

**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 впливу дробоструменевого обробітку  
деталей машин при малоциклових навантаженнях в середовищах  
добрив і пестицидів»**

Виконав: студент групи Маш-62

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування  
(шифр і назва)

Романів Михайло Михайлович  
(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

Романів Михайло Михайлович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження впливу дробоструменевого обробітку деталей машин при малоциклових навантаженнях в середовищах добрив і пестицидів»

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. Дослідження дробоструменевої обробки на малоциклову витривалість сталі; 4.4. Охорона праці та захист населення; Висновки; Список використаних джерел.*

## 5. Перелік ілюстративного матеріалу:

Ілюстративний матеріал представити у вигляді презентації у застосунку Microsoft PowerPoint: зразки для випробувань на мало циклову втому; випробування на малоциклову втому в середовищі КАС на машині І П-2; загальний вигляд випробувальних машин І П-4, І П-20: вплив тривалості дробоструминної обробки поверхні на малоциклову витривалість шліфованих зразків; епюри залишкових напружень; вплив обробки дробом і наступного ручного шліфування на малоциклову витривалість сталі; висновки.

## 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	Дослідження дробоструменевої обробки на малоциклову витривалість 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 )

Михайло РОМАНІВ

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ ( підпис )

Андрій БЕРЕЗОВЕЦЬКИЙ

(прізвище та ініціали)

УДК 631.632.1

Кваліфікаційна робота: 58 с. текст. част., 14 слайдів, 2 табл., 30 джерел.

«Дослідження впливу дробоструменевого обробітку деталей машин при малоциклових навантаженнях в середовищах добрив і пестицидів» Романів М.М. – Кваліфікаційна робота. Кафедра машинобудування – Дубляни, Львівський НУП - 2024.

Проведено огляд літературних джерел з питань впливу засобів хімізації сільського господарства (твердих, рідких мінеральних добрив, органічних добрив, пестицидів) на довговічність конструкційних сталей.

У кваліфікаційній роботі викладено основні положення формування поверхневого шару деталей машин при дробоструменевій обробці і її вплив на малоциклову витривалість в агресивних середовищах.

Розглянуті питання кінетики втомного руйнування при циклових навантаженнях у пружно-пластичній області. Викладені методи досліджень і описане випробувальне обладнання на малоциклову втому конструкційних сталей.

Досліджено вплив втоми конструкційних сталей на безпеку працівників та навколишнє середовище.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ.....	8
1.1 Вплив добрив і пестицидів на довговічність конструкцій за літературними джерелами.....	8
1.2. Малоциклова втома і методи підвищення довговічності конструкційних матеріалів при корозійно-втомних навантаженнях.....	9
1.2.1. Малоциклова втома.....	9
1.2.2. Вплив зміцнювальних обробок на опір малоциклової втоми.....	13
1.2.3. Запобігання попередній корозії технологічними методами.....	16
1.3 Методи підвищення виносливості конструкційних сталей.....	18
1.3.1. Механічна обробка.....	18
1.3.2. Поверхнєве пластичне деформування.....	19
1.4. Висновки до розділу.....	21
2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	23
2.1. Вибір конструкційних сталей для досліджень.....	23
2.2.1. Визначення зміни маси зразка.....	23
2.2.2. Визначення глибини корозійного ураження.....	24
2.3. Дослідження опору малоциклової корозійній втомі.....	25
2.3.1. Зразки для випробувань на малоциклову втому.....	26
2.3.2. Обладнання для досліджень на малоциклову втому.....	26
2.3.3. Вимірювання деформації зразка.....	33
2.3.4. Металографічні і електронно-графічні дослідження.....	33
2.4. Робочі середовища.....	34
2.4.1. Мінеральні добрива.....	34

2.4.2. Пестициди.....	34
2.5. Методика обробки експериментальних даних.....	34
2.6. Висновки до розділу.....	35
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДРОБОСТРУМЕНЕВОЇ ОБРОБКИ НА МАЛОЦИКЛОВУ ВИТРИВАЛІСТЬ СТАЛІ.....	37
3.1. Вплив тривалості обробки і форми дроби на малоциклову витривалість.....	37
3.2. Ефективність дробоструминної обробки деталей з конструктивними концентраторами напружень.....	46
3.3. Висновки до розділу.....	50
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ.....	52
4.1. Безпека працівників при дробоструменевому обробітку.....	52
4.2. Контроль за рівнем шуму та вібрацій.....	52
4.3.Захист від шкідливих хімічних речовин.....	53
4.4. Екологічний захист і утилізація відходів.....	53
4.5. Моніторинг і навчання персоналу.....	53
ВИСНОВКИ.....	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56

## ВСТУП

У сільськогосподарському виробництві широко використовуються засоби хімізації. Враховуючи їх хімічне походження і небезпеку при використанні з можливими порушеннями правил застосування - виробництво, зберігання, перевезення, приготування, внесення препаратів дозволяється тільки механізованим способом.

Машини і механізми, задіяні до цих процесів, працюють у складних умовах. Корозійна активність мінеральних добрив, пестицидів і одночасна дія малоциклових навантажень, які отримують механізми при забезпеченні процесів виробництва, при переїздах по нерівних дорогах, борозенних полях передчасно приводять їх до поломок. Деталі і вузли, а то і цілі машини часто потребують заміни через втрату витривалості конструкційних матеріалів.

Використовувати у сільськогосподарському будівництві машин високоміцні, леговані, корозійностійкі конструкційні матеріали, які б могли працювати в умовах виробництва сільськогосподарської продукції неможливо, через їх дефіцитність і дороговизну.

Наукові працівники, дослідники сьогодні працюють над підвищенням довговічності тих конструкційних матеріалів, які нині використовують в будівництві машин даного призначення. Досліджується вплив поверхневого зміцнення вибуховою, дробоструменевою обробками, холодне вальцювання, лазерна обробка, антикорозійні покриття.

Великий вплив на опір малоцикловій витривалості конструкційних сталей має фізико-механічний поверхневий стан металу. В роботі проводяться дослідження дробоструменевої обробки деталей машин, які працюють в контакті із добривами і пестицидами.

## 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ

### 1.1 Вплив добрив і пестицидів на довговічність конструкцій за літературними джерелами

Згідно з дослідженнями, рідкі комплексні добрива (РКД) та рідкі азотні добрива, зокрема рідкий аміак, аміакати, аміачна вода та суміші карбаміду й аміачної селітри (КАС), мають високу економічну ефективність як у виробництві, так і у використанні. Зростання їхнього виробництва підвищує актуальність вивчення впливу таких добрив на матеріали, з яких виготовлені машини для їх виробництва, зберігання та внесення. Разом із впровадженням нових добрив розробляються і спеціалізовані машини: агрегати для внесення (ПЖУ), установки для транспортування рідких добрив (ОЗТП, ГКБ) та їх сумішей.

Значна частина техніки для транспортування та внесення мінеральних і органічних добрив, а також пестицидів, має вузли без антикорозійного захисту. У деяких агрегатах робочі елементи виготовлені з некорозійних матеріалів [5]. Однак дослідження корозійного впливу рідких добрив на сільськогосподарську техніку поки що обмежені.

Зокрема, Василенко С.М. [6,7] та інші науковці досліджували корозійну стійкість сталей Ст3, Х18Н10Т, 08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т у середовищах РКД марки 10-34-0 (ТУ 6-08-414-78) за гравіметричним методом протягом 1000 годин. Було встановлено, що глибинний показник корозії змінюється в залежності від тривалості випробувань, що робить його недоцільним як єдиний критерій оцінки корозійної стійкості сталі. Протягом перших 50-55 годин спостерігались вагові втрати, після чого на поверхні зразків утворювався захисний шар, який при тривалішому впливі збільшувався.

Як оптимальний показник корозійної стійкості сталі Ст3 пропонується використовувати втрати металу з одиниці площі за час формування захисного шару. Глибинний і ваговий показники не можуть повністю



описати поведінку сталі в середовищі РКД, оскільки значно залежать від часу випробувань.

Дослідження [10] показали, що корозія сталі Ст3 у РКД марок 9-9-9 та 7-7-10, на основі розчину 10-34-0, була інтенсивнішою порівняно з базовою, а наявність хлориду калію у складі 7-7-10 зменшувала здатність до формування захисного шару.

Додані до розчинів мікроелементи, такі як  $ZnSO_4 \cdot H_2O$ ,  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ ,  $Na_2B_4O_7$ ,  $(NH_4)_6MO_7O_4 \cdot 4H_2O$ ,  $Co(NO_3)_2$ , також впливають на корозійні властивості. Наприклад, у РКД з вмістом 0,7-1,0% Мо відмічали збільшення втрат металу та глибинного показника корозії, тоді як при додаванні 1,0% В захисний шар не утворювався протягом 18 діб. Натомість сірчаноокислий цинк (0,2-1,0%) сприяв утворенню захисного шару, що суттєво зменшувало корозійні втрати.

Також проводились випробування сталі Ст3 у РКД 10-34-0 на межі рідкої і газоподібної фаз протягом 1000 годин [25,27]. У газовому середовищі втрати сталі були мінімальними (швидкість корозії до 0,0013 мм/рік), але на межі поділу фаз корозія виявилася у 10-15 разів інтенсивнішою, що робить цю зону особливо вразливою до корозійних пошкоджень.

## **1.2. Малоциклова втома і методи підвищення довговічності конструкційних матеріалів при корозійно-втомних навантаженнях**

**1.2.1. Малоциклова втома.** Явище руйнування під дією циклічних напружень, які викликають пластичну циклічну деформацію матеріалу, отримало назву «малоциклової» (low-cycle) чи пластичної (plastic strain) втоми, причому слово «мало» відноситься до числа циклів до руйнування.

На відміну від звичайної, де довговічність обчислюється мільйонами циклів до руйнування, малоциклова втома передбачає довговічність не більшу  $10^5$  циклів. Руйнування в цьому випадку розвиваються на фоні макроскопічних пластичних деформацій, які охоплюють значну долю об'єму чи перерізу зразка або деталі тоді як при звичайній втомі має місце

мікропластична деформація, локалізована в малих об'ємах поблизу зони втомного руйнування. Характер руйнування при малоцикловій втомі має багато спільного з руйнуванням при дії одноразово прикладеного статичного навантаження і як би утворює проміжну ступінь між статистичними і втомними руйнуваннями. Тому прикладене з малою частотою навантаження, яке викликає руйнування протягом невеликого числа ( $10^3$ - $10^4$ ), інколи називають повторно-статичними. Випробування з постійними циклічними напруженнями відносять до розряду випробувань за «м'якою» схемою навантаження, у випадку постійності амплітуди циклічних деформацій має місце так зване «жорстке» навантаження.

Нами використовуються при випробуваннях на МЦВ установки для дослідження корпусних матеріалів у вигляді пластинчатих зразків.

Найбільш обширні експериментальні випробування різних аспектів МЦВ при термічних і механічних циклічних деформаціях були виконані дослідниками [18].

Було опрацьовано літературні дані, власні результати і показано, що зв'язок пластичної циклічної деформації і числа циклів до руйнування в широкому діапазоні довговічностей (від 1 до  $10^5$ ) циклів виражається рівнянням

$$\varepsilon_{пл} \cdot N^m = C \quad (1.1)$$

де  $\varepsilon_{пл}$  - розмах циклічної пластичної деформації,

$N$  - число циклів до руйнування,

$m$  і  $C$  - постійні.

Останнім часом вивченню різних факторів на малоциклову втому надається все більша увага. Так вплив концентрації напружень досліджено в роботах [5], мікроструктури і легування [7], рафінування сталі [16], масштабного фактору [9], частоти навантажень [10], розміру зерна [28], накопичення пошкодження і зародження та поширення тріщин [27, 28].

Появилися бібліографічні огляди літератури з малоциклової втоми. Так в Німеччині було проаналізовано 42 статті з малоциклової втоми, в США проведений аналіз всіх статей за 1957-1968 роки, до III Всесоюзного симпозіуму з малоциклової втоми (1979 рік) елементів конструкцій вийшов - бібліографічний показчик з 518 джерел, та огляд матеріалів чотирьох провідних журналів Японії з питань матеріалознавства за період 1983-1986 років [1-4].

Багатьма дослідниками вивчалася малоциклова втома зварних з'єднань [25,27,28], що дає змогу конструкторам і технологам вирішувати складні завдання створення крупних деталей і конструкцій шляхом з'єднання зварюванням прокатних, кованих і вилитих елементів великих перерізів при високих вимогах до їх міцності при змінних навантаженнях в пластичній зоні.

У зв'язку з тим, що більшість конструкцій, які витримують повторно-статичні навантаження працюють в різних агресивних середовищах (трубопроводи, посудини під тиском, корпуси суден, реактори, літаючі апарати, машини для внесення добрив, боротьби з шкідниками рослин), велику зацікавленість представляють дані про вплив цих середовищ на малоциклову втому. Відомості про корозійну втому при довговічності  $10^5$  циклів вкрай мізерні, але, як справедливо відмічає Бенхем [38], навіть і ці небагаточисельні дані по-справжньому неможливо використати до розглядуваної проблеми. Це пояснюється тим, що корозія у більшій мірі залежить від часу, і значення довговічності сильно залежить від частоти прикладання навантаження.

При дослідженні сумісного впливу концентрації напружень і корозійного середовища (КАС) при МЦВ [27] були отримані дані, які свідчать про залежність довговічності зразків від амплітуди і частоти циклічного деформування, від геометрії концентрації напружень.

Вивченню впливу різних факторів на МЦВ при одночасній дії робочих середовищ були присвячені роботи [18,20]. Де виявлено, що збільшення

частоти амплітуди циклічного навантаження послаблює вплив середовища на довговічність, причому при наводнюванні цей ефект проявляється сильніше, ніж при корозії. Вплив концентраторів напружень на малоциклову втому в середовищах досліджений в роботі [17], де показано, що наявність концентратора напружень приводить до різкого зниження довговічності при малоциклової втомі, а найбільше зниження відмічено при випробуваннях на повітрі.

