

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Машинобудівний

(повне найменування інституту, факультету)

Деталі машин та ПТМ

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

Магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему Вплив корозії на власну
жестоту коливання металоконструкції
вантажопідійомного крана

Виконав: студент(ка) 2 курсу, групи М-312м

Спеціальності 133 Галузеве машинобуд.
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Підйомно-транспортні машини та мех.

Котік Дмитро Ігорович

(прізвище та ініціали)

Керівник Мортовичук Л.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Машинобудівний
 Кафедра Деталі машин та ПТМ
 Ступінь вищої освіти магістр
 Спеціальність 133 Галузеве машинобудування
 (код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) Лінійно-транспортні машини та мех-ми
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри [підпис]
 « 31 » 11 2024 року

ЗАВДАННЯ
 НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Котік Дмитро Ігорович
 (прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема проєкту (роботи) Вплив корозії на власну
застосування конструкції
вентильно-підйомного крана
 керівник проєкту (роботи) Мартвицький Л.М. к.т.н. доцент
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
 затверджені наказом закладу вищої освіти від « 11 » 10 2023 року № 387
- Строк подання студентом проєкту (роботи) 15.12.2023 р.
- Вихідні дані до проєкту (роботи) Огляд основних методів
дослідження корозійних процесів. Методи діагностики
деталей машин вібраційними методами.
- Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Огляд літератури
2. Спеціальна застосування
3. Методи діагностики деталей машин вібраційними
методами
4. Новітні розробки з методів дослідження корозії
- Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
4 пакети формату А4 з трійками тивидкості
корозії.
- Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	Мартовичук І.М.		
2	Мартовичук Л.М.		
3	Мартовичук Л.М.		
4	Мартовичук Л.М.		

7. Дата видачі завдання « 11 » 10 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Літературний огляд	30.10.2023	
2	Спеціальна частина	25.11.2023	
3	Методи діагностики рет. машин...	20.12.2023	
4	Новітні розробки з методів дослідж. криві	15.12.2023	

Студент

Керівник проєкту (роботи)

 Котік Д.І.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

 Мартовичук Л.М.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Завдання.....	2
ЗМІСТ.....	4
ВСТУП.....	5
1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	7
1.1 Визначення терміна "корозія металів".....	7
1.2 Роль термодинаміки та кінетики у вченні про корозію та захист	
та-	
лів.....	7
1.3 Класифікація корозійних процесів.....	10
1.4 Атмосферна корозія металів.....	12
1.5 Вплив корозії на металоконструкції крана.....	15
1. 6 Методи дослідження атмосферної корозії на корозійних станція..	19
2. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	31
2.1 Методи дослідження корозійних процесів.....	31
2.2 Експериментальні методи дослідження.....	32
2.3 Вибір типу корозійних випробувань.....	33
2.4 Модельні випробування.....	35
2.5 Натурні дослідження кранових конструкцій.....	45
2.6. Оцінка поперечних коливань силових елементів крана з урахуванням ін-	
тенсивної корозії.....	51
3 МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ВІБРАЦІЙНИМИ МЕТО-	
ДАМИ.....	65
4 НОВІТНІ РОЗРОБКИ З МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОЗІЇ.....	74
4.1 Інформаційно-оптичні 3D-технології в корозійному контролі	74
4.2 Поточкова лінія лазерної діагностики корозійних пошкоджень.....	89
4.3 Лазерний еліпсометричний і фотоелектрометричний (ЕФЕМ) відеомікро-	
зонд.....	100
ВИСНОВКИ	111

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	112
-----------------------	-----

ВСТУП

Під час корозійних досліджень матеріалів часто виникає необхідність проведення багатьох серій однотипних вимірювань товщини корозійного шару на зразках, що перебувають у корозійних середовищах, які різняться концентрацією агресивного компонента, температурою, кислотністю тощо. При стандартних корозійних випробуваннях використовується, як правило, великий набір корозійних осередків зі зразками, в яких створюються всі необхідні комбінації корозійного оточення. Через певні проміжки часу проводиться періодичне тестування зразків.

В електрохімічних методах тестування можна організувати в комірках безпосередньо в процесі корозії (наприклад, за стаціонарним потенціалом [3]). Однак така інформація пов'язана з товщиною корозійного шару тільки побічно. Крім того, багато корозійних процесів часто розвиваються в неводному або нейтральному водному середовищі, де їх електрохімічному дослідженню заважає низька електропровідність середовища. У практиці корозійних випробувань при цьому зазвичай використовують зважування зразків або аналіз середовища.

Вагові методи вимагають вилучення зразка з комірки та його подальшого зважування, що порушує перебіг корозійного процесу, і після подальшого повернення зразка назад до комірки потрібен час для стабілізації процесу. Це з необхідністю змінює стаціонарний стан поверхневого шару металу, і отримані дані спотворюються. Крім того, вагові методи мало чутливі для дослідження початкових стадій взаємодії розчину з поверхнею.

Виходячи з викладеного, актуальним є завдання прямого (не непрямого) контролю товщини корозійного шару на великій кількості зразків без вилучення їх з електроліту. При цьому не настільки важлива швидкість вимірювань (тривалість корозійних випробувань, як правило, велика), як необхід-

ність виключення зовнішнього збурювального впливу на досліджуваний процес.

Раніше [4, 5] було розроблено метод лазерної діагностики на базі зворотнопрохідної еліпсометричної схеми. Дистанційна діагностика з зондувальним лазерним пучком, що мало розходиться, на базі зворотно-прохідної еліпсометричної схеми [6-8] якнайбільше пристосована для організації поточкових корозійних випробувань, де потрібно періодично "опитувати" безліч зразків, які піддаються корозії, у стандартних корозійних осередках, оснащених оптичним вікном. Для цього треба просто періодично направляти лазерний пучок приладу у вікна корозійних осередків, що легко зробити, або переміщаючи поточкову лінію з осередками перед нерухомим пучком лазерного корозиметра, або обертаючи лазерну голівку самого лазерного корозиметра за нерухомих корозійних осередків (рис. 16).

У цій роботі на базі дистанційної-лазерної зворотнопрохідної еліпсометрії зроблено спробу розробити лазерний комплекс корозійного стеження, що дає змогу безперервно досліджувати поверхневий шар на великій кількості зразків, без збурень досліджуваного процесу, зокрема, без вилучення зразка з розчину.

1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Визначення терміна "корозія металів"

Метали та їхні сплави є найважливішими сучасними конструкційними матеріалами. Усюди, де експлуатуються металеві конструкції, є речовини, які, взаємодіючи з металами, поступово їх руйнують: іржавіння металевих конструкцій (залізних покрівель будівель, сталевих мостів, верстатів і обладнання цехів) в атмосфері; іржавіння зовнішньої металевої обшивки суден у річковій та морській воді; руйнування металевих баків та апаратів розчинами кислот, солей та лугів на хімічних та інших заводах; іржавіння сталевих трубопроводів у землі; окислювання металів під час їхнього нагрівання і т. п. У більшості металів в умовах їхньої експлуатації більш стійким є окислений (іонний) стан, у який вони переходять у результаті корозії. Слово "корозія" походить від латинського "corrodere", що означає "роз'їдати".

Корозією металів називають мимовільне руйнування металевих матеріалів унаслідок хімічної або електрохімічної взаємодії їх з навколишнім середовищем. Під металами тут і надалі маються на увазі прості метали та їхні сплави, а також металеві вироби та конструкції. Середовищем, у якому відбувається корозія металів, зазвичай бувають різні рідини та гази.

1.2 Роль термодинаміки та кінетики у вченні про корозію та захист металів

Першопричиною корозії металів є термодинамічна нестійкість металів у різних середовищах за даних зовнішніх умов. Термодинаміка дає вичерпні відомості про можливість або неможливість мимовільного протікання корозійного процесу за певних умов.

Термодинамічні потенціали, крім того, можуть бути використані для кількісної оцінки рушійних сил хімічних або електрохімічних, зокрема й корозійних процесів, а також для розрахунку швидкостей цих процесів у випад-

ках, коли є можливість розрахунку не тільки рушійної сили, а й гальмування процесу, тому що швидкість корозійного процесу може бути представлена в загальному вигляді за допомогою рівняння

$$\text{Швидкість корозії} = \frac{\text{Рушійна сила процесу}}{\text{Гальмування процесу}}$$

чисельник правої частини, який може бути визначений за допомогою термодинаміки.

Хоча термодинаміка дає можливість визначити, наскільки досліджувана система віддалена від стану рівноваги, проте вона в більшості випадків не дає відповіді на вельми важливе і з теоретичного, і з практичного боку питання: з якою швидкістю протікатиме термодинамічний можливий корозійний процес? Розглядом цього питання, а також встановленням впливу різних факторів на швидкість корозії і характер корозійного руйнування металів займається кінетика (вчення про швидкості) корозійних процесів.

Відмінною особливістю корозійних процесів є їхня складність і багатостадійність.

Зазвичай корозійний процес складається щонайменше з трьох основних стадій:

- 1) перенесення реагуючих речовин до поверхні розділу фаз до реакційної зони;
- 2) власне гетерогенної реакції;
- 3) відведення продуктів реакції з реакційної зони. Кожна з цих основних стадій може своєю чергою складатися з елементарних стадій, що протікають послідовно і паралельно.

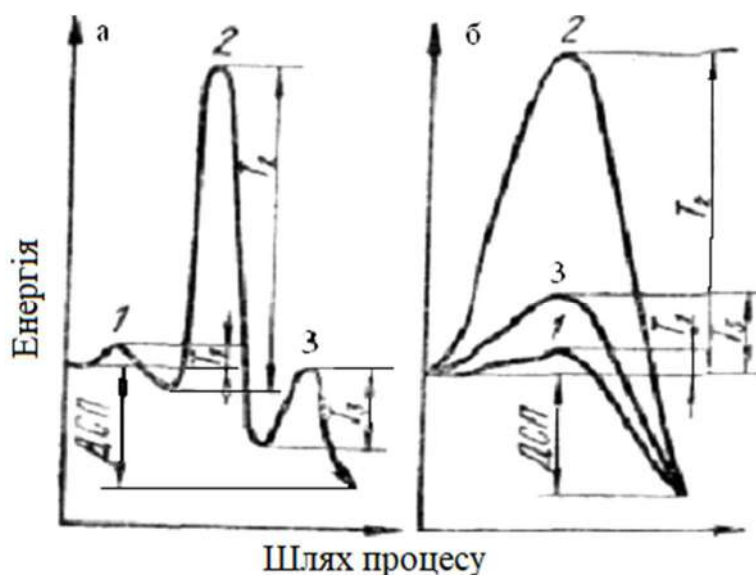
Встановлена сумарна швидкість корозійного процесу визначається рушійною силою процесу (РСП) і гальмуванням протікання його окремих стадій (Г). Якщо загальмованість однієї з послідовних стадій процесу (рисунок

1.1, а) значно більша від інших ($T_2 > T_1$ і T_3), то сумарна швидкість процесу визначається в основному швидкістю цієї найбільш загальмованої стадії (рисунк 1.1, а, стадія 2). Якщо корозійний процес складається з низки паралельних стадій, що протікають одночасно (рисунок 1.1, б), і загальмованість однієї з них значно менша від інших ($T_1 < T_2$ і T_3), то сумарна швидкість процесу визначається переважно швидкістю цієї найшвидшої стадії (рисунк 1.1, б, стадія 1). Якщо ж гальмування окремих стадій порівнянні між собою, то сумарна швидкість процесу визначається перебігом цих стадій. Цілком певні кінцеві швидкості, з якими протікають термодинамічно можливі корозійні процеси, обумовлюються найчастіше такими чинниками:

1) сповільненістю дифузії реагентів до поверхні металу або продуктів реакції у зворотному напрямку (дифузійний контроль процесу);

2) сповільненістю хімічної або електрохімічної реакції (обумовленою їхньою енергією активації) взаємодії металу з корозійним середовищем або його компонентами (кінетичний контроль процесу);

3) сповільненістю обох стадій за співмірності їх гальмувань (дифузійно-кінетичний контроль процесу).



а - послідовних; б - паралельних

Рисунок 1.1 - Схема протікання корозійного процесу, що складається з трьох стадій

1.3 Класифікація корозійних процесів

1. За механізмом процесу розрізняють хімічну й електрохімічну корозію металів:

1) хімічна корозія - взаємодія металу з корозійним середовищем, за якою окиснення металу і відновлення окисного компонента корозійного середовища протікають в одному акті (наприклад, окиснення магнію під час нагрівання на повітрі).

2) електрохімічна корозія - взаємодія металу з корозійним середовищем (розчином електроліту), за якої іонізація атомів металу та відновлення окисного компонента корозійного середовища протікають не в одному акті, а їхні швидкості залежать від електродного потенціалу металу (наприклад, іржавіння сталі в морській воді).

2. За характером корозійного руйнування розрізняють такі види корозії:

1) суцільну, або загальну корозію (рисунок 1.2, 1а-1в), що охоплює всю поверхню металу, яка перебуває під впливом даного корозійного середовища. Суцільна корозія буває:

а) рівномірною (рисунок 1.2, 1а), яка протікає з однаковою швидкістю по всій поверхні металу (наприклад, корозія вуглецевої сталі в розчинах H_2SO_4);

б) нерівномірною (рисунок 1.2, 1б), яка протікає з неоднаковою швидкістю на різних ділянках поверхні металу (наприклад, корозія вуглецевої сталі в морській воді);

в) вибірковою (рисунок 1.2, 1в), за якої руйнується одна структурна складова сплаву (графітизація чавуну) або один компонент сплаву (знецинкування латуні);

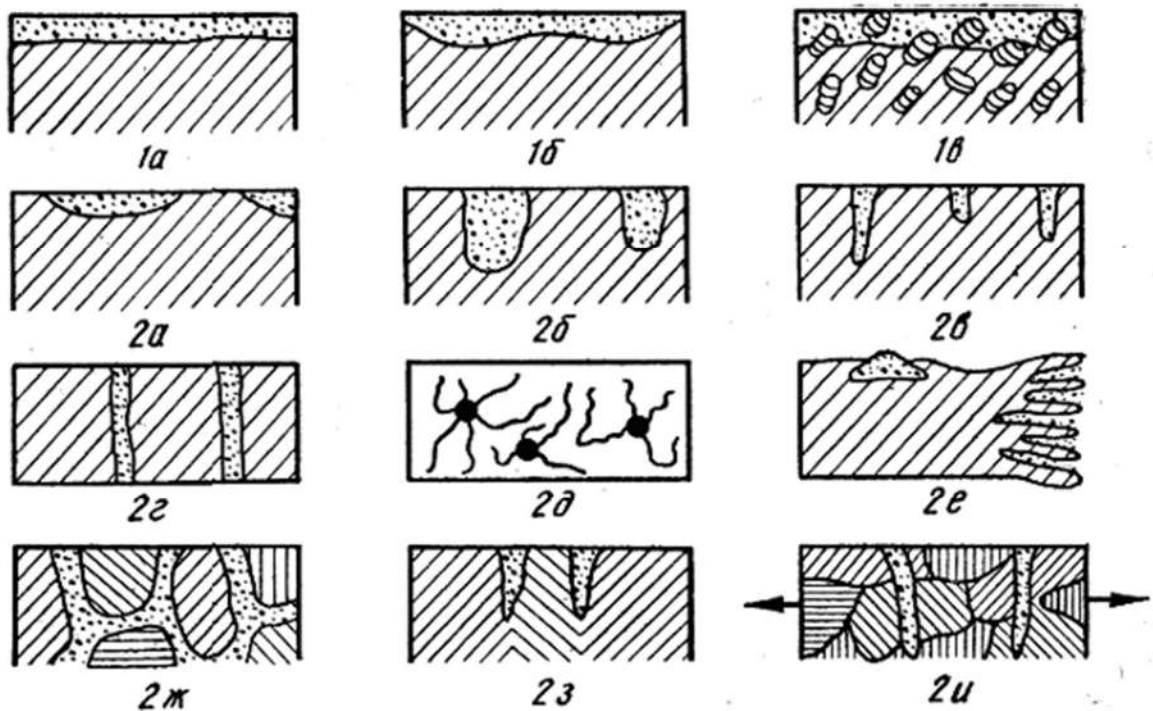


Рисунок 1.2 - Характер корозійних руйнувань

2) місцеву корозію (рисунок 1.2, 2а-2і), що охоплює окремі ділянки поверхні металу. Місцева корозія буває:

а) плямами (рисунок 1.2, 2а) - у вигляді окремих плям (наприклад, корозія латуні в морській воді);

б) виразками (рисунок 1.2, 2б) - корозійне руйнування, що має вигляд раковини (наприклад, корозія сталі в ґрунті);

в) точковою (пітінг) (рисунок 1.2, 2в) - у вигляді окремих точкових уражень (наприклад, корозія аустенітної хромонікелевої сталі в морській воді);

г) наскрізною (рисунок 1.2, 2г), що спричиняє руйнування металу наскрізь (наприклад, у разі точкової або виразкової корозії листового металу);

д) ниткоподібною (рисунок 1.2, 2д), що поширюється у вигляді ниток переважно під неметалевими захисними покриттями (наприклад, на вуглецевій сталі під плівкою лаку);

е) підповерхневою (рисунок 1.2, 2е), що починається з поверхні, але переважно поширюється під поверхнею металу таким чином, що руйнування

і продукти корозії виявляються зосередженими в деяких областях усередині металу; підповерхнева корозія часто спричиняє спучування металу та його розшарування (наприклад, утворення бульбашок на поверхні недоброякісного прокатаного листового металу під час корозії або травлення);

ж) міжкристалітної (рисунок 1.2, 2ж), що поширюється по межах кристалітів (зерен) металу (наприклад, корозія в деяких умовах хромонікелевої сталі X18H10 після її сповільненого охолодження або нагріву за температури 500-850°C); цей вид корозії особливо небезпечний тим, що, не змінюючи часто зовнішнього вигляду металевої конструкції, призводить до швидкої втрати металом міцності та пластичності;

з) ножовий (рисунок 1.2, 2з) - локалізована корозія металу, що має вигляд надрізу ножом у зоні сплавлення зварних з'єднань у сильно агресивних середовищах (наприклад, випадки корозії зварних швів хромонікелевої сталі X18H10 з підвищеним вмістом вуглецю в міцній HNO_3).

і) корозійним розтріскуванням - корозія металу під час одночасного впливу корозійного середовища і зовнішніх або внутрішніх механічних напружень розтягування з утворенням транскристалітних (рисунок 1. 2, 2і) або міжкристалітних тріщин (наприклад, корозія деяких деформівних сплавів магнію з алюмінієм, що деформуються, в атмосфері або воді за наявності розтягувальних напруг і так зване сезонне розтріскування холодно деформованих α - і β -латуній, що містять більше 8-10 % Zn, під час корозії в атмосфері, яка містить NH_3 , SO_2 тощо).

к) корозійною крихкістю, набутою металом у результаті корозії (наприклад, водневе окрихтіння труб із високоміцних сталей в умовах сірководневих нафтових свердловин); під крихкістю слід розуміти властивість матеріалу руйнуватися без помітного поглинання механічної енергії в необоротній формі.[2].

1.4 Атмосферна корозія металів

Атмосферна корозія є найпоширенішим видом руйнування металів, оскільки більшість металевих споруд і конструкцій експлуатується в атмосферних умовах. Цьому типу корозії піддаються такі інженерні споруди, як верхні надбудови кораблів, мости, засоби зв'язку, устаткування хімічних і металургійних заводів, обладнання кранового господарства, автомобільний і авіаційний транспорт, військова техніка.

Основним чинником, що визначає механізм атмосферної корозії, є ступінь зволоженості поверхні металів, що кородують.

За ступенем зволоженості поверхні металів, що кородує, розрізняють такі типи атмосферної корозії металів:

1) мокру атмосферну корозію - корозію за наявності на поверхні металу видимої плівки води. Атмосферна корозія цього типу спостерігається за відносної вологості повітря близько 100%, коли є краплинна конденсація води на поверхні металу, а також за безпосереднього потрапляння води на метал (дощ, обливання конструкції водою тощо);

2) вологу атмосферну корозію - корозію за наявності на поверхні металу найтоншої, невидимої плівки води, що утворюється внаслідок капілярної, адсорбційної або хімічної конденсації за відносної вологості повітря, нижчої за 100%;

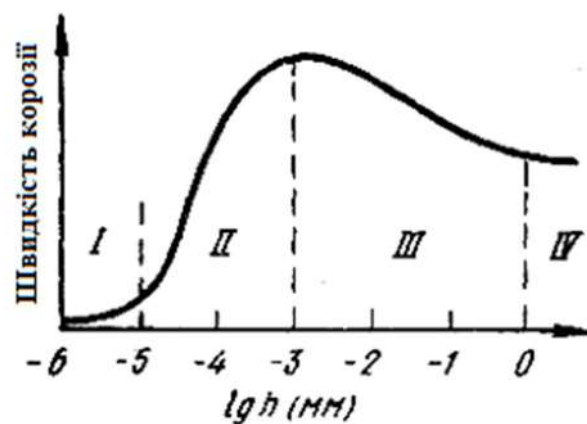
3) суху атмосферну корозію - корозію за повної відсутності плівки води на поверхні металу.

Поділ цей умовний, оскільки в практичних умовах можливі взаємні переходи одного типу корозії в інший. На рисунку 1.3 наведено якісну залежність швидкості атмосферної корозії металів від товщини шару води на поверхні металу, що кородує.

За механізмом протікання процесу атмосферна корозія поділяється на електрохімічну (мокру і вологу атмосферну корозію) і хімічну (суху).

Механізм сухої атмосферної корозії металів аналогічний хімічному процесу утворення і зростання на металах плівок продуктів корозії. Процес

сухої атмосферної корозії металів спочатку протікає швидко, але з великим гальмуванням у часі так, що через певний час, порядку кількох або десятків хвилин, встановлюється практично постійна і дуже незначна швидкість (рисунк 1.4), що зумовлено невисокими температурами атмосферного повітря. Через те, що утворюються на металах у кисні або сухому повітрі тонкі окисні плівки, а поверхня повітря містить інші гази, наприклад, сірчисті сполуки, захисні властивості плівки продуктів корозії, що утворюються, можуть знизитися, а швидкість корозії у зв'язку з цим дещо зрости.



1 - область сухої атмосферної корозії ($h=10-100$ А); 2 - область вологої атмосферної корозії ($h=100-1000$ А); 3 - область мокрої атмосферної корозії ($h=1$ мкм - 1 мм); 4 - корозія під час повного занурення в електроліт ($h > 1$ мм)

Рисунок 1.3 - Характер залежності швидкості атмосферної корозії металу від товщини шару вологи h на поверхні металу.

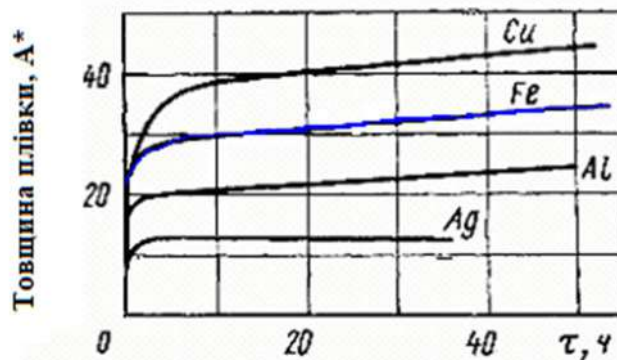


Рисунок 1.4 - Кінетика росту окисних плівок на різних металах у кисні або сухому повітрі за кімнатної температури.

Однак, як правило, суха атмосферна корозія не призводить до істотного корозійного руйнування металевих конструкцій.

Мокра атмосферна корозія металів за своїм механізмом наближається до електрохімічної корозії за повного занурення металу в електроліт, відрізняючись від неї меншою ускладненістю дифузії кисню тонкими шарами електроліту і наявністю енергійного самоперемішування електроліту в цих тонких шарах конвекцією.

1.5 Вплив корозії на металоконструкції крана

Корозійні пошкодження кранових конструкцій поділяються на два види: ураження від суцільної корозії та ураження від місцевої корозії (таблиця 2.1).

Найменший вплив корозії на міцність і витривалість сталі проявляється за суцільної та рівномірної корозії.

Рівномірна корозія, що вражає тільки тонкий поверхневий шар металу, практично не впливає на механічні властивості сталі.

Місцевим ураженням піддаються окремі конструктивні елементи і вузли під впливом концентрованих виділень газів, рідин, парів води, а також атмосферних опадів.

Під час корозії плямами відбувається ураження на окремих відносно великих ділянках; під час корозії виразками відбувається глибоке локальне ураження поверхні; під час точкової корозії глибокі ураження локалізуються в точках; під час підповерхневої корозії ураження починаються з поверхні, але головний розвиток відбувається на певній глибині від неї; міжкристалічна корозія характеризується вибірконим ураженням металу на границях зерен; щілинна корозія утворюється в зазорах.

З усіх видів і типів корозійного ураження металу найбільший вплив на міцність і витривалість сталі має структурна корозія.

У цих випадках конструкція може повністю втрачати свою несучу здатність і руйнування відбувається від незначного навантаження. Це пояснюється дією корозійного ушкодження, у кращому випадку як гострого концентратора напружень, у гіршому - як причини, що спричинила втрату суцільності в металі.

Проведений аналіз результатів обстеження металоконструкцій кранів дав змогу встановити кількісні та часові залежності виникнення дефектів і пошкоджень.

Ступінь агресивності середовища, в якому експлуатуються крани, визначається присутністю в атмосфері сірки, сірчаного і сірчистого ангідриду, сірководню, хлору. Найбільш активним є хімічне середовище, яке забруднене різноманітними хімічними сполуками. У такому середовищі експлуатується 30,6 % кранів.

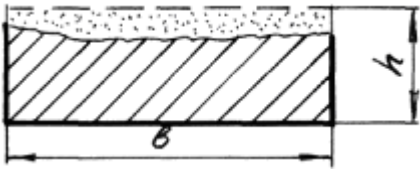
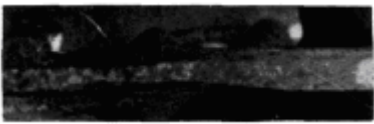
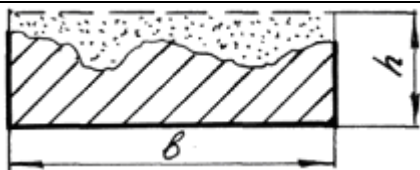
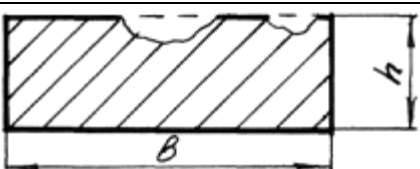
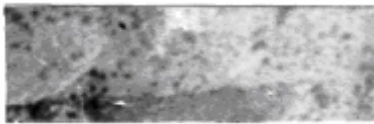
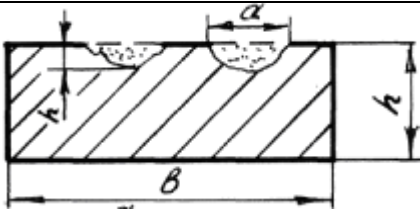
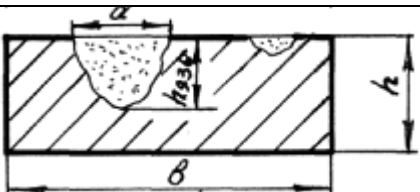
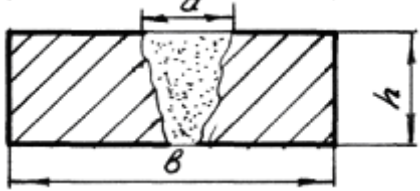
Пил, що містить корозійно активні компоненти і осідає на елементах металоконструкцій, також прискорює корозію металу. Загальні корозійні втрати металоконструкцій не перевищують 40%, при цьому понад 85% кранів відпрацювали свій номінальний термін.

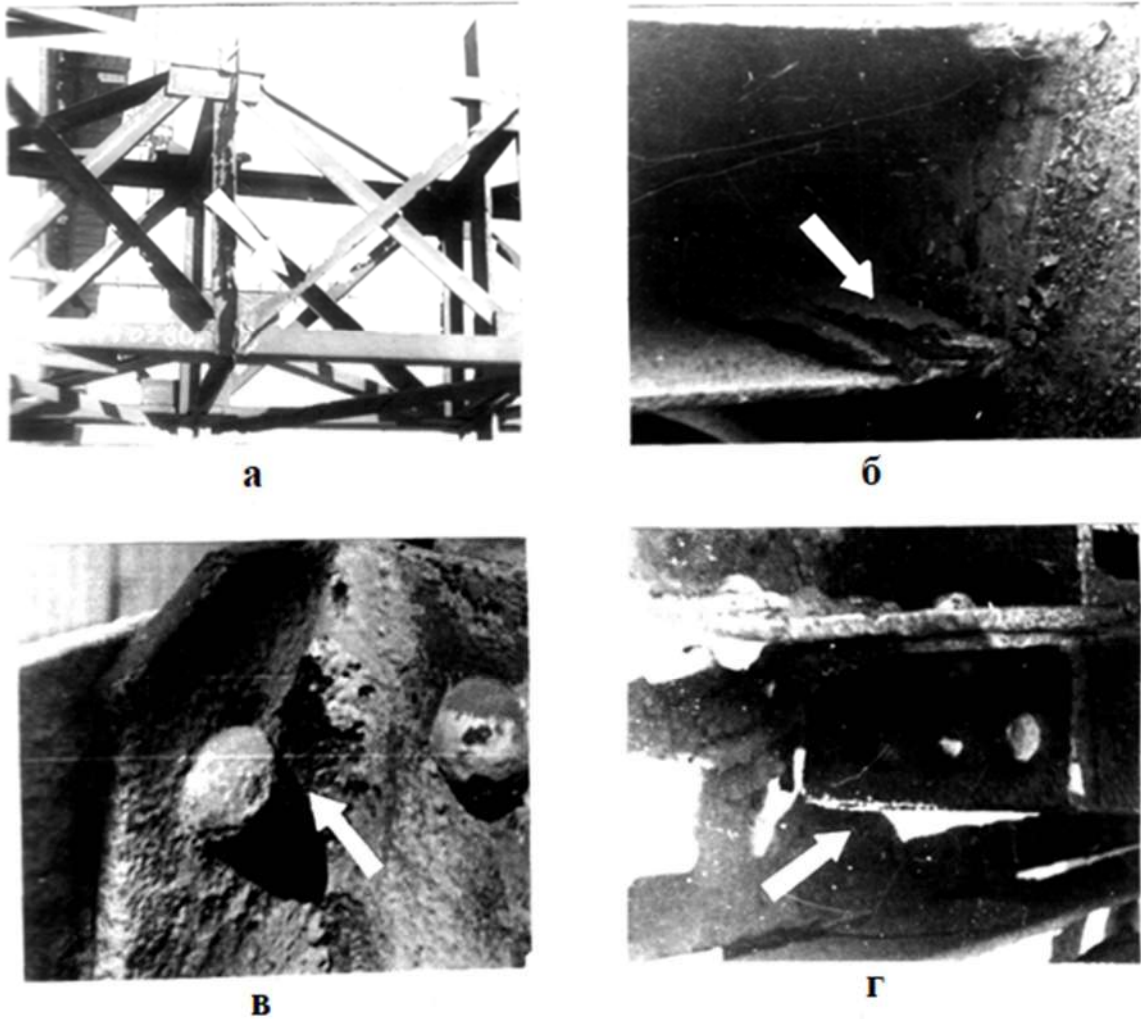
З несучих конструкцій кранів найчастіше уражаються корозією ферми гратчастих мостів, що мають відносно невеликі перерізи (рисунок 1.5).

