

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: **«Дослідження поверхневого зміцнення вибухом
деталей машин, які працюють в агресивних
сільськогосподарських середовищах»**

Виконав: студент групи Маш-61

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

Шкраба Маркіян Ростиславович
(Прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент Березовецький Андрій Петрович
(Прізвище та ініціали)

)

Дубляни 2024

Міністерство освіти та науки України
Львівський національний університет природокористування
Факультет механіки, енергетики та інформаційних технологій
Кафедра машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
машинобудування
(назва кафедри)

(підпис)

професор Віталій
ВЛАСОВЕЦЬ

(прізвище, ім'я, по батькові)
“ ”

----- 20__ року

З А В Д А Н Н Я
на кваліфікаційну роботу студенту

Шкрабі Маркіяну Ростиславовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження поверхневого зміцнення вибухом деталей машин, які працюють в агресивних сільськогосподарських середовищах»

Керівник роботи к.т.н., доцент Березовецький Андрій Петрович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЛНУП від 12 вересня 2024 року №616/к-с

2. Строк подання студентом роботи до “ 10 ” 12 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: *Літературні джерела за тематикою кваліфікаційної роботи; науково-технічна, методична та довідкова література; результати патентного пошуку; законодавча і нормативна база України з питань охорони праці.*

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

4.1. Огляд літературних джерел за темою; 4.2. Методика досліджень; 4.3. Вплив обробки вибухом на малоциклову довговічність сталі; 4.4. Охорона праці та захист населення; Висновки і пропозиції; Список використаних джерел.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

Ілюстративний матеріал представити у вигляді презентації у застосунку Microsoft PowerPoint: зразки для випробувань на малоциклову втому; випробування на малоциклову втому в середовищі КАС на машині ПП-2; загальний вигляд випробувальних машин; характер зміни мікротвердості по глибині зразка сталі 20, зміцненого різним тиском хвилі: криві статичного згину зразків сталі 20, зміцнених вибуховою хвилею при різному тискові на фронті ударної хвилі; вплив тиску на фронті ударної хвилі на механічні властивості сталі 20, зміцненої вибухом; структурні зміни металу (сталь 20), зміцненого вибухом при різному тиску на фронті ударної хвилі; вплив тиску на фронті ударної хвилі на малоциклову довговічність зразків сталі 20 на повітрі (а) і в КАС (б).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		Завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3	Березовецький А. П. доц. кафедри машинобудування.			
4	Городецький І.М., к.т.н., доцент кафедри фізики, інженерної механіки та безпеки виробництва			

7. Дата видачі завдання “ 16 ” вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Огляд літературних джерел за темою	04.10.24	
2	Методика досліджень	25.10.24	
3	Вплив обробки вибухом на малоциклову довговічність сталі	15.11.24	
4	Охорона праці та захист населення	22.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	06.12.24	
6	Оформлення слайдів	10.12.24	

Студент

_____ (підпис)

— Маркіян ШКРАБА
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

— Андрій БЕРЕЗОВЕЦЬКИЙ
(прізвище та ініціали)

УДК 631.632.1

«Дослідження поверхневого зміцнення вибухом деталей машин, які працюють в агресивних сільськогосподарських середовищах»
Шкраба М.Р. – Кваліфікаційна робота. Кафедра машинобудування
– Дубляни, Львівський НУП - 2024.

56 с. текст. част., 15 рис., 3 табл., 12 слайдів, 28 джерел.

Викладено основні положення формування поверхневого шару деталей машин при різних зміцнювальних обробках і його вплив на малоциклову витривалість в агресивних середовищах.

Зміцнення вибухом збільшує механічні властивості сталі 20. При максимальному тиску 20,0 ГПа спостерігається інтенсивне двійникування і текстура зерен металу. У корозійних середовищах довговічність зростає майже в 2,5 рази порівняно з незміцненими зразками. Метод є перспективним для використання в агресивних умовах експлуатації.

Практична значимість вибухового зміцнення показала високу ефективність для підвищення довговічності сталі 20 у пружно-пластичній області циклічного навантаження, особливо в агресивних середовищах. Метод може бути використаний для деталей, що працюють у складних умовах, зокрема в сільськогосподарській техніці та машинобудуванні.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ.....	8
1.1. Вплив добрив і пестицидів на витривалість машин.....	8
1.2. Технологічні методи підвищення роботоздатності конструкційних сталей.....	9
1.2.1. Механічна обробка.....	9
1.2.2. Поверхнєве пластичне деформування.....	10
1.3. Висновки до розділу 1.....	16
2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	18
2.1. Вибір конструкційних сталей.....	18
2.2. Методи корозійного оцінювання.....	18
2.2.1. Визначення втрати маси зразка.....	18
2.2.2. Визначення глибини корозійних уражень.....	19
2.2.3. Попередня корозія.....	19
2.3. Зразки для випробувань на малоциклову втому.....	19
2.4. Робочі середовища.....	21
2.5. Висновки до розділу 2.....	21
3. ВПЛИВ ОБРОБКИ ВИБУХОМ НА МАЛОЦИКЛОВУ ДОВГОВІЧНІСТЬ СТАЛІ	23
3.1. Вплив величини тиску на фронті ударної хвилі.....	23
3.2. Зміцнення концентраторів напружень на поверхнях металевих виробів вибуховою хвилею.....	27
3.3. Вплив вибухового зміцнення на довговічність зварних з'єднань металевих виробів.....	29
3.4. Дослідження стадій втомного руйнування і утворення тріщин.....	31
3.5. Визначення залежності малоциклової довговічності сталі 20 від основних параметрів вибухового навантаження.....	39

3.6.	Визначення залежності малоциклової довговічності сталі 20 від величини тиску на фронті ударної хвилі.....	43
3.7.	Висновки до розділу 3.....	45
4.	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ.....	47
4.1.	Аналіз небезпечних факторів.....	47
4.2.	Організація охорони праці при вибухових процесах.....	47
4.3.	Санітарно-гігієнічні вимоги.....	48
4.4.	Протипожежна безпека.....	49
4.5.	Охорона навколишнього середовища.....	50
4.6.	План дій у випадку надзвичайних ситуацій.....	50
4.7.	Висновок до розділу 4.....	50
	ВИСНОВКИ.....	52
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	54

ВСТУП

На сучасному етапі виробництво сільськогосподарської продукції не обходиться без використання засобів хімізації. Це група пестицидів: гербіциди, фунгіциди, інсектициди, стимулятори росту, а також мінеральні добрива: сипучі, рідкі, суспендовані.

Широке використання цих препаратів ставить перед інженерними службами питання впливу їх на довговічність конструкцій машин, які працюють в контакт з даними середовищами.

Науковці працюють сьогодні над підвищенням довговічності тих конструкційних матеріалів, які нині використовують в будівництві машин, що піддаються корозійному впливу агресивних середовищ і циклічних навантажень. Досліджується вплив поверхневого зміцнення вибуховою, дробоструменевою обробками, холодне вальцювання, лазерна обробка, антикорозійні покриття.

Проведена нами робота над темою «Дослідження поверхневого зміцнення вибухом деталей машин, які працюють в агресивних сільськогосподарських середовищах» показала, що підвищення тиску фронту ударної хвилі, збільшення кратності вибухового навантаження, зменшення кута зустрічі хвилі з перешкодою приводить до підвищення малоциклової витривалості сталі. Підвищення витривалості стається як за рахунок факторів, притаманним методам ППД (зміцнення, залишкові напруження стиску, підвищення міцності), так і завдяки особливостям вибухового зміцнення – виникненню великої кількості двійників, створенню множинності систем ковзання, які забезпечують рівномірний розподіл деформацій. Вибухове зміцнення листової сталі з концентраторами напружень та привареними конструктивними елементами дало позитивний результат при малоциклових випробуваннях у корозійному середовищі.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ

1.1 Вплив добрив і пестицидів на витривалість машин

Сьогодні найекономічнішими, як з точки зору виробництва, так і використання, є рідкі комплексні добрива (РКД) та рідкі азотні добрива: рідкий аміак, аміакати, аміачна вода, а також суміші концентрованих розчинів карбаміду та аміачної селітри (КАС).

Із зростанням виробництва рідких мінеральних добрив зростає актуальність дослідження їхнього впливу на матеріали, з яких виготовляють техніку для виробництва, зберігання та внесення цих добрив. Паралельно з розробкою нових видів добрив створюються й спеціалізовані машини: агрегати для внесення, для транспортування рідких добрив та їхніх сумішей.

У багатьох конструкціях машин, призначених для транспортування та внесення мінеральних і органічних добрив, а також пестицидів, спостерігаються недоліки. Зокрема, деякі вузли цих машин не мають антикорозійних покриттів, а робочі органи деяких моделей виготовлені з матеріалів, які недостатньо стійкі до корозії [19]. Проте вплив рідких добрив на матеріали сільськогосподарської техніки вивчений недостатньо.

Дослідження Василенка І.М. [7] та інших авторів охоплюють корозійну стійкість вуглецевої сталі Ст3 та низки економлегованих сталей (Х18Н10Т, 08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т) у середовищах РКД марки 10-34-0 (ТУ 6-08-414-78) протягом 1000 годин за допомогою гравіметричного методу. Результати свідчать, що глибинний показник корозії змінюється залежно від тривалості експерименту, тому не може бути універсальним критерієм оцінки корозійної стійкості сталі.

Втрати ваги матеріалу спостерігалися переважно у перші 50–55 годин випробувань. Металографічний аналіз зразків показав формування захисного шару товщиною 3–4 мкм на їх поверхні, що з часом

збільшувався до 6–7 мкм. Найдоцільнішим критерієм для оцінки корозійної стійкості Ст3 є втрата металу з одиниці площі під час формування захисного шару, оскільки вагові й глибинні показники не відображають повної картини поведінки сталі у РКД.

Дослідження [13] корозійної стійкості сталі Ст3 в РКД марок 9-9-9 і 7-7-10, виготовлених на основі базового розчину 10-34-0, показали, що корозія сталі у РКД 9-9-9 перевищує відповідний показник у базовому розчині в 2–2,5 рази. У РКД 7-7-10 корозія металу ще вища через наявність хлориду калію, який уповільнює формування захисного фосфатного шару.

Мікроелементи, додані до РКД, значно впливають на корозійні характеристики. Наприклад, у розчинах з 0,7–1,0% Мо спостерігалось зростання втрат металу та глибинного показника корозії. Водночас сірчаноокислий цинк у концентрації 0,2–1,0% активізував формування захисного шару, зменшуючи втрати металу. Експерименти також підтвердили, що економлеговані сталі мають високий рівень корозійної стійкості у середовищах РКД з мікроелементами.

Випробування сталі Ст3 на межі поділу рідкої та газоподібної фаз у герметичних умовах протягом 1000 годин [14] показали, що швидкість корозії в газовому середовищі незначна, проте на межі поділу фаз утворюються значні корозійні пошкодження. У цій зоні захисний шар не формується, що призводить до утворення вогнищ корозії, а швидкість руйнування у 10–15 разів перевищує показники для рідкого середовища.

1.2 Технологічні методи підвищення роботоздатності конструкційних сталей

1.2.1 Механічна обробка. Якість поверхні металу після механічної обробки визначається мікрогеометрією, а якість приповерхневих шарів – їх структурою, міцністю, пластичністю та рівнем залишкових напружень. Мікрогеометрія поверхні відіграє вирішальну роль у витривалості сталі за

циклічних навантажень, оскільки дефекти та сліди обробки діють як концентратори напружень. Найважливішим параметром, що характеризує якість обробленої поверхні, є максимальна глибина нерівностей, оскільки вони є основними причинами зниження циклічної міцності [25].

На сучасному етапі вплив механічної обробки на витривалість конструкційних сталей розглядається комплексно, беручи до уваги як мікрогеометрію, так і стан приповерхневих шарів. Зменшення шорсткості, підвищення рівня зміцнення та стискуючих залишкових напружень сприяють покращенню витривалості сталей. Різні методи механічної обробки по-різному впливають на фізико-механічний стан металу, що визначає їх ефективність.

Особливого значення якість поверхні набуває за умов одночасного впливу циклічних навантажень і агресивного середовища, оскільки поверхня є основним каналом взаємодії матеріалу з зовнішнім середовищем. Тому питання впливу механічної обробки на фізико-механічні та електрохімічні властивості металу є надзвичайно важливим.

