

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Корозійні ураження обладнання в хімічній промисловості

1.2 Прогнозування залишкового ресурсу обладнання

РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Об'єкти досліджень

2.2 Характеристика корозійних середовищ

2.3 Методика досліджень сталей на розтяг

2.4 Металографічні дослідження сталей

2.5 Випробування сталей на ударну в'язкість

2.6 Математичне забезпечення експерименту

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ МЕТАЛУ ТЕПЛООБМІННИКІВ

3.1 Дослідження сталі 15X5M

3.2 Дослідження сталі 12X1MФ

3.3 Дослідження сталі JIS G3458 STPA22

РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРУ ЗМІН МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТРУБНИХ СТАЛЕЙ В АГРЕСИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ РОБОТІ У ЛАБОРАТОРІЇ

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ККД – коефіцієнт корисної дії

КР – корозійне розтріскування

МКК – міжкристалітна корозія

МКР – міжкристалітне корозійне розтріскування

КС – ударна в'язкість, МДж/м<sup>2</sup>

ЄСЗКС – єдина система захисту від корозії і старіння

N – кількість циклів деформації

n – кількість дослідів

T – температура, К

$\delta$  – відносна деформація зразка, %

$\sigma_b$  – границя міцності, МПа

$\sigma_t$  – границя текучості, МПа

$\sigma_{0,2}$  – умовна границя текучості, МПа

$\sigma_{-1}$  – границя втоми, МПа

$\sigma_{-1c}$  – границя корозійної втоми, МПа

$\psi$  – відносне звуження, %

## ВСТУП

Однією з найважливіших науково-технічних проблем є проблема продовження ресурсу експлуатації потенційно небезпечних об'єктів.

Аналіз виникнення аварійних ситуацій показує, що загальний технічний стан устаткування із збільшенням терміну експлуатації погіршується, часто його проектний експлуатаційний ресурс практично вичерпаний. При цьому зростає небезпека відмов, обумовлених деградаційними процесами в метали за його тривалій експлуатації.

При розробці устаткування для підприємств хімічної, нафтопереробної і інших галузей промисловості передбачається, що механічні властивості матеріалів є загалом незмінними і забезпечують міцність і надійність устаткування протягом розрахункового терміну експлуатації. Проте, як показала практика, для устаткування, що працює в умовах агресивних середовищ, підвищених тисків і температур, із збільшенням терміну експлуатації знижується ресурс його працездатності. Зниження ресурсу працездатності устаткування проявляється в збільшенні числа відмов (аварійних руйнувань) через зниження властивостей матеріалів, з яких воно виготовлене. Погіршення властивостей матеріалів за тривалої експлуатації устаткування є експериментально встановленим фактом і називається "експлуатаційною деградацією властивостей". Деградація є наслідком протікання в металі під дією зовнішніх чинників ряду процесів, різних за своєю природою, механізму, кінетиці розвитку. Залежно від виду устаткування, умов його експлуатації деградація може проявлятися у вигляді змін механічних властивостей, структурного стану, утворення дефектів на поверхні і в об'ємі металу, корозійних ушкоджень. Виявлення розвитку процесів деградації, вивчення їх природи для устаткування, що працює в умовах агресивних середовищ, підвищених тисків і температур, є важливим,

оскільки дозволить надійніше оцінювати поточний технічний стан його з урахуванням впливу чинника часу його експлуатації.

Для запобігання передчасному крихкому руйнуванню обладнання, оцінювання залишкового ресурсу при плануванні капітального ремонту необхідно виходити з реальних властивостей металу. Для встановлення реального стану металу по тривалій експлуатації необхідно досліджувати комплекс фізико-механічних характеристик, який дозволяє оцінити опір руйнуванню металу в умовах, найбільш близьких до умов експлуатації, у тому числі за низьких температур, гострих концентраторах напруження, дії корозійного середовища і водню. Розуміння природи процесів, що протікають в металі в ході тривалої експлуатації, дозволить прогнозувати безпечний термін служби устаткування і послужить основою для створення конструкційних матеріалів, стійких до дії експлуатаційних чинників.

Комплексне дослідження механізмів старіння устаткування і матеріалів, з яких воно виготовлене, можливо при встановленні характеру, параметрів макродефектів і визначенні кількості і розмірів мікродефектів в елементах цього устаткування. Потрібний контроль напружено-деформованих станів об'єкту на підставі даних розрахункових і експериментальних аналізів. Також важлива комплексна діагностика об'єкту для оцінки його працездатності і визначення залишкового ресурсу з більш високою науково-методичною точністю, ніж проектного і початкового.

Тому нині залишаються актуальними питання дослідження деградації металу експлуатованого устаткування, що відпрацювало розрахунковий термін служби, а також важливою є оцінка структурно-хімічної і механічної неоднорідності металу обладнання, що працює в умовах агресивних середовищ і підвищених температур та тисків.

# РОЗДІЛ 1

## ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Корозійні ураження обладнання в хімічній промисловості

В наш час найважливішою науково-технічною проблемою для багатьох галузей промисловості є продовження терміну служби і підвищення тривкості металевих матеріалів і устаткування до процесів корозійного руйнування. Ця проблема стає гострішою, оскільки темпи зростання корозійних втрат останніми роками значно перевищують темпи зростання виробництва металу. Тому дослідження процесів корозійного ураження металів і розробка методів боротьби з корозією і захисту металів є актуальною науково-технічною проблемою.

Обладнання хімічної промисловості піддається корозійним ураженням внаслідок дії агресивних середовищ, високих температур і тисків. Проблемі вивчення явища корозії присвячено багато досліджень, накопичений великий досвід працівниками хімічної, нафтопереробної, металургійної та ін. галузей промисловості, де корозія проявляється як загроза катастрофічних наслідків [1-4]. Виявлення корозії металу, корозійних процесів, їх класифікація, природа походження і протікання, вплив корозії на стан обладнання, - це перелік проблем, що чинять вплив на надійність обладнання.

Боротьба з корозією посідає важливе місце при веденні хіміко-технологічних процесів і підтримці технологічного обладнання в працездатному стані. Корозійні ураження викликають передчасний вихід з ладу технологічної апаратури, що вимагає або повної заміни такого обладнання або вимагають додаткові витрати на ремонт пошкодженого апарату, машини, а також втрати від корозійних процесів обумовлюються необхідністю витрат на боротьбу з ними, захист обладнання від втрати надійності через корозію.

Корозійні ураження класифікуються за механізмом, умовам протікання процесу і характеру руйнування.

Окрім цього, корозію розглядають з урахуванням призначення апаратів, машини, обладнання в конкретних галузях промисловості.

Залежно від механізму процесу розрізняють хімічну, електрохімічну, біохімічну і деякі інші види корозії [5].

До хімічної корозії відносяться процеси, що протікають за безпосередньої хімічної взаємодії між металом і агресивним середовищем, не супроводжуються виникненням електричного струму. Характерною особливістю процесу хімічної корозії є утворення продуктів корозії безпосередньо в місці взаємодії металу з агресивним середовищем. За умовами протікання можна виділити: газову корозію (корозія металів, що викликається дією пари і газів за високих температур) і корозію в неелектролітах (корозія металів в рідинах, що не проводять електричний струм).

За характером руйнувань розрізняють загальний і локальний види хімічної корозії. При цьому хімічна корозія може протікати як компонентно-виборча або структурно-виборча, а локальна корозія може бути міжкристалітною або носити виразковий характер (наприклад, такий може виявлятися ванадієва корозія).

За природою корозійного середовища розрізняють корозію в кисневмісних або сірковмісних газах, водневу, ванадієву, галогенідну корозію, корозію в розплавах сірки і інших неметаллах [6]. Ці види корозії проявляються у тому випадку, якщо корозійне середовище не є електропровідним. Такі умови виникають, коли метал стикається з газами за високих температур, коли виключається конденсація вологи на поверхні металу. Тому при підборі матеріалів, придатних для експлуатації в умовах газової корозії, доводиться поєднувати їх тривкість до окиснення (жаростійкість) з високою міцністю за підвищених температур (жароміцність).

Одним з найбільш поширених видів газової корозії металів є корозія в кисневмісних газах. Найчастіше вона зустрічається при експлуатації різних паливневих пристроїв парових котлів, двигунів внутрішнього згорання, коли

при згоранні палива в повітрі або кисні утворюється газова суміш, що містить кисень [7].

Такий вид корозії металів спостерігається також при обробці металевих заготовель в ковальських і термічних цехах, оскільки деталі при термічній обробці (загартуванні, відпалі), при куванні, штампуванні, плющенні, волочінні і інших операціях гарячої обробки металів нагрівають до високих температур, а потім вони можуть контактувати з повітрям і окислюватися.

При корозії металів в таких умовах утворюється окалина. На залізі, сталях, чавунах окалина має складну будову: часто вона складається з трьох шарів (рис. 1.1) з різною концентрацією кисню і мірою окиснення заліза.

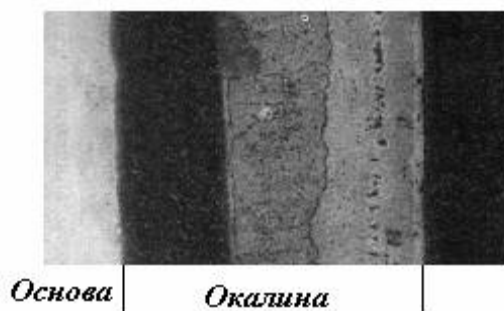


Рис. 1.1 Шарувата будова окалини, що утворюється на залізі при його окисненні на повітрі за підвищеної температури.

Великий вплив на швидкість газової корозії мають температура і склад газового середовища. Залежність газової корозії від температури приблизно описується рівнянням Ареніуса [8]:

$$\ln k = A - \frac{B}{T}$$

де  $k$  – швидкість реакції;

$A$  і  $B$  – константи;

$T$  – абсолютна температура, К.

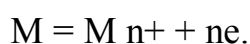
Додатковий вплив чинять вторинні реакції, вид і властивості продуктів корозії, які стимулюють зниження надійності хіміко-технологічного устаткування.

Шаруватість окалини спостерігається внаслідок убування концентрації кисню в плівці окалини в міру наближення до металу, оскільки кожен з шарів представляє бар'єр на шляху дифузії кисню до металу. При окисненні сплавів склад окалини може бути змінним, співвідношення компонентів сплаву може змінюватися за складним законом по товщині шару окалини [9].

А. Г. Кульман [10], зіставляючи різні види корозії, для наочності приводить схему корозії металів за внутрішнім механізмом процесів, що лежать в їх основі. На практиці корозія металів не завжди протікає за яким-небудь одним механізмом, часто цей процес має комплексний характер, і далі відзначається, що багато складних комплексних процесів повністю не з'ясовано досі.

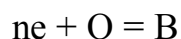
До електрохімічної корозії, що є гетерогенною електрохімічною реакцією, відносяться корозійні процеси, що протікають у водних розчинах електролітів, вологих газах, розплавлених солях і лугах. За електрохімічної корозії процес розчинення металів супроводжується появою електричного струму, як в металі, так і в агресивному середовищі. При цьому електричний струм виникає внаслідок процесів корозії, а не за рахунок підведення його ззовні. За електрохімічної корозії одночасно відбувається два процеси: окиснювальний (розчинення металу на одній ділянці) і відновлюваний (наприклад, відновлення кисню). Ці дві ділянки називають анодом і катодом і відповідно розрізняють анодний і катодний процес. Анодний процес - переходження металу в розчин у вигляді гідратованих іонів, із залишенням еквівалентної кількості електронів в металі. Катодний процес - асиміляція надмірних електронів з металу атомами молекул або іонами розчину.

На поверхні кородуючого металу одночасно і незалежно одна від одної можуть протікати анодна і катодна реакції. В деяких випадках можлива їх локалізація. На поверхні анодної ділянки переважно відбувається реакція окиснення металу





В результаті реакції утворюються іони металу, що переходять в розчин, а в металі залишаються електрони (ne). Вони можуть вільно переміщатися усередині металу. Потрапляють вони і на катодну поверхню, де відбувається їх поглинання (асиміляція) окисником O з утворенням продукту відновлення (B) по реакції



Таким чином, сумарний процес складається з трьох стадій, що включають анодний процес, переміщення зарядів в провідниках і катодний процес.

У цьому суть корозійного процесу, що протікає за електрохімічним механізмом.

Можна дати і інше трактування даному явищу. На межі метал - розчин з боку розчину рівномірно розташовані молекули (чи іони) окисника. Вірогідність взаємодії їх з поверхнею в усіх точках однакова. Проте передача електронів (ne) на окремих ділянках окиснику виявляється через певні умови (неоднорідність металевої поверхні, температури, концентрації) легшою.

У цьому місці і відбувається переважно процес відновлення окисника. Ці ділянки і називаються катодними.

Передача електрона окиснику на катодних ділянках веде до порушення електронейтральності металу, і іон, що залишився в металі, переходить в розчин. Ділянки, на яких це відбувається, є анодними.

При біохімічній корозії в корозійному процесі безпосередню участь беруть живі організми, наприклад бактерії, що живуть в ґрунті, морській воді і так далі, або продукти їх життєдіяльності [11].