В роботі [18] досліджено зміни деяких структурно чутливих властивостей (мікротвердості, циклічної в'язкості, ширини рентгенівської дифракційної лінії) в процесі випробування на повітрі і в наводнюючому середовищі. Приведені результати вивчення утворення і поширення тріщин. Пропонується механізм міжзеренного руйнування при МЦВ. Показано, що наводнююче середовище прискорює міжзеренне руйнування при МЦВ і сприяє розвитку багаточисельних тріщин, тоді як при руйнуванні на повітрі спостерігається одна магістральна тріщина.

Вплив корозійного середовища на малоциклову втому конструкційних сталей різного рівня міцності вивчався в роботі [9], а накопичення пошкодження [20]. Зменшення втомної міцності під впливом наводнювання було названо «водневою втомою»; очевидно, і зниження довговічності при МЦВ під дією водню автори резонно назвали «малоцикловою водневою втомою» [26]. Враховуючи актуальність вивчення впливу водню на МЦВ сталі, рядом дослідників проведені такі випробування, де відмічено, що руйнування зразків в середовищі водню відбувається в 2-3 рази швидше, ніж у вакуумі. Таке зниження пояснюється різким спадом пластичності приповерхневого шару внаслідок адсорбції водню.

З приведеного короткого літературного огляду із малоциклової втоми видно, що цьому виду втомного руйнування все більше і більше на сьогоднішній день присвячується досліджень, проте багато питань в цьому напрямку все ще не вивчені.

### **1.2.2. Вплив зміцнювальних обробок на опір малоциклової втоми.**

Метод зміцнення деталей машин поверхнево-пластичним деформуванням (ППД) отримав на сьогодні широке розповсюдження. При ППД змінюються фізико-механічні властивості поверхневого шару металу, підвищується його твердість, створюється сприятливий розподіл залишкових напружень перерізу деталі, а також видозмінюється форма і орієнтація кристалічних зерен поверхневих шарів, так що опір цих шарів пластичній деформації і руйнуванню підвищується.

Що стосується впливу поверхневого нагартування для підвищення циклічної міцності, то тут існує однозначна думка: поверхнєве нагартування завжди підвищує довговічність металу, коли немає перенагартування, яке знижує довговічність. Це питання достатньо добре вивчене і викладене у роботах [6,8], та інших дослідників.

Не дивлячись на те, що нагартовані поверхні піддаються більш сильній дії зовнішніх активних середовищ, нагартування значно підвищує довговічність сталі в активних середовищах при дуже довготривалому циклічному навантаженні.

Виходячи з вищенаведеного, видно, що питання впливу нагартування на багатоциклово звичайну втому як на повітрі, так і в корозійному середовищі детально вивчений, однак в літературі дуже мало досліджень, присвячених питанню впливу нагартування на малоциклово втому, а результати про сумісний вплив нагартування і робочих середовищ, зокрема добрив і пестицидів, для цих умов практично відсутні.

Специфічною особливістю процесу пошкодження матеріалу у випадку малоциклової втоми є накопичення макропластичної деформації. Ця особливість на перших порах породжувала сумнів в сприятливості поверхневого нагартування для збільшення несучої здатності деталей, які працюють в режимі малоциклової втоми. Ці сумніви базувалися на тому, що ППД супроводжується зменшенням запасу пластичності нагартованого шару. Разом з тим відомо [15], що здатність до накопичення пластичної де-

формації є одним із основних факторів, які визначають опір малоцикловій втомі матеріалів.

Крім цього, думалося, що з накопичуванням пластичної деформації при малоцикловому навантаженні будуть пропадати сприятливі залишкові напруження, викликані поверхневим нагартуванням. Разом з тим появились роботи, в яких для деяких конкретних випадків (посудини високого тиску і глибокого занурення, підштампові плити пресів) була показана можливість збільшення опору малоцикловій втомі шляхом використання поверхневого нагартування [8,15].

В цих дослідженнях головна роль у підвищенні втомної міцності деталей відводиться залишковим стискующим напруженням. Не можна погодитися з тим, що залишкові стискуючі напруження суттєво впливають на підвищення втомної міцності при невисоких рівнях змінних напружень. Разом з тим ряд дослідників [11,13] рахують, що при змінних навантаженнях в пружно-пластичній зоні сприятливі стискуючі залишкові напруження, які виникли після поверхневого нагартування, не можуть відігравати першочергову роль у підвищенні довговічності деталей машин.

З іншого боку, багаторічні дослідження, які виконувалися у ВІАМі стосовно до умов роботи авіаційних конструкцій, дозволяють рахувати, що в малоцикловій області при високих повторних навантаженнях найбільш важливим фактором, який обумовлює підвищення довговічності високоміцних матеріалів, є радикальне покращення мікрорельєфу поверхні. Поверхнєве нагартування нейтралізує дію гострих надрізів, забезпечує найбільш сприятливий мікрорельєф поверхні і тим самим підвищує втомну міцність поверхневого шару. Коли при шліфуванні багато гострих і глибоких надрізів залишаються, то після поверхневого зміцнення радіуси впадин мікронерівностей суттєво збільшуються, самі нерівності розорієнтовні, висота цих нерівностей набагато зменшується. Так, Ткаченко [24] вказує, що при дії високих повторних навантажень (малоциклова область) і невеликій концентрації напружень роль залишкових напружень

стиску стає другорядною, а на перший план, особливо для високоміцних матеріалів, виступає мікрорельєф поверхні.

Згідно [7] обробка для зняття розтягуючих залишкових напружень дає невеликий ефект або зовсім не впливає при циклічних пластичних деформаціях, суттєве підвищення втомної міцності можна забезпечити заходами, які затримують виникнення і поширення тріщин - це досягається в основному за рахунок механічного видалення різких переходів, надрізів і тріщин у відповідальних місцях.

В роботах [12,16] показано, що пластична деформація від зовнішніх навантажень приводить до зменшення чи навіть повного зникнення початкових залишкових напружень, і, як наслідок, вплив залишкових напружень на витривалість може не проявитися. Відмічену вище точку зору про швидкість релаксації залишкових напружень і малої ефективності ППД при малоцикловій втомі сталі поділяють автори роботи [10].

Ряд досліджень [17,18] показують, що в багатьох випадках (особливо в зонах конструктивних чи технологічних концентраторів напружень) релаксація залишкових напружень, викликаних ППД, не відбувається навіть при напруженнях вищих границі пружності.

З вищенаведеного випливає, що поверхнєве нагартування приводить до підвищення довговічності деталей машин в малоцикловій області, і суперечливі лише погляди, які з факторів (сприятливі стискуючі залишкові напруження чи мікрорельєф, шорсткість поверхні) є першорядним.

Однак є і зовсім протилежні думки про значення поверхневого зміцнення для підвищення малоциклової втоми. Наприклад, Олменом [96] були опубліковані результати втомних випробувань сталених зразків, які піддавалися дробоструменевому нагартуванню, згідно яких при високих рівнях напружень втомна міцність нагартованих зразків нижча від ненагартованих. Аналогічні результати отримані в роботах [97-99].

Таким чином, використання поверхневого нагартування для підвищення несучої здатності деталей в області маклоциклової втоми ще є

проблематичним. Єдиної думки про ступінь впливу нагартування на МЦВ сталі немає.

### **1.2.3. Запобігання попередній корозії технологічними методами.**

Автори [8] зробили спробу вивчити стійкість сталі, обробленої механічно різними видами і при різних режимах проти корозії при періодичному змочуванні в 3 %-ному розчині хлористого натрію, а також дослідити вплив цих видів попередньої корозії на наступну втомну міцність сталі в залежності від механічної обробки.

Для досліджень вказаних питань була взята середньовуглецева сталь 45 в нормалізованому стані (перлітно-феритної структури), з якої виточували зразки для досліджень на корозійну стійкість і корозійно-втомну міцність. Всі зразки оброблялися звичайним, силовим і швидкісним точінням (два режими), а також шліфування і обкатування роликками. Чистота поверхні токарнооброблених зразків для всіх режимів була однаковою і рівнялася 5-му класу, шліфованих і обкатаних роликками -9-му класу.

Попередня корозія металу викликає появу концентраторів напружень. Проте гострота цих концентраторів залежить від фізико-механічних властивостей поверхні металу, викликаних тією чи іншою обробкою. Умовна границя корозійної втоми попередньо прокородованих зразків, шліфованих після силового різання підвищилася майже на 12 %, а шліфованих після швидкісного різання - знизилась на 4 %.

Обкатування роликками, підвищуючи довговічність сталі на повітрі, дає також високу стійкість сталі за умов її попередньої атмосферної корозії (зниження довговічності біля 2 %). Проте корозія обкатаних роликками зразків, спричинена змочуванням соленою водою, привела до значнішої втрати довговічності, рівної майже 8%, але все ж абсолютне значення довговічності обкатаних роликками зразків було більшим, ніж у 2 рази в порівнянні з довговічністю попередньо прокородованих зразків, шліфованих після різних видів токарного обробітку. Ці результати показують наскільки сприятливим видом обробки є обкатування роликками сталевих виробів, що



працюють як на повітрі при наявності попередньої корозії, так і в корозійному середовищі з попередньою корозією і без неї. Звідси, обробка, яка надає поверхневим шарам металу стискуючі напруження і усуває поверхневі дефекти, зменшує вплив попередньої корозії на втому на повітрі.

Вплив ПК на сталі 18Cr-2Mo-Ti і типу AISI 304 AISI 316 проводили [10] в умовах міста і морської атмосфери протягом п'яти років. Зразки візуально оглядали через 1, 3 і 5 років, а також після закінчення досліджень з допомогою растрової електронної мікроскопії. Було показано, що в міській атмосфері поверхня зразків на досліджуваних сталях залишалася в нормальному стані; в морській атмосфері поверхня сталі 18Cr-2Mo-Ti була кращою, ніж у сталі AISI 316. Поліровані поверхні виявилися більш стійкими, ніж травлені. Останні проявили кращі властивості, ніж шліфовані.

Електрохімічним поляризаційним методом досліджували вплив параметрів якості поверхні на корозійну стійкість низьковуглецевих сталей. Результати досліджень представлені у вигляді графіків залежності електрохімічних параметрів від шорховатості поверхні  $R_a$  і середньоквадратичного значення шорховатості  $R_q$ . Корозійна стійкість сталі знижується із зменшенням параметрів  $R_a$  і  $R_q$ , що протирічить існуючим представленням про те, що корозійна стійкість сталі знижується при грубшій поверхні зразків. Це пов'язано з тим, що параметр  $R_a$  не дає представлення про профіль нерівностей поверхні. При недостатній ширині дефекта поверхні рідина не буде затікати в дефект; при більшій ширині рідина не буде втримуватися в дефекті. Тому корозійна стійкість залежить не тільки від шорховатості поверхні, але і від профілю дефектів поверхні.

В роботі [14], наприклад, при виявленні впливу стану поверхні на ступінь зниження втомної міцності внаслідок попередньої корозії встановлено, що визначне значення має характер механічної обробки поверхні, а не її чистота. Так, шліфовані зразки з високою чистотою показали більше зниження циклічної міцності після попередньої корозії, ніж зразки оброблені токарним різцем.

Автор [11] відмічає, що дробоструменева обробка не захищає від пітингової корозії, оскільки ефект від неї розповсюджується на глибину  $\sim 80$  мкм. Тому, якщо починається пітингова корозія і глибина поражень досягає, наприклад 100 мкм, то в цій області вже діють напруження розтягу і стає можливим корозійне розтріскування.

Аустенітні сталі можуть набувати підвищеної чутливості до корозійного розтріскування після таких видів механічної обробки, як свердління, фрезерування, шліфування. Це пояснюється тим, що при цьому на окремих ділянках поверхні напруження досягають границі міцності. Але такі високі напруження розповсюджуються на невеликі зони.

Є ще один спосіб обробки поверхні для усунення напруженого поверхневого шару, а саме травлення. Травленням можна видаляти шари сталі товщиною не більше 10-20 мкм. Більш товстіші шари видаляти недоцільно, оскільки в шарах розміщених нижче напруження від зварювання перевищують напруження від механічної обробки.

### **1.3 Методи підвищення виносливості конструкційних сталей**

**1.3.1 Механічна обробка.** Після механічної обробки якість поверхні металу визначається мікрогеометричними характеристиками, а якість приповерхневих шарів – їх структурою, рівнем зміцнення, міцністю, пластичністю та залишковими напруженнями. При циклічних навантаженнях мікрогеометрія значно впливає на витривалість сталі, адже дефекти і сліди обробки діють як концентратори напружень. Найважливіший параметр, що впливає на витривалість обробленої поверхні, – це максимальна глибина нерівностей, яка виступає основним чинником зниження циклічної міцності [12].

На сьогодні вплив механічної обробки на витривалість сталі розглядається комплексно, з урахуванням мікрогеометрії та стану поверхневого шару. Зменшення шорсткості поверхні, збільшення зміцнення та залишкових напружень стиску сприяє підвищенню витривалості сталі.

Різні види обробки впливають на втомну міцність по-різному через варіації у фізико-механічному стані металу. Особливу увагу приділяють властивостям поверхні при одночасному впливі циклічних напружень та агресивного середовища, адже всі зовнішні чинники впливають саме через поверхню металу.

Дослідження [12, 14] підтверджують, що механічна обробка, змінюючи фізичний стан поверхні, суттєво впливає на її хімічну стійкість та електрохімічні властивості. Пластична деформація призводить до електрохімічної гетерогенності поверхні, що підсилює роботу корозійних елементів. Різні способи обробки надають різний рівень хімічної стійкості поверхні, дозволяючи визначити оптимальні режими механічної обробки.