Дослідження [25] довели, що механічна обробка змінює фізико-механічний стан поверхні, впливаючи на хімічну стійкість і електрохімічні характеристики сталі. Нерівномірна пластична деформація створює електрохімічну гетерогенність поверхні, що підсилює корозійні процеси. Різні методи обробки формують неоднаковий рівень хімічної стійкості, що дозволяє обирати оптимальні режими обробки для зниження впливу агресивного середовища.

Таким чином, вплив стану поверхні та приповерхневих шарів металу, сформованих механічною обробкою, на малоциклову витривалість у агресивних умовах залишається недостатньо дослідженим і потребує подальшого вивчення.

1.2.2 Поверхнєве пластичне деформування. Механічна обробка спрямована на забезпечення необхідних геометричних параметрів деталей машин із певною шорсткістю поверхні, а залишкові напруження і

зміцнення приповерхневих шарів є побічним, але невід'ємним наслідком цього процесу. Для цілеспрямованої зміни фізико-механічних властивостей поверхні застосовують методи поверхневого пластичного деформування (ППД).

Методи ППД набули широкого поширення завдяки своїй ефективності. Вони змінюють фізико-механічні властивості поверхневого шару металу, підвищують його твердість, створюють сприятливий розподіл залишкових напружень, а також змінюють форму і орієнтацію кристалічних зерен у поверхневому шарі. Це підвищує опір шару до пластичної деформації та руйнування.

Щодо впливу зміцнення на підвищення циклічної міцності, дослідження однозначно підтверджують, що поверхнєве зміцнення завжди сприяє збільшенню довговічності сталі. Відомо, що зміцнені поверхні більше піддаються впливу агресивного середовища [8,10], проте загальний ефект зміцнення значно перевищує потенційні ризики. Зміцнення дозволяє нейтралізувати гострі надрізи, покращує мікрорельєф поверхні та збільшує її втомну міцність. Після ППД різко зменшується висота нерівностей, збільшуються радіуси їх заглиблень, що знижує концентрацію напружень.

Дослідження [25] показали, що при високих повторних навантаженнях (у малоцикловій області) мікрорельєф поверхні відіграє вирішальну роль, тоді як вплив залишкових стискуючих напружень стає менш значним. Це пояснюється їхньою швидкою релаксацією під час багаторазових навантажень. Автор [25] зазначає, що залишкові напруження стиску мають обмежений вплив на малоциклову витривалість конструкційних сталей, особливо при тривалих циклах навантажень.

Дослідження з використання енергії вибухової речовини (ВР) для обробки металів дозволили розробити і впровадити в промисловість перспективний і ефективний процес зміцнення металів – зміцнення

вибухом. Є ряд фундаментальних робіт з обробки металів вибухом [4-6,11-12,28].

Накопичено значний експериментальний матеріал з дослідження механічних властивостей і мікроструктури зразків різних металів і сплавів після ударної дії. Механічні властивості заліза після навантаження ударними хвилями досліджувалися Ковальчуком і Ларінім [16]. У роботі приведені вимірювання мікротвердості армко-заліза при тисках від 15,0 до 42,0 ГПа. У роботі [17] досліджені механічні властивості заліза: твердість, границі текучості, міцності, відносне видовження в діапазоні від 7,0 до 55 ГПа. Отримані криві залежності мікротвердості від тиску характерні різким збільшенням твердості в районі 13,0 ГПа, де проходить фазовий перехід. У діапазоні тиску вище фізичного переходу твердість змінюється незначно [16-17]. У роботі [20] стверджується, що в діапазоні 80,0 - 110,0 ГПа підвищення твердості не спостерігається і ці дані можуть бути пов'язані з відпалом при пластичній деформації. Одним словом, визначальним параметром відповідальним за ефективність зміцнення є величина тиску на фронті ударної хвилі, про що свідчать дані з механічних властивостей ряду маловуглецевих сталей, зміцненими ударними хвилями.

У дослідженнях на американських сталях 1020, 1040, 1095 з різними вихідними станами [1-3] спостерігалася зона підвищеної твердості поверхні металів. Твердість матеріалу в цій зоні у 1,5-2 рази переважає початкову в залежності від абсолютної величини вихідної твердості і досягала величини 300-320 Нv. Металографічна зона є зоною «множинного викривлення», яка нагадує структуру мартенситу, який утворюється в маловуглецевій сталі зміцненням з аустеніту. Викликаний ударним навантаженням фазовий перехід дозволяє отримати при нормальній температурі мартенситну структуру в залізі високої чистоти. Аналогічні результати отримали японські дослідники [5].

Механічні властивості аустенітних сталей після навантаження ударними хвилями досліджено достатньо добре. Вивчалася сталь 1X18H9T, американські сталі 301, 302, 303, 316, а також високомарганцевиста сталь Г-13 (сталь Гадфільда) [13]. Слід відмітити, що сталь Гадфільда є винятково сприятливою до всіх видів зміцнення, і вибух не став виключенням. Так, Зінченко [14], досліджуючи зміцнення сталі Г13Л з використанням литого сплаву ТГ50/50, а також пластичного ВР Г-75 ($\rho=1,5$ г/см², $D = 7,5$ км/с) після одноразового вибуху твердість підвищилася з 200 до 300 од. за Брінелем, глибина зони підвищеної твердості склала 25 - 33 мм.

Автори [9] досліджували залежність твердості, текучості, міцності і видовження від тиску в ударній хвилі в діапазоні від 8,0 до 40,0 ГПа. Порівнюючи з холодною прокаткою, ними було встановлено, що при зміцненні до однієї і цієї ж твердості, зразки після ударного навантаження мають більшу в'язкість.

У всіх аустенітних сталях зміни мікроструктури були ідентичними: плоскі скупчення дислокацій у площинах (111), які супроводжуються двійниками і дефектами упаковки при тисках вищих 12,0 ГПа. Густина двійників зростала зі збільшенням тиску, проходила через максимум, і при тиску 75,0 ГПа починала падати, що пов'язано з явищем відпуску. Показано, що структурні зміни у високомарганцевистій сталі Гадфільда такі ж, як і в аустенітних матеріалів з малою енергією дефекту упаковки. Утворюються скупчення дислокацій в площині (111), при тисках 12,5 ГПа з'являються двійники. Виняткову здатність сталі Гадфільда до зміцнення можна пояснити тим, що основна роль в цьому механізмі належить взаємодії між дислокаціями і комплексами Mn-C у твердому розчині аустеніту. Горбатенком С.Г. і ін. було теоретично і експериментально визначено межі параметрів ударних хвиль для деяких конструкційних матеріалів [9].

Рядом авторів було показано, що зміцнення вибухом приводить до підвищення густини дислокацій. Так, дослідниками [20] виявлено, що при зміцненні вибухом армко-заліза густина дислокацій зростає до $6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-1}$, що близько до середньої густини, яка досягається при звичайній пластичній деформації, тобто при вибуховому навантаженні більша частина дислокацій затримується в металі. Густина дислокацій залежить від величини прикладеного тиску:

Тиск, ГПа	9,0	9,5	11,5	15,0
Густина дислокацій	0,2	0,39	4,6	15,0

Головною особливістю мікроструктури заліза чи м'якої сталі, яка піддавалася дії ударної хвилі, є утворення механічних двійників. Двійникування є логічним результатом ударного навантаження, оскільки час, який потрібний для цього процесу, дуже короткий. Лисенко [17] розрахував, що час, який потрібний для двійникування однієї атомної площини α -заліза, складає приблизно $3 \cdot 10^{-9} \text{ с}$.

Механічні двійники утворюються при низькому тиску і густина їх росте із збільшенням його майже лінійно. Підвищення границі текучості маловуглецевої сталі при ударному навантаженні супроводжується уже малою зміною перерізу металу. Щоб створити ту саму міцність звичайним методом деформації (наприклад, при протягуванні дроту), потрібне було б обтискування із зменшенням площі поперечного перерізу біля 85% [16]. До таких висновків прийшли Дмитерко [12], досліджуючи мідь і Петренко [20] - армко-залізо.

Автори [11] зробили висновок, що енергія дефектів упаковки має значення у створенні цієї чи іншої деформованої мікроструктури. При низькій енергії дефектів упаковки є тенденція до переваги в мікроструктурі, утворюваній при ударному деформуванні, плоских нагромаджень дислокацій чи плоских дефектів (а саме, дефектів упаковки чи двійникових дефектів). При більш високих значеннях енергії дефектів упаковки є тенденція до утворення комірчастих дислокаційних структур,

чому напевно, сприяє легкість поперечного ковзання в таких матеріалах. Показано також, що густина плоских дефектів збільшується зі збільшенням тиску удару, і що комірчасті утворення в субзернах збільшуються в розмірі, а як наслідок, збільшується густина дефектів на одиницю об'єму матеріалу. У відповідності з цим можна очікувати, що механічні властивості металів, деформованих ударом, змінюються із зміною максимального тиску удару і зі зміною утвореної при цьому мікроструктури. У цій же роботі показана пряма залежність між збільшенням густини двійникових дефектів і підвищенням мікротвердості при зміні тиску удару, створюваного при вибухові для ряду матеріалів. Дані про границю текучості також підтверджують прямий зв'язок густини дефектів з механічними властивостями нержавіючої сталі 304, нікелю і міді.

У випадку нержавіючої сталі і латуні, тобто сплавів з низькою енергією дефектів упаковки (відповідно, 25 і 14 ерг/см²), механізм зміцнення при ударному деформуванні, головним чином полягає в тому, що зі збільшенням тиску створюється і підвищується густина плоских дефектів (двійникових дефектів), тоді як збільшення границі текучості в міді і нікелю, які мають більш високі значення енергії дефектів упаковки відповідно (80 і 300 ерг/см²), викликається підвищенням густини дислокаційних комірок із збільшення тиску удару. Різновидності моделей поведінки дислокацій при імпульсивній деформації вивчалися і представлені в роботах [12,16].

Хоча вивченню різних аспектів зміцнення вибухом металів приділяється дуже велике значення, однак досліджень присвячених впливу вибуху на експлуатаційні властивості сталей дуже мало. Наведено позитивний вплив вибухового зміцнення на опір сталей крихкому руйнуванню і декілька робіт про опір втомному руйнуванню. Так в роботі [28], показано, що зміцнення маловуглецевої сталі вибухом збільшує її

втомну міцність з 176 до 315 МПа, а сталь 30ХГСА після зміцнення вибухом з тиском 10 ГПа збільшила границю втоми на 28%.

Вивченню підвищення довговічності зварних з'єднань вибухового зміцнення проводилося в роботі [20]. Встановлено, що вибухова обробка зварних з'єднань підвищує границю втоми на 85%. Дослідженнями [16] проведені узагальнені дані досліджень впливу обробки вибухом на опір корозійному розтріскуванню зварних з'єднань низьковуглецевих сталей у H_2S – середовищах. Результати проведених досліджень свідчать про те, що така обробка забезпечує високу стійкість металоконструкцій. Головною причиною покращення втомних властивостей зварних зразків, зміцнених вибухом, вважають зміну викликану в кристалічній ґратці проходженням ударних хвиль. Збільшення довговічності зварних зразків, зміцнених вибухом, пояснюють також притупленням мікротріщин пов'язаних з цим зменшенням концентрації напружень, збільшенням поверхневої твердості металу, а також зменшенням залишкових розтягуючих і виникненням залишкових стискуючих напружень.

Таким чином, питання впливу вибухового зміцнення на опір втомі ще підлягає більш детальному вивченню, особливо в агресивних середовищах і при великих пружно-пластичних циклічних деформаціях (малоциклова втома), такі випробування практично відсутні.

1.3 Висновки до розділу 1

1. Дослідження корозійної стійкості вуглецевих і економлегованих сталей показали, що формування захисного шару залежить від тривалості впливу агресивного середовища. Однак універсальних критеріїв оцінки корозійної стійкості ще не розроблено.

2. Вплив механічної обробки на довговічність сталей є комплексним. Зменшення шорсткості поверхні, створення стискуючих залишкових напружень і підвищення міцності приповерхневих шарів сприяють підвищенню втомної міцності матеріалів.