Залежно від умов протікання процесів і характеру руйнування металу розрізняють наступні види корозії [12]:

- корозія в рідинах електропровідних (морській, річковій воді, в кислотах, лугах, нейтральних розчинах солей і розсолах) і неелектропровідних (органічні рідини);

- атмосферна корозія, при якій безпосередньо на поверхні металу знаходиться плівка адсорбованої або конденсованої рідини, яка стикається із зовнішнього боку з вологим газом, що містить кисень або інші корозійні агенти. Це найбільш поширений вид корозії, адже близько 80% металевих поверхонь знаходяться у контакті з атмосферним повітрям;

- газова корозія - мимовільне руйнування металу, що знаходиться в зіткненні з газами при такій температурі, коли конденсація вологи на поверхні металу виключається;

- корозія металу при неповному зануренні в рідину; при цьому виділяють декілька зон на поверхні металу, що відрізняються характером взаємодії металу із зовнішнім середовищем. Перша зона відповідає корозії в рідині, друга - атмосферній корозії, а третя, особлива зона зазвичай посиленої корозії, називається корозією по ватерлінії;

- ґрунтова корозія зі своїм характерним механізмом електрохімічної корозії металу при контакті його з вологим ґрунтом.

По виду руйнування розрізняють корозію суцільну (загальну) і місцеву (локальну); поверхневу і підповерхневу [13]. При суцільній корозії до руйнування схильна уся поверхня матеріалу, що контактує з агресивним середовищем. Сюди відносять компонентно- і структурно-вибіркові види корозії. Якщо із сплаву в процесі корозійної взаємодії вибірково віддаляється один компонент, - такий вид корозії називають компонентно-вибірковим [14]. Широко відомим прикладом є знецинкування латуні (сплав міді з цинком), коли в процесі корозії із сплаву вибірково витравлюється цинк і поверхневий шар сплаву "збагачується" міддю і вона залишається у вигляді пористого шару. Структурно-вибіркова корозія - вид корозійної взаємодії сплаву із зовнішнім середовищем, в результаті якого в поверхневих шарах металу відбувається інтенсивніше руйнування однієї із структурних складових сплаву [15].

При місцевій корозії ураження зосереджені на окремих ділянках поверхні металу. Місцева корозія може мати різний характер і міру нерівномірності. Тому розрізняють наступні види місцевої корозії:

1) корозія плямами - руйнування окремих ділянок поверхні на порівняно невелику глибину;

2) виразкова корозія - характеризується досить глибокими зосередженими ураженнями металу на обмежених ділянках поверхні ( $S_{\text{плям.}} > S_{\text{вираз.}}$ );

3) точкова (пітингова) корозія [16] - руйнування зосереджені на окремих ділянках поверхні, але характер ураження глибший, аж до наскрізних уражень;

4) підповерхнева корозія - руйнування починаються на поверхні металу, але надалі поширюються під поверхнею, так що продукти корозії виявляються зосередженими усередині металу і відбувається його спучення і розшарування;

5) вибіркова корозія - якщо руйнується один компонент сплаву, то це компонентно-вибіркова корозія, Якщо в розчин переходить тільки одна структурна складова сплаву, то такий вид руйнування називається структурно-вибірковою корозією (корозія сірих чавунів, часто супроводжується розчиненням фериту);

6) міжкристалітна корозія - відноситься до вибіркової корозії і характеризується руйнуваннями по межах зерен металу;

7) щілинна корозія - характеризується посиленням руйнуванням металу під прокладками, в місцях нещільного з'єднання однорідних металів, в невеликих проміжках, в різьбових і клепаних з'єднаннях;

8) ножова корозія - спостерігається при зварюванні нержавіючих сталей за наявності багат шарових зварних швів. Причиною ножової корозії є різниця температурної дії на різні шари металу;

9) корозія транскристалітна [17] - руйнування поширюється через тіло зерна сплаву. У деяких металів і сплавів при корозії в специфічних умовах

проявилися тільки властиві ним види корозії. Наприклад, алюмінієві сплави в середовищах, що містять галоїдні іони, і особливо в морській атмосфері, виявилися схильні до корозійного розшаровування, яке небезпечно тим, що розвивається без помітного гальмування і за відносно короткий час веде до повного руйнування металу [18].

Безліч корозійних процесів виникає при поєднанні фізико-хімічної дії на метал корозійного середовища і різних додаткових дій - механічних, електричних, радіаційних тощо.

Так, спільна дія на метал корозійного середовища і механічних навантажень викликає корозію під напруженням.

В цьому випадку руйнування металу відбувається у вигляді тріщин. Такий корозійний процес називають ще і корозійним розтріскуванням під напруженням.

Механічні напруження, сприяючи утворенню корозійних тріщин, може виникати з різних причин: при розтягуванні або стисканні об'єкту зовнішніми навантаженнями, внаслідок прояву їх внутрішніх напружень, що виникає під дією термічної обробки металу або в процесі електроосадження в гальванічних покриттях як наслідок процесу електрокристалізації металу.

Не менш небезпечні руйнування можуть мати місце за одночасної дії агресивного середовища і зовнішніх знакозмінних навантажень. Це явище, яке викликає розтріскування металу, називають корозійною втомою.

Крім того, виділяють корозію при терті - руйнування металу при одночасній дії агресивного середовища і тертя. Терміном фретинг-корозія позначають руйнування матеріалів при коливальному переміщенні двох поверхонь одна відносно одної в умовах дії корозійного середовища. При стираючій дії оброблюваного середовища відбуваються руйнування, які називаються корозійна ерозія. Серйозні ураження металів спостерігаються при корозійній кавітації - руйнуванні при ударній дії корозійного середовища.

Проблеми, які доводиться вирішувати у зв'язку з появою і розвитком корозійних процесів, визначаються державним стандартом [19].

ГОСТ 9.101-78 встановлює визначення, призначення, структуру і склад єдиної системи захисту виробів і матеріалів від корозії і старіння (ЄСЗКС), правила найменування і позначення стандартів системи.

ЄСЗКС - комплекс взаємозв'язаних державних стандартів, що встановлюють загальні для усіх видів матеріалів і виробів: вимоги, правила, норми і методи по забезпеченню захисту їх від корозії і старіння на стадіях розробки, виробництва, експлуатації і зберігання.

Стандарт ЄСЗКС сприяє рішення наступних завдань:

- підвищенню збереження і довговічності виробів за рахунок застосування комплексного захисту від корозії, старіння і біоушкоджень;

- збільшенню термінів зберігання виробів без переконсервації;

- уніфікації і скороченню номенклатури вживаних засобів і методів захисту, методів випробувань;

- скороченню витрат на заходи по захисту виробів і матеріалів від корозії, старіння і біоушкоджень в результаті раціонального конструювання виробів, підвищення якості і вдосконалення технології застосування засобів і методів захисту.

ГОСТ 9.311-87 визначає метод оцінки корозійних уражень металевих і неметалевих неорганічних покриттів по зміні зовнішнього вигляду після корозійних випробувань, дефектації зразків при експлуатації і зберіганні. Метод полягає у візуальному визначенні виду корозійних уражень зразків з наступним виміром площі, зайнятої цими ураженнями [20].

У всьому світі велика увага приділяється боротьбі з корозією, включаючи боротьбу з корозією теплообмінного обладнання. Постійне підвищення втрат від різних типів корозії в основному пов'язане із зростанням в довкіллі концентрацій агресивних домішок. У США в 1975 р. ціна річних втрат від корозії складала 82 млрд дол., а в 2000 р. - вже 400 млрд. дол.

Економічні втрати і збиток, що заподіюється нашій планеті корозією металевих виробів, обладнання для промисловості і різних конструкцій, необчислені. У минулі роки в США щорічні втрати від корозії склали 300 млрд. дол., що відповідає 6 % національного доходу усієї країни.

Теплообмінна апаратура складає дуже значну частину технологічного устаткування в хімічній і суміжних галузях промисловості. На підприємствах нафтохімічної і нафтопереробної промисловості питома вага теплообмінного устаткування складає 50 % [21].

На сьогодні усі підприємства хімічної і нафтопереробної, а також інших галузей промисловості, що експлуатують теплообмінні апарати, стикаються з наступними основними проблемами:

- утворення відкладень на теплообмінних поверхнях, що веде до зниження;
- інтенсифікація корозійних процесів, яка визначається в першу чергу зростанням в довкіллі промислових зон концентрацій агресивних з'єднань (двіоксид сірки та ін.)

Багато хімічних реакцій (нейтралізації, окислення, гідрування і так далі) протікають з утворенням тепла, при цьому важливою умовою високого відсотка виходу цільового продукту і мінімізації побічних процесів є суворе дотримання температурного режиму за рахунок охолодження в теплообмінних апаратах. Система оборотного водопостачання є найважливішим елементом технологічного процесу хімічного та нафтопереробного виробництва.

Причинами пропуску трубок теплообмінного обладнання можуть бути такі пошкоди, як забруднення поверхні теплообміну накипом, маслом, відкладеннями солей і смол, корозія металу і ін. При потужному забрудненні з метою охолодження (підігрівання) доводиться пропускати через теплообмінник завищені кількості води, що веде до завищених витрат електроенергії [22].

Як показують спостереження, особливо інтенсивно розвивається корозія трубок в місцях їх розвальцьовування на трубних дошках. Тут окрім агресивної дії самого середовища, позначається ще і механічне напруження, що з'являється внаслідок великих перепадів тепла між теплоносіями.

У парових кожухотрубчастих теплообмінниках теплоносієм є високотемпературна пара, яка подається під тиском  $10 \text{ кгс/см}^2$  з температурою  $+180^\circ \text{ C}$ . Віддавши тепло, пара конденсується на поверхні трубного пучка, а конденсат стікає по трубках в нижню частину апарату і виводиться назовні.

Найінтенсивніше руйнується поверхня трубок, яка звернена до пари, що подається всередину теплообмінника. Характер корозії виразковий, що і зумовлює швидкий вихід трубок з ладу за 1-2 року. Головна причина виходу з ладу паропідігрівачів полягає в агресивних властивостях пари, а точніше - води, що сконденсувалася з неї. Агресивність пари обумовлена недостатньою хімічною підготовкою жорсткої води, з якої її отримують.

Помітному корозійному ураженню піддаються теплообмінники "труба в трубі", проте через більш товсті стінки труб їх руйнування переносяться на більш пізній термін в порівнянні з кожухотрубчастими теплообмінниками.

У роботі [23] розглянуті корозійні процеси теплообмінних труб парогенераторів діючих АЕС. Підтримка цілісності теплообмінних труб парогенераторів - важливе завдання для забезпечення безпеки експлуатації реакторних установок.

Загальна кількість теплообмінних труб в цих парогенераторах складає близько 2 мільйонів штук. В процесі експлуатації мають місце ушкодження теплообмінних труб. Одним з перших був інцидент, що стався в 1982 році на 1 та 2 блоках АЕС "Норд" в Східній Німеччині, пов'язаний з попаданням морської води в поживну воду парогенератора. В результаті були пошкоджені і заглушені в цілому 621 теплообмінна труба (при критерії глушення 90% від товщини стінки). Значні ушкодження теплообмінних труб парогенераторів були виявлені в 1996 році на блоці 2 Балаковської АЕС. За період експлуатації

до 2004 року (до заміни парогенераторів) унаслідок течі і за результатами вихреструмового контролю було заглушено 3785 трубок.

Металографічні дослідження дозволили встановити, що механізмом ушкодження труб в парогенераторах є корозійне розтріскування під напруженням. Результати досліджень пошкоджених теплообмінних труб, виконаних методами оптичної і електронної мікроскопії, свідчать про те, що на стадії монтажу парогенераторів на зовнішній поверхні труб мали місце вогнища локальної пітингової корозії різних розмірів і форми з тріщинами, переважно транскристалітного характеру. При цьому корозійне розтріскування спостерігали як в місцях дистанціювання теплообмінних труб, так і поза цими місцями.

У міру накопичення забруднень на поверхнях теплообмінних труб вірогідність ушкодження через корозію металу зростає.

Найважливіше поняття теорії корозії - корозійна тривкість. Вона характеризує здатність металу або сплаву чинити опір корозійній дії середовища і певним видам корозійних руйнувань.

Щоб успішно боротися з корозією, треба уміти розраховувати її швидкість, тобто визначати, як швидко йде корозійний процес в цьому металі в часі.

Методи оцінки корозійної тривкості можна розділити на якісні і кількісні. Якісні дозволяють візуально встановити зміни мікрогеометрії поверхні металу або покриття, а також вид корозійного руйнування (зміна кольору, якості і неоднорідності поверхні). Для кількісного оцінювання використовують показники корозії, які встановлюють швидкість корозійних руйнувань або зміну інших властивостей в результаті корозії.

У випадках, коли корозійне ураження протікає як загальна корозія, для оцінки швидкості корозії можна використовувати зміну кількості металу в результаті процесу, зміни кількості реакційного агента (окисника) або одного з продуктів корозії в часі. Оскільки корозійний процес є



гетерогенним, то відповідні кількісні характеристики мають бути віднесені до одиниці поверхні.

Оцінки швидкості корозії називають показниками корозії.

Застосовують масовий, об'ємний, глибинний, осередковий і інші показники корозії.