**1.3.2 Поверхнєве пластичне деформування.** Основна мета механічної обробки полягає в отриманні деталей заданих розмірів та з певною шорсткістю поверхні, тоді як утворені при цьому зміцнення та залишкові напруження є невід'ємним супутнім результатом. Щоб цілеспрямовано змінювати фізико-механічні властивості поверхневих шарів, а саме забезпечувати необхідне зміцнення та формувати сприятливі залишкові напруження, застосовують методи поверхневого пластичного деформування (ППД).

Сьогодні ППД широко використовується для зміцнення деталей машин. Цей метод змінює фізико-механічні властивості поверхневого шару металу, збільшуючи його твердість, створюючи сприятливий розподіл залишкових напружень у перерізі деталі, а також змінюючи форму й орієнтацію кристалічних зерен. У результаті такі шари мають підвищену стійкість до деформацій і руйнування.

Перевага поверхневого зміцнення для підвищення циклічної міцності загальноновизнана: цей процес завжди збільшує довговічність металу. Дослідження показують, що хоча зміцнені поверхні зазнають посиленого впливу агресивних середовищ [9], їх довговічність у таких умовах зростає під час тривалого циклічного навантаження.

У випадку багатоциклової втоми дробоструминна обробка сприяє подовженню стадії утворення тріщини, проте менше впливає на стадію її поширення [12]. Якщо ж глибина тріщини невелика, дробоструминна обробка може знижувати швидкість її розповсюдження, хоча цей ефект зникає із збільшенням глибини тріщини.

Дробоструминна обробка також затримує виникнення поверхневих тріщин, оскільки дислокаційні скупчення у деформованій зоні зразка стримують виникнення втомних тріщин [8]. Коли ж тріщини все-таки утворюються, вони розвиваються повільніше через стискуючі залишкові напруження, утворені при обробці.

Більшість дослідників [6,15,22], вивчаючи вплив ППД на втому, відзначають, що зміцнений стан поверхні впливає не на швидкість появи тріщин, а на швидкість їх зростання. Проте зазначено, що залишкові стискуючі напруження здатні суттєво затримувати ріст втомних тріщин лише за певних невисоких рівнів циклічної деформації. Також поверхнєве зміцнення позитивно впливає на циклічну довговічність зварних з'єднань.

Загалом вплив зміцнення на багатоциклову втому в умовах повітря та агресивного середовища вивчено досить детально. Однак досліджень щодо впливу зміцнення на малоциклову втому недостатньо, і практично немає даних про поєднаний вплив зміцнення та середовища за таких умов.

Малоциклова втома супроводжується накопиченням макропластичної деформації, що спершу викликало сумніви щодо доцільності ППД для збільшення міцності деталей, які працюють у цих умовах. Це пояснювалося зниженням пластичності зміцненого шару. Однак відомо, що здатність накопичувати пластичну деформацію є одним із ключових чинників, що впливають на опір малоцикловій втомі.

Деякі дослідники припускали, що накопичення пластичної деформації призводить до втрати сприятливих стискуючих напружень, утворених у процесі ППД. Утім, існують дослідження, які показують, що для

специфічних застосувань, як-от посудини високого тиску, ППД може збільшувати опір малоциклової втомі [12].

У цих роботах основну роль у підвищенні втомної міцності деталей відводять стискуючим залишковим напруженням, хоча їхня ефективність обмежується низькими рівнями змінних напружень. Деякі дослідники [17] вважають, що за умов змінних навантажень у пластичній зоні такі залишкові напруження не є вирішальними для довговічності деталей.

Поверхнєве зміцнення згладжує гострі надрізи та забезпечує кращий мікрорельєф, що підвищує втомну міцність поверхневого шару. Наприклад, при шліфуванні зменшуються глибина та гострота мікронерівностей, а після зміцнення розміри впадин збільшуються, а висота нерівностей зменшується.

На думку деяких дослідників [7,21], пластична деформація під впливом зовнішніх навантажень може повністю зменшити або зникнути початкові залишкові напруження. Автор [8], досліджуючи ППД для малоциклового навантаження конструкційних сталей, відзначає, що залишкові стискуючі напруження можуть швидко зникати після кількох циклів навантаження, переходячи з стискуючих у розтягуючі.

Хоча деякі автори [7,8,21] не визнають позитивного впливу залишкових напружень стиску на малоциклову втому, вони відзначають загальне підвищення витривалості після ППД, пояснюючи це тим, що в поверхневому шарі зменшуються локальні напруження, вирівнюється мікровикривлення, збільшується внутрішнє тертя.

Отже, поверхнєве зміцнення сприяє підвищенню довговічності деталей у малоциклової області, і розходження полягає лише в оцінці вагомості сприятливих стискуючих напружень або мікрорельєфу поверхні як основних чинників довговічності.

#### **1.4. Висновки до розділу**

1. Різні типи добрив і пестицидів мають агресивну дію на матеріали машин та обладнання, що обумовлює корозійне зношення конструкцій.

Дослідження вказують на підвищений корозійний вплив на сталі, зокрема під час експлуатації в агресивних рідких добривах, де корозійна стійкість може змінюватись залежно від складу добрив та методів захисту матеріалу.

2. Малоциклова втома конструкційних сталей — це процес руйнування під дією циклічних навантажень. У цьому випадку руйнування розвивається під дією великих пластичних деформацій, що сприяє накопиченню пошкоджень у поверхневих шарах. Дослідження демонструють залежність малоциклової витривалості від параметрів навантажень, частоти циклів, типу обробки та наявності корозійних середовищ.

3. Метод поверхневого зміцнення, зокрема шляхом дробоструминної обробки, показує високу ефективність у підвищенні довговічності сталі. Стискуючі залишкові напруження після зміцнення сприяють затримці розвитку втомних тріщин, особливо при низьких рівнях циклічних навантажень. Проте при високих амплітудах вплив цих напружень знижується, і зменшення пластичності поверхневих шарів може негативно вплинути на витривалість матеріалів.

4. Корозійна втома матеріалів у агресивних середовищах є важливою проблемою для агротехнічного обладнання, що працює в умовах частого контакту з добривами та пестицидами. Попередня обробка матеріалів (шліфування, обкатування роликками) дозволяє зменшити негативний вплив корозії, проте для довготривалої роботи в корозійних середовищах слід враховувати специфіку хімічного складу добрив.

5. Методи зміцнення матеріалів, такі як поверхнєве пластичне деформування, можуть бути ефективними засобами для підвищення малоциклової втоми, проте необхідно враховувати умови експлуатації конструкцій, оскільки зміцнення підвищує довговічність тільки за умови мінімального перенагартування.

6. Подальші дослідження повинні зосередитись на розробці матеріалів з покращеною корозійною та втомною стійкістю для використання в агресивних середовищах.

## 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1. Вибір конструкційних сталей для досліджень

Для реалізації завдань цього дослідження було використано значну кількість експериментального матеріалу, зокрема конструкційних сталей різного хімічного складу, для проведення всебічних випробувань. До вибраних сталей належать вуглецева сталь звичайної якості Ст3, вуглецеві якісні сталі марок 20, 30, 35, 45, а також високоміцні сталі 30ХГСНА, аустенітна марганцевиста 45Г17Ю3, корпусні сталі 09Г2, 10ХСНД, леговані сталі типу 12ХНЗА та корозійностійкі 08Х17Н6Т, Х18Н10Т.

Відсутність в Україні якісних високолегованих сталей або інших спеціальних конструкційних матеріалів призвела до необхідності використання для виробництва сільськогосподарської техніки низькосортних вуглецевих сталей. Особливу увагу було приділено сталі 20, яку обрали як модель для експериментів з вивчення впливу попередньої корозії та зміцнювальних обробок.

### 2.2. Методи оцінки корозії

Для оцінки корозії застосовували методи визначення зміни маси зразка та глибини корозійного ураження, а також електрохімічні методи згідно з ГОСТ 9.908-85 «Методи визначення показників корозії та корозійної стійкості». Метод вимірювання зміни маси забезпечує надійні показники корозійної стійкості, оскільки безпосередньо вказує на обсяг металу, який зазнав корозії.

**2.2.1. Визначення зміни маси зразка.** Цей метод є простим і надійним для оцінки рівномірної корозії. Втрати маси розраховували за формулою:

$$\Delta m = (m_0 - m_1)/S \quad (2.1)$$

де  $m_0$  - маса зразка початкова;

$m_1$  - маса зразка після зняття продуктів корозії;

$S$  - початкова площа поверхні зразка (до випробування).

Тоді для швидкості корозії можна записати

$$K = (m_0 - m_1)/S \cdot \tau \quad (2.2)$$

де  $\tau$  - час.

Швидкість корозії виражається в г/(м<sup>2</sup>·год).

При зважуванні використовувалася вага лабораторна квадрантна 4-го класу моделі ВЛКТ-500г-М з механізмом компенсації тари.

Визначення маси металу дає середні показники корозії. За такою методикою можна визначити ступінь нерівномірності корозії, який характеризується індексом нерівномірності, тобто відношенням всієї площі зразка до площі, зайнятої корозією.

**2.2.2. Визначення глибини корозійного ураження.** Для нерівномірної корозії оцінка зміни маси була доповнена вимірюванням глибини корозійного проникнення. Використовували індикаторну головку та профілографи для отримання мікрогеометрії поверхні та вивчення форми корозійних уражень.

Вимірюють глибину корозії індикаторною головкою або профілографом. Перевагою профілографа є можливість вимірювання виразок і отримання в збільшеному масштабі фотографічного запису мікрогеометрії поверхні зразка, на якій утворилися корозійні ураження. За профілограмою можна судити не тільки про глибину, але і про форму утворених корозійних уражень. Для більш ретельного вивчення форми і глибини корозійних уражень нами використовувався растровий мікроскоп РЕМ-200.



### 2.3. Дослідження опору малоцикловій корозійній втомі

Для більшості конструкційних сталей основними критеріями якості є характеристики металу, отримані при випробуваннях зразків на статичний розтяг. До вказаних показників відносяться показники міцності - границя міцності ( $\sigma_B$ ), границя текучості ( $\sigma_T, \sigma_{0.2}$ ) і показники пластичності - відносне видовження ( $\delta$ ), відносне звуження ( $\psi$ ). Хоч ці характеристики не втратили свого важливого значення (вони входять до числа сертифікатних даних кожної виплавки більшості марок сталей і сплавів), вони все ж не можуть бути єдиним критерієм якості металу, оскільки не характеризують його поведінку в експлуатаційних умовах.

В зв'язку з тим, що більшість деталей машин отримують не постійні навантаження, а повторні (циклічні), основними показниками якості матеріалу, який іде на виготовлення таких деталей, стають уже характеристики, пов'язані з опором циклічній втомі - границя виносливості ( $\sigma_w$ ) або циклічна довговічність ( $N$ ).

При одночасному впливі на метал корозійного середовища і механічних навантажень характер руйнування конструкції суттєво змінюється, тому проводили випробування при одночасній дії циклічних навантажень і корозійних середовищ. Порівнювали результати цих досліджень із довговічністю сталі на повітрі.

Величиною, яка характеризує вплив корозійного середовища на довговічність сталі і її стійкість до впливу середовища в процесі циклічної деформації, є коефіцієнт впливу середовища  $\beta_c$ , який визначається відношенням довговічності на повітрі ( $N_{\text{пов.}}$ ) до довговічності в середовищі ( $N_{\text{середов.}}$ )

$$\beta_c = N_{\text{пов.}} / N_{\text{середов.}} \quad (2.3)$$

#### 2.3.1. Зразки для випробувань на малоциклову втому.

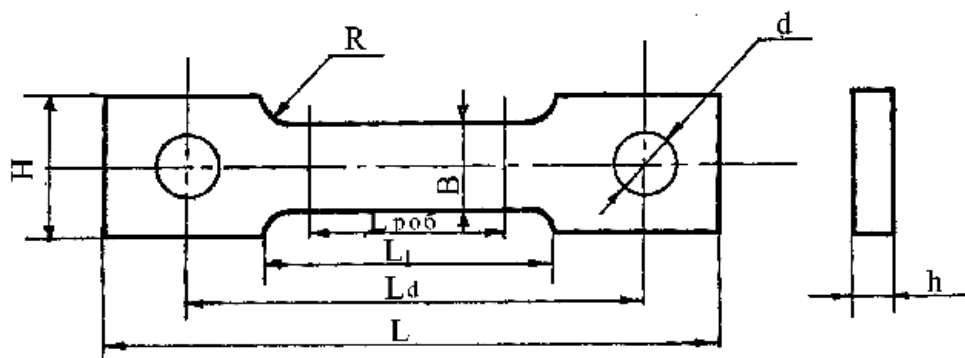
Випробування на малоциклову втому проводили на листових зразках

наступних товщин: 2,5; 6; 12; 20 мм. Форма і розміри зразків представлені на рис 2.1. Дослідження впливу зміцнювальних обробок проводили також на зварних зразках (рис. 2.2) та з концентраторами напружень (рис. 2.3).

Більшість дослідів, які мали за мету вирішити принципові якісні питання досліджень, було проведено на зразках товщиною 2,5 мм. Для вирішення прикладних питань у відповідності з вибором матеріалів досліджень інші випробування проводили на зразках реальних товщин (6, 12, 20 мм), імітуючи розміри виробів, які експлуатуються в режимі малоциклової втоми.

Після виготовлення зразків використовували різні зміцнювальні обробки і покриття за методами, які детально описані нижче у відповідних розділах.

**2.3.2. Обладнання для досліджень на малоциклову втому.** Для проведення випробувань матеріалів при порівняно невеликій частоті і значній амплітуді циклічної деформації, характерних для малоциклової втоми, нами були використана машина І П-2 випробувань плоских металевих зразків повторно-змінним чистим згином. Конструкції машин передбачають можливість проводити випробування на повітрі і в рідинному середовищі. Загальний вигляд випробувальної машини представлений на рис. 2.4. Всі випробування на малоциклову втому проводили пульсуючим, тобто віднульовим циклом.