3. Агресивне середовище значно підсилює вплив мікрогеометрії на витривалість сталей, тому оптимізація режимів обробки є важливим завданням для підвищення довговічності.

4. Методи ППД ефективно покращують фізико-механічні властивості поверхні, сприяючи підвищенню міцності та довговічності сталей у малоциклових і агресивних умовах.

5. Встановлено, що поверхневе зміцнення знижує концентрацію напружень та покращує мікрорельєф поверхні, що є ключовим фактором підвищення втомної міцності конструкцій.

6. Використання ударних вибухових хвиль дозволяє суттєво підвищити твердість і міцність конструкційних сталей, зокрема, шляхом формування мартенситної структури.

7. Ефективність вибухового зміцнення залежить від величини тиску ударної хвилі, що визначає рівень зміцнення та зміну мікроструктури металу.

8. Вибухове зміцнення також сприяє підвищенню стійкості зварних з'єднань до корозії та втоми, що особливо актуально для конструкцій, що працюють у агресивних середовищах.

9. Вплив рідких добрив на матеріали сільськогосподарської техніки вивчений недостатньо. Потребують подальшого дослідження механізми утворення корозії та шляхи її запобігання.

10. Вплив механічної обробки та методів зміцнення (зокрема, вибухового) на довговічність матеріалів у агресивних середовищах, що включають добрива і пестициди, потребує додаткових експериментальних даних, особливо в умовах малоциклової втоми.

2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Вибір конструкційних сталей

Для досягнення цілей цього дослідження було використано широкий спектр конструкційних сталей з різним хімічним складом. Серед обраних матеріалів — вуглецева сталь звичайної якості Ст3, вуглецеві якісні сталі марок 20, 30, 35, 45, а також високоміцні сталі 30ХГСНА, аустенітна марганцевиста сталь 45Г17Ю3, корпусні сталі 09Г2, 10ХСНД, леговані сталі типу 12ХНЗА та корозійностійкі сталі 08Х17Н6Т і Х18Н10Т.

Через дефіцит якісних високолегованих сталей та інших спеціальних матеріалів в Україні, для виготовлення сільськогосподарської техніки часто застосовуються низькосортні вуглецеві сталі. Особлива увага була зосереджена на сталі марки 20, яка стала базовою моделлю для досліджень впливу попередньої корозії та зміцнювальних обробок.

2.2 Методи корозійного оцінювання

2.2.1 Визначення втрати маси зразка. Цей метод дозволяє точно визначати рівень рівномірної корозії за формулою:

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_1}{S} \quad (2.1)$$

де m_0 - маса зразка початкова;

m_1 - маса зразка після очищення від продуктів корозії;

S - поверхнева площа зразка до випробування.

Швидкість корозії тоді буде:

$$K = \frac{m_0 - m_1}{S \cdot \tau} \quad (2.2)$$

де τ - час.

Швидкість корозії визначається в г/(м²·год).

Зважують досліджувані зразки лабораторними квадрантними вагами 4-го класу моделі ВЛКТ-500г-М, забезпечені механізмом компенсації тари.

Використовують метод втрати маси зразка, коли корозія є рівномірною і часто застосовують його при корозійних процесах мало-вуглецевих сталей.

2.2.2 Визначення глибини корозійних уражень. За нерівномірної корозії при визначенні втрати маси металу вдаються ще до одного корозійного показника, який вказує фактичну глибину корозійного ураження.

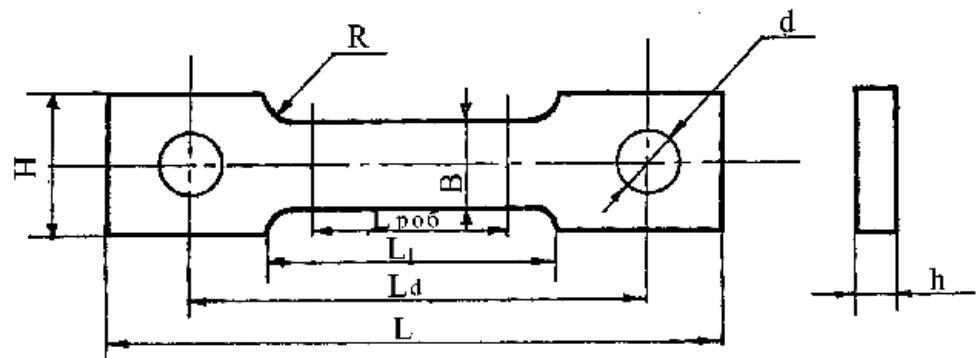
При дослідженнях вимірюють глибину корозії індикаторною головкою з пристроєм, що має можливість фіксувати вихідне положення головки. Більш наглядні результати вимірювань дають профілографи.

2.2.3 Попередня корозія. Дослідженнями на малоциклову втому зразків передбачено згідно існуючої методики визначення витривалості в циклах до поломки на повітрі і корозійному середовищі. Проте при співставленні результатів поломок зразків на повітрі і в середовищах рідких добрив чи пестицидів значення були практично однакові [15]. Пояснюється це незначним часом контакту металу з корозійним середовищем.

Проте практика використання техніки, яка контактує з корозійними препаратами, свідчить про значні негативні впливи на її роботоздатність. Тому запропонована методика попередньої корозії (ПК).

2.3 Зразки для випробувань на малоциклову втому

Випробування проводили на зразках різної товщини (2,5; 6; 12; 20 мм). Зразки включали як звичайні, так і зварні зразки, а також зразки з концентраторами напружень (рис.2.1; 2.2; 2.3).



Основні розміри (мм)				Допоміжні і габаритні розміри (мм)				
H	B	R	L _{роб.}	H	L ₁	d	L _d	L
2.5	6	10	15	12	27	8	45	57
6	30	30	77	40	110	10	130	160
12	60	60	152	70	200	20	230	320
20	100	100	70	120	110	25	270	420

Рис. 2.1. Зразки гладкі бездефектні

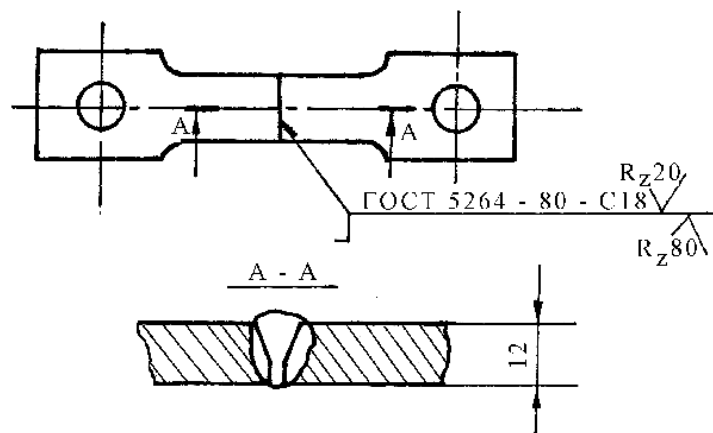


Рис.2.2. Зразки із зварним швом

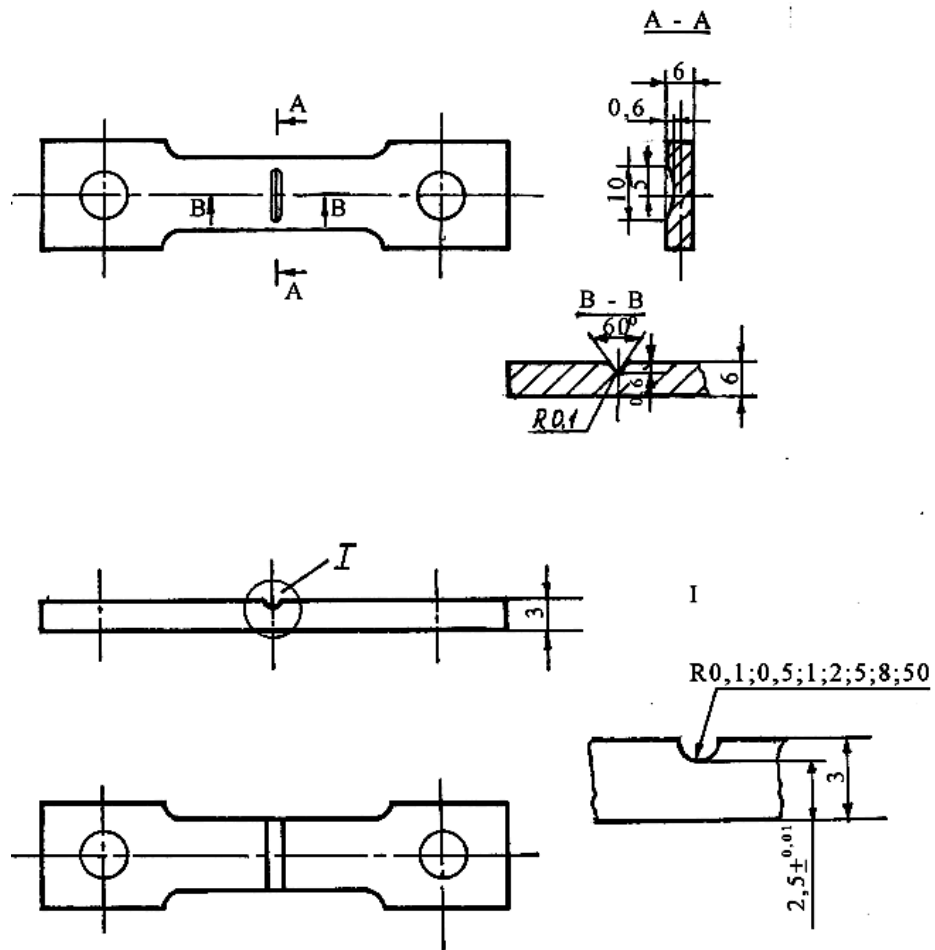


Рис.2.3. Зразки із надрізами для випробувань на малоциклову втому

2.4 Робочі середовища

Випробування проводилися у середовищах мінеральних добрив (аміачна селітра, карбамід, суперфосфат, хлористий калій) та пестицидів (інгібітори, фунгіциди, інсектициди).

2.5 Висновки до розділу 2

1. Проведено обґрунтований вибір конструкційних сталей для дослідження, який охоплює широкий спектр матеріалів з різним хімічним складом, зокрема вуглецеві, леговані, високоміцні та корозійностійкі

сталі. Особливу увагу приділено сталі марки 20 як базовій моделі для вивчення впливу корозії та зміцнювальних обробок. Враховано специфіку використання низькосортних матеріалів у сільськогосподарській техніці, що зумовлено дефіцитом високолегованих сталей в Україні.

2. Розроблено та впроваджено комплексний підхід до оцінювання корозійних властивостей сталей.

3. Випробування проводилися на зразках різної конструкції, що включали гладкі, зварні та зразки з концентраторами напружень. Дослідження враховували варіативність товщини зразків (2,5; 6; 12; 20 мм), що дозволило оцінити вплив конструктивних особливостей на стійкість матеріалів до малоциклової втоми.

4. Для моделювання реальних умов експлуатації зразки піддавали впливу мінеральних добрив (аміачна селітра, карбамід, суперфосфат, хлористий калій) та пестицидів (інгібітори, фунгіциди, інсектициди). Це забезпечило комплексну оцінку корозійної стійкості конструкційних сталей в агресивному середовищі.

5. Загалом, методика досліджень забезпечує високий рівень точності та достовірності отриманих результатів, дозволяючи ефективно оцінювати вплив корозії та циклічних навантажень на різні типи конструкційних сталей у контексті їх використання в агросекторі.

3. ВПЛИВ ОБРОБКИ ВИБУХОМ НА МАЛОЦИКЛОВУ ДОВГОВІЧНІСТЬ СТАЛІ

3.1 Вплив величини тиску на фронті ударної хвилі

Визначальним параметром при вибуховій зміцнювальній обробці є тиск на фронті ударної хвилі. Для визначення впливу величини тиску на фронті ударної хвилі на малоциклову втому зразки сталі 20 піддавали зміцненню вибухом при тисках 10,0, 16,8 і 20,0 ГПа. Підвищення тиску викликає прогресуюче збільшення мікротвердості (рис.3.1), зусилля деформування при статичному згині (рис.3.2), а також границі міцності і текучості зміцненої сталі (табл.3.1).