Масовий показник отримують в результаті визначення зміни кількості металу, що прокородував. У цьому випадку його називають "негативним" масовим показником. Коли продукти корозії міцно утримуються на поверхні металу і внаслідок цього відбувається збільшення маси зразка металу, що прокородував, застосовують "позитивний" показник корозії.

Об'ємний показник використовують в тих випадках, коли продукти корозії газоподібні. Це може спостерігатися при кислотній корозії металу, коли продуктом корозії є водень. Об'ємний показник використовують і тоді, коли газоподібним є окисник (наприклад, кисень). Вимірюючи кількість кисню, що витрачається в корозійному процесі, отримують об'ємний показник корозії.

Глибинний показник характеризує швидкість проникнення корозії в глибину металу. Отримують його перерахунком масового або об'ємного показника, а також безпосередньо, вимірюючи зміну товщини деталей обладнання, що прокородувало.

Осередковий показник корозії - це число корозійних вогнищ, що виникають на одиниці поверхні матеріалу за певний проміжок часу в цих умовах експлуатації.

Показник схильності металу до корозії - характеризує термін експлуатації до початку корозійного процесу. Початок корозійного процесу визначається станом поверхні металу, при якому корозійна поразка досягла 1 % площі.

Механічні показники корозії, наприклад, міцностний, який характеризує зміну границю міцності за час експлуатації.

Електричні показники корозії, наприклад струмовий, який характеризує величину виникаючого електричного струму на ділянці поверхні металу.

Проте найбільшого практичного поширення набула оцінка корозійного ефекту в балах певної шкали. Шкали зв'язують тривкість матеріалів до дії агресивного середовища певних параметрів і швидкість корозії.

Для характеристики корозійної тривкості металів використовується десятибальна шкала, що має "зворотний характер", тобто, десятий бал відповідає нетривким металам, а перший бал - цілковито тривким металам.

Оцінка в десять балів означає, що швидкість корозії металу в глибину досягає більше 10 мм в рік. Оцінка в один бал відповідає швидкості корозії менше 0,001 мм на рік і вказує на хорошу корозійну тривкість металу.

Тривкими до дії різних корозійних середовищ є благородні метали: платина, золото. Вони найчастіше характеризуються першим балом корозійної тривкості.

Досить тривкими (бали 3, 4, 5) виявляються навіть прості низьколеговані сталі (що містять менше 2-3 % легуючих елементів) при контакті з концентрованою азотною або сірчаною кислотою. Але при розбавленні цих кислот корозійна тривкість низьколегованих сталей може знижуватися до десятого балу. Цей приклад показує, що здатність матеріалів чинити опір корозії слід розглядати стосовно конкретних корозійних умов на відміну від здатності чинити опір механічним навантаженням або протіканню електричного струму.

Для характеристики локальних видів корозії використовують коефіцієнт рівномірності корозії, що є відношенням максимальної глибини руйнування до середньої. Він завжди більше одиниці і чим більше, тим більше нерівномірним є корозійний процес. Середнє значення глибини корозійного руйнування можна визначити одним з розглянутих способів, а максимальне - за допомогою металографічних або профілометричних вимірів.

У практиці використовують ще і "фізичні" показники корозії. Серед них розрізняють: міцністний показник, омічний показник, засновані на зміні механічних або електричних властивостей, показник зміни магнітних властивостей і інші.

Фізичні показники застосовують для характеристики, наприклад, швидкості міжкристалічної корозії і інших видів локальної корозії, коли зміна маси випробовуваного зразка металу може бути незначною.

Прогнозування виникнення корозії, динаміки розвитку цього процесу і протікання, а також результати випробувань і довідкові матеріали можуть допомогти у вирішенні питання підвищення надійності устаткування, що піддається корозійному зносу.

## 1.2 Прогнозування залишкового ресурсу обладнання

При тривалій експлуатації обладнання хімічних та нафтохімічних виробництв неминуче виникають ушкодження або порушення працездатності його елементів навіть за відсутності дефектів виготовлення і дотриманні правил експлуатації. Це обумовлено особливостями цих виробництв: високою корозійною активністю технологічних середовищ, високими температурою, тиском і швидкістю технологічних потоків, наявністю змінних температурних деформацій і складного напруженого стану металу обладнання. Крім того, навіть при дотриманні технологічної дисципліни при експлуатації обладнання неминучі коливання складу сировини і реагентів, у тому числі вміст в них агресивних компонентів; коливання регульованих параметрів (температури, тиску, витрати та ін.), обумовлені запізнюванням регулювання; коливання зовнішніх дій (напруження електроживлення, температури і тиску технологічної пари, охолоджуючої води та ін.). Дія вказаних чинників протягом тривалого часу викликає ушкодження металу. Розвиток мікродефектів на поверхнях навантажених елементів обладнання або відкладення на них осаду, перешкоджає нормальному протіканню

технологічного процесу. У деякі моменти функціонування обладнання можуть виникати такі небажані поєднання параметрів, які порушують його працездатність, тобто викликають відмови.

Відмови хімічного обладнання можна розділити на три види: механічні, технологічні і обумовлені помилками (порушеннями) при експлуатації, виготовленні або розробці обладнання.

До першого виду відносять відмови, викликані порушенням механічної працездатності обладнання внаслідок зношування, корозії, поломок деталей, порушення форми елементів обладнання, виникнення неприпустимих супутніх процесів - вібрації, стука, витоку технологічного середовища, перегрівання підшипників тощо.

До технологічних відносять відмови, обумовлені порушенням ходу технологічного процесу, що виконується на цьому обладнанні, що веде до випуску некондиційного продукту, або порушенню функціонування обладнання. Прикладами таких відмов в хімічних виробництвах є локальне перегрівання сушарного апарату, що веде до налипання на його поверхнях термолабільних продуктів; закоксування труб в трубчастих печах; забруднення фільтрів і розділових елементів в апаратах мембранного розподілу, що призводить до зниження їх продуктивності; забруднення каталізатора в реакційних апаратах; відкладення на стінках і рухливих елементах машин та ін.

Доля відмов третього виду визначається в основному рівнем технологічної дисципліни і культури виробництва на конкретному підприємстві.

Статистика частоти виникнення аварій на підприємствах хімічної промисловості говорить про те, що підвищення безпеки експлуатації обладнання є необхідним, оскільки, незважаючи на тенденцію до зниження, кількість аварійних ситуацій залишається великою. Переважна більшість аварійних ситуацій викликана внутрішніми чинниками, причинами яких, часто, стають помилки в діагностуванні і визначенні залишкового ресурсу.

Вони ведуть до того, що граничний стан матеріалу устаткування настає раніше призначеного терміну експлуатації. Тому розробка нових методів оцінювання залишкового ресурсу обладнання хімічної і нафтопереробної промисловості є актуальним завданням.

Оцінка ресурсу промислового обладнання, зокрема, апаратів хімічної промисловості - найважливіше завдання, рішення якого проводиться, як на стадії проектування, так і протягом періоду експлуатації. Нині для вирішення цього завдання провідними науково-технічними центрами розроблена велика система знань, методологій і інструментів. Але, проте, для великої кількості промислових об'єктів, до числа яких входить обладнання хімічної промисловості, точна оцінка ресурсу представляє значну складність. Помилки, що допускаються при прогнозуванні ресурсу, ведуть до тяжких наслідків.

Ресурс є найважливішою характеристикою, що визначає тривалість безпечної експлуатації, як окремих виробничих об'єктів, так і складних технічних систем. Згідно з визначенням, приведеним в [24], це сумарне напрацювання об'єкту від початку його експлуатації або її відновлення після ремонту до переходу в граничний стан. Величина ресурсу виробничого об'єкту залежить не лише від конструктивних особливостей і матеріального виконання, але і від того, в яких умовах він працює. Тому, фактичний термін безпечної експлуатації устаткування може значно відрізнятись від проектного. Це є серйозною проблемою для устаткування хімічної промисловості, оскільки воно працює в дуже важких умовах: дії корозійно-активних середовищ, високих температур і тисків.

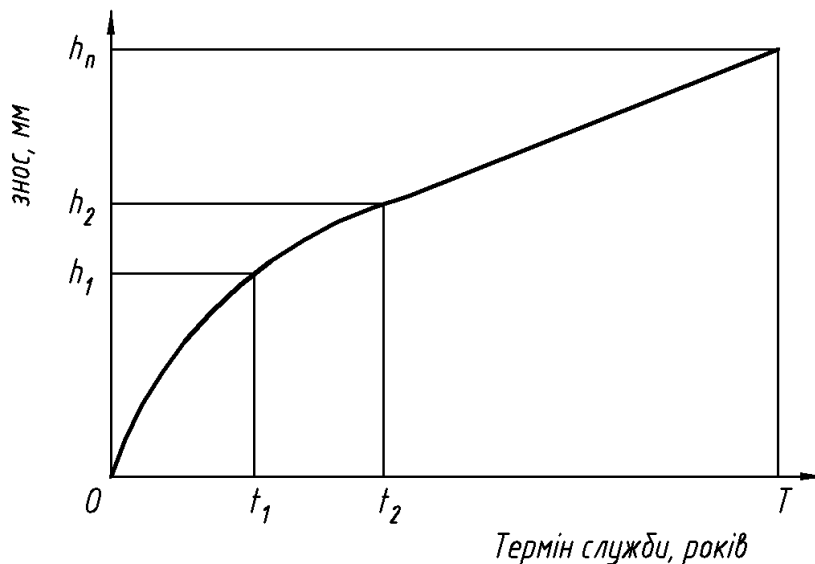
Для забезпечення безпеки експлуатації усі небезпечні виробничі об'єкти, у тому числі обладнання хімічної промисловості, періодично піддаються технічному огляду, і для них проводиться експертиза промислової безпеки. Порядок їх проведення і періодичність регламентуються численними нормативно-правовими документами, наприклад [25]. По результатах

призначається ресурс безпечної експлуатації, після закінчення якого для продовження роботи обладнання має бути проведена наступна експертиза.

Прогнозування величини залишкового ресурсу можливе, якщо забезпечується одночасна наявність наступних умов:

- відомі параметри, що визначають технічний стан обладнання;
- відомі критерії граничного стану обладнання;
- є можливість періодичного (чи безперервного) контролю значень параметрів технічного стану.

Прогнозування надійності обладнання зазвичай здійснюється за схемою (Рис. 1) [26].



t - тривалість експлуатації;

h - величина ушкоджень.

Рис. 1.2. Типова схема прогнозування надійності обладнання

Через певні періоди експлуатації  $t_1, t_2, \dots$  і так далі вимірюють максимальні величини виниклих ушкоджень (зносу, корозії, деформацій)  $h_1, h_2, \dots$  і так далі і екстраполюють залежність до гранично допустимої величини ушкоджень  $h_n$ . Такий метод дозволяє отримати досить точні оцінки показників надійності, якщо відомий вид залежності  $h(t)$  і при вимірюваннях значень  $h$  визначаються

дійсно максимальні значення ушкоджень, тобто здійснюється суцільний контроль поверхонь обладнання.

Вид залежності  $h(t)$  встановлений для багатьох видів руйнування. При деяких видах корозії і зношування (ерозійне тертя) залежність зносу від часу лінійна:

$$h(t) = h_0 + C \cdot t$$

де  $h_0$  і  $C$  - постійні величини для заданих умов.

Нині для оцінки залишкового ресурсу небезпечних виробничих об'єктів провідними науковими центрами розроблено багато методів. Згідно найбільш загальної класифікації, усі вони можуть бути розділені на дві великі групи: детерміновані і імовірнісні. Для оцінки залишкового ресурсу детермінованими методами визначається переважаючий механізм, за яким відбувається старіння об'єкту.

Залежно від механізму встановлюється критерій граничного стану обладнання, тобто стан, в якому подальша експлуатація об'єкту небезпечна. Призначається контрольований параметр і визначається величина, відповідна граничному стану. Відстежується динаміка зміни контрольованого параметра, і за результатами визначається ресурс безпечної експлуатації. Детермінований підхід дає прийнятну точність прогнозування ресурсу обладнання, що не виробило нормативний термін служби.

В основу детермінованих методів покладені залежності ресурсу обладнання від його напрацювання, встановлені по конкретних видах деградаційних процесів та залежності ресурсу обладнання від навантажень, достовірно встановлені за результатами випробувань і введені в державні стандарти. Для прогнозування залишкового ресурсу обладнання детермінованими методами необхідно встановити, що є головною причиною втрати працездатності обладнання, визначити фактичні діючі на обладнання навантаження (спектри навантажень) і при відповідності умов експлуатації

вимогам стандартів виконати розрахунки з встановлення стандартам залежностям.

Детерміновані методи прогнозування залишкового ресурсу обладнання поділяються на [27]:

- прогнозування залишкового ресурсу при малоциклових навантаженнях;
- прогнозування залишкового ресурсу складових частин машин;
- прогнозування залишкового ресурсу по змінах контрольованого параметра.

Прогнозування залишкового ресурсу сталевих посудин і апаратів при малоциклових навантаженнях здійснюють за малоциклової втоми металу відповідно до вимог ГОСТ 14249-89 [28] і ГОСТ 25859-83 [29]. При цьому визначають діючі навантаження, залишкову товщину стінок, наявність дефектів - концентраторів напруження, і виконують розрахунок з урахуванням фактичного напруження.