Основні розміри (мм)				Допоміжні і габаритні розміри (мм)				
h	B	R	L <sub>роб.</sub>	H	L <sub>1</sub>	d	L <sub>d</sub>	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 для випробувань на малоциклову втому

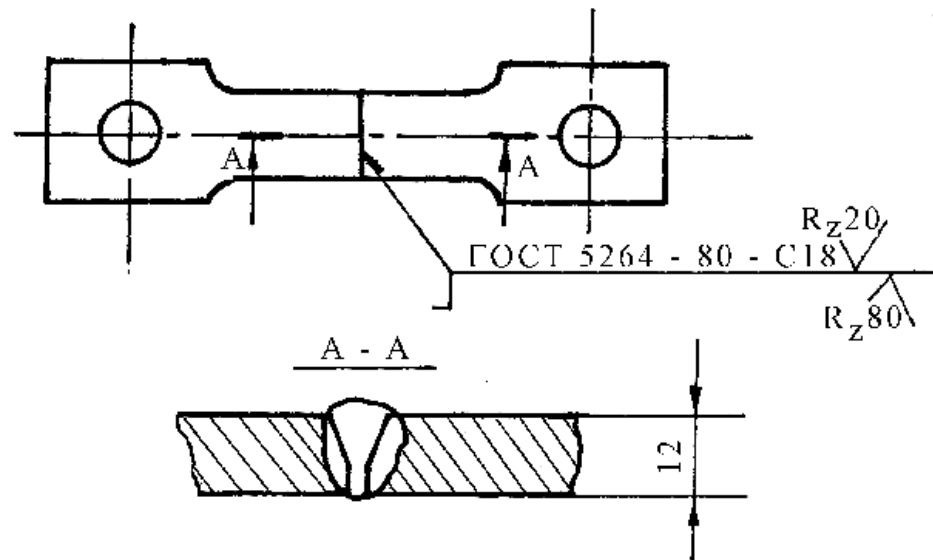


Рис.2.2. Зварні зразки для випробувань на малоциклову втому

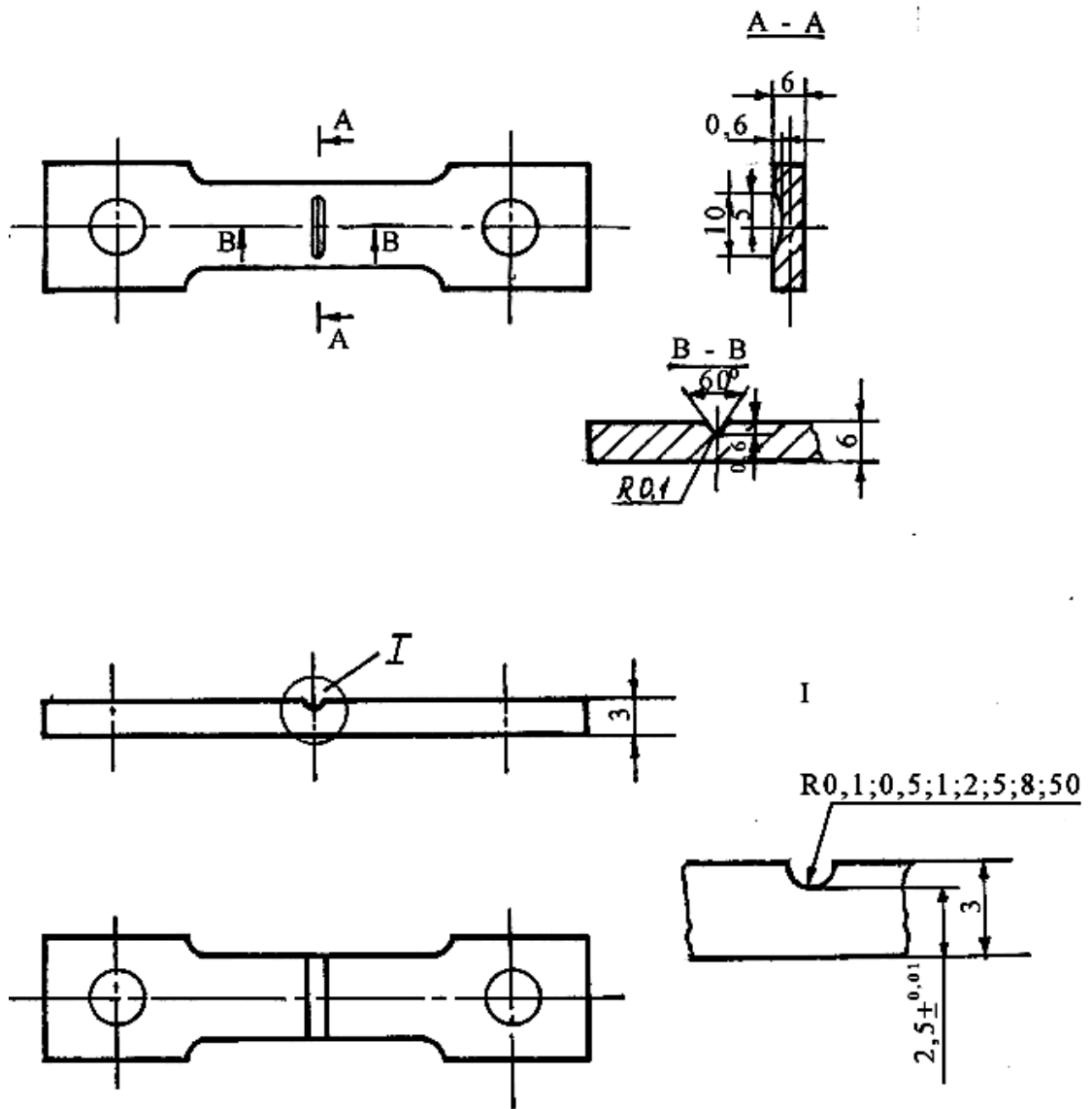


Рис.2.3. Форма і розміри надрізів на зразках для випробувань на малоциклову втому

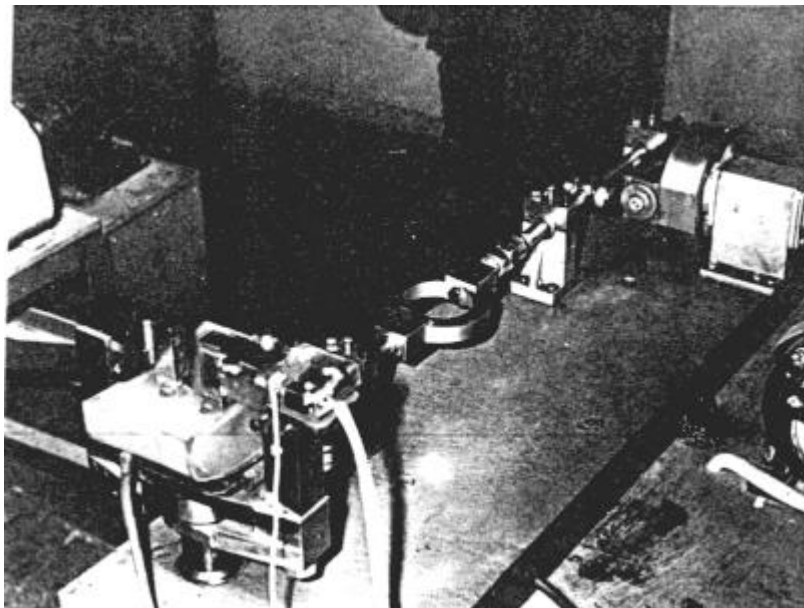


Рис. 2.4. Випробування на малоциклову втому в середовищі КАС на машині І П-2

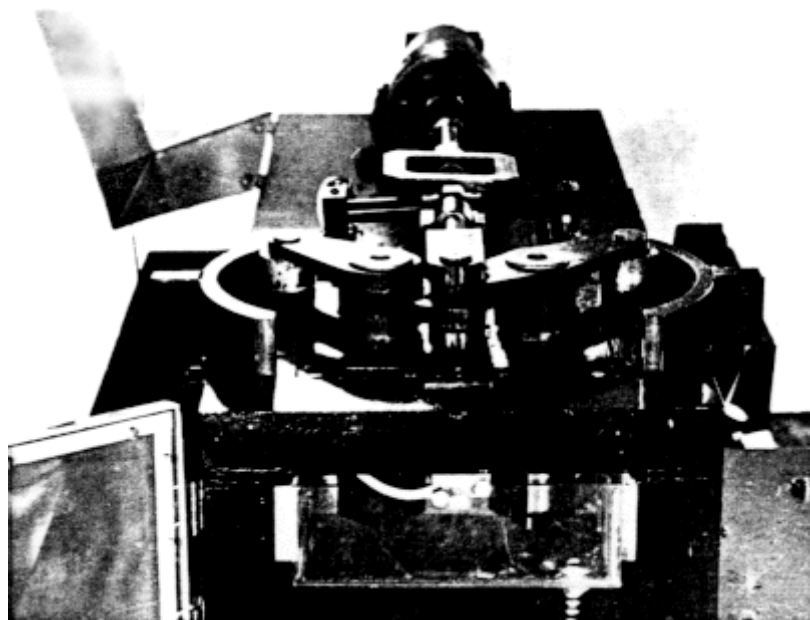


Рис.2.5. Загальний вигляд випробувальної машини І П-4

Працездатність корпусних конструкцій, які експлуатуються в умовах малоциклового навантаження, не може бути з достатньою достовірністю визначена на установках типу ПП-2, які дозволяють проводити випробування зразків товщиною до 3 мм. Тому ми використовували серію (рис.2,5; 2,6; 2,7), які дозволяють випробовувати зразки товщиною до 25 мм, а також деякі конструктивні елементи - зразки зі стиковим зварним з'єднанням, привареними поперечно і поздовжньо ребрами жорсткості, наплавками та ін. - як на повітрі, так і в рідинних середовищах.

Конструктивно установки складаються з двох вузлів, розташованих в одному корпусі-станині; зверху розміщений вузол згинання зразка, а всередині - гідропривід. Управління роботою установки виконується із спеціального пульта (як правило, один пульт на чотири установки). Вузол згинання зразка (рис. 2.7) має захвати 1 і 2, в яких за допомогою цангових зажимів 6 закріплюється зразок 7. Зворотньо-поступальний рух штока 8 гідроциліндра передається на захвати, які, повертаючись навколо осей, створюють згинаючий момент. Обидва захвати виконані плаваючими. Кожний захват має ролик 3, який обкочується по радіусному копіру 4, встановленому на станині 5. Завдячуючи тому, що в процесі навантаження з копіром контактує тільки один з роликів, а між другим копіром і роликом є зазор, досягається умова чистого згину зразка, який випробується.

Проведені тензометричні дослідження показали, що в межах точності досліду (+2 %) дотримувалася умова чистого згину зразка, тобто по всій довжині робочої частини зразка при заданій деформації напруження були однакові.

Електрогідрравлічна схема управління дозволяє вести випробування з постійною амплітудою деформації чи зусиллям при різній асиметрії і формі циклу. Є можливість здійснювати навантаження зразка за наперед заданою програмою. Установки забезпечені ваннами, які можна знімати для проведення випробувань в активних рідинних середовищах.

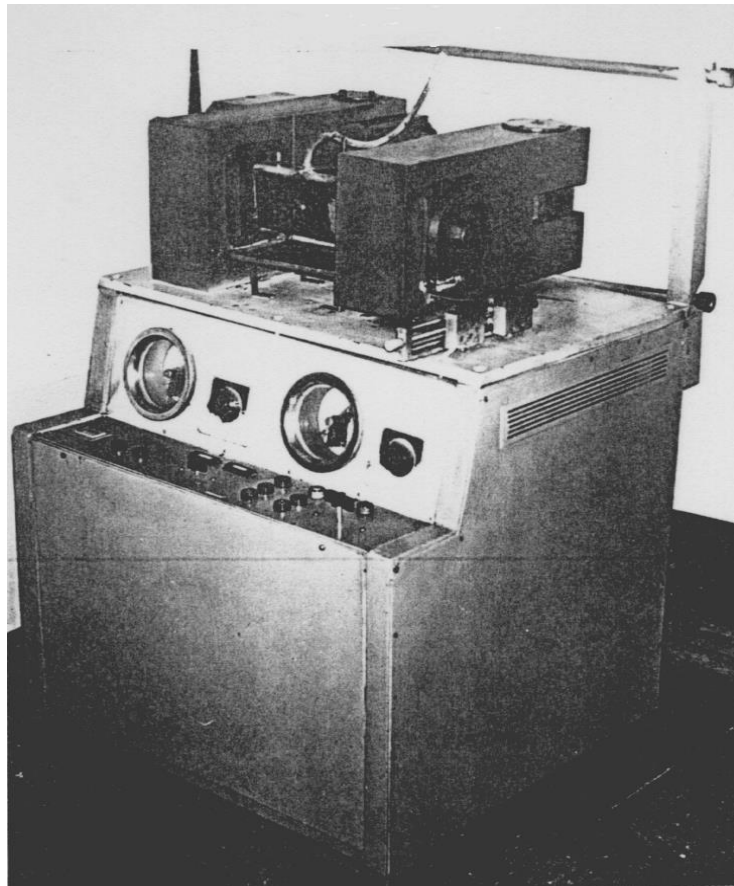


Рис.2.6. Загальний вигляд випробувальної машини І П-20

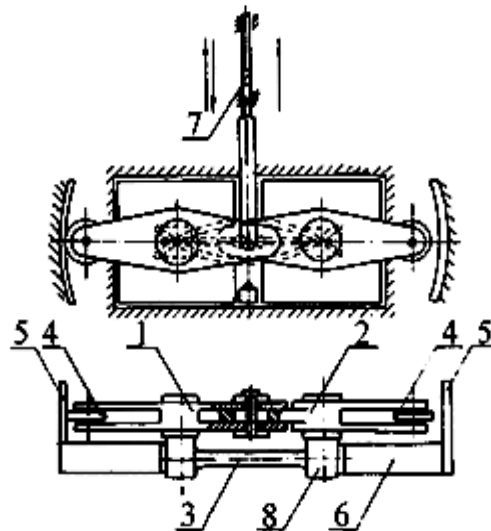


Рис.2.7. Схема установки для випробувань на малоциклову втому згином

**2.3.3. Вимірювання деформації зразка.** Особливу методичну трудність при випробуваннях на малоциклову втому представляє вимірювання напружень чи деформацій. У нашому випадку при жорсткому навантаженні

необхідно було виміряти деформацію зразка. Для визначення відносної деформації за допомогою індикатора вимірювали максимальний прогин (рис. 2.8) з точністю до 0,01 мм. Потім  $R_{\max}$  визначається за формулою

$$R_{\max} = (a^2 + 4f^2)/8f \quad (2.4)$$

де  $a$  - віддаль між голками вилки пристосування;

$f$  - максимальний прогин.