З рис. 3.3, де приведені фотографії структури зміцненої вибухом сталі, видно, що при $P=20,0$ ГПа (рис.3.3г) спостерігається сильно розвинутий процес двійникування у всьому об'ємі металу, а також проявляється текстура (витягнутість зерен). При $P=16,8$ ГПа (рис. 3.3в) деформація протікає менш інтенсивно, густина двійників і число зерен фериту, охоплених двійникуванням, знижується.

Результати досліджень на малоциклову втому свідчать (рис.3.4), що ефективність вибухового зміцнення в значній мірі залежить як від величини тиску на фронті ударної хвилі, так і від амплітуди пружно-пластичної циклічної деформації і виду робочого середовища.

При порівняно невисоких амплітудах збільшення тиску на фронті ударної хвилі підвищує малоциклову довговічність сталі, при високих рівнях циклічної деформації спостерігається обернена залежність. Причиною цього явища слід рахувати підсилення з ростом циклічної деформації чутливості малоциклової довговічності сталі до пластичності металу, яка при зміцненні значно знижується.

Отже, зміцнення вибухом є ефективним засобом захисту сталі від шкідливої дії агресивних середовищ, при циклічних навантаженнях в пружно-пластичній області, а підвищення тиску на фронті вибухової хвилі до 20,0 ГПа підсилює цей позитивний ефект.

Таблиця 3.1 - Вплив тиску на фронті ударної хвилі на механічні властивості сталі 20, зміцненої вибухом

Величина тиску, ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %
Вихідний (незміцнений)	275	386	38.1
10.0	440	476	17.8
16.8	525	610	16.1
20.0	598	675	13.3

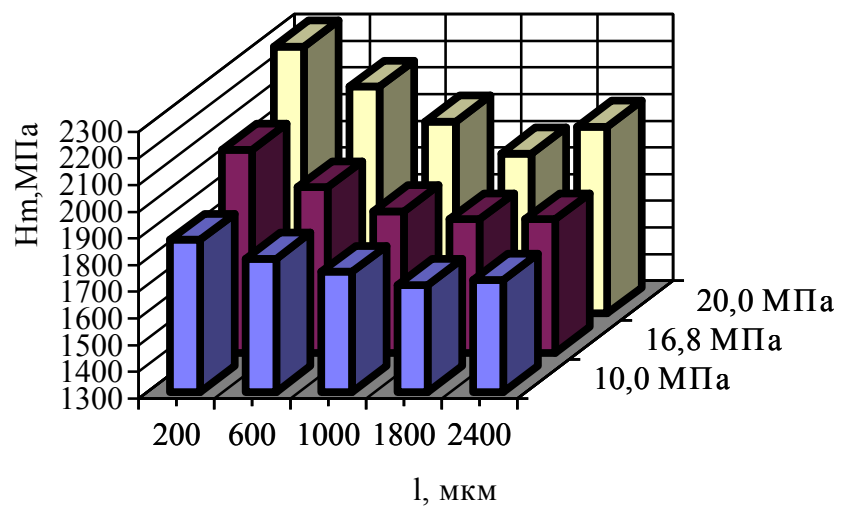


Рис. 3.1. Характер зміни мікротвердості по глибині зразка сталі 20, зміцненого різним тиском хвилі

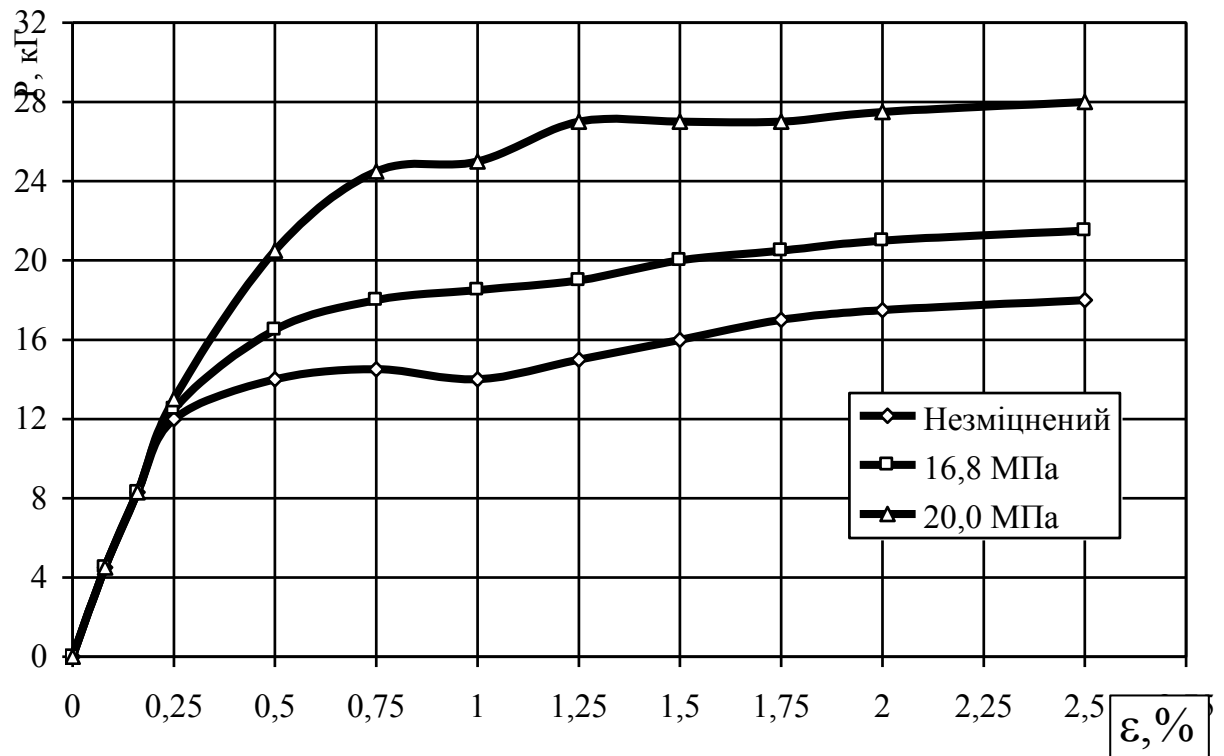


Рис. 3.2. Криві статичного згину зразків сталі 20, зміцнених вибуховою хвилею при різному тискові на фронті ударної хвилі



а)



б)

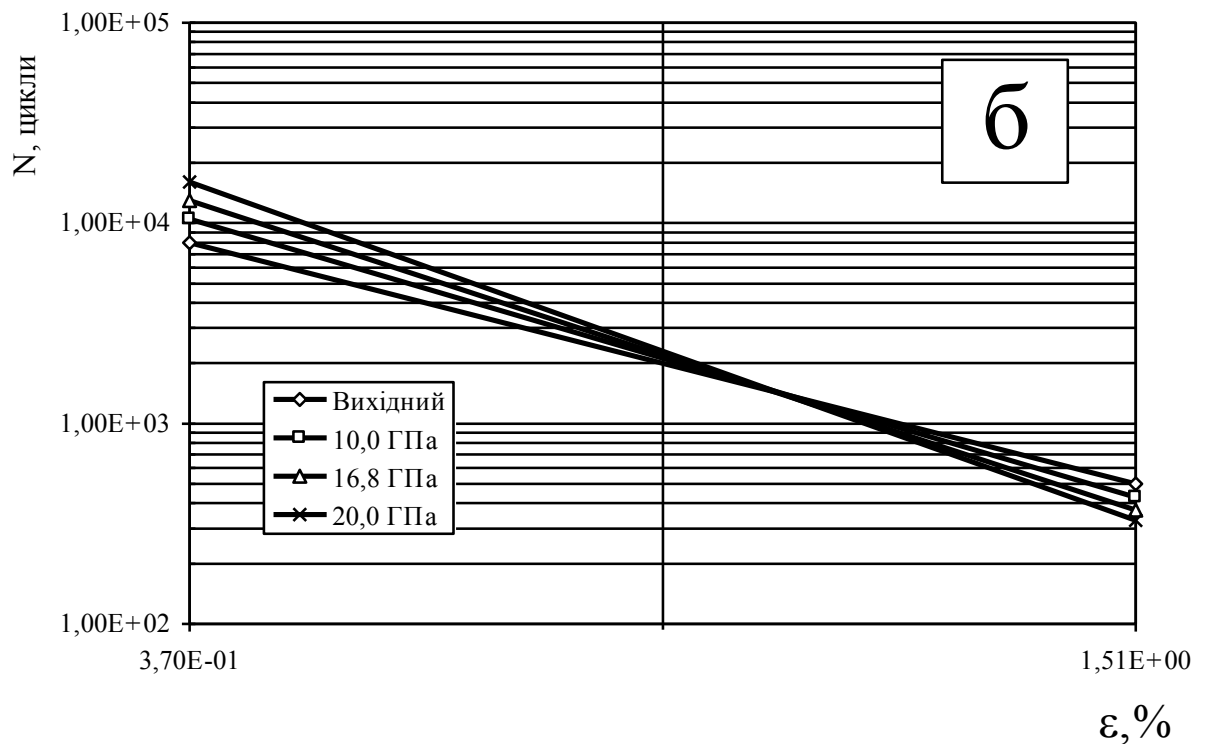


Рис. 3.4. Вплив тиску на фронті ударної хвилі на малоциклову довговічність зразків сталі 20 на повітрі (а) і в КАС (б)

3.2. Зміцнення концентраторів напружень на поверхнях металевих виробів вибуховою хвилею

Автори [8] пропонують спосіб зміцнення концентраторів напружень металічних деталей машин методом механічної обробки. Цей метод не дозволяє зміцнити всі види концентраторів напружень без викривлень їх розмірів, особливо з радіусом надрізу менше 1 мм. Крім цього для обробки складних поверхонь деталей цим способом необхідні різні набори зміцнювачів і обов'язкова попередня підготовка поверхні - обезжирювання, деканування.

Розроблений і запатентований [17] новий спосіб зміцнення концентраторів напружень запобігає викривленню розмірів концентратора та підвищує фізико-механічні властивості деталей. Зміцнення концентраторів напружень металічних деталей здійснюється шляхом механічного впливу енергії ударної хвилі, яка створюється при вибуху заряду, розміщеного по його периметру, при цьому вільний

простір концентратора заповнюють інертною речовиною. Як інертну речовину використовували пластилін або масло індустриальне.

Так проводили зміцнення вибухом з допомогою пластичної вибухової речовини зразки сталі 20 товщиною 6 мм з V-подібними концентраторами напружень глибиною 3 мм і радіусом надрізу 0,05 мм, вибухову речовину розміщували при цьому вздовж периметра концентратора. Вільний простір концентратора заповнювали стандартним індустриальним маслом. Крім цього для отримання порівняльних даних проводилось зміцнення вибухом зразка без концентратора.

Досліди на малоциклову довговічність проводили на повітрі і в середовищі КАС при відносній цикловій деформації $\varepsilon=0,25\%$.

Заміри на оптичному мікроскопі не виявили змін розмірів і форм концентратора після зміцнення. В таблиці 3.2 наведені дані про випробування зразків (результати середньоквадратичні - 5 зразків на точку) з врахуванням β_k - коефіцієнта впливу концентрації напружень

$$\beta_k = \frac{\text{малоциклова довговічність гладкого зразка}}{\text{малоциклова довговічність надрізного зразка}}, \quad (4.2)$$

Таблиця 3.2 - Порівняльні результати малоциклової довговічності гладких зразків і з концентраторами напружень зміцнених вибухом

Вид обробки		Гладкі зразки		Надрізні зразки			
		малоциклова довговічність (тис. циклів)		малоциклова довговічність (тис. циклів)		По-вітря β_k	Корозійне середовище β_k
		по-вітря	корозійне середовище	по-вітря	корозійне середовище		
Вихідний без зміцнення		15.3	8.1	5.0	3.2	3.06	2.53
Зміцнення вибухом	Всього зразка без концентратора	-	-	6.1	4.3	2.51	1.88
	Тільки концентратора	-	-	10.0	7.9	1.53	1.02

Як видно з таблиці зміцнення вибухом значно підвищує малоциклову довговічність з гострим надрізом в повітрі і, особливо в корозійному середовищі. Запропонований спосіб зміцнення концентраторів напружень дозволяє підвищити малоциклову довговічність при відносній деформації $\epsilon=0,25\%$ на повітрі з 5.0 до 10 тис циклів, а в корозійному середовищі - ще більше з 3.2 до 7.9 тисяч циклів і може бути використаний для зміцнення ударною хвилею концентраторів напружень металічних деталей машин, які працюють в умовах пружно-пластичного циклового деформування, особливо при одночасному впливі засобів хімізації с.г.