Дефектами заклепувального з'єднання є іржаві сліди, що виступають з під заклепок, нещільне прилягання елементів, лущення фарби (рисунок 1.5).

Під час тривалої експлуатації кранів на відкритому повітрі відбувається кородування внутрішніх поверхонь коробчастих балок. Проникнення вологи у внутрішні простори відбувається через щілини, наявні в опорних з'єднаннях головної та кінцевої балок. Осередками корозії в козлових кранах є щілини, наявні в складових елементах, вузли з'єднань, а також елементи.

Таблиця 2.1 - Вид корозійних пошкоджень у металоконструкціях кранів

Вид пошкоджень	Зовнішні ознаки	Ескіз
Загальна		
1) рівномірна		
2) нерівномірна		
Місцева		
плямами		
Глибинна		
1) точкова		
2) виразками		
3) наскрізне ураження		



а - елементи фермових мостів; б - порожнини скупчення пилю у вигляді "кишень"; в- заклепувальне з'єднання; г- щілини в складових елементах.
Рисунок 1.5- Корозійні пошкодження елементів металоконструкцій кранів

1.6 Методи дослідження атмосферної корозії на корозійних станціях

Надійний захист виробів від атмосферної корозії має велике народногосподарське значення, оскільки близько 80% усього металу у вигляді різних конструкцій експлуатується в атмосферних умовах. Тим часом теорія атмосферної корозії розроблена в даний час ще далеко не достатньо, внаслідок цього на основі теоретичних міркувань не можна досить однозначно передбачити корозійну поведінку будь-якого покриття або металу в різних умовах експлуатації.

За сучасними поглядами атмосферна корозія має електрохімічний механізм і є результатом роботи мікро- і макрокорозійних елементів на поверхні металу.

У наступних роботах радянських учених показано [1-4], що електрохімічні процеси корозії можуть протікати не тільки під видимими плівками електроліту, які утворюються на поверхні металу під час випадання роси або дощу, а й під дуже тонкими адсорбційними плівками вологи, які утворюються в результаті адсорбції поверхнею металу деякої кількості парів води з повітря. Експериментально доведено, що корозійні процеси на металевій поверхні можуть протікати навіть за 30-40%-вої відносної вологості повітря. Однак за відсутності конденсації навіть за 100%-ної відносної вологості повітря швидкість корозії металів виявляється дуже незначною порівняно зі швидкостями корозії тих самих металів за наявності на їхній поверхні видимих плівок електроліту.

У різних кліматичних районах, як відомо з практики, швидкість корозії одних і тих самих металів різна, і характер корозії також дуже різний.

Якщо метал корозує у відкритій атмосфері, то швидкість корозії залежить від дуже великої кількості чинників, що діють одночасно, - температури, вологості повітря, швидкості вітру, сонячної радіації, кількості випадання опадів і тривалості їх випадання. Величезне значення має ступінь забрудненості повітря промисловими газами, солями морської води і пилом.

Перераховані вище зовнішні чинники не залишаються постійними, змінюючись у часі за певними законами, характерними для кожного кліматичного району, при чому ці умови не можна точно відтворити в лабораторних установках. Тому для отримання практично цінних даних про корозійну поведінку металу в природних умовах експлуатації доводиться проводити тривалі випробування на спеціально організованих для цієї мети корозійних станціях.



Рисунок 1.6 - Загальний вигляд Московської промислової корозійної станції.

На кожній станції є відкриті майданчики, на яких встановлюються стелажі для кріплення зразків. До майданчиків для випробування прилягають лабораторні приміщення та житлові будинки для співробітників. Загальний вид станції наведено на рисунку 1.6. Випробування зразків проводять у співдружності з різними відомствами, науково-дослідними інститутами та заводами за програмами, які спільно розробляють. Зразки виготовляють зацікавлені організації за затвердженими в цій галузі промисловості технологічними процесами.

Огляд зразків під час випробування і обробка результатів випробування в лабораторії проводяться науковими співробітниками корозійних станцій ІФХ спільно з представниками зацікавлених організацій. Результати випробування оформляються у вигляді технічних звітів.

Паралельно з масовими корозійними випробуваннями в лабораторіях станцій досліджуються закономірності протікання електрохімічних процесів

на поверхні зразків металів у різних атмосферних, морських і ґрунтових умовах.

Корозійні станції ІФХ - наземні, розташовані на огорожених земельних ділянках. Обладнання станцій дуже нескладне. Для випробувань у відкритій атмосфері плоских зразків використовуються спеціальні стенди (рисунок 1.7)



Рисунок 1.7- Стенд зі зразками.



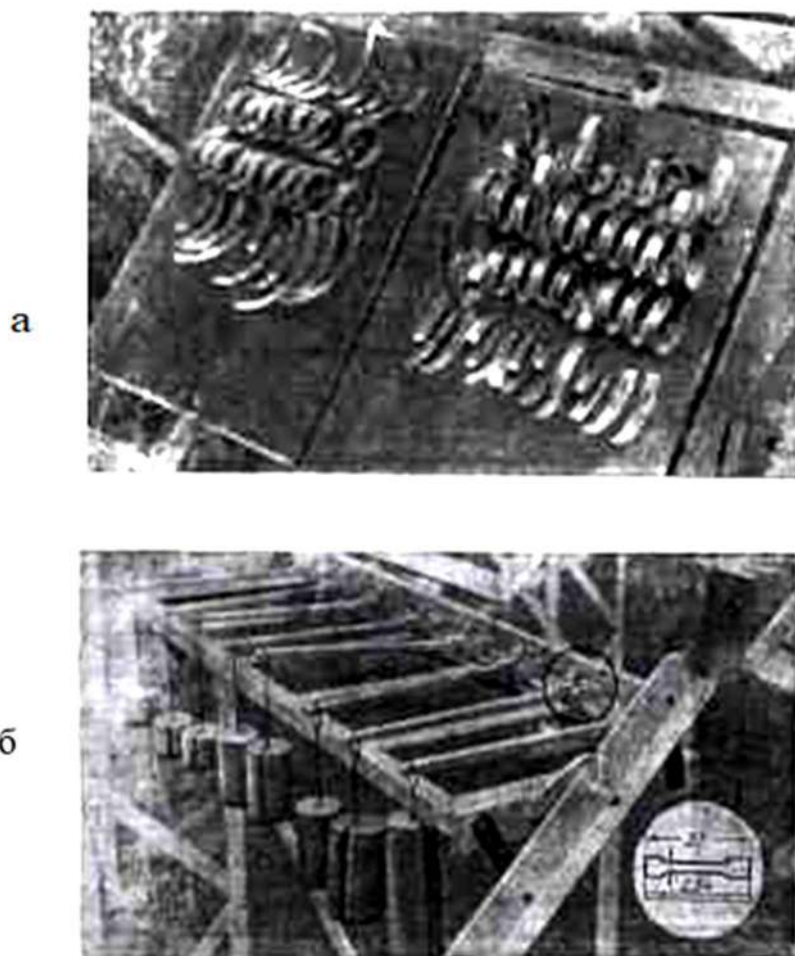
Рисунок 1.8 - Атмосферна будка

Зразки закріплені за допомогою порцелянових ізоляторів (роликів), які являють собою металеві стійки із закріпленими на них рамами для зразків. Конструкція стендів передбачає можливість закріплення рам під будь-яким кутом до горизонталі. Зразки, що підлягають випробуванню, кріпляться на рамах за допомогою порцелянових роликів.

Якщо під час випробування необхідно імітувати умови складських і опалювальних приміщень, то випробування проводять у спеціальній атмосферній будці, побудованій за принципом метеорологічних будок (рисунок 1.8). Залежно від поставленого завдання іноді доводиться випробовувати або готові вироби, або зразки спеціальної форми. Так для випробування різних

матеріалів на корозійне розтріскування застосовуються зразки у вигляді кілець або петель.

На рисунку 1.8а, показані латунні зразки у вигляді кілець, зібраних на панелях з ізоляційного матеріалу. На рисунку 1.8б, зображено установку для випробування латунних зразків під механічним розтягувальним навантаженням.



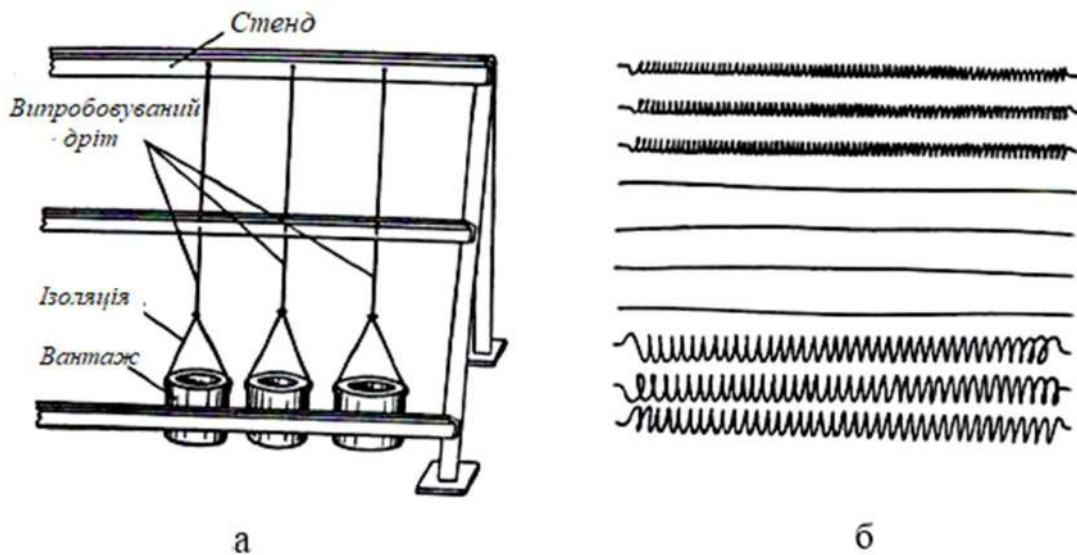
а - зразки у вигляді кілець, б - зразки стандартної форми під розтягувальне навантаження

Рисунок 1.8 - Зразки латуні, що випробовуються на корозійне розтріскування.



Рисунок 1.9 - Зразки алюмінієвих сплавів, що випробовуються на корозійне розтріскування.

На рисунку 1.9 представлена форма зразків для випробування алюмінієвих сплавів на корозійне розтріскування. Зразки укріплені на панелях з оргскла або текстоліту. На рисунку 1.10, а показано установку для випробування дроту під розтягувальним навантаженням, а на рисунку 1.10, б - зразки дроту у вигляді спіралей і прямих відрізків. Такі випробування дають можливість оцінити вплив внутрішніх напружень на швидкість корозії та зміну міцності дроту в результаті корозійних процесів.



а - випробування дроту під розтягувальним навантаженням; б - форма зразків дроту для корозійних випробувань.

Рисунок 1.10- Випробування дротів.

Метеорологічні спостереження та аналіз повітря

Оскільки швидкість і характер корозійних руйнувань значною мірою залежать від зовнішніх чинників, отримані на корозійних станціях результати можуть мати практичну цінність тільки в тому разі, якщо їх пов'язано з кліматичними характеристиками району та ступенем забрудненості повітря промисловими газами, солями морської води і пилом. Тому на корозійних станціях велику увагу приділяють проведенню метеорологічних спостережень і хімічному аналізу повітря. У районах розташування корозійних станцій проводять метеорологічні спостереження з метою визначення:

1. Середньомісячних температур повітря в денний і нічний час, що характеризують можливі добові перепади температур у різні сезони року.
2. Середньомісячних значень відносної вологості повітря в денний і нічний час.
3. Кількості опадів, що випадають протягом кожного місяця у вигляді дощу або снігу (у мм).
4. Особливо важливих даних про кількість випадання опадів та їхню середню тривалість, окремо за кожен місяць, а також визначення числа випадків випадання роси протягом кожного місяця і середньої тривалості її перебування на поверхні металу.
5. Числа днів з туманом у кожному місяці.
6. Числа годин сонячного сяйва.
7. Переважного напрямку та середньої швидкості вітру.

Усі ці дані необхідні для того, щоб отримати уявлення про можливу тривалість збереження на поверхні металу видимих плівок електроліту, що зумовлюють протікання електрохімічних процесів корозії.

Для отримання кількісних даних про можливу тривалість збереження вологи на поверхні зразків можна використовувати також прилад, розроблений в ІФХ [3]. Цей прилад являє собою пакетну модель мікрокорозійного елемента і складається з великої кількості мідних і сталевих пластин, зібраних у пакет по черзі та ізольованих між собою тонкою ізоляційною проклад-

кою. Робочою поверхнею такої моделі є відшліфована поверхня, утворена торцями пластин та ізоляційних прокладок. Усі мідні пластини з'єднані на один загальний дріт, а всі сталеві пластини на інший загальний дріт. Ці дроти вмикаються на самописний мікроамперметр. При виникненні на поверхні такої моделі плівок вологи починають працювати макрокорозійні елементи, і електровимірювальний прилад реєструє струм. Під час висихання плівки вологи корозійний струм падає до зникаючої малої величини, характерної для умов роботи мікрокорозійних елементів під адсорбційними плівками вологи. Безперервна робота такого елемента в атмосфері дає змогу точно визначити по стрічці самописного приладу час збереження плівок електроліту за будь-який відрізок часу, тобто кількість випадків і середню тривалість випадання опадів.

Велика увага приділяється аналізу повітря на вміст промислових забруднень, оскільки ці забруднення можуть чинити істотний вплив на швидкість корозії металу. Так, досліді, проведені на корозійних станціях ІФХ, показали, що присутність у повітрі $0,2 \text{ мг/м}^3 \text{ SO}_2$ спричиняє, за інших однакових умов, збільшення швидкості корозії цинку в 5 разів, а швидкості корозії кадмію - в 9 разів.

Наразі на корозійних станціях ІФХ аналіз повітря проводять на вміст SO_2 , SO_3 , C_1 , HC , NH_3 , тому що ці домішки можуть чинити дуже істотний вплив на швидкість атмосферної корозії.

На приморських станціях, де повітря забруднене солями морської води, визначають кількість хлоридів, що осідають на поверхню вологої і сухої тканини.

Для отримання на корозійних станціях практично цінних характеристик корозійного посідання того чи іншого покриття або металу необхідно проводити тривалі випробування. Вони повинні тривати не менше одного року. За тривалості випробування менше одного року дані про середню швидкість корозії і загальну корозійну поведінку металу або покриття виявляються неточ-

ферних будках. Для отримання повної характеристики корозійної поведінки металу або покриття бажано проводити випробування одночасно в атмосферній будці та на відкритих атмосферних стендах. Слід зазначити, що корозія металів і гальванічних покриттів на боці зразка, зверненому до землі, протікає інтенсивніше, ніж на боці, зверненому до неба. Це пояснюється тим, що на боці зразків, зверненому до землі, конденсація вологи протікає інтенсивніше і волога довше зберігається.

Для зразків із лакофарбовими покриттями спостерігається протилежне явище - на боці, зверненому догори, завдяки дії сонячної радіації відбувається процес меління, вивітрювання, що руйнує покриття. Сторона, звернена до землі, зберігає первинні властивості помітно довше.

В атмосферній будці корозійне руйнування відбувається в більшості випадків значно повільніше, ніж у відкритій атмосфері. Корозійне руйнування в цих умовах має, однак, дещо інший характер, ніж у відкритій атмосфері, оскільки всі продукти корозії, що утворюються, залишаються на поверхні зразка, тоді як у відкритій атмосфері частина їх змивається дощем.

Оцінювання корозійної стійкості металів, гальванічних та інших покриттів на корозійних станціях проводять за зміною зовнішнього вигляду зразків, зміною їхньої ваги і механічних властивостей після різних термінів випробування. Під час випробування металів на корозійне розтріскування стійкість проти розтріскування оцінюється за терміном утворення тріщин або розриву зразка.

Оцінка корозійної стійкості покриття за зміною зовнішнього вигляду проводиться за даними проміжних оглядів зразків у процесі випробування. Проміжні огляди проводяться безпосередньо на стендах. У перші дні після початку випробування зразки оглядаються щодня для того, щоб встановити термін появи перших вогнищ корозії. Надалі огляд зразків проводять і такі терміни: через 1, 2, 3, 6, 9, 12, 24, 36 місяців з моменту встановлення на випробування.

Так само як під час проведення попередніх оглядів, на зразок можна накладати масштабну сітку і всі зміни фіксувати на карті огляду зразка.

Під час проведення проміжних оглядів особливу увагу звертають на такі зміни:

1. Потемніння металу або покриття і зміна кольору.
- 2 Утворення продуктів корозії металу або покриття, колір продуктів корозії, їх розподіл на поверхні, міцність зчеплення з металом.
- 3 Характер і розміри вогнищ корозії основного металу, що захищається металу, що захищається.

Щоразу оглядаються всі паралельні зразки. Середня характеристика поведінки покриття записується до журналу спостережень, і повинна включати такі дані:

1. Яка частина поверхні (у %) зайнята продуктами корозії покриття або металу, що захищається (окремо для кожної сторони зразка).
2. Число осередків корозії металу, що захищається, або покриття на 1 см² поверхні.

Розміри осередків корозії металу, що захищається, з гальванічним або лакофарбовим покриттям. Розмір вогнищ корозії дається в квадратних міліметрах, або вказується діаметр вогнища корозії. Оскільки їхня величина може бути різною, то наводяться максимальні, мінімальні та середні розміри, а також розміри вогнищ корозії, які переважно зустрічаються.

Під час огляду зразків із лакофарбовим покриттям особливу увагу приділяють опису змін, що відбулися за час випробування на цьому покритті. Відзначають зміну кольору та блиску покриттів і появу на покритті тріщин, лущення та інших дефектів. Усі зазначені зміни фіксуються на карті попереднього огляду, так само як і під час огляду зразків із гальванічними покриттями. У результаті огляду лакофарбовому покриттю присвоюється певний бал відповідно до 10-бальної системи ГПП-4.

Крім проміжних оглядів зразків, які проводять без знімання їх зі стендів, за період випробування проводять низку остаточних оглядів. Зразки, що підлягають остаточному огляду, знімають зі стендів і вивчають у лабораторії корозійної станції. На корозійних станціях ІФХ остаточні огляди зазвичай відбуваються через 6, 12, 24 або 36 місяців. У ці терміни зазвичай знімають по два, три паралельні зразки. Зразки, зняті з випробування, оглядають, фотографують і потім використовують для оцінки корозійної стійкості металу або покриття за ваговим методом.

Зміна ваги зразків після різних термінів випробування на корозійних станціях досить однозначно характеризує швидкість корозії незахищених металів і анодних щодо металу, що захищається, гальванічних покриттів, якщо з поверхні їх видалити продукти корозії. Тому зразки, зняті з випробування, зважуються двічі: перший раз із продуктами корозії та другий раз після їх видалення. Різниця у вазі зразка під час першого і другого зважування характеризує кількість продуктів корозії, що утримуються на поверхні зразка в процесі випробування. Різниця між початковою вагою зразків і вагою зразків після випробування і видалення продуктів корозії показує вагу металу, що зруйнувався внаслідок корозії. З цієї величини визначається середня швидкість корозії металу або покриття.

Зміна ваги зразків з катодними по відношенню до сталі металевими покриттями і лакофарбовими покриттями не може однозначно і кількісно визначити швидкість корозійного руйнування покриття і дає лише якісну характеристику процесу корозійного руйнування. Зазвичай зразки з катодними покриттями в процесі випробування збільшуються у вазі за рахунок накопичення під покриттям продуктів корозії металу, що захищається.

Тому можна вважати, що швидкість корозійного руйнування таких покриттів прямо пропорційна збільшенню ваги зразка. Ця залежність добре зберігається, однак, тільки доти, доки покриття не починає лущитися на досить великих ділянках поверхні, внаслідок чого вага зразка зменшується.

Зміна ваги зразків з лакофарбовими покриттями в процесі випробування не може однозначно характеризувати швидкість руйнування покриття і його антикорозійні властивості, однак і в цьому разі така характеристика дає загальне уявлення про перебіг процесу руйнування. Досліди, проведені на корозійних станціях, показали, що зменшення ваги зразків з лакофарбовими покриттями свідчить про вивітрювання верхнього шару покриття і відповідне зменшення його товщини. На тій стадії випробування, на якій процес руйнування лакофарбового покриття ще не ускладнений процесом корозії металу, зменшення ваги зразка досить однозначно характеризує схильність покриття до вивітрювання, а збільшення ваги зразка - набряклість покриття. Утворення вогнищ корозії металу під лакофарбовим покриттям призводить до різкого збільшення ваги зразка за рахунок накопичення продуктів корозії, тому збільшення зразків у часі може якісно характеризувати кінетику корозії металу під лакофарбовим покриттям.

Для незахищених металів, зокрема для алюмінієвих сплавів і листової сталі, досить об'єктивною характеристикою корозійної поведінки є зміна механічних властивостей металу в процесі корозії.

Оброблені результати випробування металів і різних покриттів на корозійних станціях повинні дати чітке уявлення про можливу швидкість корозійного руйнування покриття в атмосферних умовах і про приблизний термін служби даного металу або покриття. У всіх випадках, де це можливо, даються строго кількісні характеристики корозійної поведінки металу або покриття.

На закінчення слід зазначити, що дані про корозійну поведінку покриттів на зразках, випробуваних на корозійних станціях, не можуть повністю збігатися з істинною поведінкою таких самих покриттів, нанесених на вироби, оскільки умови експлуатації виробів можуть дещо відрізнятися від умов випробувань, прийнятих на корозійних станціях. Проте наразі результати корозійних випробувань на станціях можна вважати такими, що найточніше відо-

бражають істинну поведінку металу або покриття в атмосфері і, в усякому разі, є об'єктивнішими за результати, які отримують під час випробування в лабораторних умовах, наприклад, у камерах вологості або в камерах із розпиленням розчину хлористого натрію та подібних установах.

2. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Методи дослідження корозійних процесів

Складність корозійні процесів і велика різноманітність агресивних середовищ вимагає застосування системних методів досліджень, які поділяються на якісні та кількісні.

До якісних методів належать: візуальне спостереження; фотографування умов розвитку корозійного процесу; виконання мікродосліджень, макродосліджень і стереомакродосліджень.

Відомі такі кількісні методи оцінки корозійних ефектів:

- за втратою (збільшенням) маси;
- за кількістю водню, що виділився; за кількістю поглиненого кисню;
- за часом до появи першого корозійного вогнища;
- за кількістю корозійних вогнищ;
- за зміною товщини зразка і глибини пітингу;
- за зміною електричного опору;
- за зміною механічних властивостей при розтягуванні після корозії.

Однією з цілей корозійних випробувань є прогнозування показників надійності конструкцій з матеріалів, що уражаються корозією в умовах експлуатації. Однак широко використовувані нині критерії корозійної стійкості конструкційних матеріалів [10], [11] та ін. не дають змоги робити такий прогноз із достатньою для практики точністю. Не характеризує кількісних втрат несучої здатності конструкційних матеріалів і візуально-бальний метод, який використовується для оцінки корозійної стійкості.

Відомості про методи корозійних випробувань і критерії оцінки корозійних ефектів наведено в роботах [11, 12].

Під час експлуатації кранів здебільшого застосовують візуальний метод, він дає змогу встановити зміну мікрогеометрії поверхні металу і захисного покриття, адгезію покриття (здуття, розтріскування, відшаровування),

вид корозійного руйнування. Його використовують для оцінки суцільної корозії та деяких видів місцевої корозії, плямами, точкової тощо. Місцеву корозію оцінюють за глибиною уражень і займаної ними площі поверхні. Зазвичай для оцінки корозійного ефекту використовують десятибальну шкалу корозійної стійкості [13].

Недолік розроблених шкал - розбіжність у значеннях корозійних балів.

Усі перераховані методи мають позитивні та негативні сторони. Здебільшого вони застосовуються під час лабораторних досліджень. Водночас слід зауважити, що найскладніші й найтонші лабораторні дослідження далеко не завжди правильно характеризують реальну поведінку металу в практичних умовах його експлуатації і без проведення натурних випробувань іноді не становлять великої цінності.

2.2 Експериментальні методи дослідження

Основними навантаженнями, що визначають міцність і витривалість елементів металоконструкцій, є динамічні навантаження, які виникають у кранах у період руху, який не встановився (пуску і гальмування). Динамічні навантаження поділяються на два види:

- навантаження від сил інерції руху мас;
- навантаження коливального характеру внаслідок пружності елементів металоконструкцій крана.

Навантаження сил інерції визначаються за відомими формулами теоретичної механіки.

Динамічні навантаження коливального характеру виникають під час розгону і гальмування приводної частини крана, тобто коли змінюється швидкість обертання приводу.

У перехідний період виникають гармонійні коливання, які з часом затухають і практично відсутні під час усталеного руху.

Для дослідження динаміки крана реальну конструкцію необхідно замінити фізичною моделлю з невеликим числом мас.

Метою експериментального дослідження є аналіз впливу значних корозійних ушкоджень, спричинених нерівномірністю корозії конструкції крана з плином часу, на її вібраційні характеристики, використання вібродіагностичних методів для прогнозування корозійного зносу та визначення залишкової працездатності металоконструкції.

Експериментальне дослідження мостового крана потрібне і для того, щоб оцінити, наскільки математична модель довговічності несучих елементів крана, що експлуатується в агресивному середовищі, відповідає дійсному характеру експлуатації. Таке порівняння прийнято в сучасній практиці.

Експериментально визначаються параметри коливального руху конструкції крана і ступінь її корозійної пошкоджуваності. Розроблена методика охоплює підбір апаратури, послідовність і обсяг проведення дослідження та оцінку точності.

2.3 Вибір типу корозійних випробувань

Існують різні методи дослідження корозії металів у лабораторних умовах і докладний опис більшості з них можна знайти в роботах / 44, 64, 67, 85 /,

На металеві конструкції вантажопідіймальних кранів у процесі експлуатації впливають такі атмосферні фактори:

вологість;

температура;

тривалість перебування на поверхні металів плівки вологи, що утворюється під час конденсації, змочування атмосферними опадами;

вміст хімічних або механічних домішок.

Для отримання надійних результатів випробувань під час вибору типу випробування було враховано такі вимоги:

- 1) прискорення корозійного процесу не повинно змінити його механізму;
- 2) врахування складу і властивостей корозійного середовища, в якому експлуатуються вантажопідйомні крани;
- 3) врахування умов експлуатації кранів;
- 4) відповідність складу металу, з якого виготовлена експериментальна балка, основному металу натурної конструкції;

Корозійні випробування розділені на дві основні групи:

- 1) лабораторні випробування, де експлуатаційна ситуація моделюється;
- 2) натурні випробування, що проводяться на обладнанні, яке експлуатується, безпосередньо на повітрі.

2.4 Модельні випробування

Для проведення корозійних випробувань у лабораторних умовах створено установку для визначення вібраційних властивостей балки, схильної до корозійного пошкодження.

Установка для випробування балки (рисунок 2.1) містить балку I коробчатого перерізу. Балка спирається на опори 2 великої маси за допомогою кульової 3 і циліндричної 4 опор. У середині прольоту балка навантажена постійним зосередженим вантажем 5 і збуджувальним агрегатом 6 (МП-100), що закріплений жорстко залізобетон вагою, що дорівнює 1000 кг. Механізм 7 з'єднаний із балкою I через динамометр 6, серезку й електромеханічний тримач 8 (ВД-3-53).

Балка звільняється від завантажувального механізму відкриттям тримача 8 шляхом натискання кнопки. Коливання балки знімаються тензодатчиками омичного опору 11, 12, 13 через тензопідсилювач 9 (8АНЧ) і фіксуються осцилографом 19 (Н071.1).

Завантажувальний механізм МП-100 здатний навантажити балку від 0 до 600 кг. За допомогою перемикача 15 штоком МП-100 можна регулювати натяг (прогин) балки.

Модельні балки по всій площі обгортали мішковиною, яку просочували слабким розчином сірчаної кислоти. У міру висихання розчину просочення повторювалося через певні проміжки часу, тобто балки перебували в постійному контакті з розчином електроліту.

Для просочення використовувався 3-х %-ний розчин H_2SO_4 .