Для прогнозування залишкового ресурсу складових частин машин, устаткування і приладів, відмови яких викликають процеси накопичення ушкоджень, рекомендується використовувати РД 50-490-84 [30].

У методичних вказівках розглядаються методи оцінювання залишкового ресурсу в умовах основних типових ситуацій, що виникають в практиці випробувань і експлуатації, що відрізняються об'ємом і видом початкової для обробки інформації.

У тих випадках, коли показники призначення обладнання монотонно змінюються за часом (по напрацюванню), а дисперсія показників не змінюється, для прогнозування залишкового ресурсу може бути використаний метод, викладений у ГОСТ 23942-80 [31].

Правила стандарту розроблені для лінійного

$$Y(t) = C_1 + C_2t,$$

квадратичного

$$Y(t) = C_1 + C_2t + C_3t^2$$



і експоненціального законів зміни показника призначення

$$Y(t) = \exp \{C_1 + C_2 t\},$$

де  $C_1, C_2, C_3$  - невідомі коефіцієнти

$$t = t_i - t_0, t \geq 0,$$

де  $t_0 \geq 0$  - початкове значення напрацювання виробу.

Для використання методу, рекомендованого ГОСТом, необхідно переконатися в тому, що зміна контрольованого параметра підкоряється одному із законів, а його дисперсія не зміниться із збільшенням напрацювання виробу.

Показник призначення оцінюють по вимірних значеннях контрольованого параметра

$$Y_i = F(t_i) + \Delta_i; i = 1, \dots, N;$$

де  $t_i$  - значення напрацювання в  $i$ -й момент виміру

$$t_c \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_N,$$

$\Delta_i$  - необмежена випадкова величина з дисперсією  $D$ , симетрично розподілена відносно математичного очікування, рівного нулю, або симетрично розподілена, обмежена випадкова величина, для якої при усіх значеннях напрацювання виконується умова

$$-\Delta \leq \Delta(t) \leq \Delta, 0 < \Delta < \infty.$$

Число вимірів  $N$  вибирають з умови:

$$N > 2m,$$

де  $m$  - кількість невідомих коефіцієнтів закону зміни параметра.

Рекомендується вибирати  $N \geq 11$ .

Моменти виміру  $t_i$  вибирають так, щоб випадкові величини  $\Delta_i$  були практично незалежними.

Теоретичною основою даного ГОСТ є оцінка відповідних показників на базі загальновідомого методу найменших квадратів.

Проте, як відзначається в джерелі [32] у парку обладнання вітчизняних підприємств хімічної промисловості висока доля фондів, що виробили ресурс, призначений заводом-виготівником. Тому, для достовірного прогнозування

необхідно провести комплексну оцінку технічного стану, що включає безліч різних параметрів. Для цього застосовуються імовірнісні методи оцінки залишкового ресурсу [27] :

- прогнозування залишкового ресурсу за розвитком корозійних ушкоджень;
- оцінка граничних розмірів ушкоджень статистичними методами;
- планування мінімально необхідного об'єму контролю;
- скорочення об'єму контролю за рахунок використання розподілу екстремальних значень;
- оцінка залишкового ресурсу технологічного обладнання за зміною його вихідних параметрів.

Імовірнісні методи прогнозування залишкового ресурсу засновані на обліку розмірів дефектів і ушкоджень, що виникли в елементах обладнання. Тому від точності і достовірності визначення цих розмірів залежать точність і достовірність прогнозу. Оскільки суцільний контроль елементів посудин усіма методами виконати вдається рідко (через великі поверхні апаратів), застосовують вибірковий контроль і оцінку пошкодженості по найбільших розмірах виявлених дефектів; щоб при цьому не виникало великої помилки потрібне застосування статистичних методів.

Вони дозволяють врахувати сукупну дію одночасно декількох експлуатаційних навантажень. Критерієм, за яким призначається залишковий ресурс при використанні імовірнісного підходу, - вірогідність безвідмовної роботи устаткування. Методи, засновані на використанні цього критерію, дозволяють значно точніше прогнозувати залишковий ресурс, що особливо актуально для обладнання, що працює понад нормативний термін [27].

Імовірнісний метод прогнозування залишкового ресурсу по розвитку корозійних ушкоджень здійснюється шляхом проведення періодичних обстежень обладнання, виміру глибин проникнення корозії на його стінках, статистичної обробки результатів вимірів і наступного розрахунку залишкового середнього і гарантованого ресурсу.

При обстеженнях має бути встановлена відсутність корозійного розтріскування, локальних видів корозії (пітингу, щілинної, міжкристалевої), посиленої корозії металу швів, зони термічного впливу і інших видів локальної корозії обладнання, неприпустимих при його експлуатації, і наявність тільки суцільній корозії, корозії плямами або корозійно-ерозійного руйнування поверхонь обладнання.

При незначній корозії стінок апаратів, сумірної з похибкою методу вимірів, оцінка залишкового ресурсу за критерієм корозійної тривкості може бути виконана шляхом промислових випробувань зразків, що проводяться за спеціальними методиками.

При обстеженнях мають бути визначені площа поверхні обладнання, що піддалася корозії, площа поверхні, що доводиться на один незалежний вимір (глибини корозії або залишкової товщини стінки), ступінь нерівномірності корозії і необхідне число вимірів (N). Після вимірів в N точках, рівномірно розподілених по поверхні, здійснюються статистична обробка результатів вимірів і оцінка залишкового ресурсу.

Метою статистичної обробки результатів вимірів є визначення параметрів розподілу глибин корозії і оцінка з необхідною достовірністю максимальної глибини корозії стінок або покриттів обстежуваного обладнання при мінімальному об'ємі вимірів.

Методи статистичної обробки результатів вимірів глибин корозії поверхонь слід застосовувати для оцінки ступені корозії великих поверхонь обладнання, що знаходяться в однакових умовах експлуатації і корозії, коли неможливо (чи недоцільно) виміряти глибину корозії на всіх ділянках обстежуваної поверхні і вимір здійснюють вибірково. Для ділянок поверхні, що знаходяться в істотно різних умовах експлуатації і корозії (місцеві перегрівання, підвищені швидкості технологічного середовища і тому подібне) застосування статистичних методів недоцільне, оскільки нерівномірність корозії визначатиметься, головним чином, відмінністю цих умов.

Одним з найбільш складних питань при оцінці залишкового ресурсу як детермінованими, так і імовірнісними методами є визначення домінуючого ушкоджувального механізму і міри його вкладу у формування технічного стану об'єкту. Ця проблема особливо актуальна для обладнання, що знаходиться в експлуатації тривалий час. Застосування імовірнісних методів дозволяє провести комплексну оцінку технічного стану об'єкту з урахуванням різноманіття діючих силових чинників. Результати численних досліджень в області техногенної безпеки [33-35] використовуються для оцінки технічного стану і залишкового ресурсу небезпечних виробничих об'єктів, таких як атомні і гідроелектростанції, устаткування хімічних, нафтохімічних підприємств тощо, що мають стратегічне значення в масштабах країни.

Незважаючи на високу точність, імовірнісні методи мають ряд недоліків: їх реалізація на практиці трудомістка, вимагає значних фінансових витрат і запасу часу для розробки і ухвалення рішення.

Тому, нині проводяться дослідження, спрямовані на розробку єдиного і найбільш узагальненого критерію граничного стану, на основі якого величина залишкового ресурсу може бути спрогнозована з високою точністю і протягом короткого проміжку часу. Як одне з рішень цієї задачі Н. А. Махутовим та ін. авторами [34] була запропонована концепція пошкодженості. Суть її полягає в тому, що накопичення ушкоджень матеріалом об'єкту відбувається безперервно і є результатом дії окремих силових чинників. Таким чином, технічний стан матеріалу об'єкту у будь-який момент часу може бути виражено через критерій пошкодженості. Застосування такого підходу дозволяє оцінювати залишковий ресурс обладнання, схильного до дії декількох силових чинників, на основі досліджень динаміки накопичення ушкоджень. Результати досліджень показали, що концепція пошкодженості може бути застосована і для розрахунку ресурсу обладнання.

У роботі І. Р. Кузєєва, Н. М. Захарова, Г. І. Євдокимова [36] на прикладі колонних апаратів нафтогазопереробки і нафтохімії розглядаються причини відмов і процес накопичення ушкоджень протягом усього життєвого циклу.

Діагностування колонних апаратів розглядається авторами з урахуванням пошкодженості від дії різних силових чинників.

Спрощеним прикладом застосування концепції пошкодженості для оцінки залишкового ресурсу обладнання хімічних підприємств є метод, регламентований ГОСТ 25859-83 [28]. Відомо, що колонні апарати значною мірою схильні до дії циклічних навантажень. У ГОСТі сформульована методика розрахунку залишкового ресурсу цього виду обладнання з урахуванням дії змінних навантажень. Але ця методика має обмежену точність, часто, недостатньою для практичних розрахунків. Основним недоліком запропонованого методу оцінки є те, що при розрахунку не враховуються цикли навантаження від вітрових і сейсмічних навантажень, від навантажень, викликаних розширенням металу внаслідок перепадів температури довкілля, циклічної повзучості, монтажу і транспортування і випадкових нештатних перевантажень. Тому реальна кількість навантажень, сприйнятих металом апарату протягом усього життєвого циклу, практично неможливо поррахувати.

Іншою проблемою є те, що втома матеріалу, що створюється накопиченням ушкоджень, не проявляється у вигляді макродефектів практично до досягнення граничного стану. На практиці ця обставина значно ускладнює оцінку технічного стану апаратів і нерідко стає причиною відмов і виникнення аварійних ситуацій. Для вирішення проблеми оцінки рівня накопичених ушкоджень матеріалу обладнання проводяться численні дослідження, загальним завданням яких є розробка методів неруйнуючого контролю, чутливих до змін структури матеріалу, які відбуваються при накопиченні ушкоджень матеріалом. Одним з варіантів реалізації таких методів є вимір швидкості ультразвуку.

В роботі Е. А. Наумкіна [37] встановлено, що існує залежність між швидкістю ультразвуку і рівнем накопичених ушкоджень металу, яка має періодичний характер. Таким чином, дослідження характеру розподілу швидкості ультразвуку в металі апарату може дати корисну діагностичну

інформацію про ступінь його пошкодженості. Велика кількість робіт присвячена дослідженню розподілу електромагнітних полів в металі. На основі їх результатів нині розроблені методи неруйнуючого контролю (одна з найбільш поширених класифікацій приведена в [38]). Як правило, ці методи спрямовані на виявлення дефектів суцільності, таких як розшарування, непровари, тріщини, пори тощо. Незважаючи на їх високу точність, вони не дають можливості визначити пошкодженість структури матеріалу. Це накладає істотні обмеження на їх застосування в діагностиці обладнання хімічних підприємств, оскільки часто, наявність тріщини або, наприклад, непроварення є ознакою граничного стану.

Як показали результати досліджень, характер взаємодії електромагнітних полів з металом значною мірою залежить від його пошкодженості. На основі подібних результатів надалі можуть бути розроблені методи діагностики втомної пошкодженості. Наприклад, в роботі О. Г. Кондрашової, Е. А. Наумкіна, І. Р. Кузеєва, [39] досліджена зміна магнітних полів матеріалу при накопиченні втомних ушкоджень. Встановлено, що при дії циклічних навантажень змінюється площа петлі магнітного гістерезису. Цей ефект пояснюється явищем адаптації металу до структурних змін і явищ перерозподілу векторів власної намагніченості, що відбуваються при накопиченні металом втомних ушкоджень.

М. Г. Баширов як діагностичний критерій запропонував використовувати характеристики електромагнітного поля вихрових струмів, що наводяться в металі зовнішнім джерелом змінного електромагнітного поля [40]. Фізичні основи досліджуваних явищ відомі давно, і широко застосовуються нині для вирішення широкого спектру завдань: виявлення поверхневих тріщин, вимір електропровідності, товщини проводящих і діелектричних шарів і багатьох інших. Проте авторами показано, що характеристики електромагнітного поля вихрових струмів чутливі і до пошкодженості металу.

Іншим актуальним напрямом наукових досліджень є дослідження пошкодженості обладнання від сукупної дії декількох експлуатаційних навантажень.

Як відзначалося раніше, робота обладнання хімічних підприємств пов'язана з внутрішнім тиском, підвищеною температурою, присутністю агресивних середовищ, вітрових навантажень і інших дій. Тому, для підвищення достовірності оцінки залишкового ресурсу необхідно знати, як трансформуються механізми накопичення ушкоджень при одночасній дії декількох силових чинників.

Так в роботах І. Р. Кузєєва, М. І. Кузєєва, А. Г. Чиркова [41-43] досліджені процеси деградації і старіння металу реакторів установок уповільненого коксування і обладнання установок піролізу, обумовлені комплексною термосиловою дією. Експериментально і теоретично виявлені закономірності процесів еволюції мікроструктури, пов'язаних з впровадженням вуглецю в структуру сталі, втрата стійкості і міцності, схильність до крихкого руйнування і інші ефекти, викликані тривалою термосиловою дією. З урахуванням встановлених закономірностей запропоновані методи оцінки залишкового ресурсу реакторного устаткування.