3.3 Вплив вибухового зміцнення на довговічність зварних з'єднань металевих виробів

Враховуючи широке використання зварного з'єднання при створенні габаритних конструкцій і характеристики зварного шва виникає

необхідність забезпечення рівноцінності шва і основного металу при будь-яких навантаженнях на конструкцію (статичних, ударних, циклічних).

Відомий спосіб зміцнення металів енергією ударної хвилі, створеної вибухом заряду, полягає в тому, що на поверхню оброблюваної деталі наносять не менше двох шарів вибухової речовини. Це забезпечує вплив на деталь енергії декількох ударних хвиль в короткий проміжок часу (авт. св. № 224463, кл. В 21D), але при цьому енергія ударної хвилі приводить до деформації зварних виробів і створює в навколишній зоні розтягуючі напруження.

Для зняття розтягуючих і створення стискуючих напружень в навколошовній зоні зварного з'єднання пропонуємо між зарядом вибухової речовини, який встановлюється на навколошовну зону зварного з'єднання і цією зоною розмістити проміжний шар інертного матеріалу, наприклад, пластмаси, з акустичною жорсткістю меншою, ніж у металу труби [16].

Наявність проміжного інертного шару відомої жорсткості дозволяє регулювати величину тиску на межі розподілу проміжного середовища і зміцнювальної деталі, змінюючи в ній при цьому знак напружень, що дає можливість оперативно впливати на якість зварного шва.

Проводили обробку навколошовної зони зварного з'єднання зразка конструкції із сталі 20 з товщиною стінок 10 мм вибуховою речовиною марки Л-48к товщиною 2 мм з проміжним шаром поліхлорвінілу товщиною в 1 мм. До і після вибуху вимірювали зварні напруження в навколишній зоні, використовуючи для цього об'ємний механічний деформометр конструкції МВТУ, а для визначення якості внутрішньої поверхні зварного шва проводили металографічний аналіз зразків.

Обробка вибухом в присутності проміжного шару з пластмаси показала, що розтягуюче напруження, яке було в навколошовній зоні в 10-15 кгс/мм² перетворилось на стискуюче напруження величиною в 15-

20 кгс/мм². Металографічний аналіз зразків, оброблених енергією ударної хвилі запропонованим способом не виявив слідів руйнування металу в зоні дії зустрічної ударної хвилі. Зварні зразки після вибухової обробки показали ефективність щодо підвищення опору на МЦВ особливо в середовищі КАС.

3.4. Дослідження стадій втомного руйнування і утворення тріщин

Втомне руйнування проходить у три стадії: зародження тріщини, стійке поширення її, спонтанне безконтрольне поширення. І хоча при малоцикловій втомі останні два періоди мають переважаюче значення, цікавість до періоду зародження тріщин і процесів, які ведуть до появи дефектів типу тріщина, не знижується. В роботі [16] було показано, що при малоцикловій втомі зародження тріщин, як правило, проходить з поверхні зразка в розвинутих смугах ковзання.

Було досліджено розвиток смуг ковзання на травленій поверхні вихідної і зміцненої вибухом сталі 20 при малоцикловій втомі, а також впливу амплітуди деформації на характер розвитку ковзання. Перед випробуваннями поверхню зразків полірували механічним способом, а потім протравлювали в 4%-ному водному розчині азотної кислоти. В процесі випробувань поверхню зразків більше не обробляли. Через задане число циклів зупиняли випробувальну машину і з середньої частини зразка, не виймаючи його із захватів знімали пластиковий відбиток для зберігання. Після візуально видимої тріщини в центральній частині зразка отримані з цього місця пластикові відбитки напиляли тонким шаром вуглецю. Дослідження зміни структури смуг ковзання проводили на електронному мікроскопі BS-242 за допомогою вугільних реплік, отриманих в результаті розчинення пластикової підкладки.

Вихідний матеріал представляє собою сталь з феритно-перлітною структурою, розмір зерна складає 12...14 мкм. Перліт має пластинчасту

структуру. Основна пластична деформація відбувалася у феритних зернах, які мають набагато більшу пластичність, ніж перліт. Тріщини втоми спостерігалися по зернах фериту, тому всі подальші роздуми будуть стосуватися тільки феритної матриці.

В незміцненій сталі при деформації $\varepsilon = 1,5\%$ смуги ковзання спостерігаються вже після шістнадцяти циклів деформації, в той час, як при деформації $\varepsilon = 0,37\%$ перші замітні сліди появляються після 100 циклів. Таким чином можна відмітити, що момент появи слідів ковзання насамперед залежить від величини циклічної деформації. Смуги ковзання орієнтовані переважно перпендикулярно напрямку силового потоку.

При деформації $\varepsilon = 1,5\%$ смуги ковзання на електронофрактограмах тонкі, різко окреслені і майже не змінюються в процесі циклічної деформації (рис.3.5а,б). При переході через границю зерна смуги ковзання не змінюють свого напрямку (рис. 3.6).

При циклічних деформаціях порядку 0,75%, 1%, 1,5% при ста циклах в незміцненій сталі, починаючи від гострої кромки зразка, переважно розвивається зернограничне просковзування, пов'язане з внутрішньозеренним ковзанням, яке надалі розповсюджується по всій поверхні зразка і приводить до утворення деформаційного рельєфу.

В полікристалі границі зерен звичайно не плоскі, тому в загальному випадку просковзування здійснюється по шорсткій поверхні. Наявність на поверхні виступів навіть атомного масштабу робить неможливим безпосереднє ковзання по границі зерна, оскільки для цього потрібне напруження, порівняне з теоретичною границею міцності [16].

Високі напруження, які випробовує метал, є достатніми для активації руху дислокацій на віддаль, допускаючи вихід останніх на границю зерна. Надлишок дислокацій на границі зерна приводить до розвитку зернограничного ковзання. Рух дислокацій по обидві сторони границі шляхом ковзання і переповзання забезпечує видалення матеріалу із однієї частини границі (виступів) і добавлення його до інших (западин),

що практично є пластичною аккомодациєю границь, яка приводить до вирівнювання поверхні зерна.

Для запобігання руйнуванню при сумісній дії внутрізеренного ковзання із зернограничним просковзуванням вимагається або дифузійний рух атомів, або дифузійно-ковзаючий рух дислокацій. Проте навіть локальні температури в місцях деформування не зможуть забезпечити місцевого протікання цих процесів, в результаті рівновага порушується і відбувається руйнування матеріалів по границях зерен.

При відносно низьких амплітудах деформації ($\epsilon=0,37\%$), як вже відмічалось вище, перші помітні сліди ковзання були виявлені після ста циклів деформації. Вони представляють собою тонкі нерегулярні сліди ковзання протяжністю набагато меншою розміру зерна (рис. 3.7а). До двохсотого циклу формуються смуги ковзання (рис.3.7б), які на електрофрактограмах здаються злегка розмитими і хвильовими.

В роботі [16] показано, що хвилястість смуги ковзання виникає через те, що вона складається з декількох пластинок ковзання, які по різному виступають біля фериту. До тисячного циклу деформації в результаті циклічного ковзання в смугах ковзання утворюються виступи і провали (рис. 3.8а), активізується множинне ковзання (рис. 3.8б). При десяти тисячах циклів в полосах ковзання вже спостерігаються мікротріщини (рис. 3.9), які надалі приводять до утворення магістральної тріщини і транскристалітного руйнування зразків.

Таким чином, аналіз описаних вище спостережень дозволяє зробити висновок, що при порівняно великих амплітудах циклічного деформування смуги ковзання незміцненої сталі появляються на перших циклах деформації чіткими, пізніше число смуг лише незначно збільшується, а їх структура і конфігурація не змінюється. При малих амплітудах перші смуги ковзання появляються не раніше ста циклів, вони слабо розрізняються, при наступній деформації ці смуги стають широкими і кривулястими за рахунок множинного тонкого ковзання.

Дані цього спостереження підтверджують висказану раніше - здогадку про те, що повторні великі амплітуди деформації (малоциклова втома) викликають грубе ковзання, тобто лавину ковзання зразу через декілька сотень комірок ґратки, що пояснює раптову появу чітких полос ковзання; малі ж амплітуди (звичайна втома) викликають тонке ковзання, тобто зсуви, які розповсюджуються одночасно лише через декілька комірок ґратки і поступово створюючи поверхневі порушення там, де вони є сконцентровані в смуги.

При низьких амплітудах циклічного деформування руйнування починається перетворенням діючих зон ковзання в надриви. При високих амплітудах деформування, коли вказаного перетворення немає, на перший план виходять процеси, які відбуваються на границі зерна і приводять до зернограничного руйнування.

Зміцнення сталі 20 вибухом вносить суттєву зміну в тонку структуру феритних зерен, помітно змінює топографію слідів ковзання. В зміцненім металі при малій амплітуді циклічної деформації сліди ковзання появляються набагато раніше, ніж в незміцненій сталі. Звичайно, потрібно враховувати, що внаслідок значного підвищення міцності при однакових величинах ϵ дійсні напруження в зміцненій вибухом сталі 20 набагато більші, ніж у незміцненій сталі.

Смуги ковзання в зміцненій сталі появляються після тридцяти циклів деформації (рис. 3.10а). До п'ятисот циклів навантаження в зміцненій сталі розвивається множинне ковзання, в результаті чого на поверхні зразка утворюються пересікаючі сходишки (рис. 3.10б).

Надалі в пластичному деформуванні активну участь приймають двійникові ламелі. На границях двійників, за рахунок поперечного ковзання в двійнику, виникають уступи, в яких утворюються мікротріщини. Проте загальна пластична деформація поверхні настільки велика, що проходить часткове «заліковування» дефектів поверхні і

утворення поряд з полосами ковзання специфічного хвилястого рельєфу (рис. 3.11).

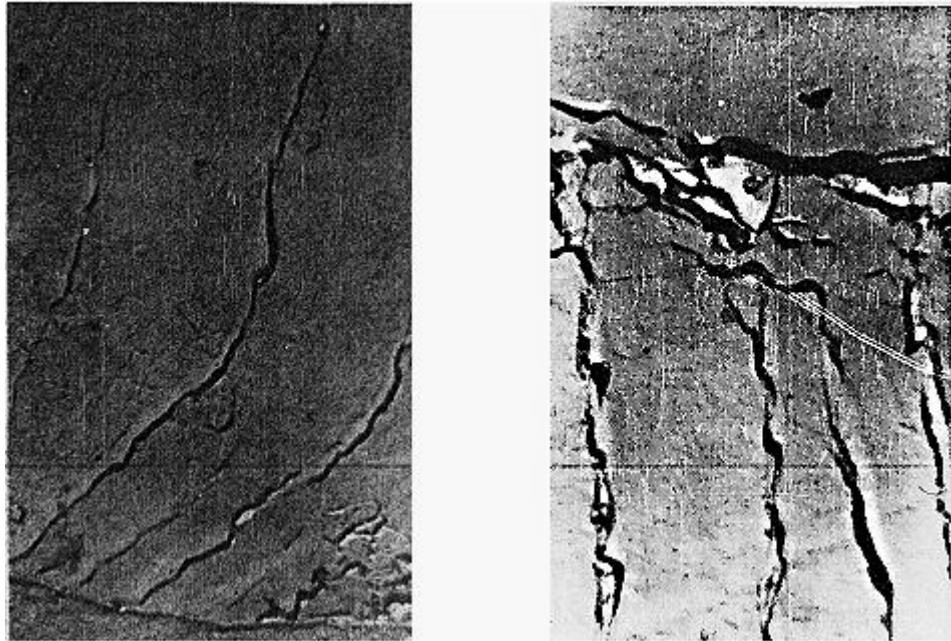
Інтенсивне внутрізеренне ковзання в зміцненому матеріалі приводить до підвищення границі порогових напружень переходу транскристалічного руйнування в інтеркристалічне. Так, в зміцненій сталі при деформації 0,5% зберігається переважно транскристалічне руйнування, а при деформації 0,75% поряд з розвитком міжзеренного руйнування зберігається значна пластична деформація зерен. Густина смуг ковзання у зміцненій сталі при $\epsilon=0,75\%$ приблизно рівна аналогічній характеристиці сталі при $\epsilon=0,37\%$.