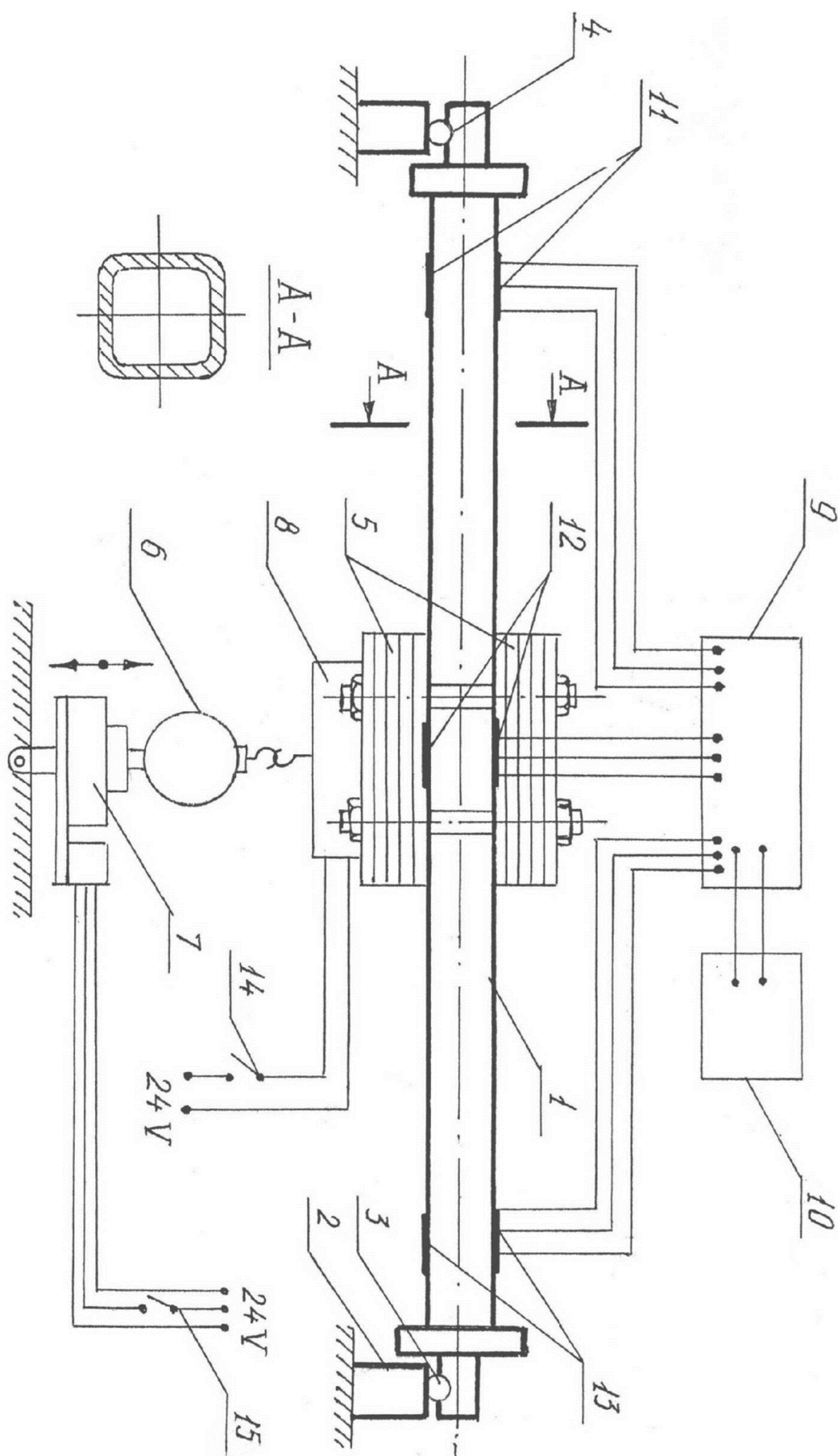


Рисунок 2.1-Установка для випробування балок

У процесі експлуатації вантажопідіймальних кранів застосовується візуальний метод, який дає змогу встановити зміну поверхні металу і захисного покриття, від корозійного руйнування. Цей метод використовується для оцінки поверхневої корозії (рівномірної і нерівномірної), місцевої корозії (плямами), глибинної (точкової, виразками) і наскрізного ураження. Зазвичай місцеву корозію оцінюють за глибиною уражень і займаної ними площі поверхні.

Інструментальні виміри виконуються в характерних точках, що відображають різний вплив агресивності середовища на корозійне зношування.

Суттєвим є вимірювання товщини перерізу з урахуванням корозійних втрат і визначення швидкості розвитку корозії сталі. У цьому разі використовується штангенциркуль або мікрометр, якими заміряють максимальну і мінімальну товщину перерізу елементів. У разі поганого доступу до елемента конструкції використовується товщиномір типу УТ-4.

У роботі застосовувалися якісні та кількісні методи досліджень.

Для кількісної оцінки ступеня корозійної пошкоджуваності в лабораторних умовах використано метод втрати маси, що ґрунтується на визначенні зміни маси випробовуваної конструкції балки (зразка) в процесі рівномірної корозії.

Корозійні втрати маси балки (зразка) Δm обчислювали за формулою:

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

де m_0 - початкова маса зразка, г;

m_1 - маса зразка після видалення продуктів корозії, г;

S - поверхня зразка, м^2 (см^2).

Швидкість корозії K ($\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$) обчислювали за формулою:

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

де τ - час випробування, година.

За нерівномірної корозії вводиться індекс нерівномірності, що являє собою відношення всієї площі зразка до площі, що піддається корозії / 85 /.

Під час визначення корозії за методом втрати маси ретельно видалялися продукти корозії механічним способом.

Експериментальні дані щодо корозії оброблялися у вигляді залежності втрати маси від часу впливу корозійного середовища.

Під час оцінки фізичного стану металоконструкцій крана, пошкодженого інтенсивною корозією, виникає необхідність у знанні динаміки крана. Для цього використовуються вібродіагностичні дослідження відповідальних елементів металоконструкції /24/.

Для лабораторних випробувань застосовувався резонансний метод, сутність якого полягає у збудженні в досліджуваній балці, на опорних стійках, вільних коливань. Вільні коливання в балці збуджувалися шляхом механічного удару.

Резонансний метод застосовували для оцінки зміни ступеня корозійної пошкоджуваності експериментальної балки в процесі впливу агресивних чинників. Ступінь корозійної пошкоджуваності аналізували за власною частотою вільних коливань. При цьому проводилася серія вимірювань через певні часові інтервали.

Схеми проведення випробувань наведено на рисунку 2.2.

Геометричні параметри балок №1, №2, № 3 такі:

балка №1: довжина $l_1 = 2000$ мм, ширина $a_1 = 100$ мм, висота $h_1 = 50$ мм;

балка № 2: довжина $l_2 = 2000$ мм, ширина $a_2 = 150$ мм, висота $h_2 = 100$ мм;

балка № 3: довжина $l_3 = 2000$ мм, ширина $a_3 = 50$ мм, висота $h_3 = 100$ мм

Схема розташування тензодатчиків наведена на рисунку 2.3.

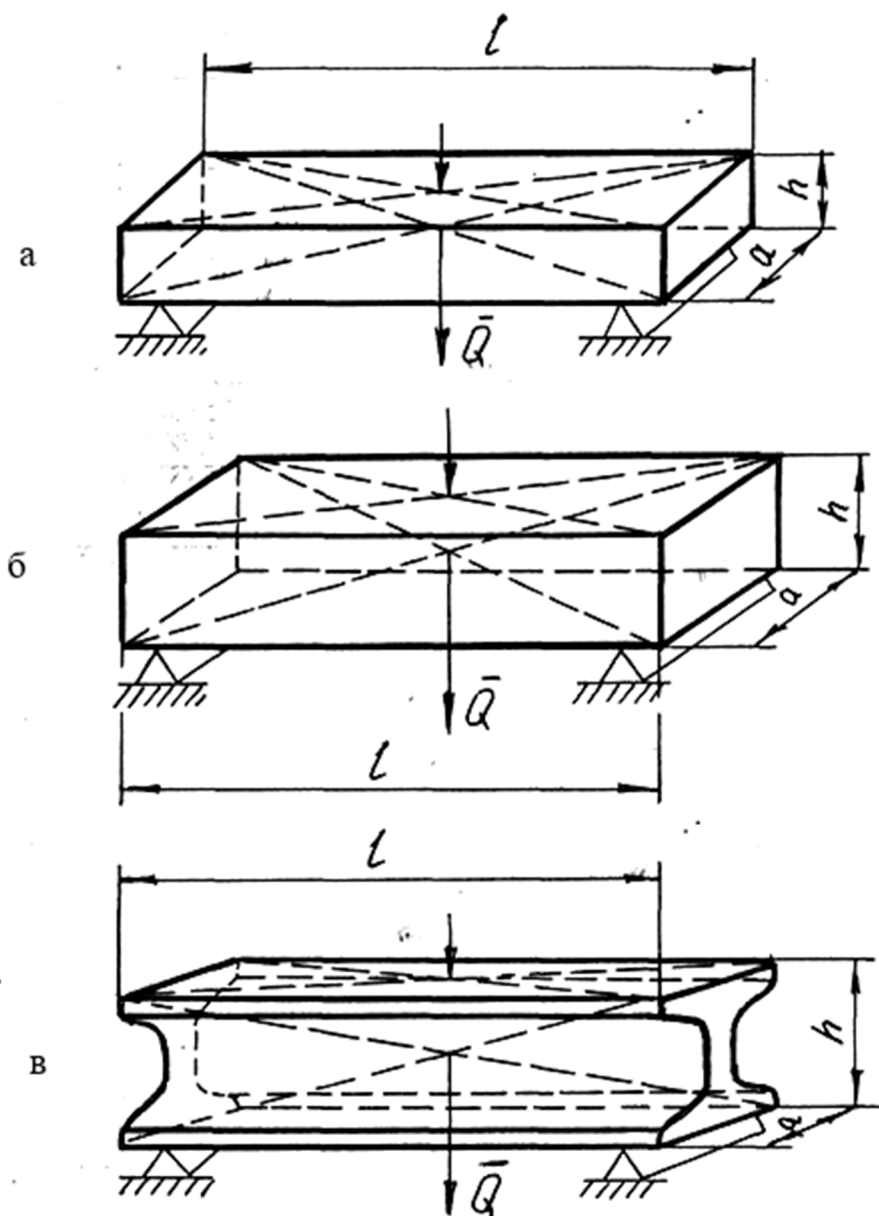
Для вимірювання коливань балки використовували тензометричні датчики омичного опору, сигнал від яких підсилювали тензометричним підсилювачем, а також реєстрували на осцилограму осцилографом Н071.1 (рисунок 2.4). Результати експериментальних досліджень як приклад зведено в таблицях 2.1, 2.2. для двох моделей балок.

Типові віброграми загасання коливань балок в умовах цього експерименту наводяться на рис. 2.5 і 2.6.

На рис. 2.7 представлено залежність втрати маси балки № 2 від часу впливу корозійного середовища.

Експериментальні дані по балках № I, № 2, № 3 оброблялися у вигляді залежностей частоти від часу впливу корозійного середовища. На рисунку 2.8 показано особливості цієї залежності.

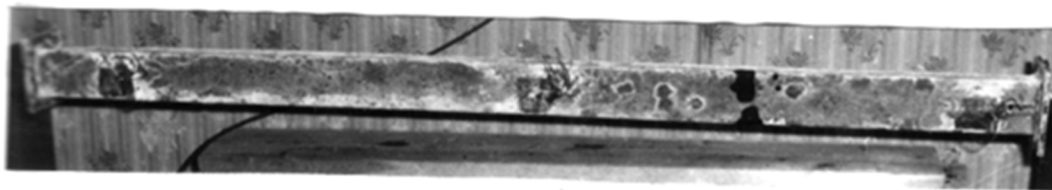
Схема проведення випробувань у лабораторних умовах



а - балка № I; б - балка № 2; в - балка № 3

l, h, a ~ довжина, висота і ширина експериментальної балок

Рисунок 2.2 - Схема проведення випробувань у лабораторних умовах



а



б

а – балка № 1, б – балка № 2

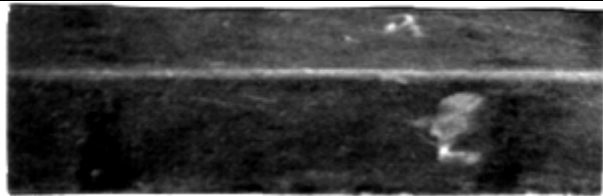
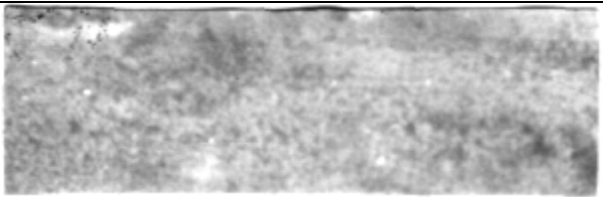
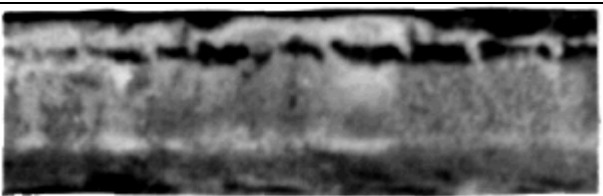
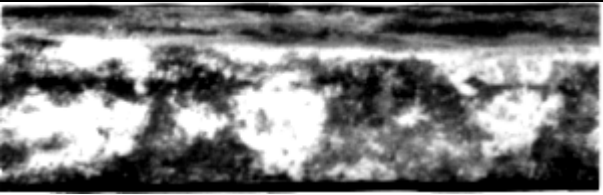
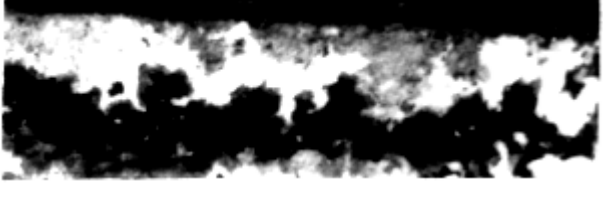
Рисунок 2.3 - Загальний вигляд танзометричної апаратури

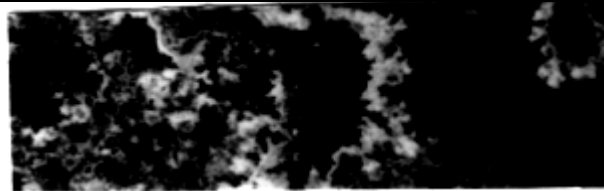


а - підсилювач 8 АНЧ б - осцилограф НОГ 1.1

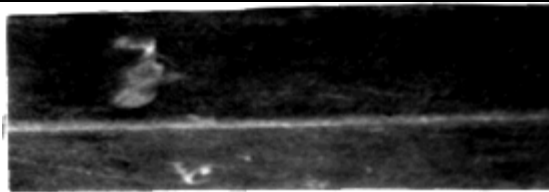
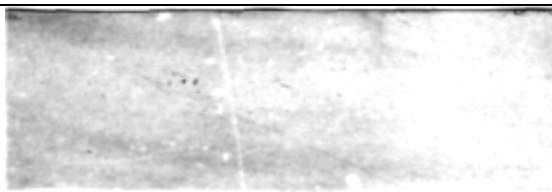
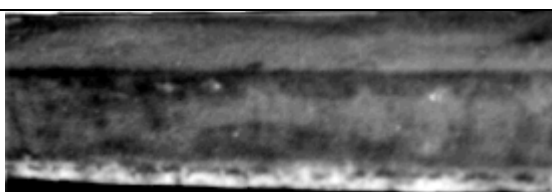
Рисунок 2.4 -Тензометрична апаратура

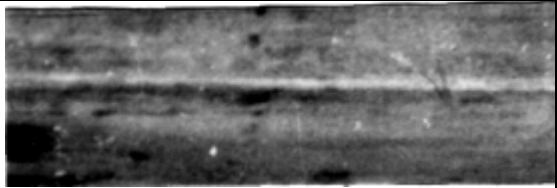
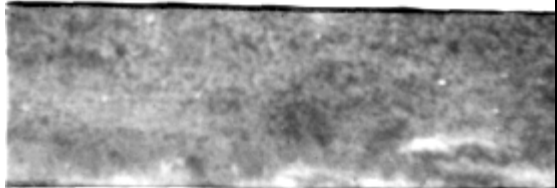
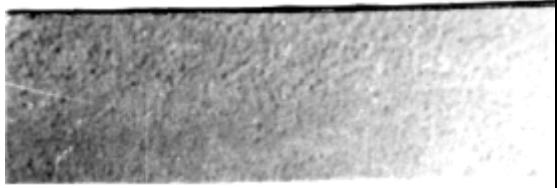
Таблиця 2.1 - Результати експериментальних досліджень балки № 1

Номер дослідження	Час кородування, доба	Власна частота, Гц	Зовнішній вигляд поверхні балки
1	-	8,58	
2	30	8,87	
3	60	7,64	
4	90	8,17	
5	120	8,14	
6	150	8,10	
7	180	7,91	

8	210	7,82	
9	240	7,80	

Таблиця 2.1 - Результати експериментальних досліджень балки № 2

Номер дослідження	Час кородування, доба	Втрати маси, г	Власна частота, Гц	Зовнішній вигляд поверхні балки
1	-	-	17,5	
2	30	26,738 1	19,0	
3	60	51,541 1	19,5	
4	90	17,739 0	20,0	

5	120	14,510 3	22,3	
6	150	14,392 0	22,0	
7	180	14,310 5	21,6	
8	210	14,139 2	21,0	
9	240	14,072 1	21,0	

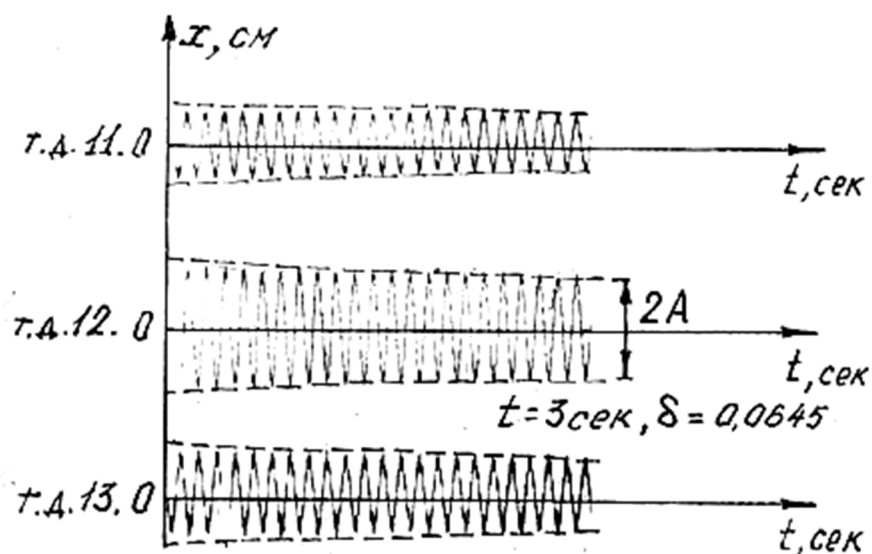


Рисунок 2.5 - Фрагмент віброграми загасання коливання балки №1

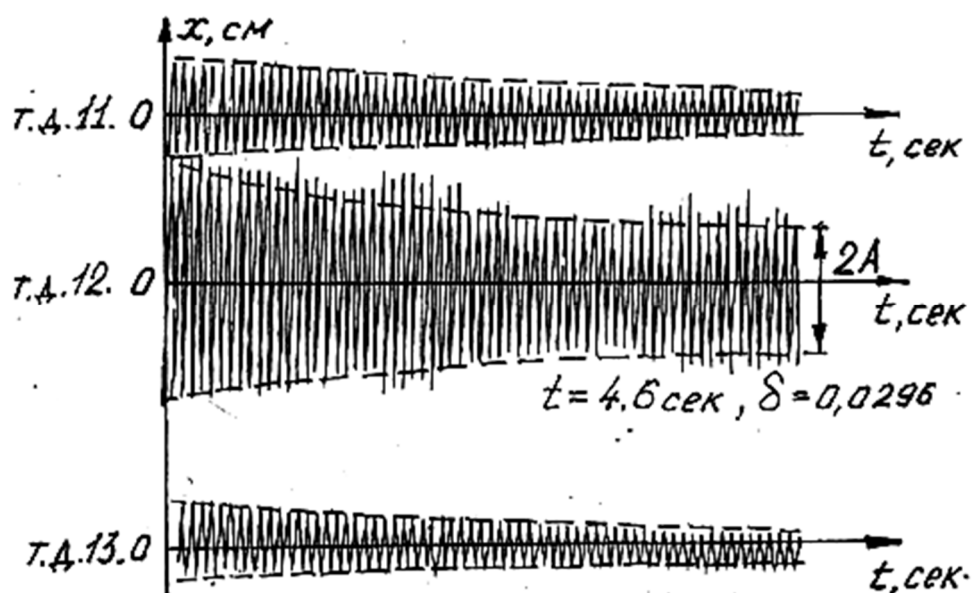
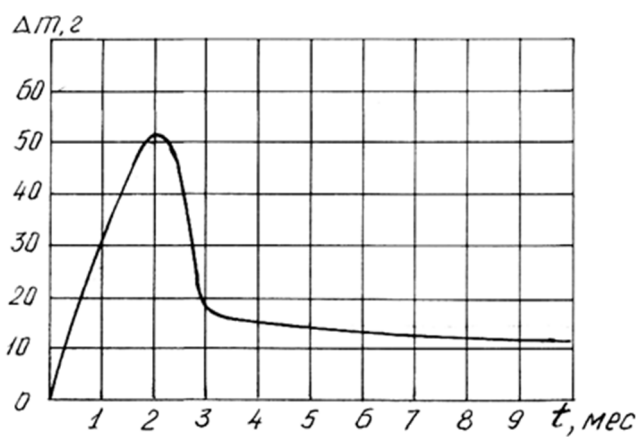
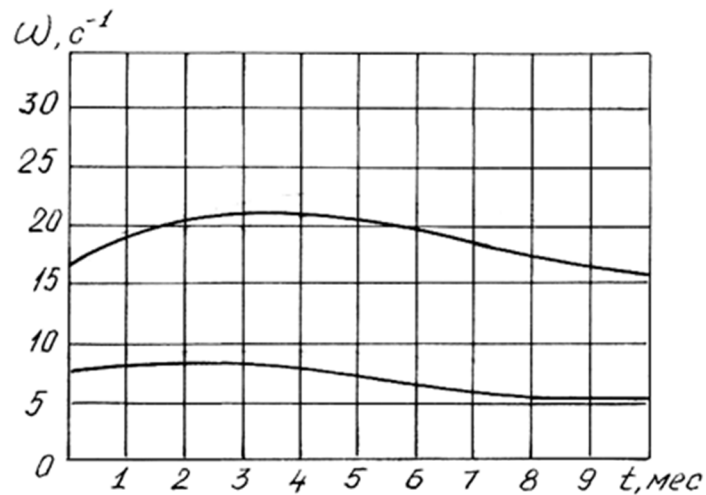


Рисунок 2.6- Фрагмент віброграми загасання коливання балки №2



Залежність втрати маси $\Delta\omega$ балки № 2 від часу впливу середовища



Залежність частоти ω від часу впливу середовища.

Рисунок 2.8 - Залежність частоти ω від часу впливу середовища.

Коливання модельної балки розглядали як коливання системи зі скінченним числом ступенів свободи. Основною динамічною характеристикою конструкції вважалася частота вільних коливань. Для отримання повної сукупності параметрів коливань було встановлено такий порядок дослідження:

- 1) визначення власних частот балок у некородованому стані;
- 2) експериментальна діагностика параметрів коливань унаслідок появи корозійної пошкоджуваності;
- 3) перевірка адекватності обраної експериментальної моделі коливальним явищам, що реально виникають;
- 4) ідентифікація параметрів коливань на основі зіставлення експериментальної та розрахункової інформації.

Така послідовність являє розроблену розрахунково-експериментальну методику дослідження частоти вільних коливань головної балки вантажопідйомного крана.

2.5 Натурні дослідження кранових конструкцій

Дослідження металевих конструкцій з метою вивчення частот коливань порівняно з дослідженнями їхніх моделей є досить ефективним засобом для

уточнення змін власних частот під час експлуатації кранів. Частота і період вільних коливань є основними динамічними характеристиками металоконструкцій.

Експериментальні дослідження металоконструкцій проводили на шести мостових кранах фермового типу (рис. 3.9), установлених у ливарному цеху металургійного комбінату "Азовсталь". Експлуатуються крани в запылено-му робочому середовищі, яке сприяє утворенню корозійної пошкоджуваності. Крани - однотипні за основними характеристиками, видом металоконструкцій, умовами експлуатації, циклами навантаження.

Попередньо було проведено обстеження стану всіх елементів метало-конструкцій, яке дало змогу встановити, що тріщини в елементах відсутні, місцеві та загальні деформації перебувають у межах допустимих величин, відбувається поверхневий нерівномірний корозійний процес.

Визначення найбільш навантажених елементів металоконструкцій у процесі експлуатації проводили фотографії робочої зміни по завантаженню кранів і складали схеми пересування моста візка з вантажем.

Характерні навантажені елементи обклеювали дротяними датчиками з базою 20 мм омічного опору.

Найбільш інформативними є три датчики, розташовані на верхньому, нижньому поясах і розкосі, схеми наклеювання представлені на рис. 3.10. Датчики наклеювалися на підготовлену поверхню клеєм БФ-2, завантажували крани і складали схеми пересування моста візка з вантажем.

Характерні навантажені елементи обклеювалися дротяними датчиками з базою 20 мм омічного опору.

Експериментально визначалися параметри коливального руху крана під час підйому вантажу, руху візка і моста з вантажем, опускання вантажу і параметри холостого ходу. Розроблена методика включає підбір апаратури, послідовність і обсяг проведення дослідження, оцінку точності.

Для вимірювання коливань використовувалася тензометрична апаратура: тензометричний підсилювач 8АНЧ7М, осцилографи К9-21, Н-700.

Випробування складалися з таких етапів: візок без вантажу встановлювали біля опор, протилежних місцям наклейки датчиків, на осцилограмі фіксували нульову лінію;

візок переміщали на середину прольоту і здійснювали підйом вантажу з підлоги й опускання з різким гальмуванням; здійснювали переміщення візка з вантажем уздовж прольоту; пересування моста крана за положення візка в середині прольоту.

Ці етапи відповідають циклограмі роботи крана. У кожному випадку вагу вантажу, що піднімається, було збільшено на 10 % номінальної вантажопідйомності.

Аналіз осцилограм показав, що протягом другого етапу після підйому і кидання вантажів спостерігається коливання крана. Розгортка загасаючих коливань моста і каната з вантажем представлена на рис. 3.11.