Оскільки робоча частина зразка по всій своїй довжині сприймає однакові напруження, що забезпечується чистим згином і постійним поперечним січенням з достатнім наближенням, лінію згину зразка можна прийняти за дугу кола. Рахуючи, що довжина дуги, яка утворюється середньою лінією зразка, не змінюється при згині, відносна деформація крайнього волокна буде виражатися відношенням довжини дуг, утворених поверхнею зразка і середньою лінією.

$$\varepsilon = (l_{\max} - l_{\text{сер}})/l_{\text{сер}} = (R_{\max} - R_{\text{сер}})/R_{\text{сер}} \quad (2.5)$$

Знаючи  $R_{\max}$ , легко визначити  $R_{\text{сер}}$

$$R_{\text{сер}} = R_{\max} - 1/2 t \quad (2.6)$$

де  $t$  - товщина робочої частини зразка.

І, тоді

$$\varepsilon = t/2R_{\text{сер}} \cdot 100\% \quad (2.7)$$

Значення  $\varepsilon$ , які отримали представляють собою  $\varepsilon_{\text{повн.}}$ , тобто сумарну пружну і пластичну деформацію. Як показали подальші дослідження і порівняння з даними інших дослідників [24], вище описаний метод визначення деформацій забезпечує достатню точність для порівняльних



випробувань малоциклової витривалості сталей при вивченні впливу різних факторів.

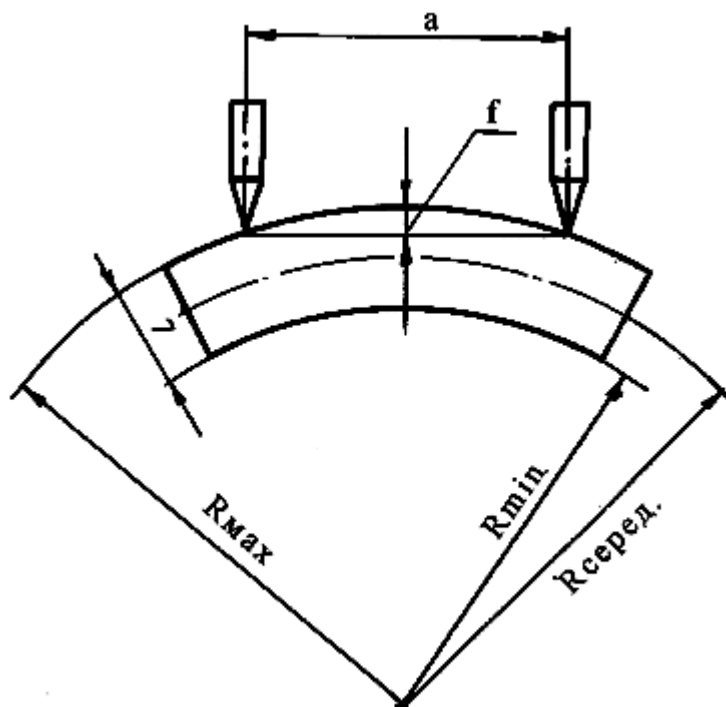


Рис. 2.8. Схема для визначення величини відносної деформації при випробуваннях на малоциклову втому

#### 2.3.4. Металографічні і електронно-графічні дослідження.

Металографічні дослідження проводили на металографічному мікроскопі МИМ-7 на шліфах, виготовлених із зразків, які пройшли випробування на малоциклову втому. Для вивчення процесу зародження і поширення тріщин використовували хімічне травлення для чіткого виявлення загальної структури і границь зерен.

Електронно фрактографічні дослідження проводили на електронному мікроскопі "Tesla BS-242" при збільшеннях від 1000 до 6000 разів. З поверхні злому знімали двохступінчаті целулоїдно-вугільні репліки. Під мікроскопом вивчали ту частину поверхні злому, яка відповідає зоні зародження і поширення втомної тріщини зі сторони максимальних розтягуючих напружень.

## 2.4. Робочі середовища

Дослідження конструкційних сталей на корозійно-втомний опір проводили в середовищах добрив (мінеральних і органічних) та хімічних засобах захисту рослин.

### 2.4.1. Мінеральні добрива.

*Сипучі:*

Аміачна селітра ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), карбамід (мочевина) [ $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ], суперфосфат простий [ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)\text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4$ ], хлористий калій ( $\text{KCl}$ ), каїніт ( $\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), нітроамофос.

*Рідкі:*

Водний аміак, КАС (суміш концентрованих розчинів карбаміду і аміачної селітри), РКД (рідке комплексне добриво).

**2.4.2. Пестициди.** Досліджували корозійно-механічні властивості сталей в середовищах 26 основних пестицидів (інгібіторів та регуляторів росту - 17; фунгіцидів - 7; інсектицидів - 2).

## 2.5. Методика обробки експериментальних даних

Випробування на втому характерні певним розкидом результатів досліджень. Цей розкид неминучий і викликається, з одного боку, факторами, які пов'язані з методикою випробувань (технологією виготовлення зразків, похибкою машин, умовами випробувань і т. ін.) і, з другого боку, неоднорідністю структури досліджуваного матеріалу (наявність включень, дефектів структури, обумовлених скривленням кристалічної ґратки, залишковою напруженістю, анізотропією механічних характеристик і т. ін.). Тому результати досліджень для достовірності повинні бути опрацьовані за допомогою методів математичної статистики.

Статистична обробка результатів досліджень на втому полягає у визначенні функціональної залежності між величинами напружень (деформації) і числом циклів до руйнування.

Як правило, для отримання однієї експериментальної точки використовували 8...10 зразків. Результати випробувань обробляли рекомендованим ГОСТом 23207-78 (Опір втомі) методом статистичної обробки для 50%-ної вирогідності руйнування. Крім звичайної статистичної обробки експериментальних даних, для вишукування кореляційних залежностей між малоцикловою витривалістю сталі 20 і основними параметрами вибухового зміцнення проведена спеціальна математична обробка результатів.

## **2.6. Висновки до розділу**

1. Для досліджень було обрано широкий спектр конструкційних сталей різного хімічного складу, що забезпечує об'єктивність результатів та дозволяє оцінити корозійно-втомну стійкість сталей, часто використовуваних в аграрному секторі України.

2. Використані методи вимірювання втрат маси та глибини корозії забезпечують надійну та детальну оцінку корозійних пошкоджень. Такий підхід дозволяє визначити рівномірність корозії та форму корозійних уражень зразків.

3. При дослідженні малоциклової корозійної втоми випробування зразків за умов малоциклового навантаження дозволили оцінити стійкість матеріалів при одночасному впливі циклічних деформацій і агресивних середовищ. Застосування коефіцієнта впливу середовища дозволяє кількісно порівняти довговічність матеріалів у різних умовах.

4. Зразки різних товщин і зварні зразки із концентраторами напружень, що відповідають реальним конструкціям, дозволили імітувати реальні умови експлуатації. Також були застосовані різні зміцнювальні обробки, що дає змогу порівняти їх ефективність для підвищення опору втомі.

5. Використання випробувальних установок, таких як ПП-2, ПП-4, і ПП-20, дозволило провести надійні дослідження на малоциклову втому в умовах активних середовищ, що відповідає реальним умовам експлуатації агротехнічного обладнання.

6. Дослідження структури, процесів зародження та розвитку тріщин за допомогою мікроскопів забезпечили детальне вивчення природи втомного руйнування, дозволяючи визначити основні зони концентрації напружень і їх вплив на довговічність матеріалу.

7. Випробування проводилися в умовах контакту з агресивними мінеральними добривами та пестицидами, що дозволяє оцінити вплив хімічного середовища на корозійно-втомну міцність конструкційних сталей.

8. Ця методика забезпечує повний та систематичний підхід до оцінки корозійно-втомних властивостей сталей, що важливо для їх використання в агресивних середовищах аграрної галузі.

## РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДРОБОСТРУМЕННОЇ ОБРОБКИ НА МАЛОЦИКЛОВУ ВИТРИВАЛІСТЬ СТАЛІ

### 3.1. Вплив тривалості обробки і форми дроби на малоциклову витривалість

Дробоструминна обробка є розповсюдженим методом, який використовується для зміцнення робочих поверхонь деталей. Відомо, що дробоструминна обробка широко використовується як зміцнювальна технологія для підвищення витривалості деталей і конструктивних елементів, які експлуатуються в режимі звичайної (багатоциклової) втоми на повітрі і в корозійних середовищах. Однак, про ефективність використання цього методу для випадку малоциклової втоми даних дуже мало, у зв'язку з цим і були проведені такі дослідження.

Досліджуваним матеріалом були сталь 45Г17Ю3 та сталь АК-29 у нормалізованому стані. Використовували дробоструминний апарат АД-1, відстань від зрізу сопла до поверхні, яка обробляється, приблизно 100 мм, при цьому брали сталевий колений дріб марки ДСК розміром 0,5-1 мм, а також круглий дріб діаметром 1,5...1,8 мм.

Для вивчення впливу тривалості обробки і форми дроби на малоциклову втому зразки сталі АК-29 піддавали дробоструминній обробці гострим і круглим дробом. Гострий дріб використовували з метою не стільки для зміцнення, як для підготовки поверхні під металізаційні покриття. Результати випробувань на малоциклову втому обдутих дробом зразків із сталі АК-29 показали, що дробоструминна обробка шліфованих зразків знижує витривалість (рис. 3.1).

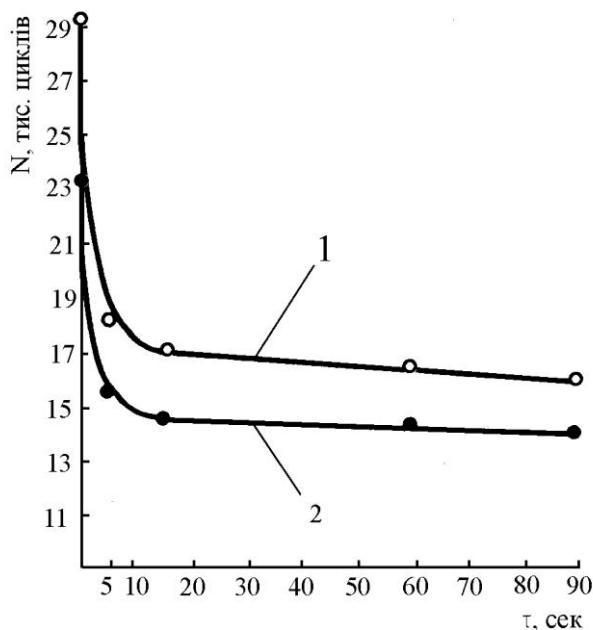


Рис. 3.1. Вплив тривалості дробоструминної обробки поверхні ( $\tau$ , сек) на малоциклову витривалість шліфованих зразків на повітрі (1) і корозійному середовищі (2) при деформації  $\varepsilon = 0,37\%$ .

Потрібно відзначити, що найбільше зниження відбувається після першої п'ятисекундної обробки дробом, подальше збільшення тривалості часу обдувки веде до монотонного незначного зниження витривалості. Дробоструминна обробка гострим дробом шліфованих зразків суттєво змінює мікрогеометрію поверхні, а також фізико-механічні властивості (зміцнення, напруженість), про що свідчать дані, приведені на рис. 3.2 і 3.3. Причиною зниження витривалості сталі в результаті дробоструминної обробки є значне погіршення мікрорельєфу поверхні, що викликає появу прогресуючої концентрації напружень.

Характерно, що в результаті дробоструминної обробки зміцнення і стискуючі залишкові напруження (рис. 3.4) – фактори, які мають, безумовно, сприятливий вплив на опір втоми, - у даному випадку не можуть подолати переважаючого негативного ефекту концентрації напружень від поверхневих мікронерівностей.

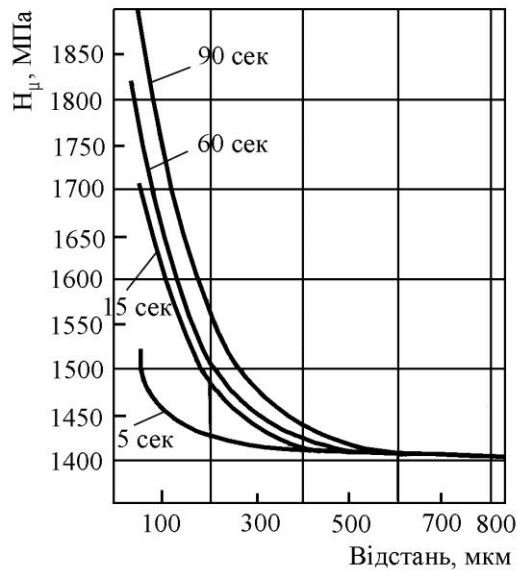


Рис. 3.2. Зміна твердості по зрізу зразка в залежності від тривалості дробоструминної обробки гострим дробом.