При деформації $\epsilon=1,5\%$, поряд зі смугами грубого ковзання, які спостерігалися в незміцненому металі, у зміцненій вибухом сталі спостерігається розвинута система смуг повторного тонкого ковзання (рис. 3.12). Отже, в результаті розвинутого внутрізеренного ковзання в зміцненому матеріалі навіть при відносно великих деформаціях зустрічаються ділянки транскристалітного руйнування.

В незміцненій сталі при малих деформаціях, як вже відмічалось вище, множинне ковзання розвивається до тисячного циклу. Кути пересічення площин ковзання відповідають пересіченню систем (011) з (112). При великих деформаціях система площин (112) більш активована. В зміцненому металі при всіх досліджуваних деформаціях спостерігається великий набір кутів пересічення кутів ковзання, відповідних до різних можливих комбінацій систем площин ковзання (011) з (102), (011) з (123), (112) з (123), пересічення всередині систем. Особливості структури сталі зміцненої вибухом за рахунок більш повного використання різних систем ковзання були підтверджені пізніше [16].

Отримані спостереження дозволяють зробити висновок, що зміцнення вибухом активізує можливі системи ковзання металу, що забезпечує підвищення пластичності зміцненої сталі при повторних

навантаженнях (тобто при втомі), хоч при статичному навантаженні ці можливості не реалізуються.



а)

б)

Рис. 3.5 . Смуги ковзання у вихідному матеріалі при деформації: а) 16 циклів $\times 1200$; б) 100 циклів $\times 1200$

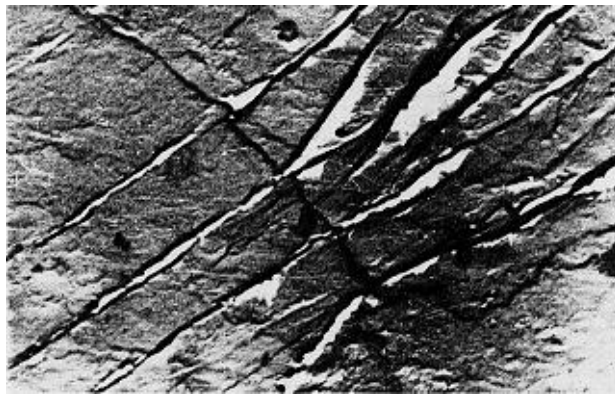
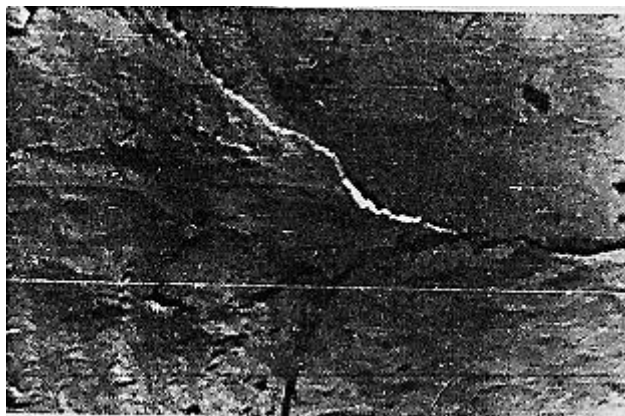
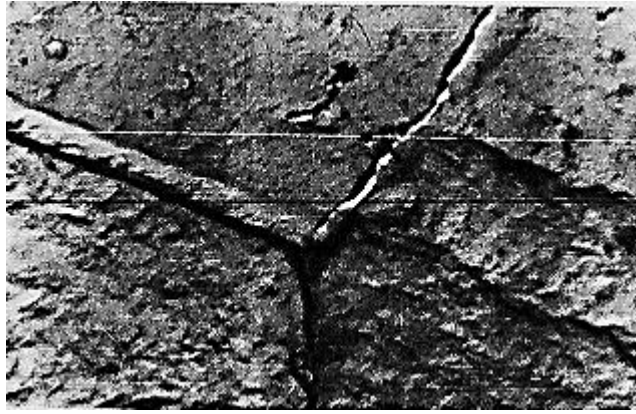


Рис.3.6. Пересічення границі зерна смугами ковзання $\times 3000$.



а)



б)

Рис. 3.7. Смуги ковзання в незміцненій сталі 20 $\varepsilon = 0,37\%$; $\times 300$
 $N=100$ циклів (а), $N=200$ циклів (б).



а)



б)

Рис. 3.8. Мікрорельєф поверхні незміцненої сталі 20 ($\varepsilon = 0,37\%$;
 $N=1000$ циклів) $\times 1200$.



Рис. 3.9. Мікроструктура в смугах ковзання ($\varepsilon = 0,37\%$; $N = 10000$
циклів) $\times 1200$.

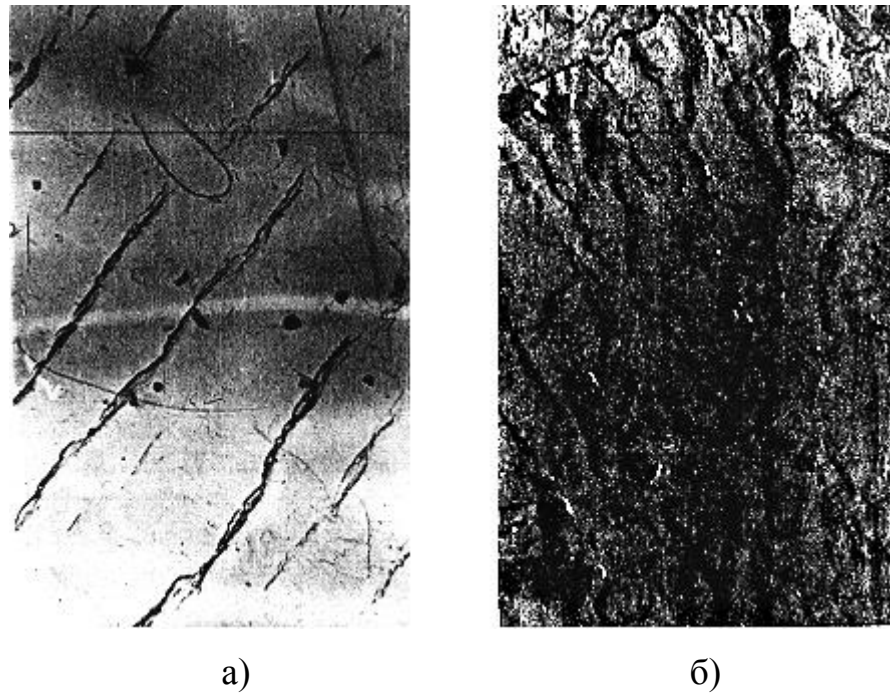


Рис. 3.10. Смуги ковзання в зміцненій вибухом сталі 20 ($\epsilon = 0,37\%$; $\times 3000$; $N=30$ циклів (а), $N=500$ циклів (б))

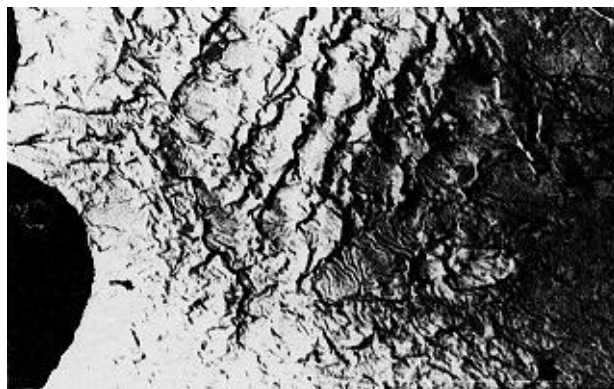


Рис. 3.11. Хвилястий рельєф в зміцненій вибухом сталі 20 ($\epsilon = 0,37\%$; $N=1000$ циклів) $\times 3000$.

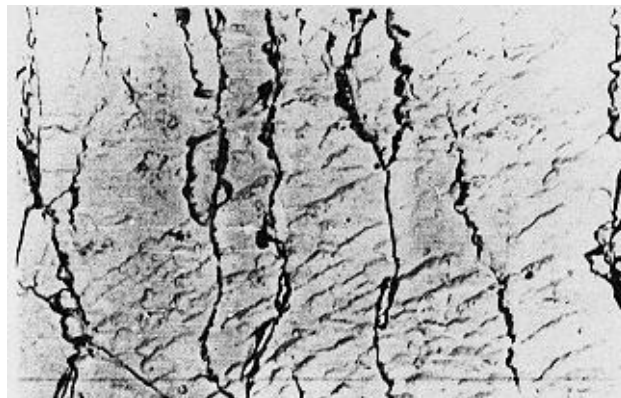


Рис. 3.12. Смуги повторного ковзання в незміцненій сталі 20 ($\epsilon = 1,5\%$; $N = 100$ циклів) $\times 1000$

3.5. Визначення залежності малоциклової довговічності сталі 20 від основних параметрів вибухового навантаження.

В цьому розділі розглянуті і узагальнені результати дослідження впливу зміцнювальної обробки ударними хвилями (вибухом) на довговічність сталі в пружно-пластичній області. Проведена математична обробка залежності малоциклової довговічності сталі в середовищах засобів хімізації сільського господарства від тиску на фронті ударної хвилі.

На основі аналізу результатів вказаних експериментів зроблені основні висновки по впливу ударних хвиль на малоциклову довговічність сталі. Проте всі розглядувані експерименти проводились нами лише при певних значеннях параметрів вибухового навантаження і для певних заданих значень відносної деформації зразка і тому отримані на їх основі результати не дозволяють з достатньою ступінню точності прогнозувати довговічність досліджуваних сталей при малоцикловому деформуванні для проміжних значень як параметрів вибухового навантаження, так і амплітуд деформації.

В зв'язку з цим було поставлене завдання з допомогою ЕВМ обробити результати експериментів і математично описати залежність малоциклової довговічності досліджуваної маловуглецевої сталі 20 від основних параметрів вибухового навантаження.

Для впливу тиску (P) на фронті ударної хвилі визначали залежність амплітуди деформації зразка ε від кількості циклів до руйнування N: $\varepsilon = f(N)$. Вказана залежність апроксимувалася рівнянням:

$$\lg \varepsilon = B_1 + B_2 \lg N; \quad (4.3)$$

де B_1 і B_2 - коефіцієнти, які залежать від параметрів вибухового навантаження, а також від властивостей робочого середовища. Вигляд

рівняння (4.3) як прямої лінії в логарифмічних координатах ε і N було визначено експериментально. Для розрахунку коефіцієнтів B_1 і B_2 в рівнянні використовували метод найменших квадратів.

Згідно з методом найменших квадратів найкращим коефіцієнтом в розумінні наближення до експериментальних значень будуть коефіцієнти, знайдені, виходячи із умови мінімуму суми квадратів відхилень між експериментальними і розрахунковими значеннями.

Основна трудність апроксимації за методом найменших квадратів, в тому числі і многочленної, полягає у вирішенні нормальної системи рівнянь в часткових похідних суми квадратів відхилень вимірних значень від розрахункових за знайденими коефіцієнтами. Для вирішення вказаної системи рівнянь використовувалась процедура GORDAN, на основі якої розроблена програма, яка реалізує многочлени наближення за методом найменших квадратів для довільного числа точок. Всі обчислення проводилися з допомогою персонального комп'ютера Pentium 100. Потім визначали точність апроксимації залежності $\varepsilon = f(N)$ рівняння (4.3). При цьому вираховували похибки обчислених значень в кожній експериментальній точці.

$$\Delta \lg \varepsilon_i = \lg \varepsilon_{ie} - \lg \varepsilon_{ip}; \quad (4.4)$$

а також середню квадратичну похибку $\sigma \lg \varepsilon$ визначення значень ($\lg \varepsilon$)

$$\sigma \lg \varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_i^m \Delta^2(\lg \varepsilon_i)}{m}}; \quad (4.5)$$

де m - кількість експериментальних точок.