З осцилограм визначали такі параметри коливань:

1) декременти загасань першого і другого головних коливань

$$D_1 = \ln \frac{U_1^{(1)}}{U_{r+1}^{(1)}} ; \quad D_2 = \ln \frac{U_1^{(2)}}{U_{r+1}^{(2)}} \quad (2.3)$$

де $U_{r+1}^{(1)}$, $U_1^{(1)}$ - дві амплітуди осцилограми коливань моста;

$U_{r+1}^{(2)}$, $U_1^{(2)}$ - дві амплітуди осцилограми коливань каната;

2) частоти K_1 і K_2 першого і другого коливань системи

$$K_1 = \frac{2\pi}{T_1} ; \quad K_2 = \frac{2\pi}{T_2}$$

де T_1 - період коливання моста;

T_2 - період коливання каната

3) речова частина кореня характеристичного рівняння визначається співвідношенням (11,41):

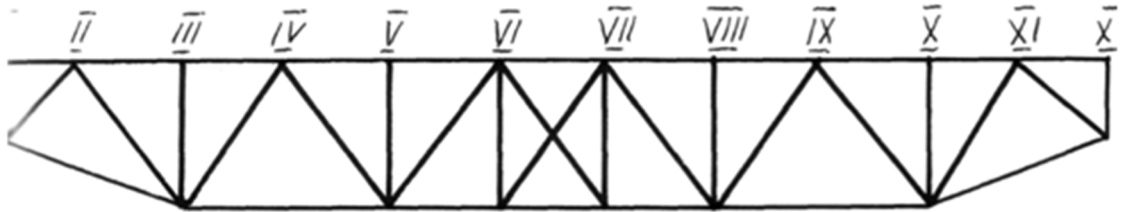
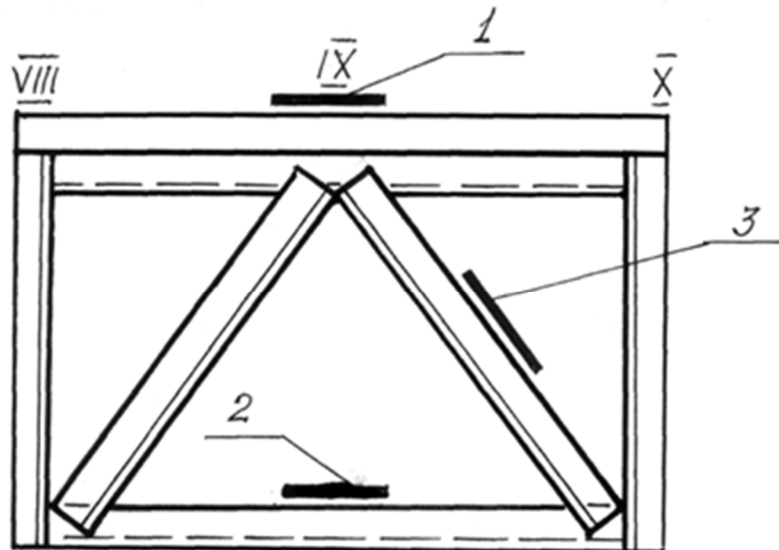


Схема встановлення танзометричних датчиків



$$n_1 = \frac{1}{t_4^{(1)} - t_2^{(1)}} \ln \frac{U_{r+2}^{(1)}}{U_r^{(1)}}; \quad n_2 = \frac{1}{t_4^{(2)} - t_2^{(2)}} \ln \frac{U_{r+2}^{(2)}}{U_r^{(2)}}, \quad (2.5)$$

де $(t_4^{(1)} - t_2^{(1)})$ - часовий відрізок, виміряний між точками осцилограми;

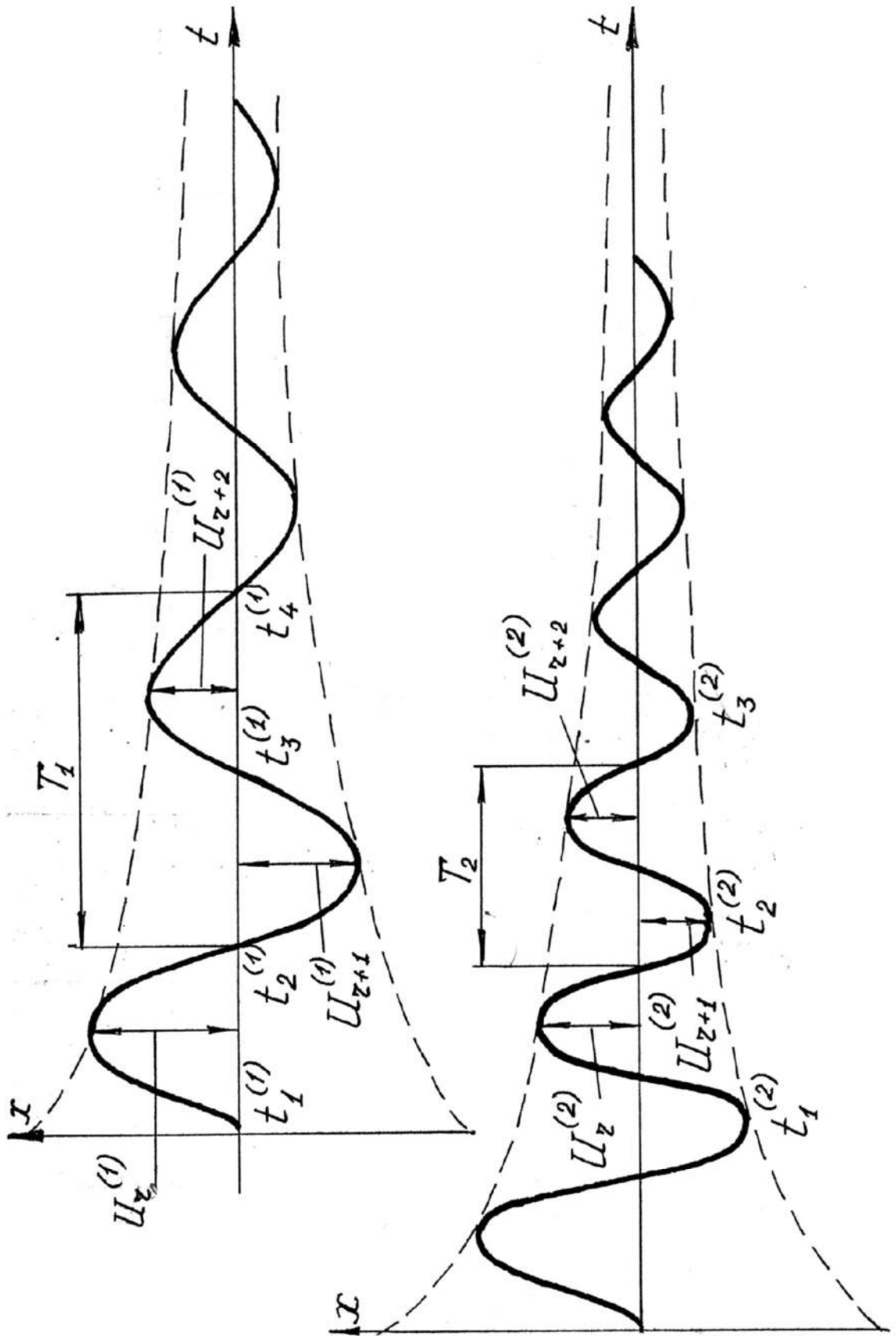
$U_{r+2}^{(1)}$, $U_r^{(1)}$ - амплітуда коливань моста;

$(t_4^{(2)} - t_2^{(2)})$ - часовий відрізок точки осцилограми коливань каната;

$U_{r+2}^{(2)}, U_r^{(2)}$ - амплітуда коливань каната;

4) початкові фази визначаються з виразу

$$\operatorname{tg} \alpha_1^{(1)} = \frac{K_1^{(1)}}{n_1^{(1)}} ; \quad \operatorname{tg} \alpha_2^{(2)} = \frac{K_2^{(2)}}{n_2^{(2)}}$$



5) амплітуди коливань визначаються із співвідношень

$$\frac{U_{r+1}}{U_r} = \frac{A e^{-nt_{r+1}}}{A e^{-nt_r}}$$

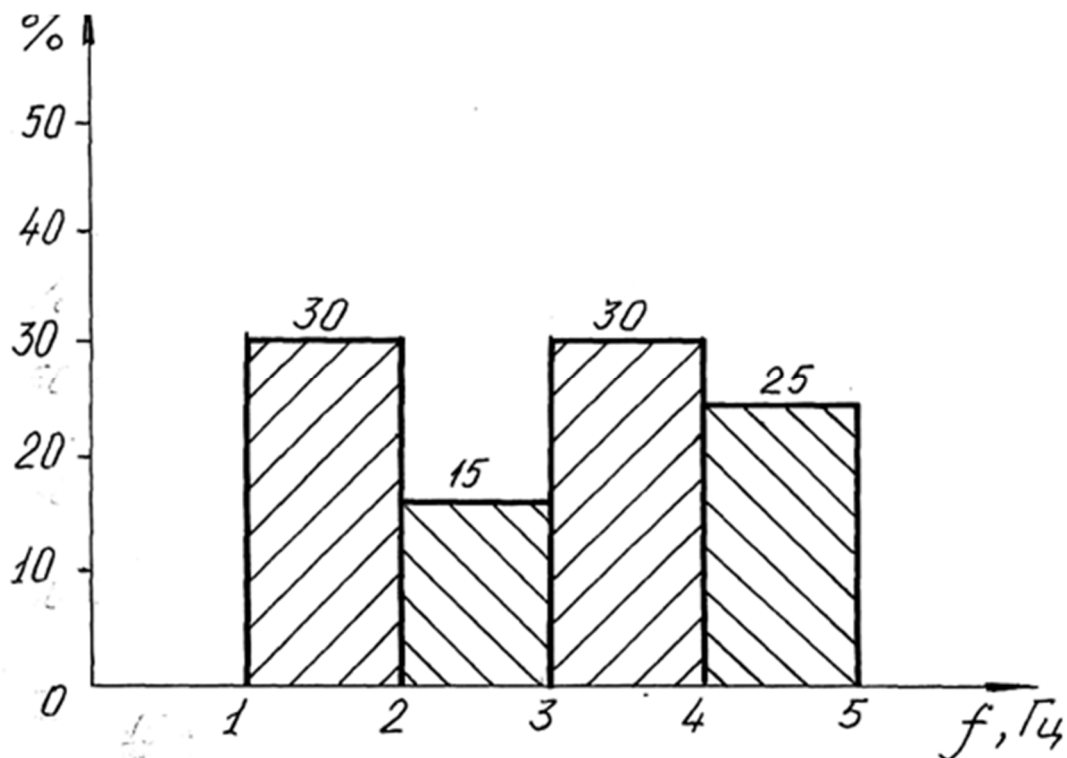
Отримані осцилограми вертикальних коливань опрацьовувалися для кожного з шести кранів, результати наведено в таблиці 3.3.

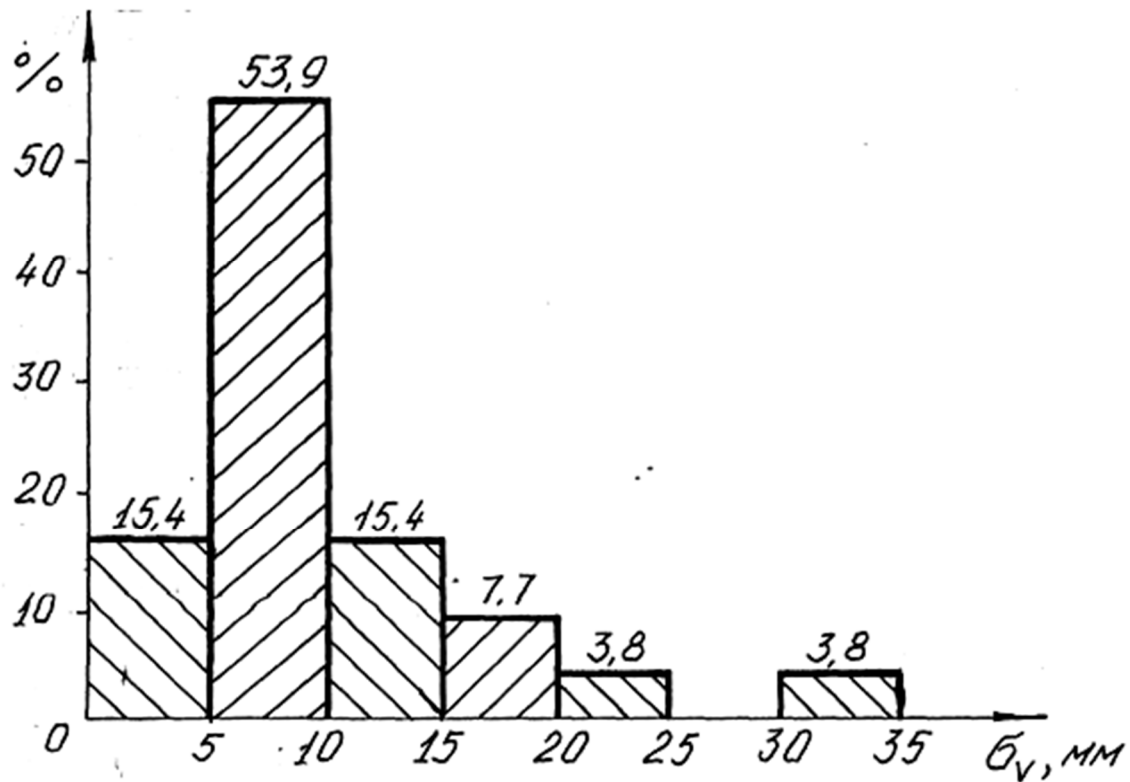
Аналіз результатів обробки коливальних процесів показав, що частоти власних коливань елементів металоконструкцій перебувають у межах 1-5 Гц, а встановлені змінні напруги - у межах 0-35мм.

Тензометричні дослідження металоконструкцій кранів дали змогу встановити, що коливання вже другої гармоніки затухають дуже швидко. Тому достатньо обмежитися розглядом тільки основної нижчої частоти.

На рис. 3.12; 3.13 наведено гістограми розподілу власних частот і умовних змінних напружень.

Розподіл власних частот – f



Розподіл напружень σ_v 

2.6. Оцінка поперечних коливань силових елементів крана з урахуванням інтенсивної корозії

У металургійній, машинобудівній і хімічній промисловості використовують металоконструкції, що працюють в умовах агресивного середовища, яке спричиняє інтенсивну корозію металу, що істотно змінює з часом жорсткість, масу, розміри несучих конструкцій. Для оцінки стану більшості таких конструкцій можливий такий шлях: здійснити ідентифікацію параметрів конструкцій, скористатися отриманою інформацією для прогнозування довговічності конструкцій.

Досвід дослідження металоконструкцій показує, що є багато випадків, коли спостерігається нерівномірна інтенсивність корозії по довжині головної балки крана.

Зазвичай кран можна розглядати як складну просторову конструкцію, що складається з великої кількості ферм і балок / 37 /. Оскільки в загальному вигляді розгляд задачі про всі типи статичних і динамічних навантажень, що діють в умовах інтенсивної корозії на таку складну металоконструкцію, як кран, на сьогодні не видається можливим, доцільно розглянути, насамперед, спрощену модель крана у вигляді його головної несучої балки певного поперечного перерізу, завантаженої поперечним і поздовжнім навантаженнями. Наявність поздовжнього змінного навантаження обумовлюється такими факторами: поздовжніми складовими аеродинамічного навантаження, а також припущенням про те, що, зважаючи на велику кількість зварних вузлів конструкцій крана, деякі з них реагують на поперечне навантаження, викликане пересуванням візка, або на аеродинамічні навантаження, як жорстко затиснуті.

У цьому розділі проведено аналітичну оцінку впливу значних корозійних пошкоджень на вібраційні характеристики елементів кранових конструкцій.

Під час розгляду поперечних коливань схему кранової конструкції можна приймати як балку:

1) вільно оперту на двох опорах без консолей або з консолями для мостових і козлових кранів і перевантажувальних мостів під час коливань у вертикальній площині;

2) вільну для тих самих типів кранів, або вільно оперту для козлових кранів і перевантажувальних мостів за умови відносно великої маси їхніх опор, при коливаннях у горизонтальній площині;

3) з одним шарнірно опертим (або закладеним та іншим вільним кінцем для поворотних кранів зі стрілкою) за умови коливань у вертикальній (або горизонтальній) площині /37/.

Коливання кранової конструкції можна розглядати як коливання системи зі скінченним числом ступенів свободи / 37 /.

Розглянемо малі поперечні коливання стрижня кранової конструкції з прямолінійною віссю, змінного за довжиною і за часом перерізу. Віссю стрижня є лінія центрів ваги його перерізів. Передбачається, що стрижень має хоча б одну поздовжню площину симетрії і коливання розглядаються в цій площині.

Прийmemo прямолінійну вісь головної балки в недеформованому стані за вісь X . Зважаючи на малість коливань, переміщення будь-якої точки осі в момент часу t визначається координатою $y(x, t)$, а поворот перерізу том $\theta = dy/dx$. Малими зміщеннями перерізів уздовж осі та пов'язаними з цим силами інерції нехтуємо. Вважаємо, що коливання відбуваються з малими амплітудами, за яких зберігається пропорційність між силами пружності та відхиленнями стрижня від положення рівноваги, або (що те саме) між силами пружності та деформаціями стрижня. Оскільки конструкція має змінну масу, то в рівняння її коливань повинні входити доданки, що містять похідну маси. Однак, з огляду на те, що корозійні процеси розвиваються відносно повільно, швидкістю зміни маси можна знехтувати. За прийнятих припущень диференціальне рівняння вільних коливань прямолінійного стрижня має вигляд

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(J_s \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - N \frac{\partial y}{\partial x} \right) + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0$$

(2.1)

де $m(x, t)$, $EJ(x, t)$ - погонна маса стрижня і жорсткість на вигин, $IS(x, t)$ - масовий погонний момент інерції стрижня / 102 /. За малих відхилень від положень рівноваги поздовжні зусилля N не залежать від коливань і повністю визначаються вихідними умовами задачі.

Розрахунок частот вільних коливань стрижнів зазвичай проводиться без урахування інерції повороту його елементів. Це допущення, правильне для нижчих форм коливань, стає несправедливим під час розрахунку частот ви-

щикх форм коливань. Воно виявляється також непридатним, якщо до стрижня приєднуються сторонні маси, що істотно змінюють масовий погонний момент інерції, але мало змінюють його жорсткість.

Проте на початку дослідження не будемо враховувати терцію повороту елементів перерізу стрижня і припустимо, що поздовжня сила N дорівнює нулю. У такому разі диференціальне рівняння (2.1) набуде такого вигляду:

$$EJ = \varphi_1(\xi) * \psi_1(t); \quad m = \varphi_2(\xi) * \psi_2(t) \quad (2.3)$$

де $\xi=x/l$ - безрозмірна координата, що змінюється вздовж довжини стрижня від нуля до одиниці, а l - довжина стрижня.

Уявімо шукану функцію прогину $y(\xi, t)$ як добуток двох незалежних функцій:

$$Y(\xi, t) = Y(\xi) \cdot T(t), \quad (2.4)$$

Підстановка (4.4) з урахуванням залежностей (4.3) у диференціальне рівняння (4.2) призводить до поділу останнього на два самостійні рівняння

$$\ddot{T}(t) + p^2 \frac{\psi_1(t)}{\psi_2(t)} T(t) = 0,$$

(2.5)

$$\varphi_1(\xi)Y^4 + 2\varphi_1'(\xi)Y^{(3)} + \varphi_1''(\xi)Y^{(2)} - l^4 p^2 \varphi_2(\xi)Y = 0 \quad (2.6)$$

Розглянемо випадок, коли стрижень має прямокутний переріз, лінійні розміри якого через корозію з плином часу зменшуються за експоненціальним законом. Існування додаткового джерела, що спричиняє корозію, поблизу

одного з кінців стрижня призводить до того, що по довжині стрижня інтенсивність корозії нерівномірна і лінійні розміри поперечного перерізу стрижня зменшуються за експоненціальним законом ще й уздовж довжини стрижня.

Спочатку розглянемо випадок, коли висота поперечного перерізу значно більша за його ширину, так що зміною висоти можна знехтувати. Оскільки для прямокутного перерізу

$$I = \frac{bh^3}{12}, \quad m = \rho b h,$$

де b - ширина поперечного перерізу стрижня, ρ - густина, h - висота, то за прийнятого припущення, позначаючи через EJ_0 і m_0 первісну вигинну жорсткість і погонну масу, отримуємо такі залежності [25, 30].

$$EJ = EJ_0 e^{-\alpha(\tau+t)\xi} e^{-\beta(\tau+t)}$$

$$m = m_0 e^{-\alpha(\tau+t)\xi} e^{-\beta(\tau+t)}$$

де τ - час існування стрижня (крана) в умовах агресивного середовища до початку роботи в конкретному циклі,

t - поточний час роботи стрижня (крана) в конкретному циклі,

α і β - параметри, що визначаються експериментальним шляхом.

З огляду на той факт, що τ набагато більший, ніж t , наприклад, для крана τ вимірюється десятиліттями, а t - годинами, у залежностях (2.7) і (2.8) в одному із співмножників можна знехтувати значенням t порівняно з τ , оскільки вони входять сумою.

Отримуємо

$$EJ = EJ_0 e^{-\alpha\tau\xi} e^{-\beta(\tau+t)} \quad (2.9)$$

$$m = m_o e^{-\alpha\tau\xi} e^{-\beta(\tau+t)}$$

(2.10)

У такому разі диференціальні рівняння (2.5) і (2.6), що описують вільні коливання стрижня, набудуть вигляду:

$$\ddot{T}(t) + p^2 T(t) = 0$$

(2.11)

$$Y^{(4)} - 2\alpha\tau Y^{(3)} + \alpha^2 \tau^2 Y^{(2)} - k^4 Y = 0$$

(2.12)

де

$$k^4 = l^4 \frac{m_o p^2}{EI_0}$$

(2.13)

Цей вираз, вирішений відносно p , дає загальну формулу для розрахунку частоти власних коливань стрижнів:

$$p = \frac{k^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI_0}{m_o}}, \quad (2.14)$$

коефіцієнт K_2 залежить від умов закріплення стрижнів і визначається нижче.

Рівняння (2.11) вільних гармонійних коливань має загальний розв'язок

$$T(t) = A_1 \cos pt + A_2 \sin pt.$$

Загальний інтеграл рівняння (4.12) має вигляд

$$Y(\xi) = C_1 + C_2 \xi + C_3 e^{\alpha \tau \xi} + C_4 \xi e^{\alpha \tau \xi}$$

при $K^2=0$, (4.15)

$$Y(\xi) = e^{\frac{\alpha \tau \xi}{2}} \left(C_1 e^{\lambda_1 \xi} + C_2 e^{-\lambda_1 \xi} + C_3 e^{\lambda_2 \xi} + C_4 e^{-\lambda_2 \xi} \right)$$

при $0 < K^2 < \frac{\alpha^2 \tau^2}{4}$

$$Y(\xi) = e^{\frac{\alpha \tau \xi}{2}} \left(C_1 e^{\lambda_1 \xi} + C_2 e^{-\lambda_1 \xi} + C_3 \xi + C_4 \right) \quad \text{при} \quad K^2 = \frac{\alpha^2 \tau^2}{4}$$

(2.17)

$$Y(\xi) = e^{\frac{\alpha \tau \xi}{2}} \left(C_1 e^{\lambda_1 \xi} + C_2 e^{-\lambda_1 \xi} + C_3 \cos \lambda_2 \xi + C_4 \sin \lambda_2 \xi \right) \quad (2.18)$$

При $K^2 = \frac{\alpha^2 \tau^2}{4}$

Тут

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{\lambda^2 \tau^2}{4} + K^2}, \quad \lambda_1 = \sqrt{\frac{\lambda^2 \tau^2}{4} - K^2}$$

(2.19)

Остаточний вигляд розв'язку отримують після визначення постійних

C_1, C_2, C_3, C_4 , виходячи із задоволення граничних умов - умов закріплення кінців стрижня.

Розглянемо стрижень, кінці якого розташовані на жорстких шарнірних опорах, і ширина $b(1,0)$ при $t=0$ кінцевого перерізу для $=1$

Становить 0,8 або 0,6 від ширини $b(0,0)$, кінцевого перерізу для $=0$, тобто

$e^{-\alpha\tau} = 0,6$ ($\alpha\tau = 0,22-0,52$) за рахунок додаткового джерела, що викликає корозію, і розташування біля кінця $=1$

Граничними умовами для шарнірних опор є

$$Y(0) = 0; Y''(0) = 0; Y(1) = 0; Y''(1) = 0$$

(2.20)

Завдання полягає у визначенні відмінного від нуля розв'язку диференціального рівняння (2.12), що задовольняє граничні умови (2.20).

Із задоволення граничних умов (2.20) випливає, що рішення (2.15),

(2.16), (2.17) являють собою одне рішення

$Y(\xi) = 0$, оскільки граничним умовам задовольняють єдині значення невідомих постійних $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 0$ для розглянутих випадків.

Підставляючи в граничні умови (2.20) розв'язки (2.18), одержуємо однорідну систему рівнянь відносно невідомих C_1, C_2, C_3, C_4 . Щоб одержати відмінні від нуля розв'язки системи, дорівнюємо нулю її визначник і одержуємо часткове рівняння у вигляді визначника четвертого порядку. Розгортаючи визначник у рядок, приходимо до рівняння для визначення частот у вигляді

(2.21)

$$\begin{aligned} & \left(e^{-\lambda_1} - e^{\lambda_1} \right) \sin \lambda_2 (2\alpha\tau\lambda_1 (\alpha\tau\lambda_1 + 2K^2) - (\alpha\tau\lambda_1 + 2K^2)^2 + \\ & + \alpha^2 \tau^2 \lambda_2^2) + 2\alpha^2 \tau^2 \lambda_1 \lambda_2 \cos \lambda_2 (e^{-\lambda_1} + e^{\lambda_1}) - 4\alpha^2 \tau^2 \lambda_1 \lambda_2 = 0 \end{aligned}$$

Коріння цього рівняння, що відповідають першому тону для нижчої форми коливань, дають такі форми частот:

$$p = \frac{9,8434}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_o}{m_o}} \quad \text{для} \quad \alpha\tau = 0,52; e^{-\alpha\tau} = 0,6 \quad (2.22)$$

$$p = \frac{9,7877}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_o}{m_o}} \quad \text{для} \quad \alpha\tau = 0,92; e^{-\alpha\tau} = 0,4 \quad (2.23)$$

Якщо порівняти отримані результати з аналогічною частотою для стрижня постійного перерізу, для якої коефіцієнт у формулі частоти (2.14) у разі шарнірного обпирання кінців стрижня дорівнює

$K^2 = \pi^2 = 9,8696$ то видно, що зменшення ширини поперечного перерізу від кінця стрижня до іншого до 60-40% незначно впливає на величину частотного коефіцієнта 0,83 (0,25)%.

Розглянемо консольний стрижень із жорстко закладеним одним кінцем $\xi = 0$. Граничні умови в цьому випадку виражаються рівністю :

$$Y(0) = 0; Y'(0) = 0; Y''(1) = 0; Y'''(1) = 0 \quad (2.24)$$

Як і в попередньому випадку, розв'язки (2.15.), (2.16), (2.17) диференціального рівняння (2.12), що задовольняють граничним умовам (2.24), являють собою один розв'язок $Y(\xi) = 0$.

Розв'язок (4.18) у цьому випадку запишемо у вигляді

$$Y(\xi) = e^{\frac{\alpha\tau\xi}{2}} (C_1 ch\lambda_1\xi + C_2 sh\lambda_1\xi + C_3 \cos\lambda_2\xi + C_4 \sin\lambda_2\xi), \quad (2.25)$$

де λ_1 і λ_2 визначаються виразом (2.19), а $4K^2 > \alpha^2\tau^2$.

Підставляючи розв'язок (2.25) у граничні умови (2.24), одержуємо однорідну систему рівнянь відносно невідомих C_1, C_2, C_3, C_4 . Щоб одержати відмінні від нуля розв'язок системи, дорівнюємо нулю її визначник і одержуємо часткове рівняння, що приводимо до вигляду

$$(a_{11} - b_{11})(\lambda_2 a_{22} - \lambda_1 b_{22}) - (a_{21} - b_{21})(\lambda_2 a_{12} - \lambda_1 b_{12}) = 0 \quad (4.26)$$

$$\text{где} \quad a_{11} = \left(\frac{\alpha^2 \tau^2}{4} + r_1^2 \right) chr_1 + 2 \frac{\alpha \tau}{2} r_1 shr_1 = f(r_1, r_1^2, chr_1, shr_1) \quad ;$$

$$a_{21} = \left(\frac{\alpha^3 \tau^3}{8} + 3 \frac{\alpha \tau}{2} r_1^2 \right) chr_1 + \left(3 \frac{\alpha^2 \tau^2}{4} r_1 + r_1^3 \right) shr_1 = f_2(r_1, r_1^2, r_1^3, chr_1, shr_1)$$

$$a_{12} = f_1(r_1, r_1^2, shr_1, chr_1);$$

$$a_{22} = f_2(r_1, r_1^2, r_1^3, shr_1, chr_1);$$

$$b_{11} = f_1(-r_2, -r_2^2, \cos r_2, \sin r_2);$$

$$b_{11} = f_2(-r_2, -r_2^2, r_1^3, \cos r_2, \sin r_2);$$

$$b_{12} = f_1(r_2, -r_2^2, \sin r_2, \cos r_2);$$

$$b_{22} = f_2(r_2, -r_2^2, -r_2^3, \sin r_2, \cos r_2);$$

$$r_1 = \lambda_1 \quad ;$$

$$r_2 = \lambda_2 .$$

Визначимо корені рівняння (2.26), що відповідають першій формі коливань, отримуємо такі формули частот

$$p = \frac{4,6265}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_o}{m_o}}$$

$$\text{для } \alpha\tau = 0,92, e^{-\alpha\tau} = 0,4;$$

$$p = \frac{4,1138}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_o}{m_o}}$$

$$\text{для } \alpha\tau = 0,52, e^{-\alpha\tau} = 0,6;$$

$$p = \frac{3,7597}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_o}{m_o}}$$

$$\text{для } \alpha\tau = 0,22, e^{-\alpha\tau} = 0,8;$$

Порівнюючи отримані результати з частотним коефіцієнтом $K^2 = 3,5156$ для аналогічної форми коливань консольного стрижня постійного перерізу, бачимо, що зменшення ширини поперечного перерізу від закладеного кінця до вільного до 40% призводить до збільшення коефіцієнта частоти на 17%.