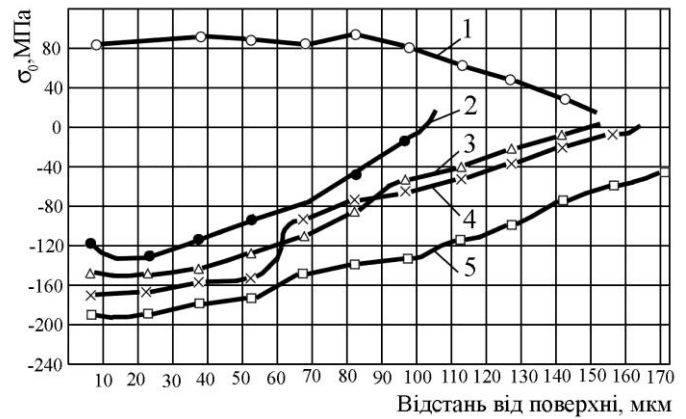


Рис. 3.3. Епюри залишкових напружень шліфованих зразків сталі - вихідного (1) і оброблених дробом протягом 5 (2); 15 (3); 60 (4); 90 (5) секунд.

Для вияснення причин негативного впливу обробки дробом на малоциклову витривалість сталі були проведені дослідження обдуганих дробом зразків з наступною обробкою шліфувальною шкуркою (для зняття мікронерівностей, які виникли при обдуванні дробом).

З таблиці 3.1, де наведені результати випробувань вказаних зразків, видно, що шліфування обробленої дробом поверхні приводить до підвищення малоциклової витривалості. Правда, витривалість не відновилася до показників решти шліфованих зразків, тому що на поверхні все-таки залишаються сліди від дробоструминної обробки.

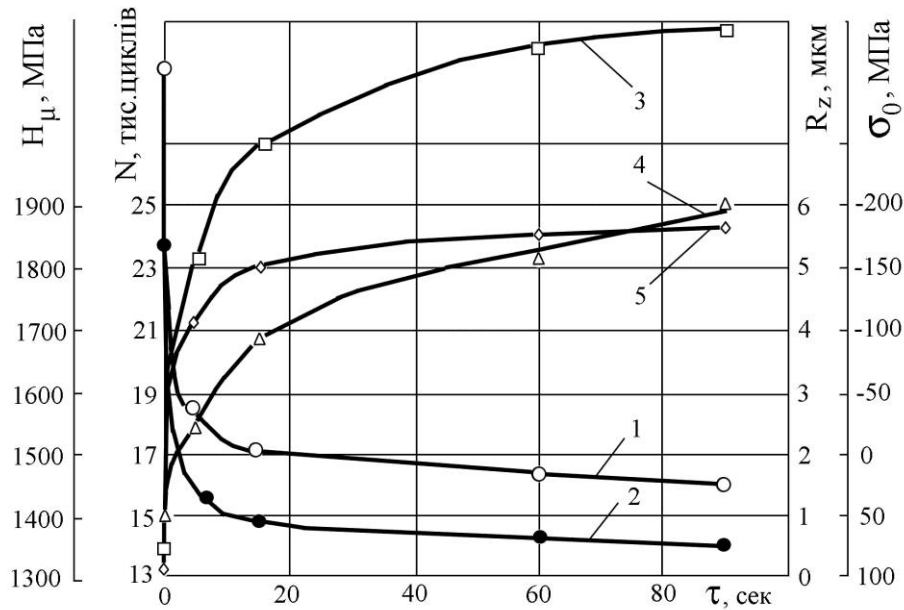


Рис. 3.4. Вплив тривалості дробоструминної обробки на малоциклову витривалість сталі АК-29 на повітрі (1) і корозійному середовищі (2), висоту мікронерівностей (3), мікротвердість (4) і залишкові напруження (5) поверхневого шару.

Таблиця 3.1 - Вплив обробки дробом і наступного ручного шліфування на малоциклову витривалість сталі АК-29 при  $\varepsilon = 0,37\%$

№п/п	Технологія обробки поверхні зразка	Витривалість N, тис. циклів до руйнування	
		повітря	корозійне середовище
1	Чистове шліфування (вихідний)	29,3	23,9
2	Дробоструминна обробка (5сек)	18,1	15,6
3	Дробоструминна обробка (5сек) + шліфування	26,7	22,0
4	Дробоструминна обробка (90сек)	15,8	13,7
5	Дробоструминна обробка (90сек) + шліфування	25,1	20,6



Приведені результати є ще одним підтвердженням того факту, що причиною зниження малоциклової витривалості зразків, які піддавалися дробоструминній обробці, є погіршення мікрорельєфу. Вказаний висновок добре ілюструє фотографія, наведена на рис. 3.5, з якої чітко видно, що втомна тріщина виникла біля своєрідного концентратора напружень, утвореного гострим дробом.

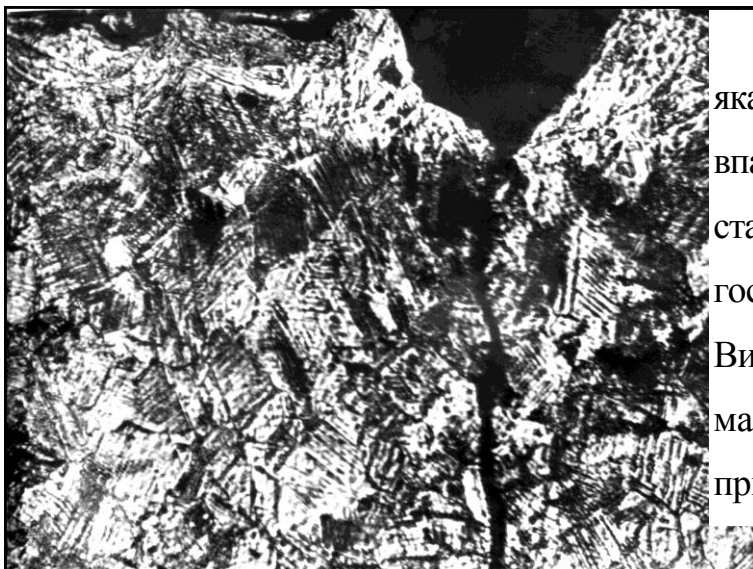


Рис 3.5. Втомна тріщина, яка починається від глибокої впадини на поверхні зразка із сталі 45Г17Ю3, обдутого гострим дробом. Випробування на малоциклову втому в повітрі при  $\epsilon = 0,8 \%$ ,  $\times 400$ .

Порівняльні дослідження впливу форми дробу на малоциклову втому сталі АК-29 при постійній величині циклічної деформації показали (рис. 3.6), що круглий дріб менше знижує малоциклову витривалість в порівнянні з гострим при одній і тій же тривалості обдуву, що можна пояснити утворення більш сприятливого мікрорельєфу поверхні після обробки круглим дробом. Покращення рельєфу поверхні ілюструють профілограми поверхні, наведені на рис. 3.7. Коли при обробці гострим дробом на поверхні спостерігаються гострі і глибокі надрізи, то після обробки круглим дробом радіуси западин мікронерівностей заокруглені, самі нерівності розорієнтовані, хоч висота цих нерівностей в обох випадках майже однакова. Крім того, обробка круглим дробом створює сильніше зміцнення.

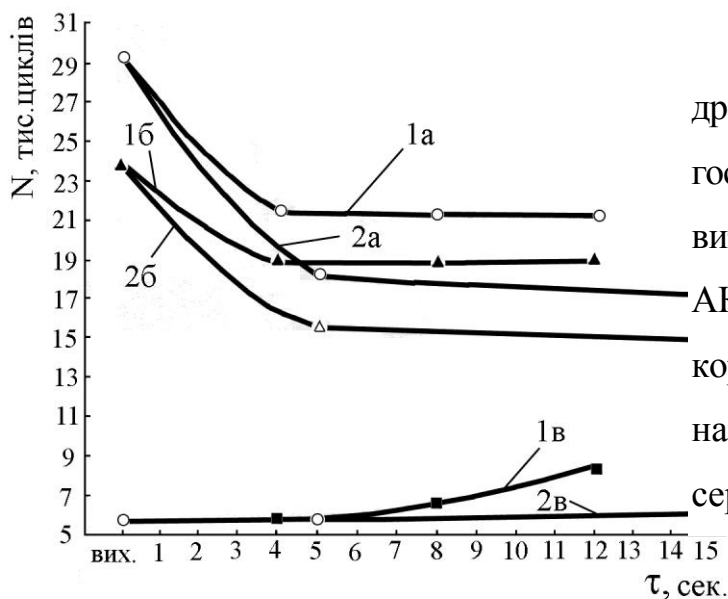


Рис.3.6. Вплив форми дроби (1–круглий; 2–гострий) на малоциклову витривалість ( $\epsilon=0,37\%$ ) сталі АК-29 на повітрі (а), корозійному (б) і наводнювальному (в) середовищах.

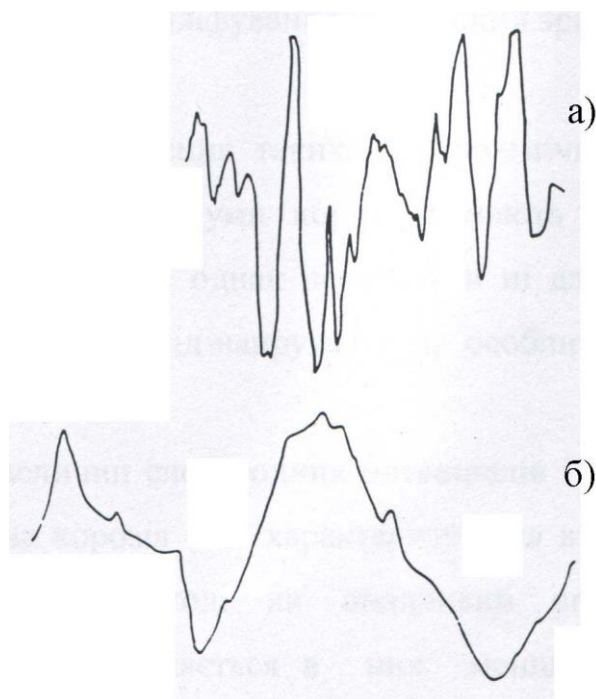


Рис.3.7. Профілограми поверхні зразків сталі АК-29, після обробки гострим дробом (а) та круглим дробом (б).

Оскільки конструкційні сталі після дробоструминної обробки працюють в корозійному середовищі, то безумовно виникає інтерес вивчення електрохімічних властивостей сталі після її обробки. Вимірювання електродних потенціалів у 3,5% розчині NaCl зразків сталі АК-29, оброблених круглим дробом, показали такі результати: шліфовані зразки – 495 мВ; обробка 4 сек – 530 мВ; 8 сек – 550 мВ; 12 сек – 555 мВ. Таким чином, дробоструминна обробка спочатку різко, а потім монотонно підвищує електронний потенціал.

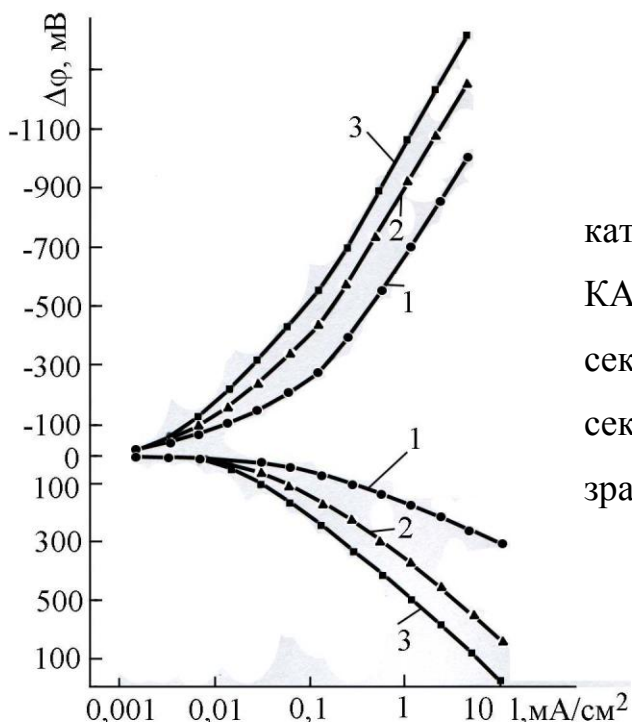


Рис. 3.8. Криві анодної та катодної поляризації сталі АК-29 у КАС: 1 – обробка круглим дробом 12 сек; 2 – обробка круглим дробом 4 сек; 3 – шліфування (еталонний зразок).

Поляризаційні криві знімалися в 3,5 % розчині NaCl одночасно при малих густинах струму (до  $0,2 \text{ mA/cm}^2$ ). На рис. 3.8 наведені криві анодної і катодної поляризації сталі АК-29 у КАС. Багаторазове повторення дослідів на однакових зразках підтвердило наявність повної відмінності в анодній поляризації поверхні металу після цих видів обробки.

Поляризація поверхні, отримана при шліфуванні, стала вищою, ніж поверхні після дробоструминної обробки. Понижена анодна поляризація поверхні, отримана дробоструминною обробкою, пояснюється дією зміцнення і зсувами при інтенсивній пластичній деформації, які призводять до зниження енергії зв'язку атомів ґратки металу і полегшенню їх відриву.

