Technol.* 2022, 147, 106897.