Розглянемо тепер випадок, коли всі лінійні розміри поперечного перерізу з плином часу та зі зміною довжини зменшуються за експоненціальним законом, а отже, зміна, одиниці довжини та моменту інерції перерізу визначаються такими

Залежностями, аналогічно (2.9), (2.10):

$$EJ = EJ_o e^{-4\alpha\tau\xi} e^{-4\beta(\tau+t)} , \quad (2.27)$$

$$m = m_o e^{-2\alpha\tau\xi} e^{-2\beta(\tau+t)} . \quad (2.28)$$

У цьому випадку диференціальні рівняння (2.5) і (2.6) набудуть вигляду:

$$\ddot{T}(t) + p^2 e^{-2\beta(\tau+t)} T(t) = 0 \quad (2.29)$$

$$Y^{(4)} - 8\alpha\tau Y^{(3)} + 16\alpha^2\tau^2 Y^{(2)} - K^4 e^{2\alpha\tau\xi} Y = 0 \quad (2.30)$$

За допомогою заміни $\theta = \frac{1}{\beta} p e^{-\beta(\tau+t)}$ рівняння (2.29) приводиться до рівняння Бесселя і загальний інтеграл рівняння (2.29) виражається через функції Бесселя нульового порядку

$$T(t) = A_1 J_o(\theta) + A_2 N_o(\theta) \quad (2.31)$$

Загальний інтеграл рівняння (2.30) має вигляд:

$$Y(\xi) = u^4 [C_1 J_4(u) + C_2 N_4(u) + C_3 I_4(u) + C_4 K_4(u)] , \quad (2.32)$$

де

$$u = \frac{2K}{\alpha\tau} e^{\frac{\alpha\tau\xi}{2}}$$

Оскільки τ набагато більше, ніж t , то рівняння (2.29) можна спростити, нехтуючи значенням t у показниках ступеня при e , порівняно з рівняння τ (2.29) набуде вигляду звичайного рівняння вільних гармонійних коливань.

$$\ddot{T} + p^2 e^{-2\beta\tau} T(t) = 0, \quad (2.33)$$

загальне рішення якого

$$T(t) = A_1 \cos e^{-\beta\tau} pt + A \sin e^{-\beta\tau} pt \quad (2.34)$$

У випадку, коли значення параметрів такі, що добуток невеликий $2\alpha\tau\xi$, розкладемо $e^{2\alpha\tau\xi}$ в ряд і втримаємо неповні перших три члени ряду, замінивши ξ середнім значенням, тоді в першому наближенні рівняння (2.30) набуде вигляду, аналогічного рівнянню (2.12)

Розв'язання якого ми вже розглядали:

$$Y^{(4)} - 8\alpha\tau Y^{(3)} + 16\alpha^2\tau^2 Y^{(2)} - K^4 \left(1 + \frac{\alpha\tau}{2}\right)^2 Y = 0 \quad (2.35)$$

Провівши аналогічні перетворення, для консольного стрижня, наприклад, отримуємо такі, що відповідають першій формі коливань, наближені формули частотного множника в (4.34)

$$p = \frac{5,079}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_o}{m_o}} \quad \text{для } \alpha\tau = 0,52, \quad e^{-\alpha\tau} = 0,6;$$

$$p = \frac{4,120}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_o}{m_o}} \quad \text{для } \alpha\tau = 0,22, \quad e^{-\alpha\tau} = 0,8;$$

Можна припустити, що лінійні розміри поперечного перерізу стрижня внаслідок корозії з плином часу змінюються обернено пропорційно до часу перебування стрижня в умовах агресивного середовища. Існування додаткового джерела, що спричиняє корозію, поблизу одного з кінців стрижня призводить до того, що по довжині стрижня інтенсивність корозії нерівномірна, внаслідок чого лінійні розміри перерізу зменшуються за параболічним законом ще й уздовж довжини стрижня. У такому разі отримуємо для маси одиниці довжини та моменти інерції стрижня такі залежності

$$EJ = EJ_o \frac{[\alpha(\tau + t)\xi - 1]^8}{[\beta(\tau + t) + 1]^4}, \quad (2.36)$$

$$m = m_o \frac{[\alpha(\tau + t)\xi - 1]^4}{[\beta(\tau + t) + 1]^2} \quad (2.37)$$

Беручи до уваги те, що $\tau \gg t$, нехтуємо доданком $\alpha t\xi$ порівняно з $\alpha\tau\xi$ і приводимо до простіших виразів

$$EJ = EJ_o \frac{(\alpha\tau\xi - 1)^8}{[\beta(\tau + t) + 1]^2}$$

$$m = m_o \frac{(\alpha\tau\xi - 1)^4}{[\beta(\tau + t) + 1]^2}$$

$$(2.38)$$

$$(2.39)$$

З урахуванням залежності (2.38), (2.39) диференціальні рівняння (2.5) і (2.6), що описують вільні коливання стрижня, набудуть вигляду:

$$\ddot{T}(t) + p^2 \frac{1}{(\beta\tau + \beta t + 1)^2} T(t) = 0 \quad \beta \neq 0$$

$$(3.40)$$

$$(\alpha\tau\xi - 1)^4 Y^{(4)} + 16\alpha\tau(\alpha\tau\xi - 1)^3 Y^{(3)} + 56\alpha^2\tau^2(\alpha\tau\xi - 1)^2 Y^{(2)} - K^4 Y = 0$$

$$\text{при} \quad \alpha \neq 0$$

$$(2.41)$$

Рівняння (2.40) є рівняння Ейлера; його рішення

$$T(t) = A_1 (\beta\tau + \beta t + 1)^{\frac{1}{2} + \lambda} + A_2 (\beta\tau + \beta t + 1)^{\frac{1}{2} - \lambda} \quad \text{при } 1 - 4p^2 > 0 \quad (2.42)$$

$$T(t) = A_1 (\beta\tau + \beta t + 1)^{\frac{1}{2}} + A_2 (\beta\tau + \beta t + 1)^{\frac{1}{2}} \ln(\beta\tau + \beta t + 1) \quad (2.43)$$

$$1 - 4 \frac{p^2}{\beta^2} = 0$$

При

$$T(t) = A_1 (\beta\tau + \beta t + 1)^{\frac{1}{2}} \cos \lambda \ln(\beta\tau + \beta t + 1) + A_2 (\beta\tau + \beta t + 1)^{\frac{1}{2}} \sin \lambda \ln(\beta\tau + \beta t + 1)$$

$$1 - 4 \frac{p^2}{\beta^2} < 0$$

при

$$(2.44)$$

$$2\lambda = \sqrt{\left|1 - 4 \frac{p^2}{\beta^2}\right|}$$

Загальний інтеграл рівняння (2.41) має вигляд

$$\begin{aligned} Y(\xi) = & C_1 |\alpha\tau\xi - 1|^{-\frac{5}{2}+S_1} + C_2 |\alpha\tau\xi - 1|^{-\frac{5}{2}-S_1} + C_3 |\alpha\tau\xi - 1|^{-\frac{5}{2}+S_2} + \\ & + C_4 |\alpha\tau\xi - 1|^{-\frac{5}{2}-S_2} \end{aligned}$$

(2.45)

3 МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ВІБРАЦІЙНИМИ МЕТОДАМИ

Рекомендується такий порядок розроблення методик діагностики та організації діагностичних обстежень машин, що експлуатуються.

Підготовчі роботи. У разі виникнення необхідності доведення машин, що експлуатуються, і розроблення у зв'язку з цим методик вібродіагностики конкретних вузлів і деталей підприємство, що виготовляє або ремонтує машини, оформляє рішення на розроблення методу, узгоджуючи його з підприємствами та організаціями, що експлуатують.

Після оформлення рішення збирають і узагальнюють інформацію про кількісні та якісні характеристики дефектів, що мали місце під час випробувань і експлуатації машини. Далі розробляють загальний план робіт із підготовки та проведення вібродіагностики і вібродосліджень вузла, що діагностується. У плані враховують зібрану інформацію, необхідність спеціальних доопрацювань і препарування машини, необхідність і доцільність проведення дослідження в стендових і експлуатаційних умовах і намічають загальний напрямок дослідження, варіанти виготовлення і складання досліджуваного вузла.

Для конкретизації діапазону досліджуваних частот проводять розрахунок частот, очікуваних у спектрі вібрації досліджуваного вузла на різних режимах роботи машини. На підставі розрахунку вибирають частотний діапазон для спектрального аналізу.

Потім, на підставі загального плану, випускають робочу програму проведення досліджень. У програмі вказують такі дані:

- місця встановлення і кількість вібро- і тензодатчиків (місця встановлення вібродатчиків слід вибирати так, щоб максимально наблизити датчик

до вузла, що діагностується, доцільно, що б кількість датчиків була максимально можливою);

режими роботи машини для проведення вимірювання, оброблення та аналізу вібро- і тензосигіалів;

- частотний діапазон досліджуваних сигналів;

варіанти виготовлення і складання вузла, що діагностується, які імітують задовільні (допустимі) і незадовільні (неприпустимі) його стани та умови роботи, а також варіанти, за яких досліджуваний вузол не є джерелом вібрації і в досліджуваних вібросигналах відсутні складові, що виникають під час звичайної нормальної роботи вузла у складі машини;

- необхідність визначення динамічної навантаженості та напруженості досліджуваного вузла шляхом тензометрування, розроблені схеми препарування вузла тензодатчиками, прокладення трас і виводів проводів від них, необхідне для цього доопрацювання деталей машини;

- перелік необхідної апаратури, датчиків, приладів;

- методику калібрування вібро- і тензодатчиків та апаратури;

- додаткові заходи з техніки безпеки, що стосуються роботи машини під час імітації неприпустимих станів і умов роботи вузлів.

Натурні дослідження на випробувальних стендах.

На підставі плану робіт і робочої програми розробляють технічну документацію на проведення випробування експериментального екземпляра машини.

На першому етапі обробки результатів досліджень виявляють складові спектра вібрації, що характеризують динамічну напруженість і напруженість досліджуваного вузла.

Другим етапом є пошук інформаційної системи діагностичних ознак.

Третій етап - стиснення інформації, що міститься у вібросигналах.

Потім вивчають механізми генерації в справному і несправному станах вузлів та їхній зв'язок із параметрами стану вузлів.

На підставі результатів дослідження розробляють технічне завдання на апаратне забезпечення діагностики в експлуатаційних умовах і, за необхідності, на розроблення, проектування та виготовлення спеціальних вібродіагностичних засобів.

Дослідження і розробка методики діагностики вібронапруженості робочих лопаток силових агрегатів на пересувних електростанціях

У процесі експлуатації силових агрегатів на пересувних електростанціях проявлявся дефект "обрив лопаток", всього за період експлуатації було близько 20 випадків прояву дефекту.

Обрив лопаток відбувався через згинальних і крутильно-згинальних коливань. Злам за місцем руйнування втомний з лінійним вогнищем руйнування, розташований з боку спинки.

На підставі проведених досліджень встановлено, що руйнування лопатки - втомне і якістю матеріалу не пов'язане.

Для визначення причини прояву цього дефекту і відпрацювання методу діагностики агрегатів з максимально вібронавантаженими лопатками в експлуатації агрегат був відновлений для проведення досліджень.

Перед препаруванням тензодатчиками всі лопатки піддавалися частотному контролю за двома формами коливання - 4-ю згинальною і крутильно-вигинною.

На вібростенді методом пісочних фігур було визначено форми коливань усіх лопаток у діапазоні частот $f=5-7$ кГц.

Препарування тензодатчиками з базою, що дорівнює 5 мм, проводили за схемою, що враховує як місця обриву лопатки, так і розташування вузлових ліній обох виявлених форм коливань. Тензометрування лопаток проводили в наступних варіантах складання агрегату і його монтажу на стенді: початковий варіант складання, за якого стався обрив лопатки (на редукторі змонтовано обтічник); монтаж агрегату на стенді без обтічника редуктора; монтаж агрегату на стенді без ежектора;

складання агрегату з редуктором агрегату, який відпрацював в експлуатації кілька тисяч годин без дефекту "Обрив лопатки";

складання агрегату з редуктором, у якому ведуча шестерня сателітів виконана без фланця, а вінцева шестерня і сателіти - за мінімальними допусками похибок евольвент;

складання агрегату з редуктором, у якому поставлено планетарний ступінь, що збільшив передавальне відношення редуктора (з 0,0812 до 0,0873).

Тензометрування проводили за таких режимів роботи агрегату: холостий хід, завантаження 200, 1250, 2500, 3000 кВт, у діапазоні оборотів ротора від 92 до 98% від номінального (майданчик ми через 0,5%).

З огляду на те, що під час пробного виходу на режими завантаження генератора понад 2000 кВт у лопатках проявилися високі динамічні напруження ($\sigma = 200$ МПа), з метою тривалішої схоронності тензодатчиків усі дослідження проводилися під час завантаження генератора 1250 кВт; наприкінці роботи, витримуючи лопатку на резонансних оборотах $n = 230 \text{ с} \sim 1$ і змінюючи завантаження генератора від 200 до 2500 кВт (на більш високе завантаження вийти не вдалося), знято залежність.

Паралельно з тензометруванням проводили спектрографування вібрації агрегату вібродатчиком, встановленим на редукторі спільно з апаратурою: спектроаналізатором і діагностичним приладом слідкуючої фільтрації.

Вимірювання вібрацій проводилося також на агрегаті, на якому в процесі досліджень стався обрив лопатки.

Результати досліджень. Власні частоти лопаток перебувають у межах:

Таблиця №1

Варіант складання монтажу агрегату на стенді	σ МПа	f .Гц	Характер
Початковий варіант складання	240	—	Резонансний
Зі знятим обтічником	270	6000	#
Зі знятим ежектором	267	—	#
З редуктором агрегату, який відпрацював в експлуатації кілька тисяч годин	180	—	#
З редуктором, у якому ведучу шестерню сателітів замінено на шестерню, виготовлену без фланку	210	6000	#
З редуктором, у якому ведуча шестерня сателітів і вінців замінені	54	5800— 6000	Нерезонансний

за 4-ю згинальною формою $f = 5520-5879$ Гц; за згинально-крутильною ("кутовою") $f = 6012-6479$ Гц.

Форми коливань препарованих лопаток у діапазоні частот $f = 5500--6500$ Гц.

Результати тензометрування (за максимальними значеннями) зведено в табл. 1.

За даними тензометрування побудовано графіки зміни динамічних напружень від частоти обертання ротора.

Дані за максимальними результатами тензометрування 14 лопаток у початковому варіанті складання і монтажу агрегату на стенді при завантаженні генератора 1250 кВт зведено в табл. 2.

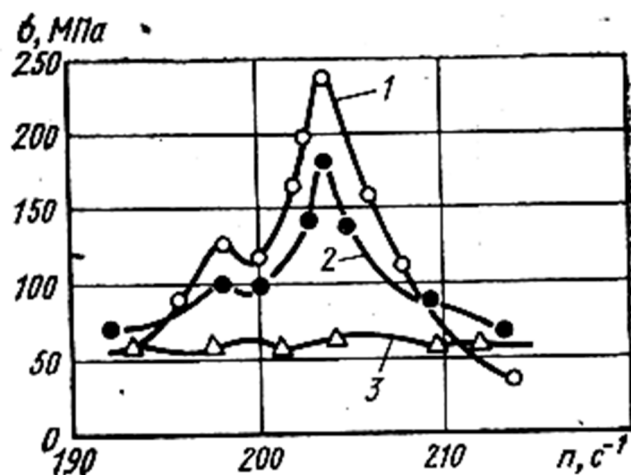
Максимальні динамічні напруження в лопатках проявляються з частотами, відповідними діапазону гармонік $i = 29--30$. мають яскраво вираже-

ний резонансний характер, причому найбільш чітко проявляються за гармоніки $i=29,4$.

Коливання з 29-ю і 30-ю гармоніками проявляються на корпусних деталях агрегату. Гармоніка $i=29,4$ пов'язана з частотою пересполучення зубів ведучої шестерні та шестерень сателітів і визначається числом зубів ведучої шестерні.

Максимальні значення динамічних напружень ($\sigma = 240-270$ МПа) отримано з частотами, відповідними гармоніці $i = 29,4$ (гармоніку визначали за допомогою частотоміра), водночас резонанс лопаток може виникнути за однією з двох форм коливань: вигинально-крутильною ("кутовим") та 4-ою вигинною. Цим пояснюється і той факт, що характер руйнувань лопатки в експлуатації був двояким: "по куточку" (кут верхньої і задньої кромки) і по хорді пера на відстані 12-17 мм від вершини лопатки.

Зі знятим обтічником редуктора динамічна напруга дещо зросла, з 240 до 270 МПа (за тензодатчиком, що показав максимальне значення, лопатка 3), практично такий самий вплив справило зняття вхідного пристрою-ежектора (див. табл. 2).



1- вихідний варіант; 2 - шестерня від несправного агрегату; 3 - шестерня підвищеної точності

Рисунок 3.1 - Зміна змінних напружень у лопатці під час заміни ведучої шестерні

Тензометрування лопаток із редуктором агрегату, що відпрацював в експлуатації кілька тисяч годин, показало, що максимальні динамічні напруження в лопатках, які піддавалися дослідженню, за своїм значенням нижчі і становлять $\sigma = 180$ МПа (лопатка 3). Аналіз частот власних коливань, заміряних за двома високочастотними формами, показав, що власні частоти лопаток агрегату перебувають у межах:

за 4-ю згинальною формою $f = 5449-5639$ Гц:

за згинально-крутильною формою $f = 6001-6284$ Гц, тобто за 4-ю згинальною формою власні частоти лопаток лежать нижче за зону робочих частот обертання, за згинально-крутильною формою - у зоні резонансу за 30-ю гармонікою.

Тензометрування лопаток із ведучою шестернею редуктора, виконаною без фланця із сателітами і вінцевою шестернею ступені, виготовленими з мінімально допустимими похибками евольвенти зубів, показало, що резонансний характер напружень у лопатках зберігається. Максимальні динамічні напруження в лопатках становили $\sigma = 210$ МПа.

Но- мер лопа-	Власні частоти		σ , М Па	n, с- 1	f , Гц	Но- мер ло-	Власні частоти		σ , МП а	n, с-1	f , Гц
	4-я	«ку-					4-я	«кути			
1	583	6400	140	205	6000	11	5810	6377	180	20	6975
3	588	6326	240	203	6030	13	5711	6146	125	19	5800
4	566	6077	125	196	5735	16	5687	6208	175	196	5790
6	548	6100	60	196	5750	22	5520	6012	200	204	6100
8	565	6400	160	198	5750	23	5633	6127	100	196	5800
9	570	6200	110	200	5800	24	5617	6270	190	196	5800
10	592	6406	240	205	6030	19	5691	6142	175	196	5790

Заміна в редукторі ведучої та вінцевої шестерень ступені сателітів на шестерні, що збільшують передатне відношення редуктора до 0,0873, усунула резонансні явища в лопатках у всьому діапазоні досліджуваних частот обертання ($n=197-210$ с-1).

Максимальні напруження в лопатках зафіксовано $= \pm 54$ МПа з частотою коливань $f = 5700\text{--}6000$ Гц (рис. 3.1).

Тензометрування лопатки на резонансних обертах при завантаженні генератора, що змінюється від холостого ходу до 2500 кВт, зафіксувало зростання динамічних напружень у лопатці (рис. 3.2).

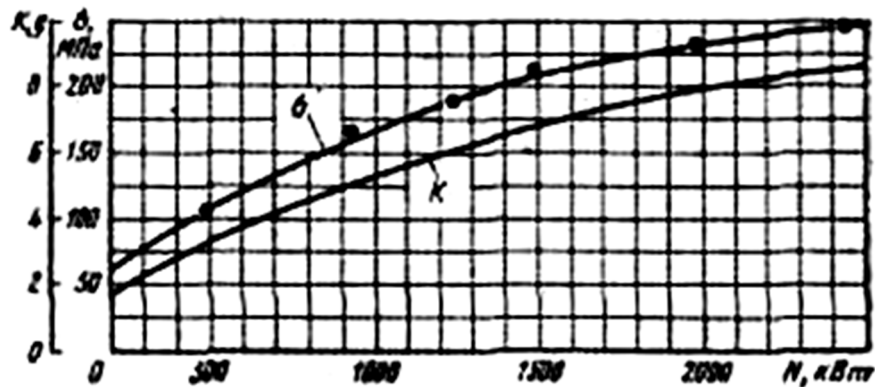


Рисунок 3.2 - Залежність змінних напружень у лопатці та рівня вібрації корпусу від навантаження генератора

З огляду на те, що в процесі досліджень вібронапруженості лопаток було встановлено наявність резонансу за редукторною гармонікою паралельно з тензометруванням, був проведений аналіз спектра частот вібрацій редуктора в діапазоні частот $f = 5500\text{--}7500$ Гц. На спектроаналізатор спочатку було подано сигнал від тензодатчика, а потім від вібродатчика, встановленого у вертикальній площині на редукторі. Аналіз спектрограм показує, що як у сигналі тензодатчика, так і в сигналі вібродатчика чітко виділяються коливання з гармонікою $i = 29,4$.

У процесі досліджень було проведено аналіз стану зубчастого зачеплення планетарного ступеня редуктора. Аналіз проводився порівнянням якості виготовлення евольвенти зубів зубів шестерні

агрегату, на яких мало місце руйнування лопатки під час стендових випробувань, із шестернями агрегату, що відпрацював не скільки тисяч годин в експлуатації.

Аналізом характеру евольвентограм зубчастого зачеплення перед встановленням шестерень на агрегат виявлено таке:

- а) на ведучій шестерні агрегату розмір фланка 14 мкм (за кресленням 4-10 мкм), підріз -20 мкм (за кресленням 6-12 мкм); на проміжних шестернях відхилення за фланками і підрізами незначні;
- б) на провідних шестернях агрегату розмір фланка-відповідно 14 і 17 мкм (за кресленням 4-10 мкм); довжина підрізу -8,6 і 10 мкм (за кресленням 6-12 мкм). На проміжних шестернях відхилення за фланками і підрізами незначні;
- в) на робочій поверхні зубів ведучої шестерні має місце вироблення, що свідчить про те, що під час сполучення зубів шестерень під час роботи агрегату відбувалося "заїдання". Провідна шестерня агрегату вироблення не має;
- г) за евольвентограмами робочих поверхонь зубів вінцевих шестерень планетарного ступеня відхилень від вимог креслення не виявлено.

З метою відпрацювання методу діагностики максимально напруги лопаток паралельно з тензометруванням лопаток на агрегаті проводилося спектрографування. Вібродатчики встановлювалися в декількох місцях корпусу.

Замір вібрацій з гармонікою $29,4 \pm 0,2$ на редукторі паралельно з тензометруванням лопаток на частотах обертання резонансу під час збільшення навантаження генератора від холостого ходу до 2500 кВт показав однаковий характер зміни динамічних напружень у лопатці та вібрацій, заміряних на редукторі вібродатчиком, встановленим у вертикальній площині.

4 НОВІТНІ РОЗРОБКИ З МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОЗІЇ

4.1 Інформаційно-оптичні 3D-технології в корозійному контролі

Розглянуто методичні основи використання інформаційно-оптичних 3D-технологій і комп'ютерних оптичних відеомікромікросондів для високопродуктивного контролю товщини, топографії та статистичних властивостей топограм тонких поверхневих корозійних шарів на мікродільниці поверхні металу або напівпровідника. Формуючи відеомікрображення зондованої мікродільниці поверхні електрода та вимірюючи розподіл інтенсивності відбитого оптичного сигналу по полю зображення даної мікродільниці, можна в реальному часі отримувати 3-вимірне (3D) зображення рельєфу товщини і властивостей островців, зародків нової фази та вдруге обложених шарів на даній ділянці електрода. Розглянуто можливості комбінування методів сканерного та рефлектометричного 3D-відеомікросонда з методами інфрачервоної спектроскопії дифузійного відбиття з гостросфокусованим зондувальним пучком, методом вимірювання фото-ЕРС, еліпсометрією, електрохімічними методами під час досліджень корозійної поведінки металів та сплавів для контролю ступеню неоднорідності товщини та хімічного складу корозійних шарів. Використання інформаційно-оптичних 3D-технологій оброблення зображень дає змогу досягти високої інформативності контролю ступеня неоднорідності товщини, дефектності та хімічного складу шару за досліджуваною мікродільницею.

Ернс Аббе 1876 р. пророчо пророчив, що інструменти, які одного разу дадуть змогу спостерігати найелементарніші деталі природи, матимуть з аналогічними інструментами його часу тільки одну спільну рису - назву "мікроскоп". Трохи більше ніж через 100 років роздільна здатність мікроскопічних систем сягнула молекулярних і атомних масштабів. Відповідні мікроскопічні прилади (електронні, атомно-силові, тунельні та багато інших мікроскопів)

справді дуже далекі за конструкцією від звичайних оптичних мікроскопів. Паралельно появі нових мікроскопічних схем удосконалювалися системи цифрового оброблення зображень і відповідні комп'ютерні системи [3]. Використання комп'ютерів дало змогу здійснювати введення зображень та їхній піксельний аналіз практично в реальному масштабі часу. Цифрове опрацювання мікроскопічних зображень, що дає змогу виявити й дослідити практично невидимі у вихідному зображенні особливості структури й морфології досліджуваного об'єкта, поступово стає рутинним методом сучасних дослідницьких лабораторій. (Найпильніший інтерес зараз викликає 3-вимірна реконструкція поверхневих мікроб'єктів, зокрема топографія і рельєф поверхні та поверхневого шару, поверхневий структурний аналіз). Природно, все це не могло не торкнутися корозійних досліджень, де стандартними методами досі де-факто є електрохімічні та гравіметричні методи.

Незважаючи на те, що вельми барвисті (але далеко не завжди такою ж мірою інформативні) 3-вимірні (3D) зображення поверхні одержують на нинішньому рівні за використання модних зараз атомно-силових і тунельних мікроскопів, стандартна оптична мікроскопія далеко себе не вичерпала. Так, широкого поширення при дослідженні 3-вимірних поверхневих мікроструктур набули оптичні конфокальні мікроскопи, які по суті є однією з модифікацій звичайних оптичних мікроскопів. Фактично нанороздільної здатності досягли так звані оптичні мікроскопи ближнього поля, які також використовують принцип реєстрації відбитого або пройденого через досліджуваний мікрооб'єкт оптичного випромінювання. Та й мікроскопія у своїй стандартній "версії Аббе" донині ефективно розвивається й активно використовується, зокрема й у корозійних дослідженнях, де - незайвим буде згадати - її почали успішно застосовувати задовго до появи електрохімічних методів.

Треба зазначити, що контроль поверхневих фазових шарів, особливо в складних гетерогенних і, зокрема, корозійно-електрохімічних системах, - одне з найтрадиційніших завдань мікроскопічної дефектоскопії поверхні мета-

лів і сплавів, що експлуатуються в тих чи інших умовах навколишнього середовища. Її розв'язання полегшує розуміння тих гетерогенних процесів в об'ємі неоднорідного поверхневого шару, які, прискорюючи дифузійні процеси, створюють на металі неоднорідні шари і підсилюють його мікрогетерогенність. При цьому часто необхідно визначити середню товщину, 3D-топографію (3-вимірний рельєф) і дефектність приповерхневого шару в різних точках мікроділянки поверхні металевого зразка. Зокрема, дослідження 3D-топографії (рельєфу) приповерхневих шарів на мікрорівні є важливим джерелом додаткової інформації про перебіг корозійного процесу.

Історично дослідження товщини корозійного шару за кольором побіглистості (що, власне кажучи, є звичайним методом рефлектметрії в білому світлі) було одним з основних методів, які дають змогу оцінити швидкість зростання корозійного шару, а звідси й корозійну стійкість металу. Та й ідея комбінування методів дзеркальної рефлектметрії, еліпсометрії та мікрометрії (мікрорефлектметрія) для дослідження розподілу товщини корозійного шару на мікровідділянці металу, що піддається корозії, не нова, хоча роботи із застосування цієї комбінації в корозійних дослідженнях рідкісні та фрагментарні. Річ у тім, що метод прямої рефлектметрії в застосуванні до початкових стадій зародкоутворення і шароутворення вимагає вкрай високої чутливості і швидкодії вимірювань, як правило, недосяжних у стандартних мікроскопічних системах. (Тут ми не розглядаємо близький до рефлектметрії вкрай чутливий метод еліпсометрії та мікроеліпсометрії - один з основних оптичних методів досліджень у корозії та електрохімії). Але останнім часом описана вище ситуація істотно покращилася завдяки розробкам нової приладової фотоприймальної та фотометричної бази (чутливі CCD теле- і відеокамери). З'явилися прогресивні методи введення й одночасного опрацювання масиву зображень в аналоговій і цифровій формі від цілої ділянки досліджуваної поверхні, а також потужні й достатньо доступні комп'ютерні системи, що дають змогу в режимі реального часу вводити в комп'ютер і опрацьовувати в цифро-

вому вигляді великі масиви відеозображень [1, 3]. Це призвело до істотного зростання чутливості та швидкодії методу, розширення його можливостей і сфер застосування. Приладовим "носієм" цих методів здебільшого є так звані цифрові мікроскопи.

Розвиток і активне використання стандартної оптичної мікроскопії в практиці корозійних досліджень пов'язане великою мірою з удосконаленням інформаційних технологій цифрового оброблення зображень і відповідних інформаційно-оптичних комп'ютерних систем.

Комп'ютерні цифрові оптичні системи (мікроскопи, сканери тощо), призначені для введення зображень у комп'ютер з мікродільниці, чудово пристосовані для введення й аналізу як статичних, так і динамічних зображень з поверхні реальних металевих зразків [2], досить прості у використанні, забезпечені розвиненою програмною базою обробки й аналізу зображень. Особливо слід зазначити їхню високу ефективність у комп'ютерному аналізі мікроструктури та зернограничних ефектів у системах типу метал-метал. Однак застосовують їх головним чином для якісного або напівкількісного виявлення структури та морфології досліджуваних поверхонь і поверхневих шарів.

Останнім часом мікроскопічні інформаційно-оптичні системи почали застосовуватися для аналізу мікротопографії тонких (десятки й сотні нанометрів) поверхневих оксидних та інших корозійних шарів. Формуючи відеомікрозображення зондованої мікроділянки поверхні електрода і вимірюючи розподіл інтенсивності відбитого світла по полю зображення, можна в реальному часі отримувати 3-вимірне зображення рельєфу товщини і властивостей островців зародків нової фази та вдруге осаджених шарів на даній ділянці електрода. Відповідний алгоритм розрахунку товщини і звідси рельєфу може бути програмно реалізований у тілі стандартного редактора зображень. Це дає змогу практично миттєво одержувати на екрані комп'ютера карту розподілу товщини поверхневого шару на досліджуваній мікроділянці поверхні досліджуваного зразка, а також статистичні властивості цієї топограми на об-

раній мікроділянці поверхні. При цьому для візуалізації топограми у вигляді корозійного рельєфу можна використовувати графічні 3D-технології, які дають змогу найприродніше представити псевдостереоскопічне зображення топограми з урахуванням затіненень від віртуального джерела освітлення.

У даному огляді розглянуто методичні засади використання інформаційно-оптичних 3D-технологій, комп'ютерних оптичних відеомікроскопів та їх комбінування з іншими фізико-хімічними методами (інфрачервона спектроскопія дифузійного віддзеркалення з гостро сфокусованим зондувальним пучком, метод вимірювання фото-ЕРС, еліпсометрія, електрохімічні методи) для високопродуктивного контролю товщини, топографії та статистичних властивостей топограм тонких поверхневих корозійних шарів на мікроділянці поверхні металу або напівпровідника.

Наведено приклади практичних застосувань 3D-технологій у практиці корозійних досліджень низки практично значущих корозійних систем: пітінг, високотемпературне окислення, гальванічні покриття, електрохімічна корозія.

Алгоритм рефлектометричного аналізу цифрового зображення мікроділянки поверхні металу з корозійним шаром

Рефлектометричний аналіз цифрового зображення поверхні, тобто дослідження оптичних властивостей і товщини корозійного шару в окремих або у всіх точках поверхні, дає змогу знайти розподіл його товщини поверхнею зразка, який ми будемо іменувати топограмою шару.