Криві катодної поляризації в області виділення кисню типічні і виявляють деякі відмінності в поверхні з різними обробками. Оцінюючи поляризацію за відхиленням значення потенціалу (від свого стаціонарного значення) для рівних значень струму, легко помітити, що найменшу катодну поляризацію мають поверхні після шліфування, а найбільшу – після обробки дробом. Для кількісної оцінки величини струму само розчинення, поляризаційні криві в напівлогарифмічних координатах екстраполювали із області виконуваності рівняння Тафеля  $K\Delta\phi = 0$ . Знайдені такі величини для густини струму

саморозчинення  $I_c$ : зразок з поверхнею після дробоструминної обробки 12 сек –  $0,05 \text{ мА/см}^2$ , після 4 сек –  $0,025 \text{ мА/см}^2$ , після шліфування –  $0,015 \text{ мА/см}$ , тобто швидкість розчинення поверхні після дробоструминної обробки набагато перевищує швидкість розчинення шліфованої поверхні.

Безсумнівно дослідження таких електрохімічних характеристик, як електродні потенціали і струми корозії, мають велике значення для вивчення кінетики корозії, однак переносити ці дані для характеристики металу, який знаходиться під напруженням, особливо циклічним, потрібно дуже обережно.

Так, аналіз величин електродних потенціалів і струму саморозчинення вказує, що загальна корозія (яка характеризується втратою маси) більша у зміцнених зразків, тоді як шкідливий вплив середовища при малоцикловій втомі проявляється в них менше. Багато дослідників пояснюють підвищення корозійної витривалості зміцненого металу створенням при зміцненні залишкових напружень, які перешкоджають перетворенню рівномірної корозії в локалізовану, і, таким чином, запобігають поширенню корозійно-втомних тріщин. Крім цього всі поверхневі дефекти закриваються і стають недосяжними для проникнення в них корозійного середовища, тобто для розвитку там адсорбційних та корозійних процесів. І ще, при зміцненні приповерхневого шару металу, тріщини втоми в окремих випадках можуть розвиватися під цим посиленням шаром і також будуть недосяжними для зовнішнього середовища.

Аналогічні дослідження були проведені на зразках більш міцної сталі АК-32, обробленої гострим дробом [22]. Як видно із результатів випробувань (рис. 3.9), дробоструминна обробка протягом 60 сек має такий же вплив, що і на сталі АК-29, але при значно довшій тривалості обробки можна добитися вже підвищення малоциклової витривалості. Це підвищення можна пояснити створенням більш сприятливої мікрогеометрії поверхні (рис. 3.10).

Для вивчення впливу лише однієї шорсткості зразки із сталі АК-29 після дробоструминної обробки відпалювалися у вакуумі. Випробування проводили на повітрі при відносній деформації  $\varepsilon = 0,5 \%$ . Витривалість

шліфованих зразків з 9,5 тис. циклів зменшилася в порівнянні з обробленими гострим дробом протягом 15 сек до 6,3 тис. циклів, тобто приблизно на 40%. Це є ще одним підтвердженням суттєвого впливу мікронерівностей, які утворилися після дробоструминної обробки.

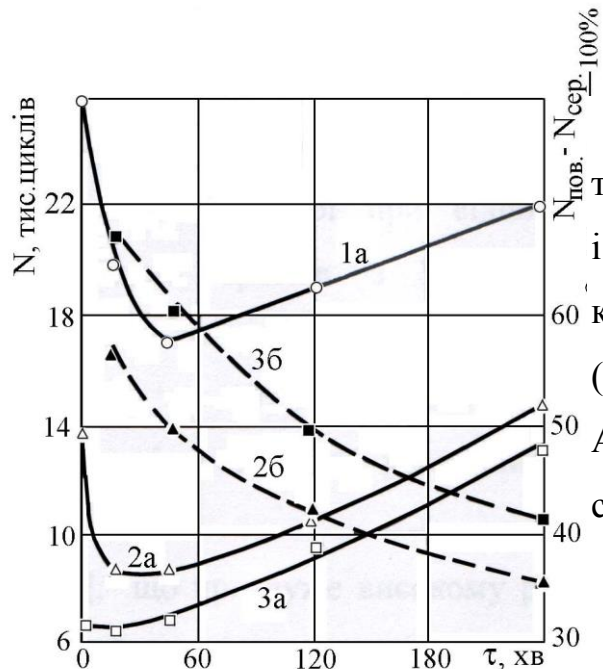


Рис. 3.9. Залежність між тривалістю дробоструминної обробки і витривалістю (а), а також коефіцієнтом впливу середовища (б) при малоцикловій втомі сталі АК-32 на повітрі (1) і корозійному (2) середовищах.

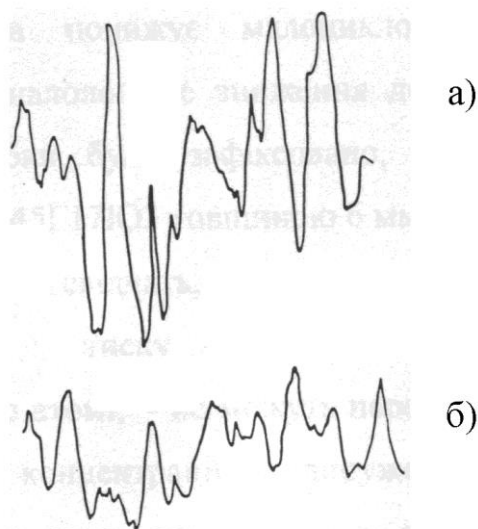


Рис. 3.10. Профілограми поверхні зразків сталі АК-32, оброблених гострим дробом: (а) протягом – 45 с; (б) протягом – 240 с.

Існує думка [24], що при дуже високому рівні циклічних напружень, тобто при малоцикловій втомі, випадкові дефекти зовнішніх і внутрішніх концентраторів напружень знімаються пластичною деформацією. Результати проведених нами випробувань на малоциклову втому при  $\varepsilon=3,75\%$  шліфованих і оброблених гострим і круглим дробом сталі АК-29 свідчать про те, що коли витривалість шліфованих зразків дорівнювала 185 циклів, то в

зразків, оброблених круглим дробом вона знизилася до 164...167 циклів, а у оброблених гострим дробом до 158...160 циклів. Як видно з приведених даних, навіть при такій значно великій циклічній деформації дробоструминна обробка знижує малоциклову витривалість сталі приблизно на 20%. Аналогічне зниження витривалості в результаті дробоструминної обробки було зафіксовано на шліфованих зразках сталі 45Г17ЮЗ товщиною 6 мм (рис.3.11).

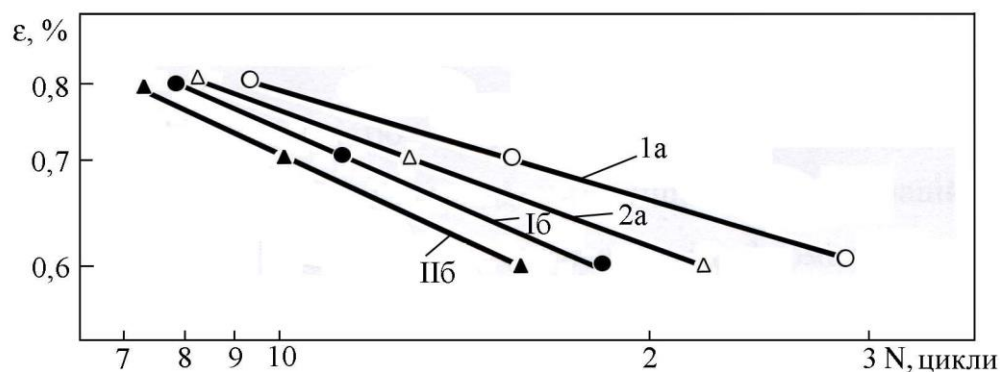


Рис. 3.11. Вплив дробоструминної обробки (шліфовані 1, І; обробка дробом 2, ІІ) на малоциклову витривалість на повітрі (а) і в корозійному середовищі (б) сталі 45Г17ЮЗ (зразки товщиною 6 мм).

Експериментальні дані свідчать, що навіть створення зміцнення і залишкових напружень стиску – факторів, які безумовно мають сприятливий вплив на опір втомі, – не можуть перешкодити переважаючому негативному ефекту концентрації напружень від поверхневих мікронерівностей. Якраз тому використання обдубки дробом гладких бездефектних поверхонь з метою зміцнення представляється недоцільною.

### **3.2. Ефективність дробоструминної обробки деталей з конструктивними концентраторами напружень**

Вплив дробоструминної обробки на малоциклову витривалість зразків з концентраторами напружень вивчали на сталі 45Г17ЮЗ. Як видно із результатів випробувань, наведених у табл. 3.2, наявність надрізу призводить до

різкого зниження малоциклової довговічності як на повітрі, так і в корозійному середовищі (3,5% NaCl). Вплив надрізу збільшується із зменшенням величини циклічної деформації.

Таблиця 3.2. Вплив надрізу і обробки дробом на малоциклову витривалість сталі 45Г17Ю3

Тип зразка і вид технологічної обробки	Витривалість N, тис циклів до руйнування			
	$\varepsilon = 0,80\%$		$\varepsilon = 0,60\%$	
	повітря	корозійне середовище	повітря	корозійне середовище
Гладкі без поверхневої обробки	9,2	7,8	29,5	22,4
Гладкі + надріз	2,5	2,2	5,2	3,7
Гладкі + надріз + дробоструминна обробка гострим дробом	3,3	2,9	9,3	7,3
Гладкі + надріз + дробоструминна обробка круглим дробом	3,4	3,0	9,4	7,4
Гладкі + дробоструминна обробка гострим дробом + надріз	2,5	2,2	6,7	5,3

Дробоструминна обробка підвищує малоциклову витривалість сталі, і, особливо, у корозійному середовищі. Слід відмітити, що дробоструминна обробка знижує чутливість сталі до надрізу. Так, наприклад, при дослідженнях на малоциклову втому при  $\varepsilon = 0,60\%$  у корозійному середовищі дробоструменева обробка знизилася ефективний коефіцієнт концентрації напружень в 2 рази.

Збільшення ефективності поверхневого зміцнення для деталей з надрізами (у порівнянні з гладкими зразками) пояснюється концентрацією сприятливих залишкових напружень на дні надрізу [22]. Аналіз результатів досліджень показав, що використання круглого дробу не дало очікуваного ефекту, це, напевно, пояснюється тим, що круглий дріб не проникає у досить гострий надріз ( $R=0,1\text{мм}$ ), тому не дивлячись на більше зміцнення, яке забезпечується

використанням круглого дробу, його ефективність практично не відрізняється від ефективності гострим дробом.

Цікаві результати отримані при випробуваннях на малоциклову втому надрізаних зразків, які попередньо пройшли зміцнювальну обробку гострим дробом. Очікувалося, що витривалість зразків повинна бути на рівні витривалості надрізаних вихідних зразків. Проте, як видно з табл. 5.2 малоциклова витривалість сталі в корозійному середовищі (при  $\varepsilon = 0,60\%$ ) збільшилася з 3,7 до 5,3 тис. циклів.

При дробоструминній обробці надріз захищався прогумованою тканиною, що виключало можливість його безпосереднього зміцнення дробом. Проте границя втоми сталі підвищилася з 148 до 208 МПа, тобто на 41 %. Оскільки надріз був захищений від попадання дробу, підвищення ефективності дробоструминного зміцнення в цьому випадку можна пояснити концентрацією сприятливих залишкових стискуючих напружень на дні надрізу.

Вихід діючих напружень за границю текучості в багатьох випадках може привести до часткового чи повного зняття залишкових напружень стиску в областях виникнення пластичних деформацій. У багатьох випадках (особливо в зонах конструктивних чи технологічних концентраторів напружень) зняття сприятливої залишкової напруженості, викликані ППД, не стається навіть тоді, коли діючі напруження перевищують границю пружності. Пояснення факту більшого впливу поверхневого зміцнення на опір звичайної багатоциклової втоми деталей, які мають концентратори напружень, є у тому, що сприятливі залишкові напруження стиску, які виникли при цій обробці, мають, як і напруження від робочого навантаження, властивість скупчення біля концентраторів напружень. У ряді випадків використанням поверхневого зміцнення зони концентратора напружень можна досягти збільшенням границі витривалості, ніж конструктивною зміною його форми. ППД може повністю нейтралізувати несприятливу дію концентратора напружень і збільшити границю витривалості деталей з концентраторами до границі витривалості деталей того ж розміру, але без концентратора напружень. Втомне



руйнування деталі може статися в цьому випадку поза зоною концентратора напружень.

Релаксація залишкових напружень стиску не відбувається тоді, коли ППД здійснюється поряд з місцями інтенсивного накопичення макропластичної деформації. Так, досліди при односторонньому згині призматичних зразків з корпусної сталі із концентраторами напружень показали сприятливий вплив поверхневого зміцнення зон, які прилягають до небезпечного перерізу на всіх етапах малоциклового навантаження.

Створення залишкових напружень стиску і, як наслідок, збільшення опору втомі за допомогою ППД можуть статися не тільки власне в зоні зміцнення. Існують методи, які зміцнюють місця прилягаючих до концентраторів напружень, що приводять до збільшення границі втоми. Значного підвищення опору втомі засобами поверхневого зміцнення можна досягти як на малих деталях, так і на великих.

Залишкові напруження стиску в небезпечній зоні на дні канавки створені за рахунок зміцнення зон, які прилягають до неї (рис. 3.12). Очевидно, прагнення зміцнених об'ємів металу розширитися (питомий об'єм зміцненого металу збільшений) не буде зникати при навантаженні зразка (одноразовим чи малоцикловим) навіть у випадку виходу робочих напружень на границю пружності в зоні дна надрізу.

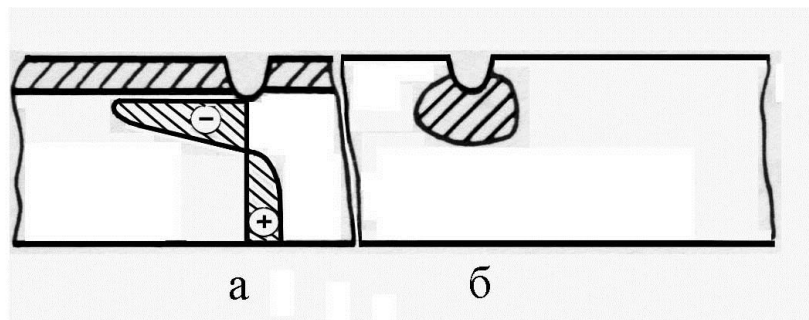


Рис. 3.12. Схема розташування деформованих ділянок при зміцненні зон, які прилягають до концентраторів (а) і самого концентратора (б) [88].