Залежності типу (4.3) були отримані нами для кожного значення відносної деформації. Враховуючи те, що коефіцієнти B_1 і B_2 є функцією

тиску на фронті ударної хвилі надалі ставилося завдання визначення залежностей коефіцієнтів B_1 і B_2 від тиску (P) на фронті ударної хвилі.

$$B_1 = f(P) = \sum_{i=0}^n a_i P_i; \quad (4.6)$$

$$B_2 = f(P) = \sum_{i=0}^n b_i P_i; \quad (4.7)$$

де a_i, b_i - коефіцієнти апроксимуючих многочленів у залежностях (4.6) і (4.7);

n - степінь апроксимуючого многочлена.

Цю задачу також вирішували методом найменших квадратів згідно вище описаної програми, однак від попередньої вона відрізнялась лише тим, що апріорно не був відомий характер залежностей (4.6) і (4.7). Тому, при визначенні залежностей (4.6) і (4.7) паралельно вирішували питання вибору оптимального степеня апроксимуючих многочленів. Оцінку степеня многочленів проводили за значеннями середньоквадратичних похибок $\sigma_{B_1}, \sigma_{B_2}$ розрахунку значень відповідно до коефіцієнтів B_1 і B_2 згідно до отриманих многочленів. Вказані похибки при цьому розраховували за формулами:

$$\sigma_{B_1} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^s (B_{1j} - \sum_{i=0}^n a_i P_i)^2}{S}} \quad (4.8)$$

$$\sigma_{B_2} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^s (B_{2j} - \sum_{i=0}^n b_i P_i)^2}{S}} \quad (4.9)$$

де S - кількість значень окремого параметру вибухового навантаження, при яких проводились випробування.

Останнім етапом в розглядуваній тут задачі математичного опису залежностей малоциклової довговічності низьковуглецевої сталі 20 від тиску (P) на фронті ударної хвилі є розрахунок похибок визначення значень згідно рівняння (4.3) з врахуванням отриманих залежностей (4.6) і (4.7). При цьому розраховували абсолютні $\Delta\varepsilon_i$ і відносні $\Delta\varepsilon_i^{\text{відн.}}$. Значення похибок розрахунку ε_i в кожній i -тій точці експерименту, а також абсолютних σ_ε і відносних $\sigma_\varepsilon^{\text{відн.}}$ значень середньої квадратичної похибки розрахунку ε для кожного окремого значення параметру вибухового навантаження.

$$\Delta\varepsilon_i = \varepsilon_{g_i} - \varepsilon_{p_i}; \quad (4.10)$$

$$\Delta\varepsilon_i^{\text{відн.}} = \frac{\Delta\varepsilon_i}{\varepsilon_i} \cdot 100\%; \quad (4.11)$$

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\Delta\varepsilon_i)^2}{m}}; \quad (4.12)$$

$$\sigma_\varepsilon^{\text{відн.}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\Delta\varepsilon_i^{\text{відн.}})^2}{m}}; \quad (4.13)$$

де ε_{g_i} - дійсне значення відносної деформації при експерименті; ε_{p_i} - значення ε_i , отримане при вирішенні рівняння (4.3) сумісно з рівняннями (4.6) і (4.7).

3.6. Визначення залежності малоциклової довговічності сталі 20 від величини тиску на фронті ударної хвилі.

Результати вирахування значень коефіцієнтів B_1 і B_2 в рівнянні (4.3) для різного тиску на фронті ударної хвилі наведені в табл.3.3.

Таблиця 3.3 - Значення коефіцієнтів B_1 і B_2 в рівнянні (4.1) в залежності від величини тиску на фронті ударної хвилі

Коефіцієнти формули (4.1)		Величина тиску ударної хвилі, ГПа			
		Без зміцнення	10,0	16,8	20,0
B_1	повітря	1.8481	1.4853	1.2850	1.0858
	корозійне середовище	1.8480	1.3890	1.1664	1.0343
B_2	повітря	-0.5366	-0.4464	-0.3964	-0.3436
	корозійне середовище	-0.6464	-0.4812	-0.3079	-0.3494

Апроксимація залежностей $B_1 = f(P)$ і $B_2 = f(P)$ проводили за формулами (4.6) і (4.7) до $n = 3$. Результати вирахувань значень a_i і b_i наведені в таблиці 3 і 4 додатку 2. Там же наведені значення середньоквадратичних похибок σ_{B_1} і σ_{B_2} відповідно до коефіцієнтів B_1 і B_2 згідно рівнянь (4.8) і (4.9).

За результатами проведених розрахунків отримані наступні рівняння, які пов'язують відносну деформацію ε і кількість циклів до руйнування N в залежності від величини тиску P на фронті ударної хвилі:

а) при апроксимації коефіцієнтів B_1 і B_2 многочленами першого степеня

для повітря:

$$\lg \varepsilon = 1,8555 - 0,0037 \cdot P + \lg N (-0,5389 + 0,00094 \cdot P) \quad (4.14)$$

для КАС:

$$\lg \varepsilon = 1,8303 - 0,0040 \cdot P + \lg N (-0,6424 + 0,0015 \cdot P) \quad (4.15)$$

б) при апроксимації коефіцієнтів B_1 і B_2 многочленами другого степеня

для повітря:

$$\lg \varepsilon = 1,8455 - 0,0031 \cdot P - 0,2809 \cdot 10^5 \cdot P^2 + \lg N (-0,5358 + 0,00076 \cdot P + 0,9137 \cdot 10^{-6} \cdot P^2) \quad (4.16)$$

для КАС:

$$\lg \varepsilon = 1,8477 - 0,0050 \cdot P + 0,5133 \cdot 10^5 \cdot P^2 + \lg N (-0,6484 + 0,0018 \cdot P - 0,1765 \cdot 10^{-5} \cdot P^2) \quad (4.17)$$

в) при апроксимації коефіцієнтів B_1 і B_2 многочленами третього степеня

для повітря:

$$\lg \varepsilon = 1,8455 - 0,0052 \cdot P + 0,2556 \cdot 10^{-4} \cdot P^2 - 0,9134 \cdot 10^{-7} \cdot P^3 + \lg N (-0,5363 + 0,00156 \cdot P - 0,7304 \cdot 10^{-5} \cdot P^2 + 0,264 \cdot 10^{-7} \cdot P^3) \quad (4.18)$$

для КАС:

$$\lg \varepsilon = 1,8479 - 0,0052 \cdot P + 0,7353 \cdot 10^{-5} \cdot P^2 - 0,7143 \cdot 10^{-8} \cdot P^3 + \lg N (-0,6484 + 0,0018 \cdot P - 0,1792 \cdot 10^{-5} \cdot P^2 + 0,8778 \cdot 10^{-10} \cdot P^3) \quad (4.19)$$

Виходячи із формули (4.14), можна визначити максимальну амплітуду циклічної деформації, якщо відома величина тиску на фронті ударної хвилі і кількість циклів до руйнування. Так, наприклад, технологічно можливо $P = 20,0$ ГПа, а довговічність в корозійному середовищі повинна складати не менше 10^4 циклів (тобто $\lg N = 4$).

$$\lg \varepsilon \leq 1,830 - 0,004 \cdot 20,0 + 4(-0,642 + 0,0015 \cdot 20,0);$$

$$\lg \varepsilon \leq 01,830 - 0,8 + 4(-0,6424 + 0,3000);$$

$$\lg \varepsilon \leq 1,030 - 1,3696 - 0,34, \text{ тобто } \varepsilon = 0,45\%.$$

Аналогічно можна визначити величину тиску на фронті ударної хвилі при зміцненні, якщо задана довговічність і амплітуда деформації в корозійному середовищі.

Наприклад: $N = 10^4$ циклів, тобто $\lg N = 4$; $\lg \varepsilon_{\max} = 0,4$, тобто $\varepsilon_{\max} = 0,4\%$.

Тоді за формолою (4.14):

$$0,4 \leq 1,830 - 0,0040 \cdot P + 4 (-0,642 + 0,0015 \cdot P);$$

$$- 0,4 \leq 1,830 - 0,0040 \cdot P - 2,568 + 0,006 \cdot P;$$

$$- 0,4 \leq 1,830 + 0,002 \cdot P - 2,568;$$

$$0,338 \leq 0,002 \cdot P;$$

$$P \geq 0 \text{ 16,9 ГПа.}$$

Значить, для виконання умови величина тиску ударної хвилі при зміцненні не повинна бути меншою 16,9 ГПа.

3.7. Висновки до розділу 3.

1. Встановлено, що підвищення тиску до 20,0 ГПа суттєво збільшує механічні властивості сталі, мікротвердість, границю текучості.

2. При максимальному тиску (20,0 ГПа) спостерігається інтенсивне двійникування і текстура зерен металу, що покращує його механічну стійкість.

3. Малоциклова довговічність сталі залежить від амплітуди циклічної деформації: при низьких амплітудах збільшення тиску покращує довговічність, тоді як при високих амплітудах цей ефект знижується.

4. Зміцнення концентраторів напружень підвищує малоциклову довговічність металу без викривлення розмірів концентраторів.

5. У корозійних середовищах довговічність зростає майже в 2,5 раза порівняно з незміцненими зразками. Метод є перспективним для використання в агресивних умовах експлуатації.

6. Вибухове зміцнення з використанням проміжного інертного шару (наприклад, поліхлорвінілу) дозволяє перетворювати розтягуючі напруження в стискуючі в зоні зварного шва; підвищувати опір малоциклової втоми, особливо в агресивних середовищах; забезпечувати підвищену якість зварних з'єднань без пошкоджень металу.

7. У зміцненій вибухом сталі спостерігається активізація множинних систем ковзання, що підвищує пластичність під час циклічного навантаження. Високі амплітуди деформації спричиняють грубе ковзання, тоді як низькі амплітуди забезпечують тонке ковзання, що сприяє кращому опору руйнуванню.

8. Проведено математичне моделювання довговічності. Розроблено рівняння, які описують залежність малоциклової довговічності сталі 20 від тиску ударної хвилі та амплітуди циклічної деформації. Модель дозволяє прогнозувати довговічність сталі в залежності від умов експлуатації та параметрів зміцнення.

9. Практична значимість вибухового зміцнення показало високу ефективність для підвищення довговічності сталі 20 у пружно-пластичній області циклічного навантаження, особливо в агресивних середовищах. Метод може бути використаний для деталей, що працюють у складних умовах, зокрема в сільськогосподарській техніці та машинобудуванні.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ

4.1. Аналіз небезпечних факторів

Для забезпечення безпеки під час процесу поверхневого зміцнення вибухом деталей машин в агресивних сільськогосподарських середовищах необхідно впровадити комплекс заходів, спрямованих на мінімізацію ризиків для працівників та зниження негативного впливу на навколишнє середовище.

Основними небезпечними факторами є:

Хімічні: Агресивне середовище, що містить пестициди та добрива, може спричиняти корозію деталей машин і забруднення повітря небезпечними випарами. Під час вибухового зміцнення можливе утворення токсичних продуктів горіння.

Фізичні: Вибухові процеси супроводжуються потужними механічними імпульсами, вібраціями, та акустичними хвилями, які можуть завдати шкоди здоров'ю працівників та навколишньому середовищу.

Теплові: Процес вибухового зміцнення супроводжується виділенням значної кількості тепла, що потребує контролю над температурними режимами.

4.2. Організація охорони праці при вибухових процесах

Працівники мають використовувати індивідуальні засоби захисту, такі як спеціальні костюми, маски, протипилові окуляри, засоби для захисту органів слуху та інше.

Важливо визначити безпечні відстані для працівників від місця проведення вибухових робіт, а також встановити зони безпеки для уникнення непередбачених ситуацій. Безпечне зонування повинне передбачити розміщення робочих зон на відстані від приміщень з персоналом та встановлення захисних бар'єрів навколо робочих зон для захисту від розльоту уламків та зменшення впливу вибухової хвилі.

Доступ до місця проведення зміцнення мають тільки працівники, що пройшли відповідну підготовку. У зоні проведення робіт дозволяється знаходитися мінімальній кількості персоналу.

Необхідно забезпечити вимірювання рівнів шуму та вібрацій і відповідно до результатів впроваджувати технічні та організаційні заходи для їх зниження.

Всі працівники, які задіяні в процесі зміцнення вибухом, мають проходити навчання щодо специфіки роботи з вибуховими матеріалами та безпеки на робочому місці.