Метод дзеркальної рефлектометрії (дослідження відбивної здатності поверхні) простий і залежно від світлопроникності досліджуваних поверхневих фаз зберігає свою чутливість під час вимірювання товщини шару в кілька нанометрів до часток мікрометра. Розглянемо випадок реалізованих на цифровому мікроскопі оптичних рефлектометричних вимірювань похилого падіння світла з довжиною хвилі λ на досліджувану поверхню металу з комплексним показником заломлення N_s , вкритого поверхневим шаром завтовшки D з комплексним показником заломлення N_f (обидва на довжині хвилі λ). Розг-

ляємо систему на рис. 1, де N_a - показник заломлення навколишнього середовища, а середній кут падіння випромінювання на поверхню дорівнює φ . У цьому разі можна записати аналітичний вираз амплітудного коефіцієнта відбиття нашої поверхневої систем для і поляризацій :

$$r^{p,s}(D, n_f) = \frac{r_{af}^{p,s} + r_{fs}^{p,s} e^{-2i\delta_j}}{1 + r_{af}^{p,s} r_{fs}^{p,s} e^{-2i\delta_j}},$$

де амплітудні коефіцієнти віддзеркалення і пропромінювання для р- і s-поляризацій на межах ваз, а фазовий член повітря - плівка ($r_{af}^{p,s}$)

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} N_f D \cos \varphi_f.$$

$$r_{af}^p = \frac{N_f \cos \varphi - N_a \cos \varphi_f}{N_f \cos \varphi + N_a \cos \varphi_f},$$

$$r_{af}^s = \frac{N_a \cos \varphi - N_f \cos \varphi_f}{N_a \cos \varphi + N_f \cos \varphi_f},$$

$$r_{fs}^p = \frac{N_s \cos \varphi_f - N_f \cos \varphi}{N_s \cos \varphi_f + N_f \cos \varphi},$$

$$r_{fs}^s = \frac{N_f \cos \varphi_f - N_s \cos \varphi}{N_s \cos \varphi_f + N_s \cos \varphi}.$$

і плівка-метал ($r_{fs}^{p,s}$) на довжині хвилі λ , мають вигляд:

Кути заломлення знаходяться із закону Снелліуса:

У рефлектометрії на практиці зазвичай вимірюється не амплітудний, а енергетичний Коефіцієнт відбиття R , що дорівнює квадрату модуля амплітудного:

$$R^{p,s} = |r^{p,s}(D, N_f)|^2,$$

який далі використовують для знаходження оптимальної товщини шару. Прирівнявши його до експериментально вимірених значень $R_{\text{exp}}(x, y)$, отриманих від різних точок поверхні з координатами (x, y) :

$$R^{p,s}(D, N_f) = R_{\text{exp}}^{p,s}(x, y),$$

рівняння (5) можна розв'язати чисельно відносно D і в такий спосіб визначити товщину D корозійного шару в усіх точках (x, y) обраної мікродільниці поверхні зразка, тобто побудувати функцію $D(x, y)$, що являє собою голограму поверхневого шару. Природно, для цього необхідно знати показник заломлення корозійного шару n_f . У цій роботі будемо припускати, що він відомий (наприклад, за табличними даними).

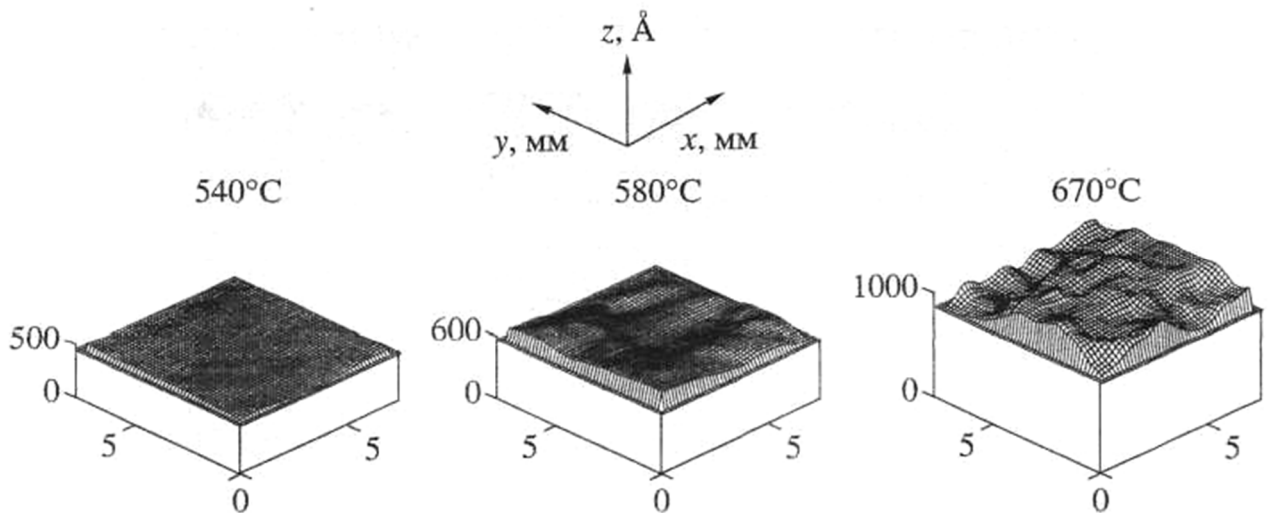


Рисунок 4.1 - Топографія корозійного шару (розподіл товщини шару поверхнею) за температур оксидування 540, 580 і 670°C

Вищенаведений алгоритм розрахунку товщини програмно реалізовано в тілі стандартного редактора зображень. Це дає змогу практично миттєво отримувати на екрані комп'ютера карту розподілу товщини поверхневого ша-

ру на досліджуваній мікродільниці поверхні зразка, а також статистичні властивості цієї топограми на обраній мікродільниці поверхні.

При цьому середню товщину (D) корозійного шару отримують, усереднюючи топограму по всій контрольованій поверхні зразка, а середньоквадратичний розкид товщини ($5Z$) - усереднюючи квадрат відхилення товщини від середнього значення по топограмі [24].

Для візуалізації топограми у вигляді рельєфу корозійного шару ми використовували графічну 3D-технологію, що дає змогу найефективніше представити псевдостереоскопічне зображення топограми з урахуванням затіненнь від віртуального джерела освітлення.

Цифрове оброблення зображень зазвичай використовують для детального дослідження морфологічних змін поверхні. Річ у тім, що можливість судити про морфологію неоднорідної поверхні електрода за його вихідними рефлектиметричними відеозображеннями обмежена, а методи цифрового опрацювання дають змогу підсилити та підкреслити ті чи інші морфологічні особливості поверхневого шару [3, 11]. Тому в [13-19] вихідне кольорове рефлектиметричне відеозображення зондованої ділянки поверхні металу після введення в комп'ютер та оцифрування піддавали математичному опрацюванню за уніфікованим алгоритмом, що охоплює посилення освітленості, оптимізацію контрасту. Під час цифрової обробки зображення та оптимізації контрасту проводили перезапис гістограми, тобто поелементного розподілу інтенсивності зображення по поверхні зразка за кожним колірним каналом. Під час перезапису діапазон розкиду інтенсивності зображення штучно посилювався, і відповідне посилення топограми корозійного шару давало змогу візуалізувати найслабші відмінності інтенсивності, а отже, і морфологічних особливостей корозійного шару по всьому полю. У низці випадків проводили додаткове цифрове опрацювання, яке включало фільтрацію, сегментацію й оконтурювання ділянок зображення [3, 11]. Алгоритм сегментації дає змогу розбити вихідне зображення на ділянки, у яких властивості зображення (ко-

лір, освітленість, контраст, гістограма тощо) приблизно однакові, тобто цей алгоритм дає змогу ефективно візуалізувати неоднорідну поверхню електрода як на мікро-, так і на макрорівні.

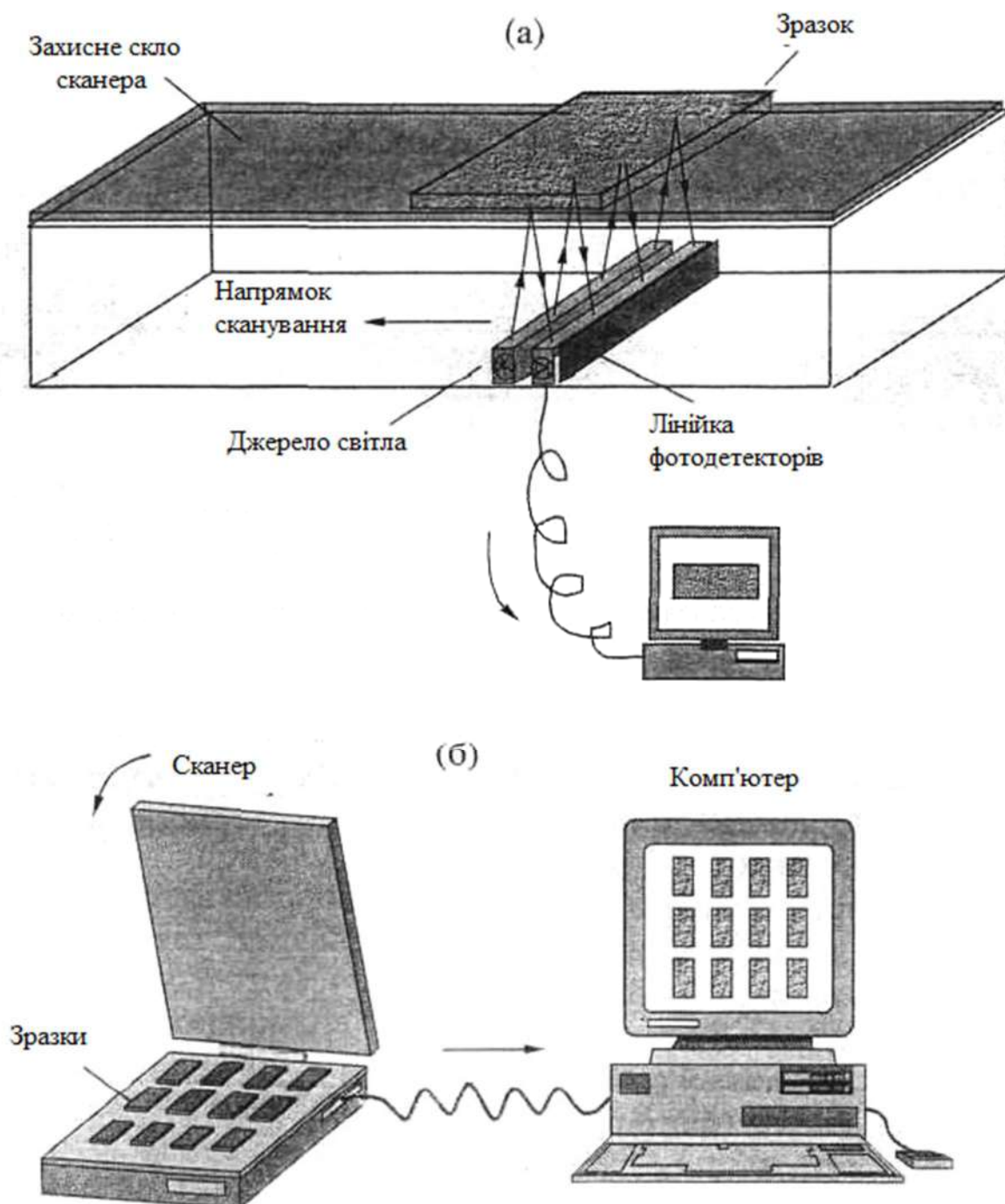


Рисунок 4.2 а - Схема оптичного сканера для введення зображень до комп'ютера; б - схема досліджень зразків, що прокорудували, на сканері

Комп'ютерні сканери, призначені, здавалося б, тільки для введення зображень з аркуша паперу, проте прекрасно пристосовані для введення й аналізу зображень з поверхні реальних корозійних зразків. Якщо на поверхні металу зростає неоднорідний корозійний шар, це, вочевидь, призводить до зміни відбивної здатності поверхні, що відмінно реєструється сканером (рис. 4.1.2) [4, 13]. За ступенем зміни відбивної здатності поверхні можна далі розрахувати товщину корозійного шару в кожній її точці. Метод дифузійної або дзеркальної рефлектометрії [20-23], що лежить в основі сканерної діагностики, вирізняється простотою і можливістю зондування корозійних шарів до глибини кілька мікрон і навіть більше залежно від поглинання світла в досліджуваних корозійних фазах.

Методичні можливості, що надаються сканерним зондом, можуть виявитися особливо плідними саме при дослідженні макродефектів поверхневих шарів. Сканер дає змогу реєструвати картину внутрішньої будови поверхневого (як правило, проникного для оптичного випромінювання) оксидного шару в усьому його обсязі. Подальше цифрове оброблення зображень дає змогу використовувати дві методики.

Цифрова обробка дифузно-відбитого зображення дає змогу найточніше виявити, ідентифікувати й визначити кількісні параметри дефектів (розмір, кількість, ступінь заповнення поверхні зразка).

З іншого боку, рефлектометрична обробка дзеркально-відбитого зображення дає змогу отримати топограму товщини шару [4,13] (карту розподілу товщини і складу оксиду по поверхні). При цьому за даною топограмою можна досліджувати 3-вимірний (3D) рельєф і статистичні властивості функції розподілу товщини корозійного шару по поверхні металу, пов'язані з його корозійною стійкістю.

Стандартний комп'ютерний цифровий мікроскоп дає змогу вводити в комп'ютер чорно-біле або кольорове напівтонове зображення мікроділянки досліджуваної поверхні. Ці прилади успішно застосовують у найрізноманіт-

ніших галузях науки і техніки, що сприяє швидкому зростанню їхньої популярності [2]. Як правило, цифровий комп'ютерний мікроскоп являє собою прилад із предметним столиком, який забезпечений двокоординатним (зазвичай комп'ютерно керованим) приводом. На столику розміщується зразок, зображення досліджуваної ділянки поверхні якого необхідно ввести в комп'ютер. Джерело випромінювання мікроскопа освітлює поверхню зразка, а дифузно відбите світло потрапляє на CCD-камеру мікроскопа. З камери зображення вводиться в комп'ютер. За допомогою стандартного редактора зображень можна провести його цифрову обробку. Важливо підкреслити, що прилад фактично реєструє рефлектометричну карту (коефіцієнти дифузного відбиття) досліджуваної поверхні металу, тобто еквівалент видимого оком зображення поверхні.

Однак таку конфігурацію використовують головним чином для виявлення морфологічних особливостей поверхні. Для дослідження товщини поверхневих шарів вона від початку не пристосована. Однак, якщо реєструвати не дифузно, а дзеркально відбите випромінювання і скористатися стандартними формулами дзеркальної рефлектометрії, то можна одержати карту розподілу товщини шару на поверхні, тобто топограму шару, або його тривимірний рельєф.

У роботі [14] відеомікроскопічну дзеркально-рефлектометричну схему (мал. 4.1.4) було побудовано на базі стереомікроскопічної системи МБ С-10 і кольорової CCD-відеокамери з роздільною здатністю 600 твл ("Sony"), сполученої через плату відеовводу (тип - Miro Video DC 10) з комп'ютером (РІШ-800). Мікроскоп МБС-10 широко розповсюджений і доступний, а двоплеча оптична схема дає змогу висвітлювати досліджувану ділянку поверхні металу з покриттям через одне оптичне плече, здійснюючи відеореєстрацію дзеркально відбитого випромінювання через довгий-фокусний об'єктив іншого плеча. Довгофокусний об'єктив давав змогу розташовувати між зразком і об'єктивом додаткові кріпильні та оптичні пристосування. Для можливості скану-

вання відеомікроскопом поверхнею зразка двокоординатний предметний столик мікроскопа міг бути забезпечений електромеханічним приводом з комп'ютерним спектральним складом випромінювання - лампою розжарювання L і спектральним фільтром F), який проходив крізь телескопічну систему 2 і через фокусувальну лінзу об'єктива мікроскопа 3 потрапляв у вимірвальну комірку 5 з двокоординатним предметним столиком.

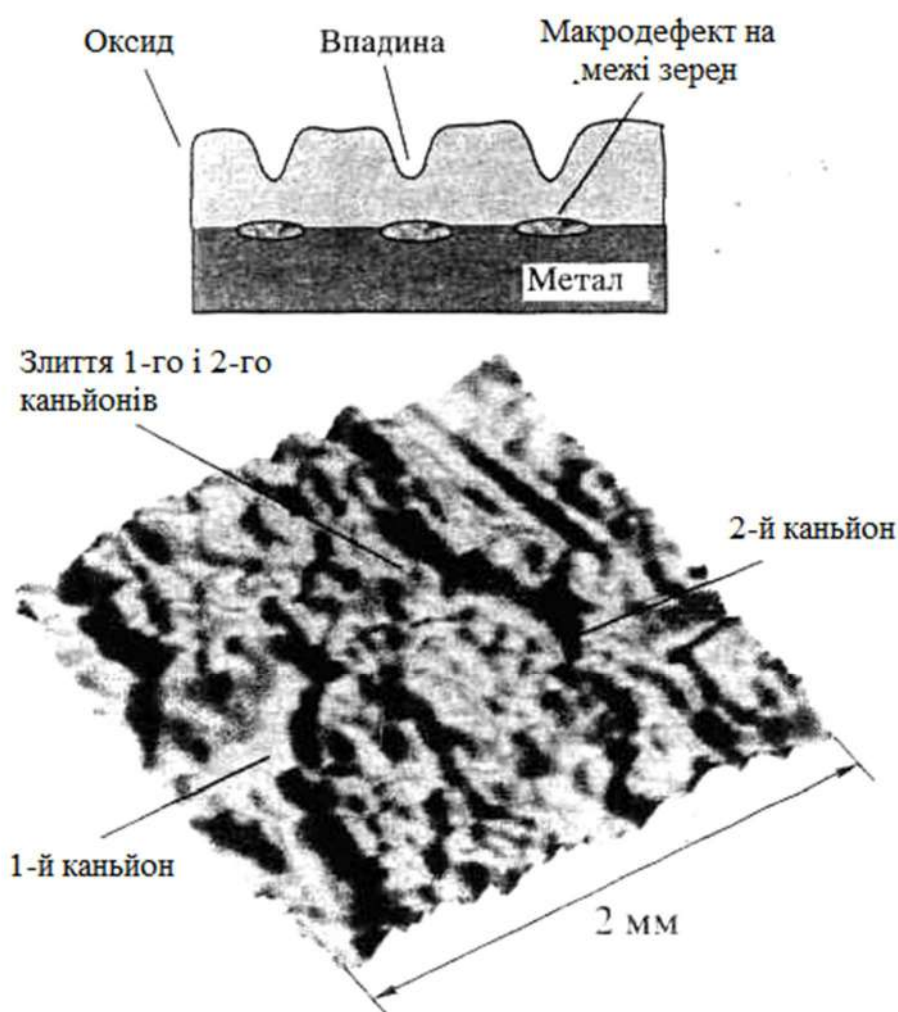


Рисунок 4.3 - Схема формування топографії та подальшого розтріскування і відшаровування оксиду за системою западин, що формують каньйони топограми оксидного шару (780°C)

Після відбиття від поверхні зразка 7 випромінювання, повертаючись* через лінзу 3, потрапляло в приймальний блок (CCD-відеокамера фірми "Sony") 9, а звідти електричний сигнал надходив на вхід системи формування відеосигналу, пов'язаної з телемонітором 10 (рис. 7). Відеосигнал надходив на

вхід плати відеовводу 13 комп'ютера 12 (Miro Video DC 10 фірми "Pinna-cle"). Джерелом випромінювання комп'ютер керував через блок живлення 16 лампи. Це давало змогу під час роботи із дзеркальними зразками автоматично зменшувати інтенсивність випромінювання джерела й уникати шкідливого засвічення CCD-камери, що має кінцевий динамічний діапазон реєстрованого випромінювання. Від телескопічної системи 2 була потрібна рівномірність засвічення поля зображення, реєстрованого через систему 2'. Це досягалося підбором лінз телескопічної системи 2 з набору додаткових компонентів мікроскопа МБС-10. Електромеханічним приводом предметного столика комп'ютер 12 керував через блок 14. Зразок 7, закріплений у тримачі 8, поміщали в оптичний осередок 5, заповнений робочим середовищем 6 (газ, рідина). Зверху комірку ізолювала скляна пластина 4. Використана комп'ютерна система (РШ-800) забезпечувала цифрове введення і математичне опрацювання відеознімків практично в реальному масштабі часу.

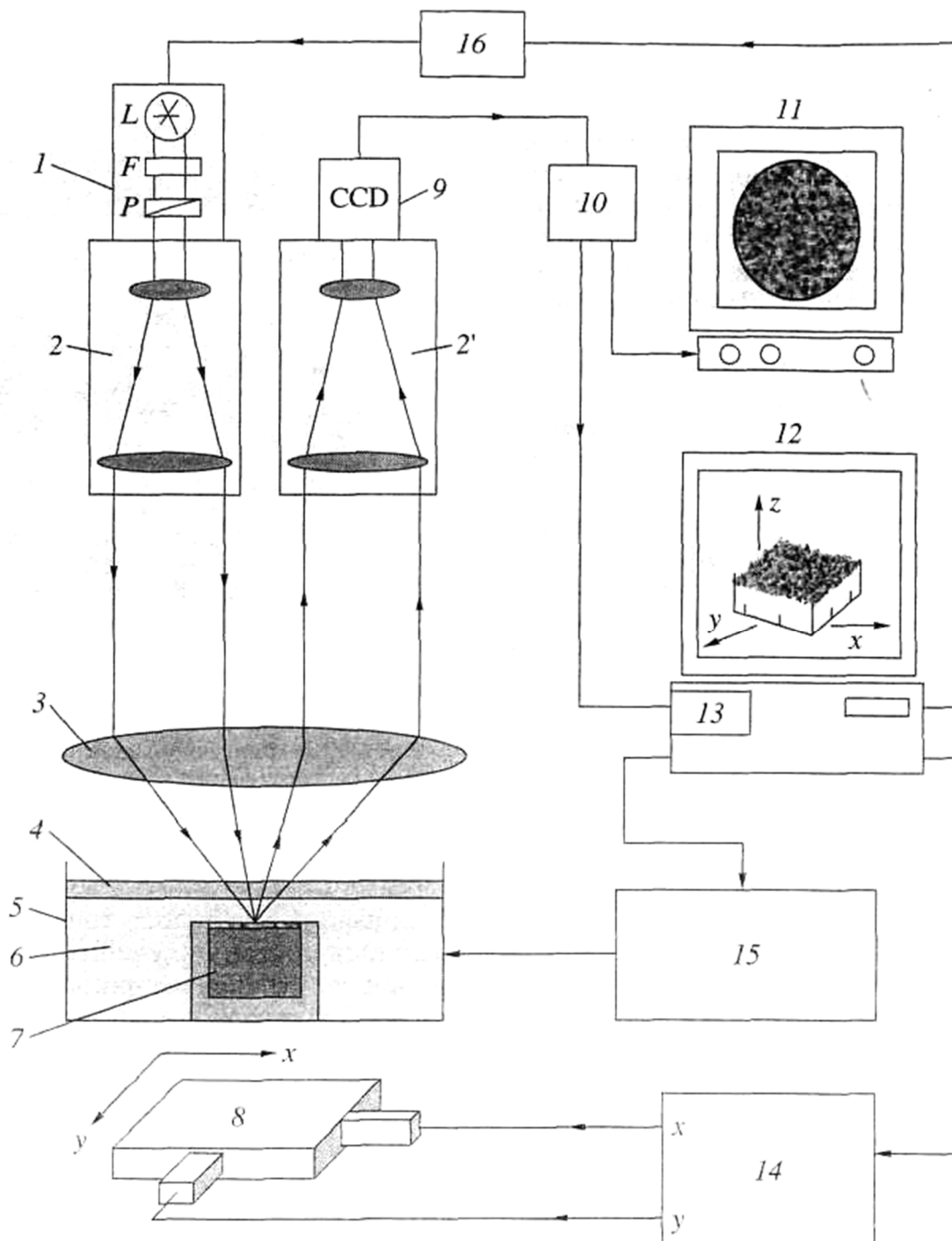
Далі буде розглянуто приклади застосування цієї системи для дослідження поширених корозійних систем.

Для прогнозування корозійної поведінки металу загалом і його піттинга в даному корозійному оточенні зокрема, необхідно мати повну інформацію не тільки про динаміку зміни розмірів ямки в тілі металу, а й про процеси акумулювання та відкладення продуктів корозії металу навколо піттинга.

Слід зазначити, що нечисленні (здебільшого із застосуванням еліпсометрії) спроби дослідити зростання товщини шару навколо піттингів *in-situ* робилися. Однак головним чином (у більшості випадків) досліджували усереднені по всій поверхні параметри шару, чого недостатньо для коректного опису зростання товщини вторинного шару навколо вогнища.

Очевидно, 3D-відеомікрозондове гостролокалізоване стеження за процесами ініціювання, розвитку та стабілізації окремого піттингу (або, загалом, корозійного осередку) та поверхневого шару, що оточує його, може бути пер-

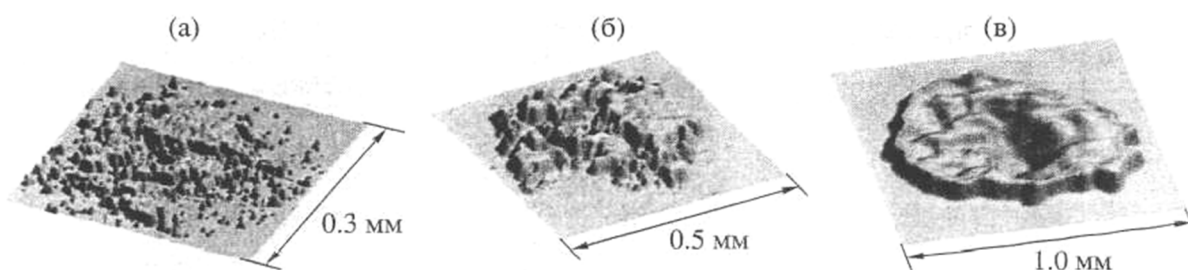
спективним методом дослідження локалізованих корозійних процесів коректного опису зростання товщини вторинного шару навколо вогнища.



1 - освітлювач мікроскопа, що складається з джерела L, спектрального фільтра F і поляризатора P; 2, 2' - телескопічна система мікроскопа; 3 - об'єктив мікроскопа; 4 - покривне скло вимірювального осередку - 5; 6 - середовище; 7 - зразок; 8 - предметний столик; 9 - CCD-камера з оптичним затво-

ром; 10 - плата формування відеосигналу; 11 - відеомонітор; 12 - комп'ютер;
13 - плата відеовводу; 14 - блок керування приводу предметного столика;
15 - потенціостат; 16 - блок живлення лампи.

Рис. 4.4. Оптична схема цифрового відеомікрозонда



а - 1 год, б - 10 год, в - 100 год

Рисунок 4.5 - Тривимірні рельєфограми окремого пітингу на сталі в 0.5 N розчині FeCl_3 на різних стадіях розвитку, побудовані за дзеркально-рефлектометричними зображеннями

Очевидно, 3D-відеомікрозондове гостроло-калізоване стеження за процесами ініціювання, розвитку та стабілізації окремого пітингу (або, загалом, корозійного осередку) та поверхневого шару, що оточує його, може бути перспективним методом дослідження локалізованих корозійних процесів.

У роботі [14] досліджували нержавіючу сталь X18H10T у тестувальному розчині (0.5 N розчин хлориду заліза(III)) на схильність до пітингової корозії без зовнішньої поляризації.

На рис. 4.1.5 наведено тривимірні рельєфограми окремого пітингу на різних стадіях розвитку, побудовані за дзеркально-рефлектометричними зображеннями: а - 1 год, б - 10 год, в - 100 год. У розрахунках додатково використовували алгоритм згладжування [3, 11], що дає змогу усунути високочастотний шум просторового спектра поля зображення по поверхні зразків.

Отриманий результат - зображення металу, що піддається корозії, - є наочним прикладом диференціювання однорідної поверхні металевого зразка на анодні та катодні зони. Спочатку на всій сталевій поверхні з'являються окремі ділянки корозійних пошкоджень, що вказують на первинний розподіл

малих локальних анодів, переважно в мікроподряпинах, які виникли під час механічного оброблення (рис. 8а). Це повністю відповідає сучасним уявленням, згідно з якими зразок, вкритий тонкою оксидною плівкою, що утворилася на повітрі, актувірується спочатку локально і передусім у заглибленнях. Це, очевидно, визначається властивостями поверхні, вкритої природною оксидною плівкою з її випадково розташованими поверхневими дефектами.

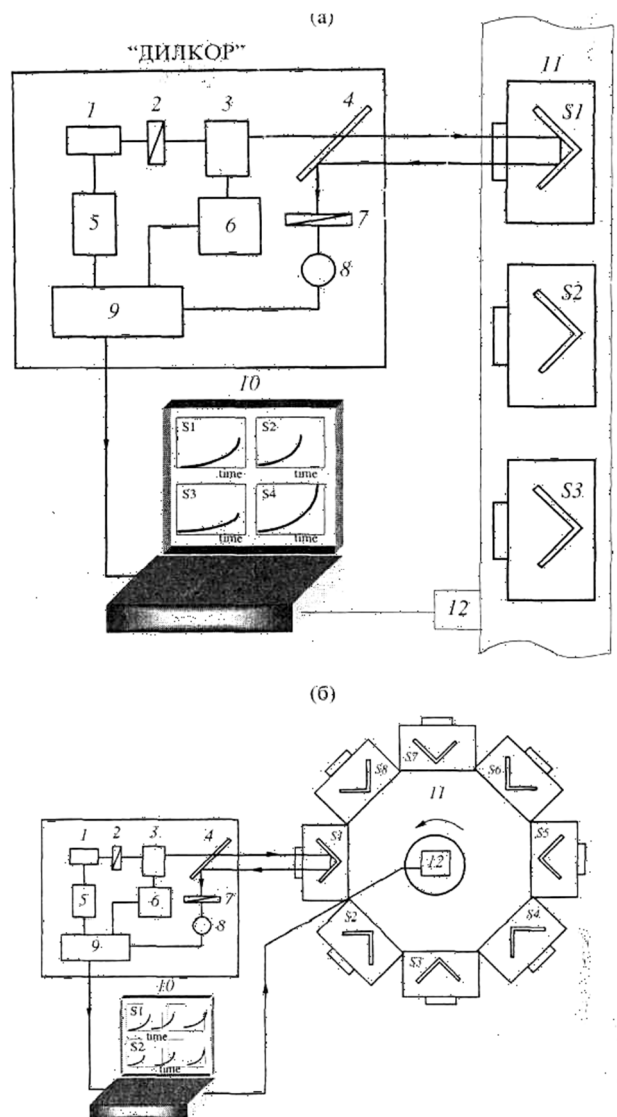
Тривимірні рельєфи (рис. 4.1.5) показують, що в ділянці мікровогниць спостерігаються мікроскупчення продуктів корозії. Під час витримки мікроосередки в островцях самоорганізуються, зливаючись у більші скупчення продуктів (рис. 4.1.5б), під якими далі, очевидно, і формуються звичайні піттинги (рис. 4.1.5в). Після значної витримки на поверхні зразка виникає стаціонарний розподіл локалізованих корозійних ушкоджень, що складаються з анодних і катодних ділянок, причому в центрі перебуває анод (сам піттинг), навколо нього - кільце корозійних продуктів (іржа), а поза ним - велика катодна ділянка (рис. 4в).