Таким чином, режим малоциклової втоми не є перешкодою для успішного використання поверхневого зміцнення.

### 3.3. Висновки до розділу

1. Дробоструминна обробка сталі різного хімічного складу показала, що збільшення тривалості обробки знижує малоциклову витривалість через появу концентрацій напружень на поверхні. Гострий дріб створює більші концентрації напружень, ніж круглий, що зменшує витривалість сталі. Однак, круглий дріб забезпечує менш агресивну мікрогеометрію поверхні, що сприяє зменшенню негативного ефекту концентрації напружень.

2. Додаткова шліфувальна обробка після дробоструминної зменшує концентрацію напружень, підвищуючи витривалість сталі, проте вона все одно не досягає рівня початкових шліфованих зразків. Це свідчить про те, що мікрорельєф, створений дробом, має значний вплив на витривалість.

3. Дробоструминна обробка впливає на корозійну стійкість сталі, збільшуючи електродний потенціал зразків. Водночас, зменшення анодної поляризації сприяє прискоренню корозії. Однак, залишкові стискуючі напруження, створені зміцненням, знижують ризик поширення локалізованої корозії, що важливо для опору корозійно-втомним процесам.

4. Обробка зразків з конструктивними концентраторами (надрізами) дробом зменшує їх чутливість до концентрації напружень, особливо у корозійних середовищах. Це підтверджує ефективність дробоструминного зміцнення при обробці конструкційних елементів з концентраторами напружень.

5. Залишкові напруження стиску, які утворюються при дробоструминній обробці, збільшують опір втоми, знижуючи ризик розвитку втомних тріщин на гладких зразках і зразках із концентраторами. Це підтверджує, що дробоструминна обробка є ефективною для збільшення витривалості конструкційних елементів, які працюють в умовах малоциклової втоми та агресивних середовищ.

6. Хоча дробоструминна обробка не є рекомендованою для гладких поверхонь, які не мають дефектів, її застосування для зміцнення зон з

концентраторами напружень є доцільним, оскільки залишкові стискуючі напруження можуть нейтралізувати негативний ефект від концентрації напружень.

7. Дослідження вказують на важливість правильної підготовки поверхні після дробоструминної обробки, а також підтверджують, що дробоструминна обробка є ефективним методом для підвищення витривалості сталей, особливо для деталей з концентраторами напружень.

## **4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ**

### **4.1. Безпека працівників при дробоструменевому обробітку**

Для забезпечення належного рівня охорони праці та захисту населення при дослідженні впливу дробоструменевого обробітку деталей машин за умов малоциклових навантажень у середовищах, що містять добрива і пестициди, необхідно враховувати кілька ключових аспектів. Перш за все, слід звернути увагу на безпеку працівників під час виконання дробоструменевого обробітку.

Цей процес супроводжується ризиками, пов'язаними із забрудненням повітря пилом та дрібними частинками, високим рівнем шуму та можливістю механічних травм [19]. Працівники мають бути забезпечені засобами індивідуального захисту, такими як захисні окуляри, маски або респіратори, захисний одяг, спеціальне взуття та рукавички. Особливу увагу необхідно приділити захисту дихальної системи, забезпечуючи ефективну вентиляцію та використання витяжних систем, щоб уникнути вдихання шкідливих речовин.

### **4.2. Контроль за рівнем шуму та вібрацій**

Контроль за рівнем шуму та вібрацій також має важливе значення для забезпечення безпеки. Постійне перебування у середовищі з високим рівнем шуму і вібрації може негативно вплинути на здоров'я працівників, викликаючи зниження слуху та нервові розлади.

Для мінімізації цих впливів доцільно використовувати шумопоглинальні матеріали та спеціальне обладнання, що знижує вібрацію. Крім того, рекомендується чергування режимів роботи з перервами для відпочинку.

### **4.3. Захист від шкідливих хімічних речовин**

У контексті захисту від шкідливих хімічних речовин, добрива і пестициди, що присутні в робочому середовищі, є агресивними сполуками, які можуть спричиняти корозію обладнання і негативно впливати на здоров'я працівників. Для захисту необхідно регулярно обробляти поверхні обладнання антикорозійними покриттями, контролювати можливі витіки та уникати забруднення навколишнього середовища. Важливим також є дотримання безпечних методів очищення та утилізації залишків хімічних речовин, зокрема пестицидів і добрив.

### **4.4. Екологічний захист і утилізація відходів**

Особливу увагу слід приділити екологічному захисту та утилізації відходів. Доцільно впроваджувати методи фільтрації, що знижують викиди шкідливих речовин в атмосферу, контролювати стічні води та уникати забруднення ґрунту і водних ресурсів. Організація збору та утилізації відходів, створення спеціалізованих пунктів для тимчасового зберігання відходів до їх обробки є важливими складовими захисту довкілля.

### **4.5. Моніторинг і навчання персоналу**

Моніторинг та навчання персоналу також є важливими аспектами забезпечення безпеки. Регулярні перевірки умов праці дозволяють контролювати рівень забруднення, рівень шуму та вібрацій, що сприяє своєчасному виявленню і усуненню небезпечних факторів. Навчання та інструктаж працівників з охорони праці, робота з хімічними речовинами та поводження з обладнанням є обов'язковими для підвищення рівня обізнаності персоналу і формування належної культури безпеки. Реалізація цих заходів забезпечує захист здоров'я та безпеки працівників, а також сприяє мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище та населення.

## ВИСНОВКИ

1. Різні типи добрив і пестицидів мають агресивну дію на матеріали машин та обладнання, що обумовлює корозійне зношення конструкцій. Дослідження вказують на підвищений корозійний вплив на сталі, зокрема під час експлуатації в агресивних рідких добривах, де корозійна стійкість може змінюватись залежно від складу добрив та методів захисту матеріалу.

2. Метод поверхневого зміцнення, зокрема шляхом дробоструминної обробки, показує високу ефективність у підвищенні довговічності сталі. Стискуючі залишкові напруження після зміцнення сприяють затримці розвитку втомних тріщин, особливо при низьких рівнях циклічних навантажень. Проте при високих амплітудах вплив цих напружень знижується, і зменшення пластичності поверхневих шарів може негативно вплинути на витривалість матеріалів.

3. Методи зміцнення матеріалів, такі як поверхневе пластичне деформування, можуть бути ефективними засобами для підвищення малоциклової втоми, проте необхідно враховувати умови експлуатації конструкцій, оскільки зміцнення підвищує довговічність тільки за умови мінімального перенагартування.

4. Використані методи вимірювання втрат маси та глибини корозії забезпечують надійну та детальну оцінку корозійних пошкоджень. Такий підхід дозволяє визначити рівномірність корозії та форму корозійних уражень зразків.

5. Зразки різних товщин і зварні зразки із концентраторами напружень, що відповідають реальним конструкціям, дозволили імітувати реальні умови експлуатації. Також були застосовані різні зміцнювальні обробки, що дає змогу порівняти їх ефективність для підвищення опору втомі.

6. Дробоструминна обробка сталі різного хімічного складу показала, що збільшення тривалості обробки знижує малоциклову

витривалість через появу концентрацій напружень на поверхні. Гострий дріб створює більші концентрації напружень, ніж круглий, що зменшує витривалість сталі. Однак, круглий дріб забезпечує менш агресивну мікрогеометрію поверхні, що сприяє зменшенню негативного ефекту концентрації напружень.

7. Дробоструминна обробка впливає на корозійну стійкість сталі, збільшуючи електродний потенціал зразків. Водночас, зменшення анодної поляризації сприяє прискоренню корозії. Однак, залишкові стискуючі напруження, створені зміцненням, знижують ризик поширення локалізованої корозії, що важливо для опору корозійно-втомним процесам.

8. Обробка зразків з конструктивними концентраторами (надрізами) дробом зменшує їх чутливість до концентрації напружень, особливо у корозійних середовищах. Це підтверджує ефективність дробоструминного зміцнення при обробці конструкційних елементів з концентраторами напружень.

9. Залишкові напруження стиску, які утворюються при дробоструминній обробці, збільшують опір втоми, знижуючи ризик розвитку втомних тріщин на гладких зразках і зразках із концентраторами. Це підтверджує, що дробоструминна обробка є ефективною для збільшення витривалості конструкційних елементів, які працюють в умовах малоциклової втоми та агресивних середовищ.

10. Хоча дробоструминна обробка не є рекомендованою для гладких поверхонь, які не мають дефектів, її застосування для зміцнення зон з концентраторами напружень є доцільним, оскільки залишкові стискуючі напруження можуть нейтралізувати негативний ефект від концентрації напружень.

11. Дослідження вказують на важливість правильної підготовки поверхні після дробоструминної обробки, а також підтверджують, що дробоструминна обробка є ефективним методом для підвищення витривалості сталей, особливо для деталей з концентраторами напружень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Laser Peening vs. Shot Peening: Engineering of Residual Stresses for Enhanced Fatigue Resistance // Shot Peener. – 2014. – № 80.
2. Liu, H., Song, Y., Zhang, X., & Wang, W. On the Severe Shot Peening Effect to Generate Nanocrystalline Surface Layers and Enhance Fatigue Performance of MIM Ti-6Al-4V Alloy // Journal of Materials Science. – 2023.
3. Lu, J., & Zheng, Z. Low Cycle Fatigue Life Prediction in Shot-Peened Components of Steam Turbine // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – Coventry University, 2023.
4. Shot Peening and Its Impact on Fatigue Life of Engineering Components // Shot Peener. – 2001. – № 149.
5. Афанас'єв О. П. Дослідження впливу агресивних середовищ на втомну міцність сталей // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2017. – № 856.
6. Василенко С. М. Дробоструменева обробка: технології та обладнання // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2018. – № 862.
7. Василенко С. М. Малоциклова втома матеріалів та конструкцій // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні матеріали в інженерії». – Львів: ЛНУП, 2018.
8. Голуб О. І. Аналіз ефективності дробоструменевої обробки металів // Науковий вісник Одеського національного політехнічного університету. – 2020. – № 1.
9. Гринько Ю. Г. Втома конструкційних матеріалів в агресивних середовищах // Науковий вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2016. – № 844.
10. Дьяків М. І. Аналіз втоми сталей в умовах агресивного середовища // Механіка композитних матеріалів. – 2019. – Т. 54, № 3.



11. Завгородній О. В. Дробоструменева обробка як метод підвищення зносостійкості деталей // Технології та інновації в машинобудуванні. – 2017. – № 5.
12. Зінченко О. В. Вивчення втомної міцності конструкційних сталей у агресивних середовищах // Матеріали V Міжнародної конференції з механіки матеріалів та конструкцій. – Київ: НТУУ "КПІ", 2020.
13. Коваленко І. А. Інноваційні технології дробоструменевої обробки // Механіка та матеріали. – 2019. – Т. 54, № 2.
14. Лукашенко І. О. Вплив агресивних середовищ на втомну поведінку сталей // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2021. – № 52.
15. Мороз І. А. Дослідження впливу параметрів дробоструменевої обробки на якість поверхні // Наукові записки Національного університету "Львівська політехніка". – 2021. – № 857.
16. Мороз І. А. Дослідження втомної міцності сталей в агресивних середовищах // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2022. – № 860.
17. Назаренко О. С. Малоциклова втома сталевих конструкцій: вплив агресивних середовищ // Науковий вісник Одеського національного політехнічного університету. – 2018. – № 1.
18. Овчаренко В. М. Вивчення втомної міцності конструкційних сталей у корозійних середовищах // Технічний прогрес та наукові досягнення. – 2017. – № 4.
19. Охорона праці та цивільний захист: навчальний посібник / за ред. В. М. Запорожця. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 264 с.
20. Петренко Ю. І. Механізми втоми та корозії конструкційних матеріалів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2019. – № 855.

21. Савченко Т. В. Втомна міцність сталей в умовах агресивних середовищ // Матеріали III Міжнародної конференції з матеріалознавства. – Харків: ХНУРЕ, 2020.
22. Сидоренко В. О. Дробоструменева обробка: сучасні тенденції та проблеми // Вісник НТУУ "КПІ". – 2022. – № 6.
23. Смирнов П. Г. Технології дробоструменевої обробки в машинобудуванні // Науковий вісник НТУ "ХПІ". – 2023. – № 12.
24. Ткаченко Р. Г. Дробоструменева обробка: основи та практичні застосування // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні матеріали в інженерії". – Харків: НТУ "ХПІ", 2018.
25. Ткаченко Р. Г. Вплив агресивних середовищ на втомні властивості сталей // Наукові записки Національного університету "Львівська політехніка". – 2021. – № 859.
26. Федоренко О. С. Дослідження втомної міцності сталей в агресивних середовищах: проблеми та рішення // Механіка та матеріали. – 2022. – Т. 65, № 2.
27. Шевченко І. А. Вплив корозії на втомну міцність конструкційних сталей // Науковий вісник НТУ "ХПІ". – 2019. – № 12.
28. Ющенко В. А. Дослідження малоциклового втомлення сталей в агресивних середовищах // Вісник НТУУ "КПІ". – 2023. – № 8.
29. Шевченко І. А. Вплив абразивного матеріалу на результати дробоструменевої обробки // Науковий вісник Одеської національної академії харчових технологій. – 2020. – № 53.
30. Юрченко Л. В. Технології очищення поверхні деталей: дробоструменевий метод // Технології в машинобудуванні. – 2021. – Т. 33, № 3.