Тривала дія високих температур і механічних навантажень часто є причиною іншого небезпечного явища - повзучості. Це явище веде до накопичення матеріалом пластичних деформацій і зниження експлуатаційних характеристик. Явище повзучості було відоме вже у кінці ХІХ століття, і нині досить вивчено. Проте, результати досліджень, проведених Ковшовою Ю. С. [45], свідчать про те, що накопичення пластичних деформацій відбувається не лише за дії високих температур і навантажень, але і в нормальних умовах при роботі матеріалу в області пружних деформацій. Очевидно, що при оцінці залишкового ресурсу устаткування, що працює понад нормативний термін, для забезпечення достовірності прогнозування цей ефект також необхідно враховувати.

Окремою областю досліджень в області оцінки залишкового ресурсу обладнання хімічної промисловості є прогнозування з урахуванням дії корозійно -активних середовищ. Особливість полягає в тому, що старіння металу при протіканні корозійних процесів може відбуватися по різних механізмах: віднесення матеріалу з поверхні (загальна корозія), ураження окремих ділянок (наприклад, "ножова" корозія, що вражає навколошовні зони зварних з'єднань), корозійне розтріскування (при роботі металу з середовищами, що містять сірководень і вуглекислий газ) і іншим. Корозійне розтріскування під напруженням є найбільш небезпечним і важкопрогнозованим. До нього схильне обладнання, що працює з сірководневмістними середовищами. Хімічні перетворення молекул сірководня ведуть до того, що в середовище виділяється елементарний водень. Його молекула має найменші розміри, і таким чином, при роботі металу під навантаженням впроваджується в його кристалічну структуру. Рух усередині структури металу припиняється в місцях найбільшої твердості. При зупинці роботи апарату ділянки металу, в які сталося впровадження водню стають концентраторами механічного напруження і мають високу схильність до крихкого руйнування. Кінетика процесу наводнення сталі є дуже складною, тому на практиці проблематично оцінити її вплив на технічний стан обладнання після тривалого періоду експлуатації. Проблема деградації металу при експлуатації з сірководневмістними середовищами характерна для великої кількості обладнання хімічної і нафтопереробної промисловості.

Розробці методів оцінки залишкового ресурсу з урахуванням можливості корозійного розтріскування під напругою присвячена велика кількість робіт. Наприклад, в роботах С. Н. Баришова [46], досліджується можливість визначення залишкового ресурсу тривало працюючого обладнання імовірнісними методами оцінки.

Потреба в розробці і вдосконаленні заходів, спрямованих на забезпечення промислової безпеки, у тому числі і нових методів технічної діагностики і оцінки залишкового ресурсу продиктована високою часткою



основних виробничих фондів хімічних підприємств, що відпрацювали проектний ресурс. Виконання цього завдання має стратегічне значення для забезпечення техногенної і енергетичної безпеки.

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1 Об'єкти досліджень

Об'єктом досліджень були труби теплообмінного обладнання, що пропрацювали тривалий час за підвищених температур в агресивному середовищі. Досліджувані труби були виготовлені: з середньолегованої сталі 15X5M і оцяднолегованих сталей 12X1MФ та JIS G3458 STPA22.

#### 2.2 Характеристика корозивних середовищ

Технологічним середовищем труб є водний розчин електролітів або пара. Це обумовлює протікання електрохімічної корозії на зовнішній і внутрішній поверхнях металу труб. Беручи до уваги робочий температурний інтервал при експлуатації теплообмінників, наводнювання труб не відбувалось. Дослідження механічних характеристик велись за нормальних і робочих температур.

#### 2.3 Методика досліджень сталей на розтяг

Механічні дослідження на розтяг велись на стандартних зразках діаметром 5мм на машині Р-5 згідно з ГОСТ 1497-84. Дослідження за підвищених температур проводились згідно з ГОСТ 9651-84. Установка для досліджень за підвищених температур складалася із: машини на розтяг Р-5, трубчастої пічі з поворотною направляючою, потенціомера з термопарою типу ТХА, автотрансформатора для регулювання температури в печі.

#### 2.4 Металографічні дослідження сталей

Металографічні дослідження макроструктури металу фіксували мікроскопом МБС при малих збільшеннях (до 10 раз), а мікроструктуру

вивчали на металографічному мікроскопі МИМ-8М при збільшенні більше 100 разів.

## 2.5 Випробування сталей на ударну в'язкість

Ударну в'язкість визначали на маятниковому копрі МК-30А згідно з ГОСТ 9454-59 і ГОСТ 9456-59. Дослідження на ударну в'язкість зварних з'єднань труб після тривалої експлуатації проводили на нестандартних зразках перерізом  $5 \times 10$  мм через значні зміщення труб при зварюванні. Вирізку зразків з поковок вели на фрезерному верстаті з застосуванням охолоджуючої речовини. Завершувальну обробку проводили на круглошліфувальному верстаті моделі 312М алмазними кругами з застосуванням охолоджуючої речовини.

Зразок для досліджень сталей на ударну в'язкість показано на рис. 2.1.

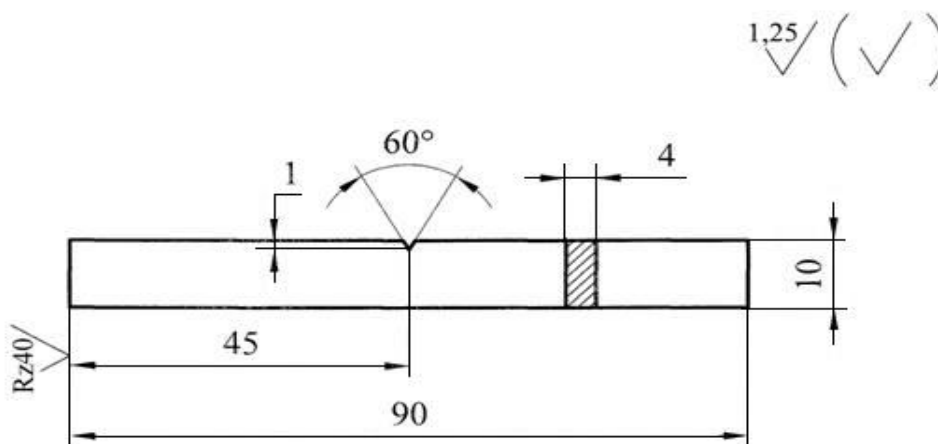


Рис. 2.1. Зразок для досліджень: плоский зразок для визначення ударної в'язкості

Кінцеву обробку плоских зразків на ударну в'язкість виконували на плоскошліфувальному верстаті типу 3171. Точність виготовлення зразків відповідає вказаним допускам.

## 2.6 Математичне забезпечення експерименту

При обробці результатів експериментів методи математичної статистики містили наступні розрахунки та обчислення:

- відтворюваність або точність вимірювань;
- незміщеність оцінки генеральної середньої,  $\bar{x}$ ;
- середнє квадратичне відхилення,  $S$ ;
- незміщену оцінку квадратичного відхилення,  $\check{S}$ ;
- за відкиданням малоімовірних даних за  $U$  – критерієм;
- за регресивним аналізом;

Незміщеною оцінкою для генеральної середньої нормального розподілу є вибіркова середня:

$$\bar{x} = 1/n \sum x$$

Середнє квадратичне відхилення є оцінкою для генерального середнього квадратичного відхилення:

$$S = + \sqrt{S^2}, S^2 = 1/(n-1) \sum (x_i - \bar{x})^2$$

Незміщена оцінка квадратичного відхилення:

$$\check{S} = M(v)S,$$

де  $M(v)$  – коефіцієнт, що залежить від кількості отриманих результатів.

Відкидання малоімовірних даних  $x_i$  проводили, якщо  $U \geq h$ . При цьому  $U$  визначали за формулою:

$$U = (x_i - \bar{x}) / S$$

Значення коефіцієнта  $h$  залежить від обсягу вибірки і прийнятої імовірності.

## РОЗДІЛ 3

### ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ МЕТАЛУ ТЕПЛООБМІННИКІВ

#### 3.1 Дослідження сталі 15X5M

Досліджувались труби теплообмінників печі П – 102 на ЗАТ “Линик” виготовлені зі середньолегованої сталі 15X5M діаметром 219×8мм і 152×8мм після 14832, 55440 і 71280 (умовно позначимо їх труба А, Б, В відповідно) годин експлуатації.

В печі відбувається нагрів вуглецевим газом сировини (гідроочищений вакуумний дисцилят).

Продуктовий змійовик експлуатується за наступних технічних характеристик:

робочий тиск в радіаційній частині	-	0,3МПа;
розрахунковий тиск	-	1,8МПа;
температура сировини на виході з радіаційної частини	-	390 – 410 °С;
температура газів на виході з радіаційної камери	-	≤800 °С

Досліджували механічні характеристики основного металу і зварних з'єднань, металографію основного металу і зварних з'єднань, визначали характер і глибину корозії. Механічні випробування на розтяг велись за нормальної і робочої температури (400<sup>0</sup>С) на стандартних зразках діаметром 5мм. Дослідження на ударну в'язкість зварних з'єднань труб проводили на нестандартних зразках розміром 5×10мм.

Порівняльний аналіз може мати суто якісний характер, зважаючи на досить різні умови експлуатації. Дані механічних характеристик металу труб за кімнатної температури після різних термінів експлуатації і труб, що в експлуатації не були, приведені в таблицях 3.1, 3.2, 3.3.

Таблиця 3.1

## Механічні характеристики експлуатованої трубної сталі 15X5M

№ тру- би	Стан матеріалу	Глибина наугле- цьован. шару	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{0,2}/$ $\sigma_b$	$\delta$ , %	$\psi$ , %	Твердість НВ		Кут загину	КС, МДж/ м <sup>2</sup>	Примітки
								Науглецьо- ваний шар	Зовнішня поверхня			
1А	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2А	експлуатована	0,7	475	250	0,53	29,2	58,0					
			531	-	-	19,5	57,0	207	156	180 <sup>0</sup>		
			484	259	0,54	22,4	63,8					
13А	експлуатована	1,26	474	282	0,59	31,0	53,2			180 <sup>0</sup>	2,20	Сплющен. не витрим.
			471	290	0,62	36,0	60,6				2,10	
			473	265	0,56	35,2	57,8				2,45	
12А	експлуатована	1,68	472	269	0,57	30,2	59,6				2,46	
			473	258	0,55	30,4	58,3	207	156	180 <sup>0</sup>	2,70	
			478	252	0,53	27,6	61,3					
10А	експлуатована	1,8	465	233	0,50	29,8	46,6					
			474	251	0,53	21,1	45,9					
			457	218	0,47	27,8	45,7					
4А	експлуатована	1,9	495	295	0,6	14,7	20,1	255	175			
			479	252	0,53	14,9	25,5					
			537	318	0,55	14,0	34,6					
14А	експлуатована	2,07	411	210	0,51	18,2	47,8					тріщини
			416	-	-	-	-					
			437	311	0,63	13,1	31,1	207	139			

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
17,	Труби, що не були в експлуатації	-	512	377	0,71	31,3	76,1				2,76		
18			521	370	0,71	29,1	76,8				2,86		
				526	373	0,71	27,5	75,7	-	170	180 <sup>0</sup>	2,88	
				525	397	0,76	31,4	69,8					
				519	370	0,71	33,9	68,9					
				531	365	0,69	30,9	68,9					

Таблиця 3.2

Механічні характеристики експлуатованої трубної сталі 15X5M

№ труби	Стан матеріалу	Середня глибина науглецьованого шару	$\sigma_b$ , Мпа	$\sigma_{0,2}$ , Мпа	$\sigma_{0,2}/\sigma_b$	$\delta$ , %	$\psi$ , %	Твердість НВ		Кут загину	КС, МДж/м <sup>2</sup>
								Науглецьований шар	зовнішня поверхня		
4Б,	експлуатована	нема	627	501	0,79	27,8	57,8	нема			1,85
5Б		-	924	883	0,95	13,2	40,9	-	170	180 <sup>0</sup>	2,64
		-	727	607	0,83	17,0	42,1	-			2,98
		-	835	831	0,99	-	44,7	-			
		-	917	849	0,93	15,4	55,9	-			
		-	792	709	0,90	16,6	38,2	-			

Таблиця 3.3

## Механічні характеристики експлуатованої трубної сталі 15X5M

№ труби	Стан матеріал.	Середня глибина науглецьованого шару	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{0,2}/\sigma_b$	$\delta$ , %	$\psi$ , %	Твердість НВ		Кут загину	КС, МДж/м <sup>2</sup>	Примітки
								Науглецьований шар	Зовнішня поверхня			
14 В	експлуатована	0,5	752	718	0,95	9,8	27,1				7,35	Випробуван. на сплющення не витримали
15 В			707	578	0,82	14,3	42,7	285	229	30 <sup>0</sup>	7,10	
34 В			771	747	0,97	-	-				6,50	
59 В			727	690	0,95	16,4	33,8					
			615	556	0,90	13,8	30,9					



Механічні характеристики експлуатованих труб за температури досліджень 400 °С наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Механічні характеристики трубної сталі 15Х5М за температури 400 °С

№ труби	Термін експлуатації, год	Стан матеріалу	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{0,2}/\sigma_b$	$\delta$ , %	$\psi$ , %
2	14832	експлуатований	394	259	0,66	19,1	57,8
			378	244	0,65	18,2	61,8
			379	163	0,47	23,5	64,4
10	-	-	378	192	0,51	18,7	50,9
			400	184	0,46	19,5	50,3
			374	194	0,52	20,2	40,2
			363	158	0,44	20,3	50,6
4	-	-	417	277	0,66	14,9	33,5
			426	283	0,66	11,3	23,9
			414	263	0,64	13,1	29,6
14	-	експлуатований з тріщинами	337	284	0,84	8,0	16,5
			342	274	0,80	-	-
			317	221	0,70	7,6	25,2
			343	208	0,61	-	-

Після механічних випробувань за температури 20 °С зразки після 14832 годин експлуатації з глибиною науглецьованого шару до 1,8 мм мають характеристики міцності і пластичності, що відповідають діючим вимогам. Хоча можна зауважити певне зниження величин  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ , а особливо  $\delta$  і  $\psi$ . Про значні дегредаційні процеси свідчить великий інтервал значень величин  $\delta$  і  $\psi$  та велике зменшення відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ . Твердість науглецьованого шару дорівнює 207 НВ, зовнішньої поверхні 156 НВ. Але зростання науглецьованого шару до 1,9 мм і більше веде до різкого падіння характеристик пластичності:  $\delta$  до 13,1% - 14,9%, інтервал значень  $\psi$  значно більший і лежить в інтервалі 20,1% - 34,6%. Значного зменшення  $\sigma_b$  і  $\sigma_{0,2}$  при цьому не відмічається.