Розглянуто 3D-методи та можливості проведення досліджень неоднорідних поверхневих шарів: еліпсометрія, мікроскопічна та відеоеліпсометрична методики, методи світлорозсіювання, шумо-галасливої рефлектметрії та зондуючої еліпсометрії мікролокалізованих корозійних процесів. Розглянуто найвдаліші приклади ефективного використання методів відбиття та розсіювання в застосуванні до моніторингу найхарактерніших видів корозійних руйнувань, зокрема, дослідження піттингової корозії, корозії під захисними покриттями, атмосферної корозії, газового оксидування металів і сплавів, процесів нуклеації та шароутворення.

4.2 Потокова лінія лазерної діагностики корозійних пошкоджень

Представлено метод лазерної еліпсометричної діагностики корозійних шарів на великій кількості зразків як у лабораторних, так і польових умовах. Розроблено та випробувано схему лазерного моніторингу, що дає змогу дис-

танційно контролювати товщину корозійного шару. Розроблено оптико-електрохімічну зворотнопрохідну комірку дворазового відбиття, що забезпечує високу чутливість вимірювань. На прикладі безперервного корозійного контролю сплаву мідь-нікель у морському середовищі розглянуто основні методичні аспекти використання дистанційного лазерно-еліпсометричного зонда для організації потокової лінії лазерного корозійного контролю при проведенні корозійних випробувань.



а - лінійно-конвеєрна потокова лінія, б - карусельно-конвеєрна потокова лінія: 1 - лазер, 2 - поляризатор, 3 - електрооптичний фазовий модулятор поляризації світлового випромінювання, 4 - світлоподільувальна пластина, 5 - блок живлення лазера, 6 - генератор збудження модулятора, 7 - аналізатор, 8 - фотоприймач, 9 - блок управління та обробки інформації еліпсо-

метра, S1, S2, S3 - ретровідбивачі, виконані з металу чи сплаву, що досліджується в даних корозійних умовах. Ретровідбивачі S1, S2, S3 розміщені в комірці з корозійним середовищем і мають вікно для зондувального пучка;

10 - комп'ютер зі спеціалізованим АЦП-ЦАП, 11 - конвеєр із комірками, 12 - блок керування приводом конвеєра.

Рисунок 4.6 - Дистанційний лазерний корозиметр "ДИЛКОР"

Описи методу

Звичайні оптичні вимірювання товщини корозійних шарів проводять на стаціонарних еліпсометрах, що являють собою двоплечий оптичний прилад, який містить послідовно рознесені джерело монохроматичного світла, поляризатор, компенсатор, досліджуваний зразок, аналізатор і фотоприймач. У такій схемі плечі падаючого і відбитого випромінювань рознесені в просторі, що унеможливорює дистанційні еліпсометричні вимірювання за незмінного положення приладу.

Крім розглянутої з'явилися й інші схеми [10], що зумовлено необхідністю використовувати еліпсометрію в умовах, у яких стандартна двоканальна схема або конструктивно незастосовна, або занадто малочутлива. До них належать зворотнопрохідні еліпсометри [11-14], що становлять безсумнівний інтерес для корозійних досліджень. Справді, якщо досліджуваний об'єкт перебуває в корозійному середовищі, то стандартна схема вимагає створення спеціальної камери з двома оптичними вікнами. Зазвичай же дослідницькі (зокрема, корозійні) камери мають одне оглядове вікно, Зворотнопрохідна схема (рис. 1) забезпечує можливість проведення еліпсометричних досліджень і в таких умовах. При цьому поєднання падаючого і відбитого пучків дає змогу зробити корозійний монітор компактним і автономним [4].

Принцип методу ґрунтується на використанні ретрорефлекторів [15], виконаних із досліджуваного корозійного матеріалу і встановлених в обраних корозійних середовищах (наприклад, у просторі екологічно небезпечного промислового підприємства). Під час відбиття від ретрорефлектора стан по-

ляризації лазерного випромінювання змінюється залежно від параметрів сканованого корозійного шару на поверхні металу. Спектр поляризації цього відбитого від ретрорефлектора і зворотного лазерного випромінювання, що прийшло, дає змогу судити про властивості поверхневого шару на відстані [4]. Реєстрація не тільки інтенсивності, а й поляризації відбитого випромінювання дає змогу практично виключити вплив шумів атмосфери і навколишнього середовища на точність вимірювань.

Для вимірювання еліпсометричних параметрів у лазерному зонді за зворотнопрохідною схемою (рис. 1а) було використано метод фазомодуляційної фур'є-еліпсометрії [9, 16]. Пучок монохроматичного випромінювання лазера 1 проходить через поляризатор 2 і електрооптичний фазовий модулятор 3, де модулюється зсув фаз між його ортогонально поляризованими компонентами (частота модуляції ω від генератора 6). Після напівпрозорого дзеркала випромінювання телескопічною системою спрямовується на поверхню зразка ретрорефлектора. Відбившись від нього, тим самим шляхом повертається на світлоділну пластину 4, після чого відбитий пучок проходить через аналізатор 7 і потрапляє на фотоприймач 8. Для цього з виходу фотоприймача сигнал іде на вхід блока керування та обробки інформації 9, де виділяються - амплітуди відповідно нульової, першої та другої гармонік. Далі з них можна отримати еліпсометричні параметри досліджуваної поверхні [16].

Послідовно розглядаючи зміни поляризації в тракті еліпсометра, можна визначити амплітуди реєстрованих гармонік. За азимутів поляризатора й аналізатора по 45° і азимута швидкої осі електрооптичного модулятора 0° інтенсивності першої J_ω і другої $J_{2\omega}$ гармонік вихідного сигналу мають вигляд [16]:

$$\begin{aligned} I_\omega &= I_0 G(\psi, \lambda) \sin(2\Delta + \alpha) J_1(A), \\ I_{2\omega} &= I_0 G(\psi, \lambda) \cos(2\Delta + \alpha) J_2(A), \end{aligned}$$

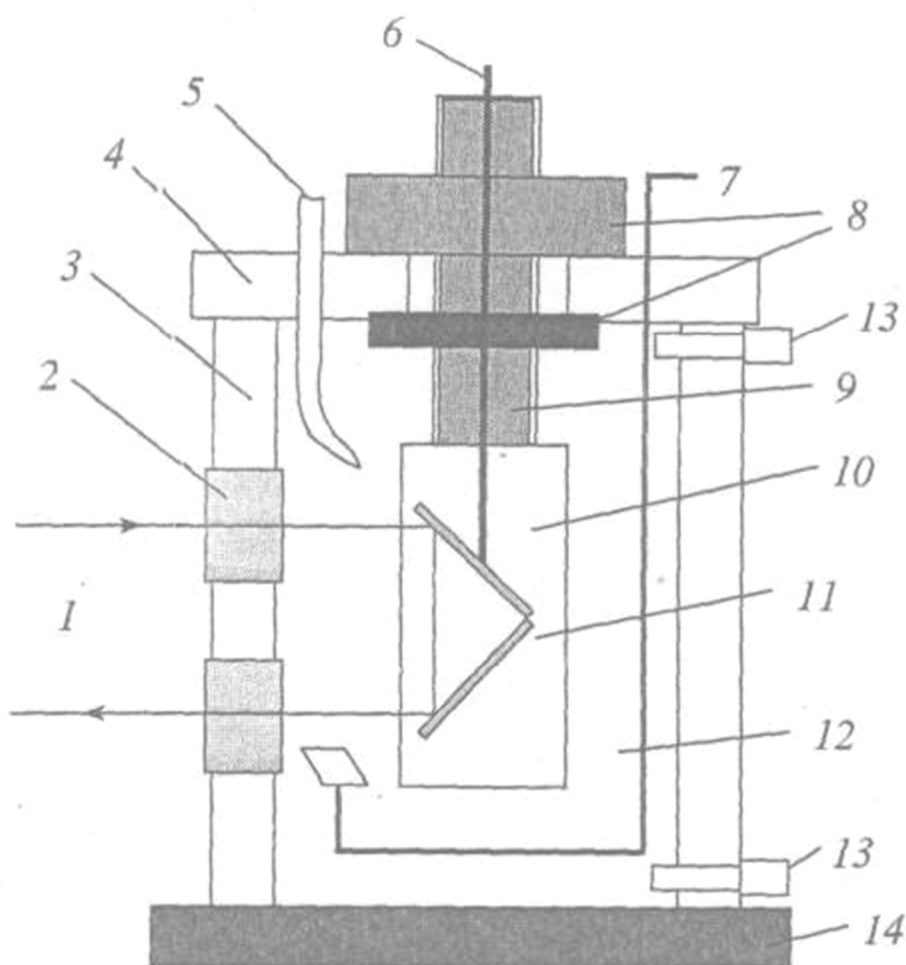
де J_0 - пропорційна інтенсивності випромінювання, що падає на модулятор; $G(\psi, \lambda)$ - відома функція [16] еліпсометричного параметра ψ , і довжини хвилі зондувального випромінювання λ ; A - амплітуда модуляції; J_1 J_2 - функції Бесселя відповідних порядків; A , ψ - еліпсометричні параметри досліджуваної поверхні; α - зсув фаз, що вноситься подачею постійного зсуву на модулятор (розглянуто випадок, коли кути падіння на грані ретровідбивача приблизно однакові, хоча під час реалізації методу дане припущення анітрохи не обов'язкове). Очевидно, з вимірених значень $J_\omega, J_{2\omega}$ і можна визначити еліпсометричні параметри поверхні на І кожній довжині хвилі зондувального випромінювання.

У вимірювальній системі приладу передбачено підключення його виходу через спеціалізований інтерфейс до комп'ютера. Для цього з виходу фотоприймача виділяються і за допомогою широкосмугового підсилювача посилюються змінні складові $J_\omega, J_{2\omega}$ вихідного сигналу. Посилений змінний сигнал надходить на плату еліпсометричного інтерфейсу, до якого входять програмований швидкий спектроаналізатор на основі RISC-процесора, що виділяє гармоніки частоти модуляції вихідного сигналу, та аналого-цифровий і цифро-аналоговий перетворювач (АЦП-ЦАП). Плату розміщено в одному зі слотів комп'ютера 10. ЦАП-вихід плати з'єднаний із блоком керування ланцюга регулювання постійного зміщення модулятора.

Прилад показав точність визначення $\Delta\delta \sim 0.1^\circ$ і роздільну здатність по товщині 5 А. Далекодія приладу визначається робочими характеристиками використовуваного лазера, а також умовами навколишнього середовища.

Для оптико-корозійних вимірювань на представленому лазерному корозиметрі було розроблено спеціальний зворотньопрхідний оптико-електрохімічний осередок, який не потребує дорогих компонентів, але дає змогу проводити рефлектометричні та еліпсометричні вимірювання з високою чутливістю (рис. 2). Досягалося це при використанні конфігурації з дво-

разовим відбиттям світла від досліджуваної поверхні з "накопиченням" корисного сигналу.



1 - зондувальний пучок випромінювання; 2 - оптичні вікна; 3 - осередок; 4 - кришка осередку; 5 - електрод порівняння; 6 - робочий електрод; 7 - протиелектрод; 8 - тefлонові гайки; 9 - верхня циліндрична частина тримача з різьбленням; 10 - нижня частина тримача прямокутного перерізу з вирізами для зразків; 11 - зразки у вигляді пластівців; 12 - електроліт; 13 - вхідний і вихідний патрубки до насоса термостата; 14 - основа

Рисунок 4.7 - Механічна конструкція оптико-електрохімічної комірки - ретро-відбивача підвищеної чутливості для еліпсометричних вимірювань в електроліті

Зразки виконували з досліджуваного матеріалу (металу, сплаву) і закріплювали в тефлоновому тримачі. У тримачі вирізали лунки-щілини (рис.4.2.2), куди вставляли плоскопаралельні зразки. На рис.4.2.2 вирізи перпендикулярні площині креслення. Функція ретрорефлектора забезпечувалася при куті між нижнім і верхнім зразками в 90° . Осередок забезпечений системою електродів для електрохімічних вимірювань і системою термостатування для вимірювань за різних заданих температур. Тримач, електроди, патрон системи термостатування нерухомо закріплені в кришці (рис. 4.2.2). Сама комірка виготовлена з оргскла. Безпосередньо перед експериментом осередок заповнювали робочим (корозійним) середовищем і кришку із закріпленим гайками тримачем, електродами та патрубком надягали на осередок, зафіксований в оптичному тракті корозиметра. Пучок випромінювання від корозиметра проходив через оптичне вікно і падав на систему плоскопаралельних відбивачів. Після двох віддзеркалень (що підвищують корисний сигнал у 2 рази) пучок через вихідне оптичне вікно повертався назад у корозиметр.

Видно, що конструкція комірки забезпечує відбиття у зворотному напрямку.

Рівняння еліпсометра, у цьому разі з урахуванням дворазового відбиття від зразка, записується у вигляді [9].

$$\begin{cases} \operatorname{tg}^2 \psi = \operatorname{tg} A, \\ 2\Delta = 90^\circ - 2P. \end{cases}$$

Вимірявши еліпсометричні параметри на початковій поверхні (без шару, на самому початку корозійних випробувань) і на поверхні з шаром, за стандартною процедурою визначали товщину шару, що виріс, d . Модель еліпсометричних розрахунків (одношарову, двошарову тощо) визначали для кожного конкретного випадку [9].

Для продуктивного тестування великої кількості зразків, що перебувають у комірках із різним корозійним оточенням, було використано концепцію

потокової лінії вимірювань з оптичним типом датчика [17], яким виступав дистанційний лазерний корозиметр "ДІЛКОР".

У лабораторних умовах корозійні комірки зі зразками-ретрорефлекторами розташовували на рухомій платформі-конвеєрі 11 (рис. 1а - лінійний або 1б - кільцевий конвеєр). Блок приводу платформи керувався комп'ютером 10. Після заповнення комірок електролітом і необхідних вимірювань комірки зі зразками послідовно вносилися в хід лазерного променя корозиметра. Після оптичних вимірювань на одному осередку вмикався привід і в тракт променя вносили наступну. І так далі. Один цикл вимірювань займає не більше 1 хв, що прийнятно для корозійних тестів.

Для організації потокової лінії корозійного тестування як лінійний конвеєр (рис. 1) використовували систему однокоординатного електромеханічного комп'ютерно керованого приводу. Як карусельний конвеєр використовували платформу у вигляді диска, забезпеченого приводом від крокового електродвигуна. Треба зазначити, що, незважаючи на простоту і поширеність комп'ютеризованого електромеханічного приводу (по суті, просто кроковий електродвигун з механічним приводом до платформи та комп'ютерний інтерфейс), вартість подібних систем сильно різниться. Наприклад, фірма "Edmund Industrial Optics" [18] визначає ринкову вартість подібних пристроїв для систем мікропозиціонування близько 1000 дол. Однак і межі цін, і варіанти пристрою залежать від його характеристик і фірми-виробника. Однак за наявності необхідних навичок і компонентів виготовлення подібної системи не повинно викликати труднощів. Утім, комірки зі зразками можна переміщати і вручну, розмістивши їх на предметних столиках уздовж однієї напрямної платформи. Під час вимірювань переміщати можна як столики, так і корозиметр уздовж платформи. Однак концепція поточкових автоматичних вимірювань при цьому не працює.

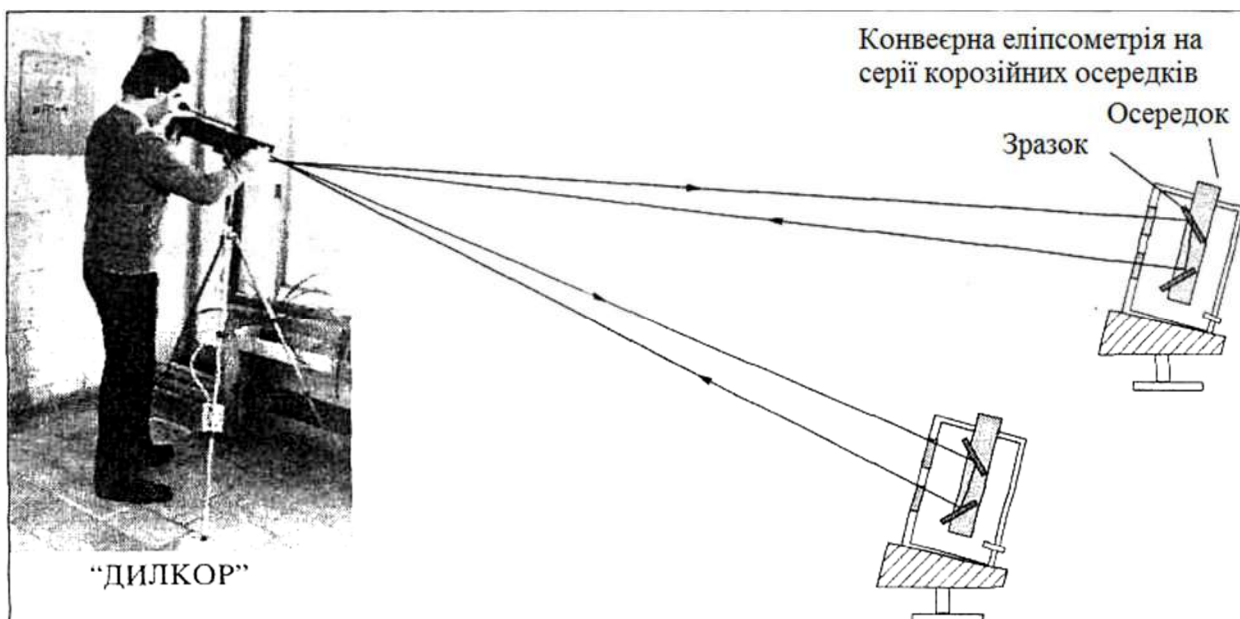


Рисунок 4.8 - Поточковий корозійний моніторинг зразків-ретрорефлекторів на лазерному дистанційному лазерному корозиметрі "ДІЛКОР" у польових умовах

У польових умовах (рис. 3), найбільш типовими є випадки атмосферної або морської корозії. Корозійні комірки зі зразками-ретрорефлекторами розташовують на землі або нерухомій морській платформі. Поточкові вимірювання (конвеєр) організовують за методологією дистанційного зондування: від точки до точки [7, 19]. Після заповнення комірок корозійним середовищем лазерний зонд послідовно спрямовується на входні вікна комірок. Після вимірювання вмикається привід, і промінь спрямовується на наступну комірку. І так далі. Один повний цикл вимірювань потребує 1-2 хв, залежно від атмосферних умов, що прийнятно для використання корозійних тестів.

.У конкретних тестах для кутової орієнтації лазерного корозиметра "ДІЛКОР" використовували і ручну систему, і трикоординатний електромеханічний комп'ютерно керований привід "Nexstar", на платформі якого розміщували "ДІЛКОР".

Як тестовану було обрано систему: сплав 90Cu-10Ni в розчині 3.4 мас.% NaCl (система для випробувань на схильність до морської корозії). Ви-

бір визначався як її практичною значущістю, так і доволі показовою і відтворюваною корозійною поведінкою, що включає послідовні стадії депасивації та пасивації, які добре розмежовуються за часовою шкалою [20].

Корозійна стійкість сплавів 90Cu-10Ni в морській воді пояснюється швидким формуванням захисного шару продуктів корозії [21]. Вважають, що тонкий підшар Cu_2O забезпечує високу корозійну стійкість сплаву, оскільки має низьку електронну провідність і обмежує швидкість катодного відновлення кисню (катодний контроль) [21]. Однак підтвердження цього припущення вимагає розробки методів безперервного контролю товщини тонкого поверхневого корозійного шару на наведеному сплаві. Тому в тестових експериментах досліджували початкові стадії формування корозійного шару на сплаві 90Cu-10Ni за різних температур, використовуючи описаний лазерний зонд. Три оптико-електрохімічні комірки (рис. 2) мали свої системи термостатування в разі вимірювань за різних заданих температур (25, 40, 60°C).

Як зразки використовували відполіровані до оптичної якості пластини сплаву 90Cu-10Ni.

Одразу після заповнення комірок термостатованими розчинами починали реєстрацію еліпсометричних параметрів. Повна зйомка однієї точки (за часом) займала близько 1 хв. Вона включала як безпосередньо вимірювання, так і перехід до наступного зразка та оптичне юстирування.

Еліпсометричні криві корозії сплаву 90Cu-10Ni наведено на рис. 4.

На рис. 5 наведено розрахункові кінетичні криві товщини шару оксиду, що виріс, на сплаві. У розрахунках використовували оптичні параметри Cu_2O на обраній довжині хвилі 0.63 мкм і оптичні параметри міді.

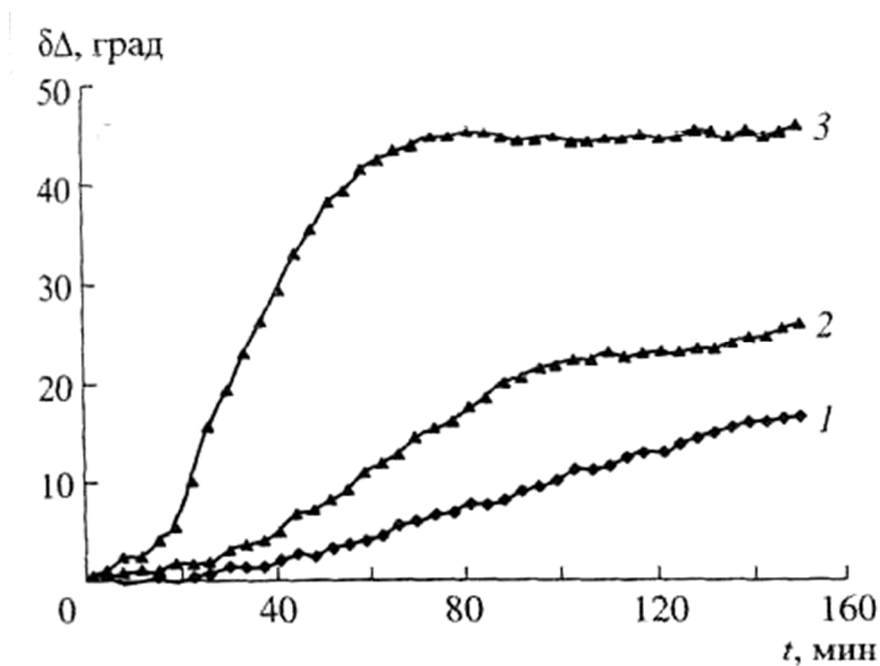


Рис. 4. Рост Cu_2O на сплаве 90Cu–10Ni в 3.4 мас.% растворе NaCl при различных температурах, °C: 1 – 25; 2 – 40; 3 – 60.

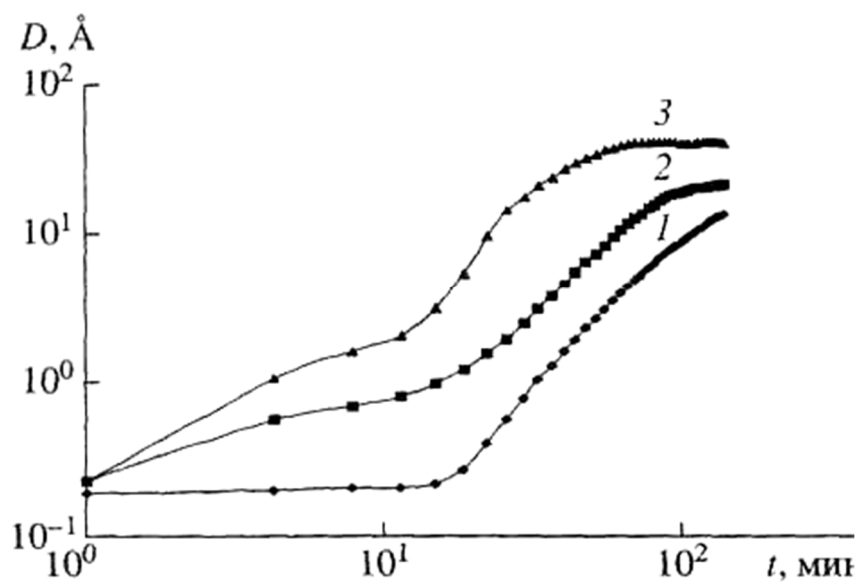


Рисунок 4.8 - Те саме, що на рис. 4; згладжені розрахункові криві

На першій стадії (приблизно до 10 хв) за всіх температур протікає слабкий корозійний процес, що інтенсифікується з підвищенням температури; Ві-

зуальне помутніння поверхні дозволяє припустити наявність приповерхневого шару продуктів корозії.

На другій стадії (10-1000 хв) починається швидке формування шару Cu_2O . Наприкінці цієї стадії поверхня частково просвітлюється, можливо, внаслідок потоншення шару.

Основний вплив температури пов'язаний з інтенсифікацією процесу формування оксиду. Однак, судячи з представлених даних, її вплив на тривалість індукційного періоду (перша стадія) не цілком однозначний.

Цікаво, що під час апроксимації кінетичних кривих у подвійних логарифмічних координатах (рис. 5) кінетичні криві зростання товщини оксиду міді перетинаються практично у водній точці за допомоги 150-200А і часу близько 3000-4000 хв. Мабуть, за великих експозицій швидкість росту товщини оксиду слабо залежить від температури, принаймні в дослідженому температурному діапазоні.

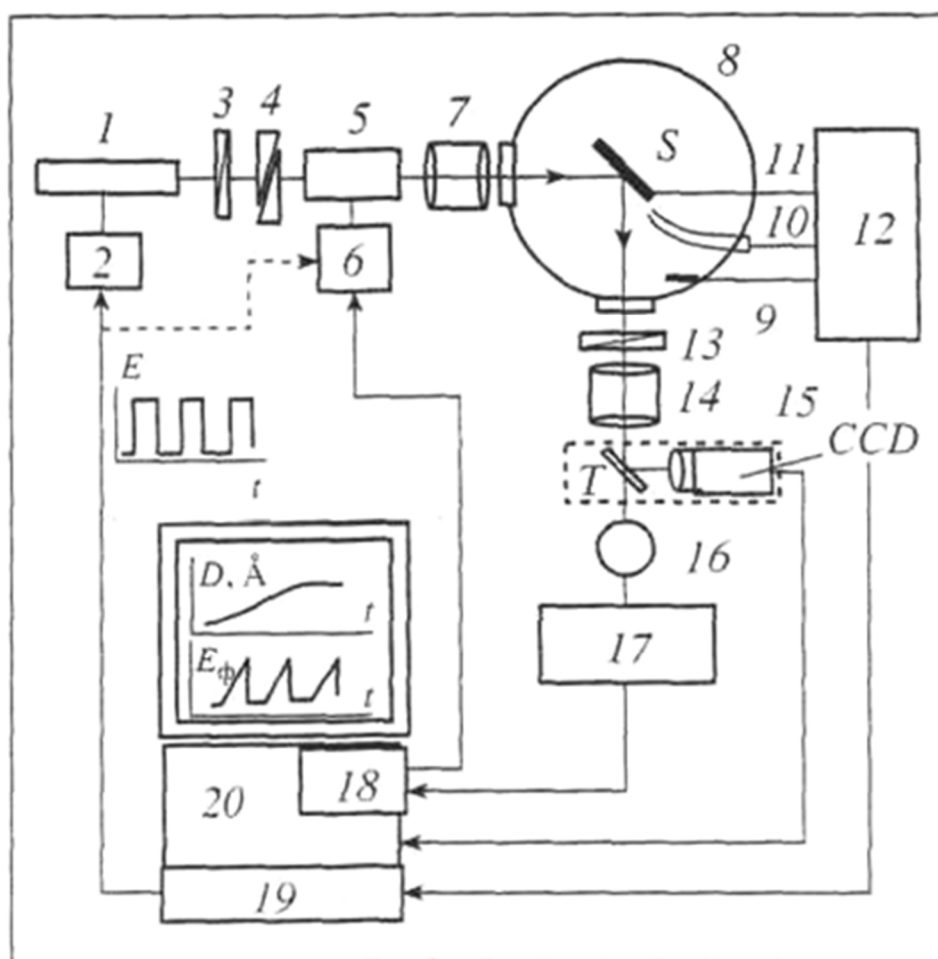
4.3 Лазерний еліпсометричний і фотоелектрометричний (ЕФЕМ) відеомікроскоп

Описано автоматичну комп'ютеризовану систему для одночасного вимірювання товщини поверхневого шару і напівпровідникових характеристик оксидних та інших поверхневих шарів на електродній поверхні під час корозійних і будь-яких інших електрохімічних досліджень. Автоматична реєстрація еліпсометричних параметрів і фотопотенціалу при гострому фокусуванні зондувального променя лазера в обраній точці поверхні забезпечує надзвичайно високу чутливість до пасиваційних і депасиваційних мікролокалізованих процесів. Найперспективніший у локальних корозійно-електрохімічних дослідженнях фазомодуляційний принцип реєстрації еліпсометричних параметрів із лазерним джерелом природно комбінується з методом вимірювання фото-ЕРС за модуляції не лише фази, а й інтенсивності випромінювання, що падає на досліджуваний зразок. При цьому закон зміни інтенсивності з часом

(тип модуляції) можна довільно задавати до частот модуляції в сотні мегагерц, що дає змогу досліджувати фотоелектрохімічні процеси з характерними часами (наприклад, життя електронно-діркових носіїв у поверхневому оксиді) в широких межах.