Видавати інструкції та настанови щодо дотримання правил роботи в агресивних середовищах і особливостей поводження з вибуховими речовинами.

Складати перелік можливих небезпек і ризиків при проведенні вибухових робіт в агресивному середовищі.

Перед початком робіт з вибухового зміцнення проводити ідентифікацію та оцінку всіх потенційних ризиків для працівників і довкілля.

Впроваджувати додаткові запобіжні заходів, які спрямовані на зменшення ймовірності виникнення аварій.

Проводити регулярний моніторинг процесу зміцнення та аналіз умов праці для коригування охоронних заходів у разі зміни умов роботи.

Постійно моніторити повітря на вміст шкідливих речовин, особливо у випадках роботи в агресивних сільськогосподарських середовищах.

Спостерігати за виробничими процесами для своєчасного виявлення відхилень і ризиків, щоб своєчасно реагувати та вживати заходів з їхнього усунення.

4.3. Санітарно-гігієнічні вимоги

Забезпечити наявність системи вентиляції для видалення шкідливих речовин з робочих зон. Вентиляційна система повинна бути обов'язково

здіяна у приміщеннях, де проводиться підготовка або обробка вибуховими матеріалами, щоб уникнути накопичення небезпечних газів.

Використовувати фільтри для очищення повітря від шкідливих речовин і токсичних продуктів вибуху.

Підтримувати температурний режим та вологість в приміщеннях, де виконуються підготовчі роботи з вибуховими речовинами.

Регулювати режим праці і відпочинку для запобігання перевтоми працівників, особливо під час роботи з вибуховими матеріалами та під впливом агресивного середовища.

Використовувати індивідуальні засоби захисту. Для захисту очей і органів дихання від шкідливих речовин та пилу, що можуть утворюватися внаслідок вибуху використовувати захисні окуляри та маски. Для захисту слуху - навушники або вушні вкладиші для зниження впливу шуму, що виникає при вибухових процесах.

Вогнестійкий одяг, рукавиці та взуття для захисту від можливих опіків та механічних ушкоджень.

4.4. Протипожежна безпека

Вибухові речовини повинні зберігатися в окремих, спеціально обладнаних приміщеннях з дотриманням протипожежних норм і вимог.

У робочій зоні мають бути встановлені засоби пожежогасіння (вогнегасники, системи автоматичного пожежогасіння), легкодоступні для персоналу.

Обладнання пожежогасіння повинне розміщатися у легкодоступних місцях на робочій ділянці.

Потрібно проводити регулярні тренування з пожежної безпеки. Організувати навчання персоналу діям у разі пожежі, зокрема правилам евакуації та використання засобів пожежогасіння.

Проводити постійні перевірки робочого обладнання та техніки для зменшення ризиків загоряння через можливі технічні несправності.

4.5. Охорона навколишнього середовища

Відходи, що утворюються після вибухового зміцнення, повинні бути утилізовані згідно з екологічними нормами, щоб запобігти забрудненню ґрунту та води.

З метою контролю забруднень, використовувати спеціальні технології для зменшення викидів шкідливих речовин під час процесу обробки вибухом.

4.6. План дій у випадку надзвичайних ситуацій

Створити чіткі інструкції для працівників на випадок надзвичайних ситуацій, зокрема при виникненні вибухів чи пожеж.

Проводити навчальні заняття та інструктажі з ліквідації надзвичайних ситуацій, дій при евакуації та наданні першої медичної допомоги.

Забезпечити наявність системи оповіщення для своєчасного інформування працівників і населення про виникнення небезпечних ситуацій.

Розроблені заходи безпеки допоможуть мінімізувати ризики під час поверхневого зміцнення вибухом і забезпечити захист здоров'я працівників, а також зменшити вплив на навколишнє середовище в агресивних сільськогосподарських умовах.

4.7. Висновок до розділу 4

1. У розділі висвітлено основні заходи з охорони праці та захисту населення під час проведення процесів поверхневого зміцнення вибухом в агресивних сільськогосподарських середовищах. Визначено небезпечні фактори, такі як хімічні, фізичні, теплові та їхній вплив на здоров'я працівників і навколишнє середовище.

2. Розроблено комплекс заходів, спрямованих на забезпечення безпеки працівників, зокрема:

- використання індивідуальних засобів захисту;
- організація безпечних зон і контроль доступу;
- моніторинг рівнів шуму, вібрації та вмісту шкідливих речовин у повітрі;
- підготовка персоналу через навчання та інструктажі.

3. Особливу увагу приділено санітарно-гігієнічним вимогам, протипожежній безпеці та охороні навколишнього середовища. Запропоновано заходи щодо зменшення впливу вибухових процесів на екологію, включаючи утилізацію відходів, фільтрацію повітря та зменшення викидів шкідливих речовин.

4. Розроблено план дій у випадку надзвичайних ситуацій, що включає навчання персоналу, інструкції з евакуації та оповіщення про небезпеки. Запропоновані рекомендації спрямовані на мінімізацію ризиків, захист здоров'я працівників і довкілля, а також підвищення ефективності роботи у складних умовах агресивного середовища.

ВИСНОВКИ

1. Вплив механічної обробки на довговічність сталей є комплексним. Зменшення шорсткості поверхні, створення стискуючих залишкових напружень і підвищення міцності приповерхневих шарів сприяють підвищенню втомної міцності матеріалів.

2. Для моделювання реальних умов експлуатації зразки піддавали впливу мінеральних добрив (аміачна селітра, карбамід, суперфосфат, хлористий калій) та пестицидів (інгібітори, фунгіциди, інсектициди). Це забезпечило комплексну оцінку корозійної стійкості конструкційних сталей в агресивному середовищі.

3. Зміцнення вибухом збільшує механічні властивості сталі 20. При максимальному тиску 20,0 ГПа спостерігається інтенсивне двійникування і текстура зерен металу.

4. Малоциклова довговічність сталі залежить від амплітуди циклічної деформації: при низьких амплітудах збільшення тиску покращує довговічність, тоді як при високих амплітудах цей ефект знижується.

5. Вибухове зміцнення концентраторів напружень підвищує малоциклову довговічність металу без викривлення розмірів концентраторів.

6. У корозійних середовищах довговічність зростає майже в 2,5 рази порівняно з незміцненими зразками. Метод є перспективним для використання в агресивних умовах експлуатації.

7. Вибухове зміцнення з використанням проміжного інертного шару (наприклад, поліхлорвінілу) дозволяє перетворювати розтягуючі напруження в стискуючі в зоні зварного шва; підвищувати опір малоциклової втомі, особливо в агресивних середовищах; забезпечувати підвищену якість зварних з'єднань без пошкоджень металу.

8. Проведено математичне моделювання довговічності. Розроблено рівняння, які описують залежність малоциклової довговічності сталі 20

від тиску ударної хвилі та амплітуди циклічної деформації. Модель дозволяє прогнозувати довговічність сталі в залежності від умов експлуатації та параметрів зміцнення.

9. Практична значимість вибухового зміцнення показала високу ефективність для підвищення довговічності сталі 20 у пружно-пластичній області циклічного навантаження, особливо в агресивних середовищах. Метод може бути використаний для деталей, що працюють у складних умовах, зокрема в сільськогосподарській техніці та машинобудуванні.

10. Висвітлено основні заходи з охорони праці та захисту населення під час проведення процесів поверхневого зміцнення вибухом в агресивних сільськогосподарських середовищах. Визначено небезпечні фактори, такі як хімічні, фізичні, теплові та їхній вплив на здоров'я працівників і навколишнє середовище.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance. Boca Raton : CRC Press, 2006. 480 p.
2. Advanced Surface Coating Techniques for Modern Industrial Applications. New York : Springer, 2017. 520 p.
3. Explosion Protection and Hardening of Metallic Components. London : Elsevier, 2015. 365 p.
4. Surface Hardening Techniques for Enhanced Durability of Agricultural Machinery. Berlin : Springer, 2020. 440 p.
5. Wear and Corrosion Resistance in Agricultural Machinery Components. Cambridge : Woodhead Publishing, 2019. 400 p.
6. Белкін М. Н., Сергеев І. А. Перспективи застосування вибухового зміцнення для деталей сільськогосподарської техніки // Сучасні технології зміцнення деталей : зб. наук. пр. Харків, 2001. С. 105–112.
7. Василенко І. М. Втома і тріщиностійкість конструкційних матеріалів. Київ : Наукова думка, 1998. 412 с.
8. Гігіняк Ф. Ф., Лебедев А. О., Шкодзінський О. К. Міцність конструкційних матеріалів при малоцикловому навантаженні за умов складного напруженого стану. Київ : Наукова думка, 2003. 342 с.
9. Горбенко С. Г., Корсун В. В., Попович В. А. Застосування методу зміцнення вибухом для підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарської техніки // Механізація та електрифікація сільського господарства. 2013. № 3. С. 34–41.
10. Гринько Ю. Г. Втома конструкційних матеріалів в агресивних середовищах // Наук. вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». 2016. № 844.
11. Грищенко В. В., Мельник П. П. Вплив вибухової обробки на корозійну стійкість нержавіючих сталей // Корозія та захист матеріалів. 2019. № 4. С. 33–39.

12. Дмитренко С. В., Кравченко М. М. Механічні властивості мідних сплавів після обробки вибухом // Проблеми матеріалознавства. 2016. № 2. С. 58–64.
13. Дьяків М. І. Аналіз втоми сталей в умовах агресивного середовища // Механіка композитних матеріалів. 2019. Т. 54, № 3.
14. Зінченко О. В. Вивчення втомної міцності конструкційних сталей у агресивних середовищах // Матеріали V Міжнар. конф. з механіки матеріалів та конструкцій. Київ : Вид-во НТУУ «КПІ», 2020.
15. Іванченко Ю. В. Вплив агресивних середовищ на втому металів в агропромисловому комплексі. Вінниця : ВНТУ, 2012. 320 с.
16. Ковальчук О. В., Ларін О. І. Вплив обробки вибухом на мікроструктуру та механічні властивості сталей // Металознавство та обробка металів. 2018. № 2. С. 45–52.
17. Лисенко О. Б., Сухомлин В. І. Технологічні аспекти обробки металів вибухом // Технологія і конструювання в машинобудуванні. 2015. № 3. С. 21–27.
18. Назаренко О. С. Малоциклова втома сталевих конструкцій: вплив агресивних середовищ // Наук. вісн. Одеського нац. політех. ун-ту. 2018. № 1.
19. Панчишин П. В. Дослідження надійності та довговічності сільськогосподарської техніки. Львів : ЛНАУ, 2006. 208 с.
20. Петренко О. С., Іванченко Л. М. Мікроструктурні зміни в титані після обробки вибухом // Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2017. Т. 53, № 1. С. 89–95.
21. Пістун І. П., Березовецький А. П., Березовецька О. Г. Небезпека аварійного руйнування машин для хімічного захисту // Охорона праці та соц. захист працівників : зб. тез доп. міжнар. конф. Київ : НТУУ «КПІ», 2008. С. 59–64.

22. Пістун І. П., Березовецький А. П., Тубальцев А. М. Малоциклова втома суднобудівних сталей (стан поверхні та приповерхневий шар) : монографія. Львів : Тріада плюс, 2009. 332 с.
23. Полянський П. М. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів : конспект лекцій. Миколаїв : МНАУ, 2014. 136 с.
24. Рубаненко В. О. Антикоровізійні властивості матеріалів для сільськогосподарської техніки. Полтава : ПНТУ, 2010. 144 с.
25. Савченко Т. В. Втомна міцність сталей в умовах агресивних середовищ // Матеріали III Міжнар. конф. з матеріалознавства. Харків : Вид-во ХНУРЕ, 2020.
26. Сидоренко В. М., Гончарук І. В. Дослідження впливу вибухової обробки на властивості алюмінієвих сплавів // Матеріалознавство. 2020. Т. 26, № 3. С. 112–118.
27. Федоренко О. С. Дослідження втомної міцності сталей в агресивних середовищах: проблеми та рішення // Механіка та матеріали. 2022. Т. 65, № 2.
28. Щербаков М. П., Литвиненко О. С. Механізм поверхневого зміцнення вибухом і його застосування в сільськогосподарському машинобудуванні // Проблеми машинобудування. 2004. № 2. С. 72–79.