Зразки з труб Б після 55440 годин експлуатації мають високі показники міцності, що характерно для загартованого стану. Разом з тим, відзначається зменшення величини  $\psi$ , а особливо свідчить про деградаційні процеси зменшення величини відносного видовження  $\delta$  до значень 13,2% – 17,0%. Такий характерний показник деградації сталі як відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$  порівняно до вихідної сталі збільшився і знаходиться в інтервалі 0,79 – 0,99. Ударна в'язкість знаходиться в межах норми.

Після експлуатації протягом 71280 годин труби В мають високі показники міцності. Але відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$  як і для труб з часом експлуатації 55440 годин, суттєво збільшилось і лежить в інтервалі 0,82 – 0,97. Відбувається подальше зменшення величин  $\delta$  і  $\psi$ . Особливо різке падіння величини відносного видовження, значення  $\delta$  лежать в діапазоні 9,8% – 16,4%. Відмічається також суттєве зменшення величини ударної в'язкості КС до величин  $6,50 \cdot 10^5 - 7,35 \cdot 10^5$  Дж/м<sup>2</sup>. Кут загину складає лише 30°, випробування на сплющування зразки не витримали. Твердість науглецьованого шару дорівнює 285 НВ, а центральної частини металу – 229 НВ. Загалом це свідчить, що після експлуатації протягом 71280 годин відбулось окрихчення сталі труб і продовжилось зниження механічних характеристик.

Дослідження механічних характеристик сталі вирізаної з труби №2 після 14832годин експлуатації за температури 400 °С свідчать про значне зменшення характеристик міцності, показники пластичності з зростанням температури практично не змінилися. Це обумовлено структурними змінами металу по тривалій експлуатації за високої температури.

Металографічні дослідження сталі труб виявили науглецьований шар на всіх трубах, крім тих, що відпрацювали 5540 годин. Труби мають різні типи мікроструктури, що можна пов'язати з неоднаковим температурним полем за час експлуатації. Саме тому науглецьований шар в трубах має відмінності за глибиною і характером структури.

В поверхневій зоні, де насичення вуглецем більше ніж 0,8% – 0,9% сформувалась структура перліт + цементит. Тут утворилась, так звана, заевтектоїдна зона. Потім йде структура перліт + сорбіт. Мікроструктура метала в середньому перерізі труб – бейнітна. В поверхневій зоні з вмістом вуглецю близько 0,8% сформувалась структура перліту, що є характерним для евтектоїдної зони, після якої розташована структура перліт + ферит. В металі труб, де насичення поверхневого шару менше 0,7% сформувалась структура перліт + ферит. Це так звана доевтектоїдна зона. Мікроструктура метала в середньому перерізі труби крупнозерниста, бейнітна.

В металі труб після 71280 годин експлуатації в поверхневому шарі сформувалась структура перліту, після якої розташовується суміш перліт + тросто - мартенсит. Мікроструктура метала в середньому перерізі труб тросто – мартенсит. На зовнішній поверхні труби А відмічається нерівномірна газова корозія глибиною 0,2 – 0,5 мм. Шар продуктів корозії на внутрішній поверхні складає 0,15 – 0,2 мм. На зовнішній і внутрішній поверхнях труб Б відмічається нерівномірна корозія глибиною 0,04 – 0,2 мм і 0,07 – 0,5 мм відповідно.

З зовнішньої поверхні труб В відмічається незначна корозія по границям зерен глибиною 0,02 – 0,05 мм, з внутрішньої сторони розташовується шар продуктів корозії глибиною 0,18 – 0,35 мм з сіткою тріщин, через які і відбулось насичення металу труби вуглецем на глибину 0,5 мм.

Отже, для сталі 15X5М можна зробити висновок, що механічні характеристики міцності і пластичності є чутливими показниками ступеня її деградації. Необхідно відмітити, що після тривалої експлуатації в умовах високих температур, внаслідок структурних змін, значно знизились показники пластичності, що пояснюється науглецюванням металу. В цілому зросли міцнісні характеристики. Діапазон змін характеристик суттєво залежить від температурного поля в якому знаходилась труба при експлуатації.

### 3.2 Дослідження сталі 12Х1МФ

Для виготовлення паропроводів, які працюють за високих температур часто використовується низьколегована сталь 12Х1МФ. Предметом досліджень була вибрана сталь, з якої були виготовлені труби котельної установки ТЕЦ-2, які відпрацювали близько 90680 годин (10 років). Паливо – природний газ. Тиск пари усередині труб змінювався в інтервалі 14,692÷16,212 МПа. Досліджувались лише прямолінійні ділянки пароперегрівальних труб, ділянки що містять гни працюють в суттєво інших умовах.

Труби експлуатувались у температурному полі з середньою температурою 556 °С і 524 °С. Температура випробувань складала 560 °С. В ході експериментів розглядались зразки виготовлені з труб, що відпрацювали 29632, 52438 і 90680 годин відповідно. При проведенні аналізу змін механічних характеристик крім основних характеристик міцності  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$  (рис. 3.1) і пластичності  $\delta$ ,  $\psi$  (рис. 3.2), внаслідок відсутності даних про характеристики сталі на момент поставки, підраховувалась величина  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$  (рис.3.3).

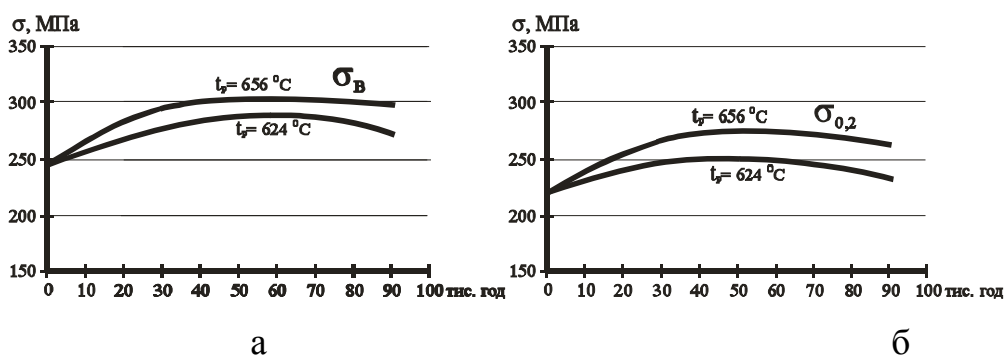


Рис. 3.1 Зміна в часі  $\sigma_b$  (а) і  $\sigma_{0,2}$  (б) сталі 12Х1МФ

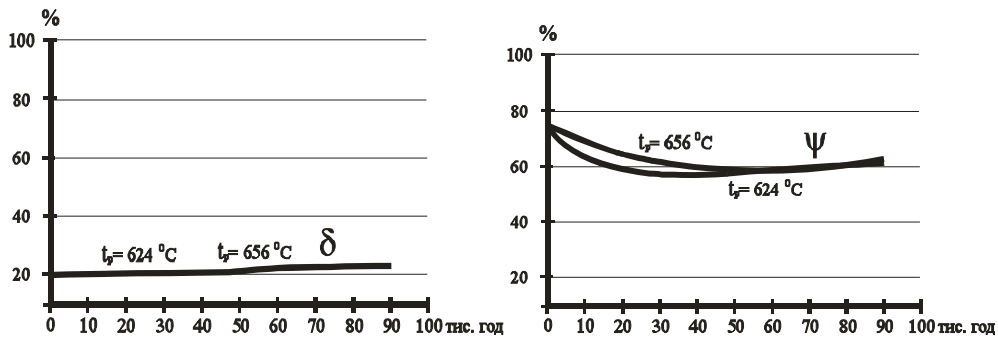


Рис. 3.2 Зміна в часі  $\delta$  (а) і  $\psi$  (б) сталі 12X1МФ

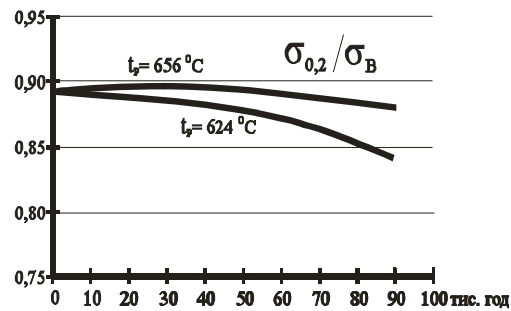


Рис.3.3 Зміна в часі  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$

З графіків видно, що за робочої температури 656 °С відмічається тенденція підвищення механічних характеристик на першому етапі експлуатації і певне розміцнення на кінцевій стадії, але навіть після 90680 годин експлуатації величина границі міцності і умовної границі текучості більші ніж на початку роботи. Зміна величини  $\delta$  відзначаються стійкою і практично лінійною тенденцією до збільшення. Відносне звуження проявило тенденції протилежні до змін характеристик міцності. Можна константувати, що приблизно після 40000 годин  $\psi$  практично не змінюється, тобто є не чутливою до процесів пов'язаних з деградацією сталі. Відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$  з збільшенням часу експлуатації характеризується послідовним зменшенням, що підтверджує для даного випадку раціональність використання цього показника для оцінювання деградаційних процесів.

Отримані данні підтверджують висновок, що метал труб паропроводів, виготовлених з низьколегованих сталей, на початкових етапах експлуатації зміцнюються. Структурні зміни, що супроводжують деградаційні процеси внаслідок дії високих температур, обумовлюють процеси розміцнення за

більш тривалих термінів експлуатації, що спостерігалось для цих сталей на інших підприємствах за схожих умов роботи [48].

Аналіз результатів досліджень сталі, що працювала в температурному полі з середньою робочою температурою 624 °С доводить, що відмічені раніше тенденції змін механічних характеристик в цілому зберігаються. Загальним є збільшення характеристик міцності на першому етапі експлуатації, певне розміцнення на завершальному етапі. Слід відзначити, що значення величин границі міцності і умовної границі текучості все одно більші, ніж на початку роботи.

В результаті обробки експериментальних даних встановлено, що зміна в часі величин  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ ,  $\delta$  і  $\psi$  може бути описана загальним рівнянням:

$$f(\sigma_{0,2}, \sigma_{0,2}/\sigma_b, \delta, \psi) = k + mt - nt^2,$$

де  $k$ ,  $m$ ,  $n$  – сталі величини;

$t$  – час, тис. год.

Значення величин  $k$ ,  $m$ ,  $n$  наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Значення величин  $k$ ,  $m$ ,  $n$  для температури 656 °С

	$k$	$m$	$n$
$\sigma_{0,2}$	226,5972	1,7215	0,0149
$\sigma_b$	251,2005	1,9428	0,0161
$\sigma_{0,2}/\sigma_b$	0,8912	0,0003266	0,000001
$\delta$	20,0796	-0,020775	-0,0004834
$\psi$	79,4404	-0,71948	-0,006008

Для температури 624 °С функціональні залежності аналогічні, відповідні сталі величини наведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

Значення величин  $k$ ,  $m$ ,  $n$  для температури 624 °С

	$k$	$m$	$n$
$\sigma_{0,2}$	221,336	-0,233819	-0,009021
$\sigma_b$	238,3691	0,1662488	-0,006517
$\sigma_{0,2}/\sigma_b$	0,898	-0,00204	-0,000025
$\delta$	20,0796	-0,020775	-0,0004834
$\psi$	80,82434	-1,001878	-0,0097948

Порівняння змін у часі механічних характеристик сталі труб пароперегрівачів виготовлених зі сталі 12Х1МФ, які пропрацювали за різних робочих температур, довів, що температура експлуатації суттєво впливає на зміну механічних характеристик. Доведено, що збільшення температури експлуатації веде до більш стрімкого підвищення характеристик міцності  $\sigma_{0,2}$  і  $\sigma_b$ . Причому функціональна залежність характеристик міцності в часі практично не залежить від температури експлуатації. Характеристики пластичності  $\delta$  і  $\psi$  на початкових етапах експлуатації за різних температур експлуатації проявили протилежні тенденції:  $\psi$  – зменшувалось, а  $\delta$  – зростало. Різницю в змінах механічних характеристик залежно від температури можна пояснити різною ступінню структурних перетворень в металі залежно від відстані до форсунки, що обумовило різний градієнт температур і відповідну робочу температуру біля труби.