Мета роботи - показати, як практично розв'язуються перераховані проблеми використання готової приладової бази модуляційного оптичного рефлектометра і які методичні переваги та можливості дає комбінування вимірювань фото-ЕРС зі скануючою лазерною автоматичною еліпсометрією. Пристрій лазерного еліпсометричного і фотоелектричного (ЕФЕМ) відеомікрозонда

На рис. 4.3.1 наведено схему лазерного ЕФЕМ-відеомікрозонда на основі бази ручного еліпсометра "Гартнер L-119XUV".



1 - лазер; 2 - блок живлення лазера; 3 - перший поляризатор;

4 - компенсатор еліпсометра; 5 - фазовий електрооптичний модулятор; 6 - блок керування модулятора; 7 - телескопічна система; 8 - оптико-електрохімічна комірка, розміщена на трикоординатному мікрометричному столику; 9 - допоміжний платиновий електрод; 10 - електрод порівняння; 11 - робочий електрод (зразок); 12 - аналоговий блок цифрового потенціостата; 13 - аналізатор; 14 - телескопічна система; 15 - блок відеоконтролю, що складається зі світловидільника Т і CCD-камери; 16 - фотоприймач; 17 - підсилювач фотоприймача; 18 - аналого-цифровий і цифро-аналоговий перетворювач каналу еліпсометра; 19 - аналого-цифровий і цифро-аналоговий перетворювач цифрового потенціостата фотоелектропотенціометра; 20 - комп'ютер

Рисунок 4.9 - Схема лазерного еліпсометричного фото-електрометричного відеомікрозонда для вимірювання товщини шару на металі та його фотопотенціалу в електроліті

Пучок монохроматичного випромінювання напівпровідників лазера 1 (довжина хвилі 0,64 мкм), керованого блоком 2, проходить через штатні поляризатор 3 і компенсатор 4 еліпсометра "Гартнер", модулюється, проходячи через електро-оптичний кристал фазового модулятора поляризації 5 [12]. (Модулятор збуджує комп'ютерно керований транзисторний генератор звукових частот 6 з амплітудою модуляції 100-500 В). Далі випромінювання проходить через телескопічну систему 7, що дає змогу фокусувати випромінювання на обраній ділянці зразка S, розміщеного в електрохімічному осередку 8, що забезпечений оптичними вікнами та трьома електродами (допоміжним 9, стандартним 10 і робочим 11), під'єднаними до аналогової частини комп'ютерного потенціостата 12. Відбите випромінювання, пройшовши аналізатор 13 еліпсометра, дефокусується телескопічною системою 14 і потрапляє на блок 15 відеоконтролю, який складається зі світловипромінювача Т і CCD-камери, під'єднаної через USB порт до комп'ютера. Випромінювання, що пройшло через світлоділник, потрапляє на фотопомножувач (ФЕУ) 16 еліпсометра.

Вимірювання еліпсометричних параметрів реалізується в режимі прямого детектування сигналу з фотоприймача [10]. Електричний сигнал ФЕУ надходить на вхід підсилювача 17 і далі на аналого-цифровий і цифро-аналоговий перетворювач (АЦП-ЦАП) 18 комп'ютера 20, де відбувається цифрове оброблення сигналу.

Сигнал з аналогової частини потенціостата 12 надходить на вхід АЦП-ЦАП 19 комп'ютерного потенціостата. За малих змін фото-ЕРС, характерних для дуже тонких плівок на металі, частоту модуляції обирали вищою за 10 Гц, а аналогову частину 12 цифрового потенціостата факультативно постачали синхронним передпідсилювачем. За достатньої для реєстрації амплітуди фото-ЕРС синхродетектування амплітуди здійснювали програмно.

Трикоординатний маніпулятор предметного столика еліпсометра дає змогу переміщати зразок у площині його поверхні, щоб точно вибрати на ній зондовану ділянку. Вибір мікроділянки здійснювали, використовуючи блок 15 штатної телескопічної системи еліпсометра "Гартнер", додатковий світлоvidілювач Т і CCD-камеру блока 15, з'єднану через порт USB з комп'ютером 20.

Для демонстраційних дослідів з приладом використано сплав 90Cu-10Ni в аерованому 3.4%-ному розчині NaCl - система, що вже була досліджена, зокрема й еліпсометрично.

Стійкість сплавів 90Cu-10Ni в морській воді пояснюють швидким формуванням захисних шарів продуктів корозії. В аналітичними методами показано, що після витримки в 3.4%-ному NaCl вони складаються з тонкого прошарку Cu_2O і відносно товстого зовнішнього шару $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ з боку розчину. У розглянуто такий сценарій формування продуктів корозії. Спочатку формується Cu_2O , який далі з боку розчину швидко трансформується в $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$. Саме тонкий підшар Cu_2O забезпечує високу корозійну стійкість сплаву завдяки своїй низькій електронній провідності, що обмежує швидкість катодного відновлення кисню (катодний контроль). Цю точку зору підтримують й інші дослідники. Підкреслювалося, що зовнішній, часто вдруге оса-

джений шар гідроксихлориду істотної ролі не відіграє, оскільки піттинги та інші порушення його суцільності на електрохімічну поведінку сплаву не впливають.

Кінетику потовщення оксиду і гідроксихлориду міді на сплаві 90Cu-10Ni у згаданому вище розчині було досліджено методом шумової еліпсометрії (рис. 3). Показано тристадійність процесу. На першій стадії (від 0 до 100 с) розчиняється метал і накопичуються продукти корозії: гідроксихлорид або хлорид міді. На другій (100-1000 с) - формується шар оксиду міді. На третій (1000 с і далі) - на поверхні формується шар Cu_2O .

Тепер, тестуючи нову методику, ми досліджували початкові стадії формування корозійного шару на сплаві 90Cu-10Ni, використовуючи лазерний ЕФЕМ-відеомікросонд на установці, описаній вище, і безперервно реєструючи обидві групи даних.

Відшліфовані й відполіровані до оптичної якості пластини сплаву 90Cu-10Ni покривали захисним шаром полімеру (рис. 4), залишаючи непокритим (або вирізаючи в покритті) тільки малу, доступну електроліту пляму (2 x 2 мм), яку й зондували під час дослідів лазерним пучком (рис. 4). У результаті досліджувана поверхня цілком і однорідно освітлювалася спочатку вузьким пучком лазерного випромінювання. Для зручності область покриття навколо плями позначали маркером. Електроліт - водний розчин 3.4% NaCl.

З урахуванням згаданих експериментальних робіт і відповідних діаграм стану Пурбе припускали, що до складу неоднорідного поверхневого шару входять тільки Cu_2O і $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ (і, можливо, хлорид міді, що має з гідроксихлоридом близькі оптичні параметри).

На кожній стадії процесу за двома вимірними і усередненими за часом еліпсометричними параметрами Δ і ψ визначали усереднені товщини шарів обох з'єднань (оксиду і гідроксихлориду міді) із системи двох відповідних рівнянь за відомими оптичними властивостями.

Еліпсометрично знайдені криві зростання товщини корозійних шарів Cu_2O і $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$, а початкова ділянка першої з них з експериментальними точками - на рис. 5. Паралельно в тих самих дослідах досліджували вплив освітлення на електродний потенціал (рис. 6).

До середини світлового імпульсу тривалістю 30 с позитивна фото-ЕРС уже досягала межі порядку кількох десятих мілі-вольта. У паузах (також 30 с) він повертався в напрямку початкового значення, але набагато повільніше.

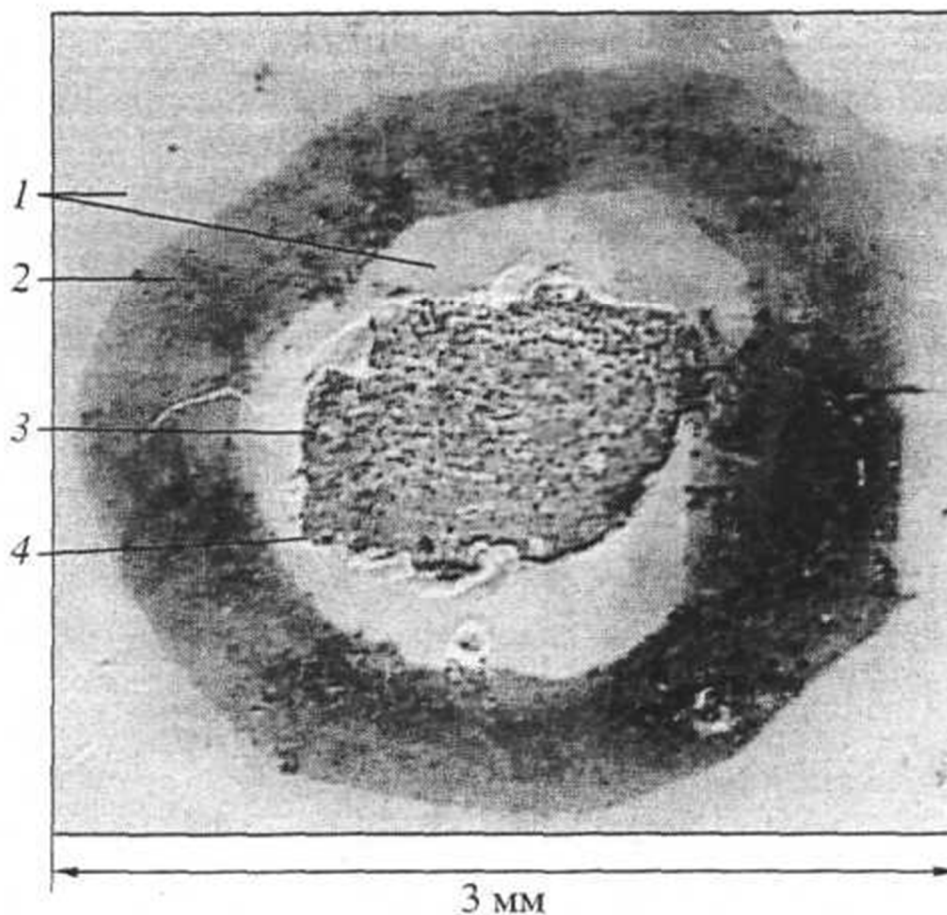
За даними рис. 5-6 можна зробити низку висновків про перебіг процесу.

На першій стадії (приблизно від 0 до 400 с) відбувається накопичення продуктів корозії, можливо, гідроксихлориду або хлориду міді. Судячи із зовнішнього вигляду (реєструється мікроскопічно), шар продуктів колоїдоподібний (рис. 7). Дані еліпсометрії (немає закису міді - рис. 5) і відсутність фото-ЕРС (рис. 6) підтверджують, що на першій стадії на металі ще немає хімічно пов'язаного з металом напівпровідникового пасивного шару.

На другій стадії (400-1000 с) формується пов'язаний з металом шар закису міді. Це підтверджують дані як еліпсометрії (рис. 5), так і фото-ЕРС (рис. 6), що свідчать про зростання напівпровідникової плівки з р-типом провідності, властивим закису міді. Можна припускати, що в міру потовщення й ущільнення колоїдного шару доступ ліганда (тобто хлориду) до металу обмежується настільки, що в умовах також дещо обмеженого доступу кисню і підвищеного його катодним відновленням рН переважаючим анодним процесом стає утворення нижчого оксиду міді. Наприкінці цієї стадії поверхня частково просвітлюється, можливо, через видалення частини колоїдного шару.

На третій стадії (починаючи з 1000 с) на поверхні інтенсивно формується шар Si_2O , що підтверджують дані еліпсометрії (рис. 5) і зростання сигналу фото-ЕРС (рис. 6). При цьому на початку періоду (до 2000 с) зменшується товщина шару продуктів розчинення металу (рис. 3). Очевидно, це результат пасивування поверхні, а після 2000 с починається депасивування металу з видимим ініціюванням пітингу. Таким чином, важливою функцією зо-

внішнього шару продуктів розчинення (гідроксихлориду міді) є створення умов зростання оксиду міді та результуючої пасивації сплаву в морській воді. Оскільки сигнал вимірюваної нами стаціонарної фото-ЕРС від поверхневого тонкого шару пропорційний до його товщини, для оцінки характеру зміни дефектності оксидного шару з часом фото-ЕРС нормувалася на його товщину. Нормовані та згладжені дані фото-ЕДС наведено на рис. 7.



1 - полімерне покриття; 2 - маркована область вимірювань; 3 - поверхня зразка, доступна електроліту; 4 - її межа

Рисунок 4.10 - Зовнішній вигляд прокородованої поверхні зразка, знятий CCD-камерою блока 15 через мікрооб'єктив після корозійних випробувань

103 с

будучи нормованою на товщину, дефектність змінюється вже не монотонно, а має максимум.

Зростання нормованої на товщину фото-ЕРС із часом (рис. 4.3.2) на ділянці 100-1000 с може бути зумовлено або монотонним зростанням поверхневої (на кордоні оксид-електроліт) концентрації катіонних вакансій - акцепторів електронів, або падінням поверхневої концентрації аніонних вакансій - донорів. Однак, з огляду на загальну тенденцію оксиду міді до зростання (рис. 4.3.4, 4.3.5), перевагу слід віддати першому чиннику, який супроводжує острівцевий ріст оксиду міді і який, крім середньої товщини, підвищує і ступінь однорідності оксиду, а отже, і властиву йому рівноважну в умовах експерименту концентрацію катіонних вакансій. Виразно був помітний відносно тонкий (частково інтерференційно-покривлений) суцільний шар (імовірно, оксид міді), поверхню якого було видно

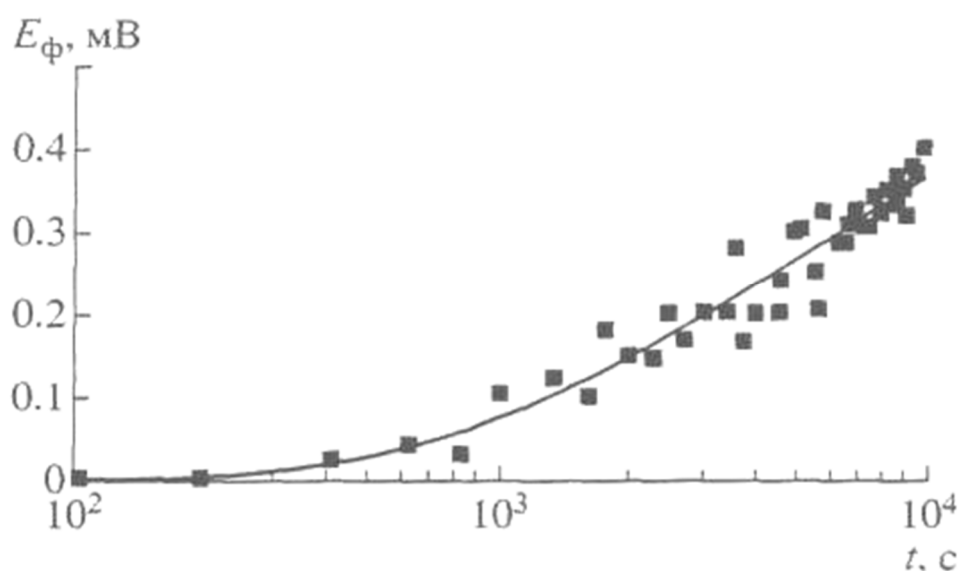


Рисунок 4.11 - Крива товщини D оксиду міді Cu_2O під час корозії сплаву 90Cu-10Ni в розчині 3.4% NaCl

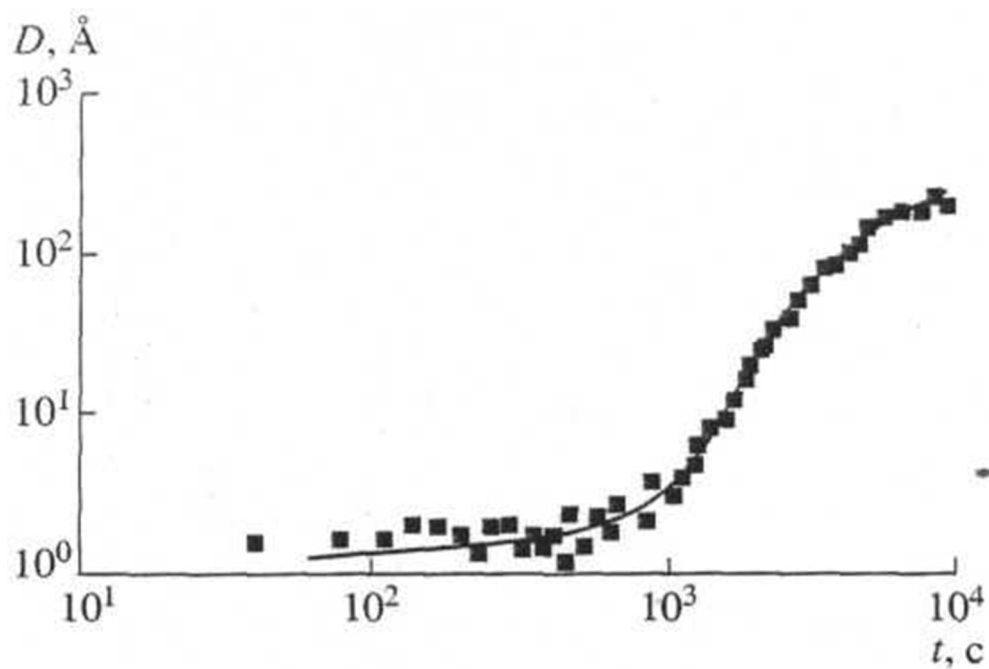
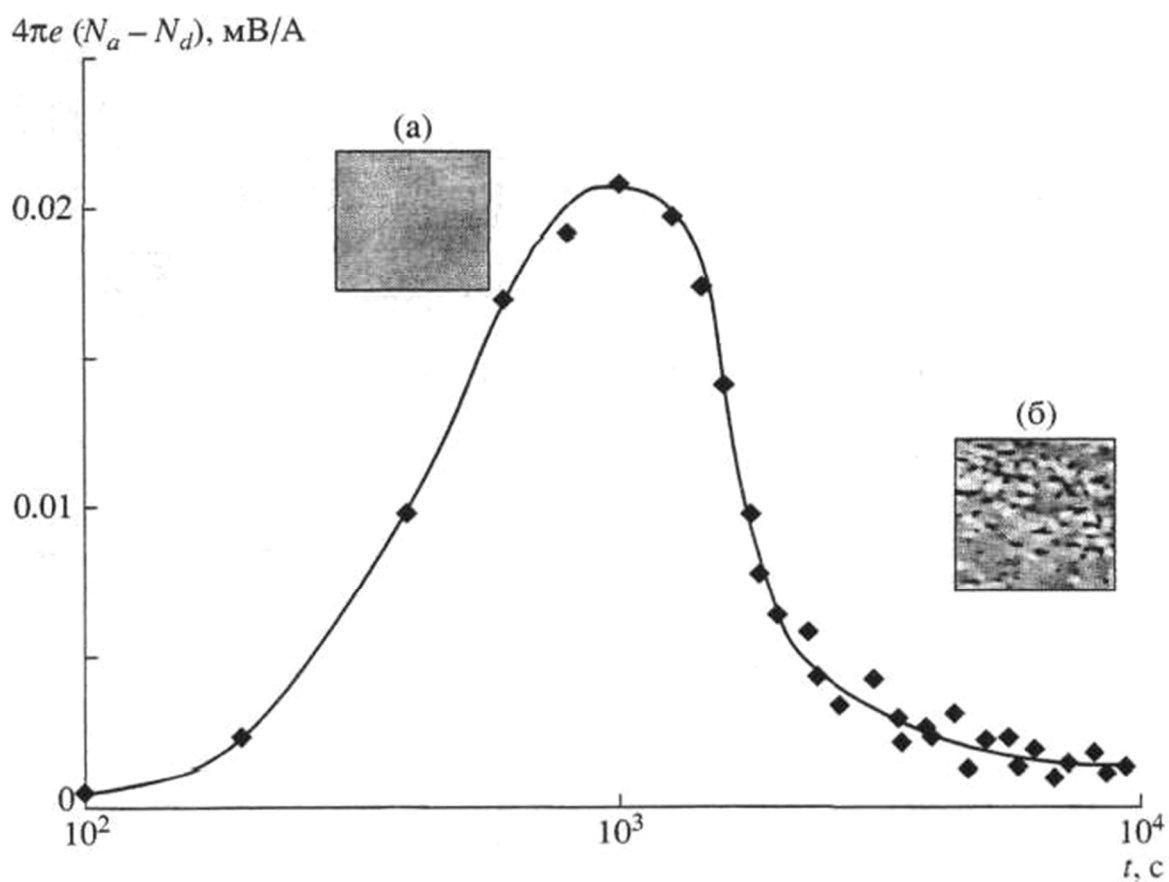


Рисунок 4.12 - Зміни фотопотенціалу сплаву 90Cu-10Ni під час корозії в розчині 3,4% NaCl



а- поверхня на відріжку 500-1000 с; б- поверхня наприкінці циклу вимірювання. Збільшення в 50 разів

Рисунок 4.13 - Зміни різниці концентрацій акцепторних і донорних дефектів за ходом росту поверхневого оксиду на сплаві

вкрай нерегулярний концентричний, що розходитьсь концентричними колами, шар продуктів корозії, який більше відповідає вторинно осажденому гідроксидхлориду міді. Крім того, на поверхні реєструвалося безліч точкових піттингів, що пронизують товстий корозійний шар у різних точках (рис. 4.3.6). Це дає змогу припустити, що спостережуване падіння поверхневої концентрації катіонних вакансій на ділянці з пов'язане з пов'язане з поступовим руйнуванням (розпушуванням) оксиду міді під час піттинговідтворення, сліди якого виразно видно на рис. 4.3.6, де саме в цей момент спостерігається прискорення розчинення сплаву з прискореним формуванням вдруге обложеного шару гідроксидхлориду. Цей повторно осаджуваний шар, імовірно, може прискорювати на цій ділянці формування діоксиду міді.

ВИСНОВКИ

У роботі поставлено й розв'язано задачу розроблення приладово-методичних основ оптичного конвеєрного моніторингу поверхневих і, зокрема, корозійних процесів, що поєднує дистанційну, багатоканальну та скануючу лазерну еліпсометрію для високопродуктивного корозійного моніторингу корозійних шарів практично одночасно з довільної кількості зразків, у різних корозійних оточеннях та умовах корозійного середовища. При цьому розглядалися можливості контролю товщини корозійних шарів, починаючи з ангстремного масштабу, що з використанням лабораторних вагових методів зробити вкрай важко. З цією метою було розроблено оптико-електрохімічний осередок дворазового відбиття, що забезпечує високу чутливість вимірювань. Прилад розроблено, виходячи з вимог максимальної адаптації до досліджуваних систем під час розв'язання проблем контролю тонких шарів у практиці корозійно-електрохімічних досліджень.

Представлений метод потокової лінії лазерної діагностики корозійних ушкоджень з успіхом може бути використаний у практиці лабораторних, польових і навіть натурних корозійних випробувань. У перших двох випадках необхідні заходи з корозійною камерою і зразком мінімальні: виготовлення замість одного тестованого зразка двох і розміщення їх під прямим кутом один до одного (рис. 1) для організації ретрорефлектора. Для натурних випробувань потрібно взяти додаткове дзеркало і розмістити його під прямим кутом поруч із досліджуваною ділянкою металевої конструкції, так щоб промінь лазера відбивався шляхом корозиметр-досліджувана ділянка-дзеркало-корозиметр. Основні переваги методу під час корозійного моніторингу в польових і натурних корозійних випробуваннях багато в чому пов'язані з використанням лазерної діагностики:

майже повна відсутність котирувальної оптики (лінз, дзеркал тощо), що зумовлено візуальністю і високою локалізацією лазерного пучка. Усі операції налаштування можна проводити практично візуально;

висока локальна інтенсивність лазерного пучка, що дає змогу працювати з відносно каламутними і малопрозорими середовищами;

високі когерентність і монохроматичність лазерного випромінювання, що дає змогу у вимірах обходитися без спектральних фільтрів;

висока вихідна поляризованість лазерного випромінювання, що дає змогу не використовувати поляризатор;

мала розбіжність лазерного пучка, що дозволяє розташовувати осередок на великій відстані від вимірювальної схеми, що вельми зручно під час роботи з великою кількістю аналізованих осередків, розміщених на значній площі. Направляючи пучок поперемінно в різні аналізовані комірки, можна контролювати одночасно велику кількість досліджуваних систем.

Вельми перспективний для локальних кінетичних корозійно-електрохімічних досліджень фазомодуляційний принцип реєстрації еліпсометричних параметрів із прямим цифровим детектуванням сигналу з фотоприймача [10] легко та витончено комбінується з лояльними вимірами фото-ЕРС. Фазовий модулятор легко забезпечує модуляцію не тільки фази, а й інтенсивності випромінювання, що падає на досліджуваний зразок. При цьому тип модуляції можна задавати довільно в найширших межах.

Для локальних еліпсометричних і паралельного збудження фото-ЕРС особливо доцільно використовувати лазерне джерело. Випромінювання прекрасно локалізується на зразку в пляму розміром до кількох мікрометрів, воно високо монохроматичне й когерентне. Це дає змогу під час фотоелектрохімічних досліджень впливати на зразок модульованим за інтенсивністю випромінюванням гранично вузького спектрального діапазону.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Мартовицький Л.М., Федерякін І.О., Глушко В.І. Методичні вказівки до дипломного проектування для студентів усіх форм навчання за напрямом 6.050503 «Машинобудування» спеціальності 7.05050308 «Підйомно-транспортні, дорожні, меліоративні машини і обладнання». / Укл. Л.М. Мартовицький, І.О. Федерякін, В.І. Глушко. – Запоріжжя: 2011. 280 с.
2. Погрелюк І. М. Зміцнення та корозійна стійкість конструкційних матеріалів / І. М. Погрелюк, М. С. Коваль. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 212 с.
3. Матеріалознавство : підручник / [Б. А. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. К. Федоров та ін.] ; за ред. Б. А. Грабченка. – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – 456 с.
4. Boresi A. P. Advanced Mechanics of Materials / A. P. Boresi, R. J. Schmidt. – 6th ed. – Wiley, 2003. – 824 p
5. Попов П. В. Хімія навколишнього середовища та захист матеріалів / П. В. Попов. – Київ : Видавничий дім «Києво-Могилянська академія», 2011. – 240 с.
6. Ahluwalia V. K. Green Chemistry: Environmentally Benign Reactions / V. K. Ahluwalia. – CRC Press, 2013. – 410 p.
7. Методичні вказівки для виконання практичних занять, лабораторних, самостійної та контрольної робіт з дисципліни «Корозія і захист будівельних матеріалів та конструкцій» (для студентів 5 курсу денної і заочної форм навчання освітньо-кваліфікаційного рівня спеціаліст галузі знань 0601 «Будівництво та архітектура» напряму підготовки 0921 (6.060101) «Будівництво») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: О. В. Кондращенко, А. А. Баранова. – Х: ХНАМГ, 2010. – 38 с.
8. ДСТУ 4372:2005 Перетворювач іржі на основі деревинної речовини. Технічні вимоги. – Київ: Держспоживстандарт України, 2005. –12 с.

9. ДСТУ EN ISO 12944-1:2015 Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016.
10. Sanaky S. Corrosion Control and Surface Finishing / S. Sanaky. – Woodhead Publishing, 2014. – 320 p.
11. Патент №(11) 61544 «Перетворювач іржі «Контраст».
12. Brown T. L. Chemistry: The Central Science / T. L. Brown, H. E. LeMay, B. E. Bursten. – 12th ed. – Prentice Hall, 2011. – 1248 p.
13. Revie R. W. Uhlig's Corrosion Handbook / R. W. Revie. – 3rd ed. – Wiley, 2011. – 1320 p.
14. Schweitzer P. A. Corrosion Engineering: Principles and Practice / P. A. Schweitzer. – CRC Press, 2006. – 696 p.
15. Jones D. A. Principles and Prevention of Corrosion / D. A. Jones. – 2nd ed. – Pearson, 2005. – 576 p.
16. Biczók Z. Corrosion Control / Z. Biczók. – Elsevier, 2004. – 315 p.
17. Костишин В. С. Корозія та захист металів / В. С. Костишин. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. – 180 с.
18. Schütze M. Corrosion and Environmental Degradation / M. Schütze. – Wiley-VCH, 2005. – 450 p.
19. Опацький І. В. Захист металевих конструкцій від корозії в будівництві / І. В. Опацький. – Київ : Будівельник, 2007. – 144 с.
20. Bastidas J. M. Corrosion Inhibitors for Infrastructure / J. M. Bastidas. – MDPI, 2020. – 210 p.
21. Хімічна корозія та захист металів : навчальний посібник / [П. І. Стоєв, С. В. Литовченко, І. О. Гірка, В. Т. Грицина]. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. – 216 с.
22. Нечипоренко Е. П. Защита металлов от коррозии / Е. П. Нечипоренко, А. П. Петриченко, Ю. Б. Павленко. – Х. : Вища школа, 1985. – 112 с.

23. Паламарчук В. А. Електрохімічний захист металоконструкцій / В. А. Паламарчук. — Вінниця : ВНТУ, 2014. — 150 с.

24. Канарчук В.Є. Методи дослідження металів: навчальний посібник / В.Є. Канарчук, В.І. Шевченко. — К.: Національний транспортний університет. — 2001. — 98 с