Аналіз наведених функціональних залежностей характеристик міцності і пластичності дозволяє зробити висновок, що характеристики міцності  $\sigma_{0,2}$  і  $\sigma_b$  і комплексний показник  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$  є найбільш чутливі до деградації сталі. Використання комплексного показника раціонально у випадку відсутності даних про механічні характеристики конкретної партії сталі на момент початку експлуатації. Чутливість  $\sigma_{0,2}$  і  $\sigma_b$  до деградації в часі для наведеного випадка практично однакові. Характеристики пластичності менш чутливі і в даному випадку не можуть адекватно свідчити про деградації сталі в часі.

### 3.3 Дослідження сталі JIS G3458 STPA22

Об'єктом досліджень була вибрана сталь марки JIS G3458 STPA22, з якої були виготовлені труби системи пароутворення цеху синтетичного аміаку 1-Б ПрАТ “Северодонецьке об'єднання Азот”. Сталь JIS G3458 STPA22 є конструкційною оццаннолегованою сталлю, яка використовується для виготовлення пароперегрівачів, паропроводів, колекторів, фланців, що довгостроково працюють за температури до 500 °С.

За хімічним складом досліджувана сталь близька до вітчизняної сталі марки 15ХМ (ГОСТ 4543-71).

Система пароутворення входить в блок парового риформінгу і призначена для отримання пари під тиском не більше 109 кгс/см<sup>2</sup> (надлишкового) з температурою 480 - 482 °С, що необхідно для парової конденсаційної турбіни з регулюючим відбором пари, яка є приводом трикорпусного відцентрового компресора азотоводневої суміші. До моменту дослідження трубопровід знаходився в експлуатації 162904 години (30 років).

Мікроструктура основного металу труб ферито-перлітна. Перліт зернистий. Сфероїдизація перліту відповідає 2-3 балу. Мікропошкодження металу труб і зварних з'єднань не виявлено. Проведений аналіз вмісту карбідів в різні періоди експлуатації наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7

Карбідний аналіз металу вирізки труби Ø508×44,4 мм

№ п/п	Час експлуатації	Cr (%)	Mo (%)	Mn (%)
1	Вихідний стан (Сертифікат заводу виробника)	11,3	8,3	6,5
2	38880 годин експлуатації	16,4	21,6	14,9
3	162904 години експлуатації (вирізка №1)	29,41	31,66	20,8
4	162904 години експлуатації (вирізка №2)	24,54	31,60	17,73

За результатами карбідного аналізу, з урахуванням результатів після 38880 годин експлуатації, з твердого розчину в карбіди перейшло 4,6%-7,9% хрому і молібдену. Металографічні дослідження металу вирізки проведені на шести мікрошліфах, вирізаних з двох котушок основного металу і на 9 макро- і мікрошліфах, вирізаних із трьох зварних з'єднань. Після експлуатації протягом 162904 годин виявлена сфероїдизація і часткова коагуляція сфероїдів цементиту в матриці і по границях зерен. Сфероїдизація перліту відповідає 2 - 3 балу за шкалою Е ОСТ 34 - 70 - 690 - 96.



Механічні дослідження на розтяг проводили на стандартних зразках на машині Р-5М згідно з ГОСТ 1497-84. Досліджували тільки прямолінійні ділянки труби  $\text{Ø}508 \times 44,4$  мм, яка експлуатувалась за робочої температури  $485^\circ\text{C}$ . Температура випробувань складала  $20^\circ\text{C}$  і  $500^\circ\text{C}$ . В ході експериментів розглядали зразки виготовленні з труби, що відпрацювали 38880, 70000, 108460 і 162904 годин. Характеристики сталі на момент початку експлуатації вибирали на основі сертифікату заводу виробника. Зразки виготовляли з орієнтацією волокон паралельно поздовжній осі труби і визначали тимчасовий опір  $\sigma_b$  (рис. 3.4а), умовна границя текучості  $\sigma_{0,2}$  (рис. 3.4б), а також комплексний показник  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$  (рис. 3.5).

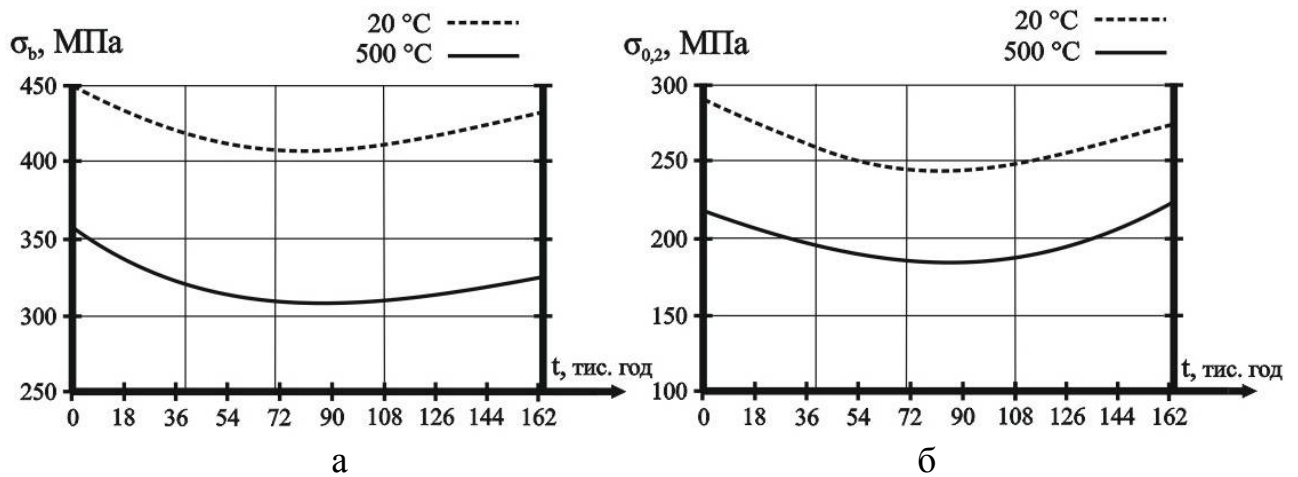


Рис. 3.4 Зміна тимчасового опору  $\sigma_b$  (а) та умовної границі текучості  $\sigma_{0,2}$  (б) з часом експлуатації

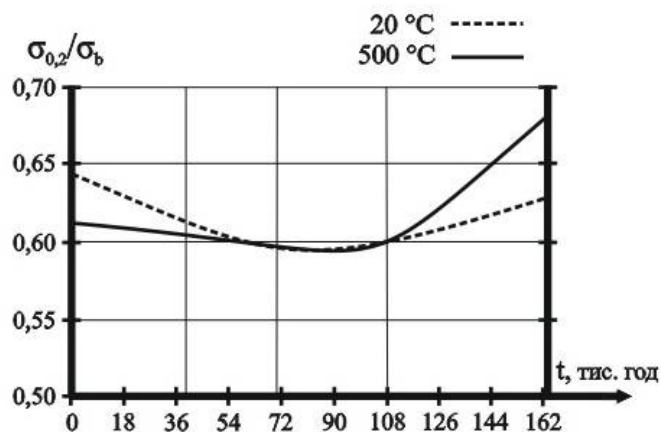


Рис. 3.5 Зміна комплексного показника  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$  з часом експлуатації

Встановлено, що згідно з характером зміни в часі тимчасового опору  $\sigma_b$  сталі за температури випробувань 20 °С і 500 °С, на першому етапі експлуатації матеріал дослідженої труби підлягав розміцненню, а другий етап навпаки характеризувався певним зміцненням. Аналіз характеру зміни в часі умовної границі текучості  $\sigma_{0,2}$  доводить, що відмічені раніше тенденції в цілому зберігаються. Спільними є зменшення характеристики на першому етапі експлуатації до 70000 годин роботи, певне зміцнення на кінцевій стадії експлуатації, але після 162904 годин експлуатації за температури випробувань 500 °С величина умовної границі текучості  $\sigma_{0,2}$  все одно на 2% більша порівняно зі значенням цієї ж величини на момент початку експлуатації.

В результаті обробки експериментальних даних встановлено, що тенденція зміни в часі тимчасового опору  $\sigma_b$  описується рівнянням:

$$\sigma_b = k + mt + nt^2,$$

де  $k$ ,  $m$ ,  $n$  – сталі величини;

$t$  – час, тис. год.

Значення величин  $k$ ,  $m$ ,  $n$  наведено в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8

Значення величин  $k$ ,  $m$ ,  $n$  для рівняння тимчасового опору  $\sigma_b$

Температура випробування, °С	$k$	$m$	$n$
20	447,2296	-1,0793	0,0068
500	357,4146	-1,3401	0,0084

Тенденція зміни в часі умовної границі текучості  $\sigma_{0,2}$  описується наступною функціональною залежністю:

$$\sigma_{0,2} = a + bt + ct^2,$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – сталі величини;

$t$  – час, тис. год.

Значення величин  $a$ ,  $b$ ,  $c$  наведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9

Значення величин a, b, c для рівняння умовної границі текучості  $\sigma_{0,2}$ 

Температура випробування, °С	a	b	c
20	294,0885	-1,1811	0,0067
500	220,6385	-0,6645	0,0052

Комплексний показник  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$  змінюється в часі за наступною функціональною залежністю:

$$\sigma_{0,2}/\sigma_b = d + gt + ht^2,$$

де d, g, h – сталі величини;

t – час, тис. год.

Значення величин f, j, p наведено в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10

Значення величин f, j, p для рівняння комплексного показника  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ 

Температура випробування, °С	d	g	h
20	0,645683	-0,0009883	0,0000065
500	0,617411	-0,0004891	0,0000043

Приведені дані свідчать, що такі характеристики міцності як  $\sigma_{0,2}$  та  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$  залишаються чутливими протягом тривалої експлуатації і можуть бути використані для опису деградаційних процесів. Для трубних сталей крім характеристик міцності унормованими величинами є характеристики пластичності і ударної в'язкості. Перехід хрому і молібдену в карбіди, що утворились на границі зерен металу, дозволяє прогнозувати принаймні зменшення ударної в'язкості.

## РОЗДІЛ 4

### АНАЛІЗ ХАРАКТЕРУ ЗМІН МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУБНИХ СТАЛЕЙ В АГРЕСИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Аналізуючи отримані дані з досліджень зміни характеристик оцадно легованих сталей 15X5M, 12XM1Ф, JIS G3458 STPA22, які пропрацювали значний термін в агресивних середовищах, характерних для виробництв хімічної і нафтопереробної галузей, можна відмітити спільні тенденції, притаманні деградації названих сталей.

При проведенні такого аналізу пропонується розглядати зміну механічних характеристик, з врахуванням результатів механічних статичних випробувань, досліджень на втому, корозійну втому, удар, металографічні дослідження структури сталі[49].

Практично всі проведені випробування показують у сталей після тривалої експлуатації збільшення величин  $\sigma_b$  і  $\sigma_{0,2}$ , що свідчить про зміцнення сталей з часом. Але перший тап експлуатації може спочатку характеризуватися розміцненням, наприклад, це характерно для сталі JIS G3458 STPA22. Тенденція змін на першому етапі експлуатації залежить від температури, за якої експлуатується теплообмінник.

Проблема порівняння з базовим значенням (тобто відсутністю даних про ці показники у сталей на момент початку експлуатації) може бути частково усунута введенням комплексного показника  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ . Так, коли для низьколегованих сталей, що не були в експлуатації, рекомендовано  $\sigma_{0,2} / \sigma_b$  в інтервалі 0,65 – 0,70, то у сталей, що були тривалий час в експлуатації, верхня границя може зміщуватись до 0,50 – 0,51, або навпаки зростає до величин 0,9 – 0,99, що говорить про більш стрімке зростання значень  $\sigma_{0,2}$  порівняно з  $\sigma_b$ . Але тенденція до зміни показника  $\sigma_{0,2} / \sigma_b$  з часом експлуатації є стійкою. Особливо чутливим він є у хромистої середньолегованої сталі 15X5M. Коли у сталі, що не була в експлуатації, він знаходиться в інтервалі 0,69 - 0,71, то після 71280 годин експлуатації він зріс

до 0,79 - 0,99. Коли порівнювати абсолютні зміни значень  $\sigma_{0,2}$  і  $\sigma_b$ , то слід зазначити, що в переважній більшості досліджених випадків абсолютна величина  $\sigma_{0,2}$  змінюється більше. Отже, за наявності для порівняння металу з тієї ж партії поставки, оцінка ступеня деградації за допомогою  $\sigma_{0,2}$  більш доцільна. В інших випадках краще використовувати комплексний показник.

Інформативним серед механічних характеристик, що характеризують деградацію сталі, є відносне видовження і ударна в'язкість. Яку наведених дослідженнях так і з літературних даних, присвячених питанням деградації оццаннолегованих сталей відмічається зменшення величини відносного видовження від 19% до 50%. Різниця суттєво залежить від середовища, в якому експлуатувались сталі і, мабуть, від терміну експлуатації.

Ударна в'язкість є досить інформативною величиною. Незважаючи на те, що інтервал змін абсолютних значень КС досить широкий: від 4% до 15%, а за деякими джерелами – до 50%, оцінка деградації, використовуючи тільки КС, проблематична за рахунок значного розкиду результатів і труднощі вибору базового значення від якого ведеться підрахунок. Хоча зміна абсолютної величини КС значна.

Завдяки зміцненню сталі з часом, а в деяких випадках і розшаруванню матеріалу, відносне звуження є менш інформативним показником деградації внаслідок відсутності регламентації його для більшості сталей у вигляді виробів (наприклад, труб), а отже складності порівняння. Можливо, що на цей показник більшою мірою, ніж на відносне видовження, впливають такі фактори, як неметалеві включення, утворені карбіди і інші включення, каверни тощо.

Всі вищеназвані механічні характеристики значною мірою пов'язані з величиною наводнювання сталі. В хімічній і нафтопереробній промисловості наводнювання відбувається внаслідок дії середовищ, що містять в своєму складі зв'язаний водень, і хімічних реакцій, в результаті яких утворюється вільний водень, який і дифундує поступово в глиб металу.

Джерелом водню можуть бути складові продукту транспортування трубопроводом (нафта, газ тощо), а також вільний водень як результат катодних реакцій при застосуванні катодного захисту при неоптимально вибраних значеннях потенціалу катодного захисту. В окремих випадках ці процеси можуть протікати одночасно: з середини окрихчення сталі воднем внаслідок його виділення в результаті хімічних реакцій, а ззовні в результаті протікання катодних реакцій. В другому випадку водневій корозії притаманний змішаний механізм: перша стадія, що пов'язана з наводнюванням металу, протікає за електрохімічним механізмом, а друга, пов'язана зі зневуглецюванням сталі - за хімічним механізмом. Окрихчення ж обладнання воднем, як правило, обумовлено лише дифузією водню внаслідок протікання хімічних реакцій.

Вимірювання твердості металу обладнання і трубопроводів, а також зварних швів, мабуть, не може у всіх випадках свідчити про ступінь деградації металу. Справа в тім, що вимірювання твердості обумовлено досить невеликими деформаціями, а в зв'язку з окрихченням сталі в більшості випадків, чутливість цього показника для оцценолегованих сталей з часом буде падати.

Загальною тенденцією, особливо за підвищених температур, є подрібнення зерна металу. Часто місця стрічкового накопичення неметалевих включень є джерелами розшарування металу, частіше вздовж напрямку прокату. Після деформаційного старіння у перліті утворюються дислокації в феритних проміжках між цементитними пластинами. Крім того, практично у всіх випадках відмічається підвищена стрічковість структури. В окремих випадках розшарування заповнені неметалевими включеннями сірого кольору, інколи утворюються „колектори” і навіть ланцюжки „колекторів”. Неметалеві включення можуть бути представлені оксидами, сульфідами, силікатами. В місцях розшарувань кількість сульфідів характеризується 3-4 балами.

В окремих випадках, поряд з подрібненням зерна відмічається структурна неоднорідність. Можна відмітити наявність окремих феритних полів і чисто феритні стрічки.

Суттєвий вплив на зміну структури сталі має середовище і умови експлуатації, особливо температура. Тому, напевно, про такий показник деградації сталей як зміна структури можна говорити в межах адекватних умов експлуатації. Слід підкреслити, що завдяки великому розкиду даних при аналізі структурних перетворень, можливо лише прогнозувати тенденції в розвитку процесу деградації сталей. Використання точних методів прогнозування, наприклад за складом карбідних фаз або розмірами карбідів можливо тільки в окремих випадках.

Слід відмітити, що динаміка змін згаданих вище механічних величин і «відносна шкала» змін механічних характеристик різна. Коли для напружень характерним є збільшення їх абсолютних значень з часом, то для відносного видовження, відносного звуження і ударної в'язкості притаманне зменшення абсолютних значень. Схожі висновки наводяться в роботах для інших умов експлуатації [50].

Не дивлячись на виявлені спільні тенденції змін механічних характеристик різних сталей, залежно від середовища експлуатації і призначення обладнання використання окремих механічних характеристик для оцінювання ступені деградації може мати своє специфічне значення і вагомість. Наприклад, для оцінки ступеня старіння і деградації профільного прокату, що працює в умовах динамічних навантажень, більш важливою є оцінка зміни ударної в'язкості. Мабуть, в окремих випадках певне зміцнення сталі може мати і позитивний результат, наприклад у вигляді загального зміцнення конструкції.

Підсумовуючи наведені факти, можна зробити висновок, що якийсь один показник або механічна характеристика не можуть однозначно характеризувати ступінь деградації сталі. В той же час комплексне

дослідження і аналіз дозволяють оцінити ступінь старіння і деградації сталі і з певною вірогідністю прогнозувати залишковий ресурс.



## ВИСНОВКИ

Результатом проведеної роботи є визначення характеру змін механічних характеристик труб теплообмінного обладнання за тривалої експлуатації в агресивному середовищі.

Наведені результати досліджених сталей показують тенденції змін характеристик міцності. Відмічені структурні зміни металу, що відбуваються за тривалої експлуатації. Зміни структури і корозійні пошкодження індивідуальні для кожної з досліджених сталей. Це обумовлено різними температурними режимами експлуатації і специфічним робочим середовищем в трубах

Запропонований підхід аналітичного опису змін механічних характеристик в часі, незважаючи на різні механізми деградації, дозволяє прогнозувати тенденції змін і орієнтовні значення характеристик міцності при подальшій експлуатації.

На основі отриманих графіків будуються математичні моделі деградаційних процесів, що відбуваються. В цілому, ґрунтуючись на рівняннях змін механічних характеристик можна орієнтовно прогнозувати залишковий ресурс обладнання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Семенова Н.В. Коррозия и защита от коррозии / Семенова Н.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. – М.: Физматлит, 2002. – 336 с.
2. Надежность и эффективность в технике: справочник: В 10Т. - М.: Машиностроение, 1986.
3. Коррозионная стойкость оборудования химических производств: Способы защиты оборудования от коррозии: Справ. руководство / Под ред. В.Б. Строкана, А.М. Сухотина. – Л.: Химия, 1987.
4. Глазунов, М.П. Методы исследования процессов коррозии / М.П. Глазунов. / Обмен опытом в радиопромышленности. – 1984. – Вып.2 - С.20-23.
5. Деградація сталей в агресивних середовищах, залишковий ресурс обладнання і корозійний моніторинг /О.Г. Архипов, В.А. Борисенко, М.С. Хома, О.В. Любимова-Зінченко. – Луганськ: Вид.-во СНУ ім. В. Даля. 2016.- 204 с.
6. Механіка руйнування і міцність матеріалів / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Т.10: Міцність та довговічність нафтогазового обладнання / Під ред. В.І Похмурського, Є.І. Крижанівського. – Львів – Івано-Франківськ: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2006. – 1193 с.
7. Акользин П.А. Предупреждение коррозии металла паровых котлов. М. Энергия, 1975, 259 с.
8. Королев Ю.В. Защита оборудования от коррозии / Ю.В. Королев, В.Е. Путилов. - Л.: Машиностроение, 1973.
9. Кузюков А.Н. Теория и практика коррозии и защита металлов и оборудования химических и нефтехимических производств. Луганск: Из-во Восточнoукраинского национального университета им. В. Даля, 2004, 184 с.

10. Кульман, А.Г. Общая химия / А.Г. Кульман. – М.: Изд-во. сельскохоз. литер, 1961, 374 с.
11. Жук Н.П. Курс коррозии и защиты металлов. М.: Metallurgia, 1968, 405 с.
12. Андреев И.Н. Введение в коррозиологию: Учебное пособие. - Казань: Изд-во Казанского государственного технологического ун-та, 2004.-140 с.
13. Структура и коррозия металлов и сплавов: Атлас. Справ. Изд. / Сокол И.Я. и др. М.: Metallurgia. 1989. - 400 с.
14. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений. Т. 1. Под редакцией А.А. Герасименко. М.: Машиностроение, 1987. - 687 с.
15. Крижанівський Є.І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання. Т.1 / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин // Івано-Франківськ- Львів, 2011. – 457 с.
16. Томашов Н.Д., Чернова Г.П. Коррозия и коррозионно-стойкие сплавы. М.: Metallurgia, 1973. – 281 с
17. Стеклов О.И. Стойкость материалов и конструкций к коррозии под напряжением. М.: Машиностроение. 1990. - 384с.
18. Защита металлов, 1980, № 4, с.422; 2000, № 2, с.195; 2000, № 4, с.438.
19. ГОСТ 9.101-78. Единая система защиты от коррозии и старения. Основные положения.
20. ГОСТ 9.311-87. Единая система защиты от коррозии и старения. Основные положения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Метод оценки коррозионных поражений.
21. Поникаров И. И., Перельгин О. А., Доронин В. Н., Гайнуллин М. Г. Коррозия нефтехимического оборудования — М.: Машиностроение, 1989. — 368 с.
22. Ермаков В.И., Шеин В.С. Ремонт и монтаж химического оборудования: Учебное пособие для вузов. – Л.: Химия, 1981. – 368 с.

23. Жуков Р. Ю. Предотвращение коррозии теплообменных труб парогенераторов действующих АЭС с ВВЭР. Подольск, 2016.-124с.
24. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Введ.1990-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1990. 38 с.
25. ДНАОП 0.00-1.07-94 Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. Харьков.: Форт. 2009.175с.
26. Маннапов Р. Г. Оценка надежности химического и нефтяного оборудования при поверхностном разрушении // Обзорн. информ. Сер. ХМ-1. М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1988.
27. РД 26.260.004.-91. Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации «Нефтегазовое дело». 2016. №1
28. ГОСТ 14249—89 (СТ СЭВ 3648-82). Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
29. ГОСТ 25859—83. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках.
30. РД 50-490-84 "Методические указания. Техническая диагностика. Методика прогнозирования остаточного ресурса машин и деталей по косвенным параметрам".
31. ГОСТ 23942-80. Оценка показателей качества продукции по изменениям контролируемого образца.
32. Юмагузин У. Ф. Баширов М. Г. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования предприятий нефтегазовой отрасли// Фундаментальные исследования. 2014. № 3. С. 277-280.
33. Махутов Н. А. Гаденин М. М. Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности: учеб. пособие/ под общ. ред. В. В. Ключева. М.: Изд. дом «Спектр», 2011. 187 с.
34. Основные результаты научных исследований и прикладных разработок по проблемам безопасности природно-техногенной сферы 1991-

2001 гг./Н. А. Махутов, К. В. Фролов, М. М. Гаденин и др.// Проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. Ч.1. 2002. № 1. С. 18-63; Ч. 2. 2002. № 2. С. 24-67.

35. Барышов С. Н. Оценка поврежденности, несущей способности и продление ресурса технологического оборудования: монография. М.: Недра-Бизнесцентр, 2007. 287 с.

36. Кузеев И. Р., Захаров Н. М., Евдокимов Г. И. Повреждаемость колонных аппаратов нефтегазопереработки и нефтехимии. Уфа. 1997. 54 с.

37. Наумкин Е. А. Оценка долговечности аппаратов, подверженных малоцикловой усталости, по скорости ультразвука (на примере стали 09Г2С): Уфа. УГНТУ. 2000. 112 с. 213 © Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2016. №1

38. ГОСТ 18353-79 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.

39. Кондрашова О. Г. Наумкин Е. А., Кузеев И. Р. Определение ресурса безопасной эксплуатации нефтегазового оборудования путем оценки адаптивных свойств металла по изменению его магнитных характеристик // Мировое сообщество: проблемы и пути решения: сб. статей/ УГНТУ. Уфа, 2006. С. 16-26.

40. Баширов М. Г. Обеспечение безопасности эксплуатации и оценка ресурса оборудования для переработки нефти электромагнитными методами диагностики: дис. ... д-ра техн. наук. Уфа: УГНТУ. 2002. 361 с.

41. Кузеев И. Р. Шарипкулова А. Т., Наумкин Е. А. Критерии технического состояния оборудования по отклику электромагнитного сигнала// Остаточный ресурс нефтегазового оборудования: сб. ст. Уфа: 2007. С. 101-110. «Нефтегазовое дело». 2016. №1

42. Изменение напряженно-деформированного состояния змеевиков печей пиролиза в процессе эксплуатации/ А. Г. Чиркова, И. Р. Кузеев, С. В. Попова, А. Н. Васильев// Нефтегазовое дело: науч. техн. журн. 2011. Т. 8, № 1. С. 78-82.

43. Кузеев М. И. Закономерности накопления повреждений в сварных соединениях оболочек реакторов установок замедленного коксования: Уфа. УГНТУ. 2000. 20 с.

44. Расчетно-экспериментальный метод оценки деградации механических свойств сталей в условиях высокотемпературного процесса пиролиз/ А. Г. Чиркова, Н. А. Махутов, М. М. Гаденин, М. И. Кузеев, В. В. Фахрутдинов// Диагностика материалов. 2009. Т. 75, № 9. С.51-53. 215 «Нефтегазовое дело». 2016. №1

45. Ковшова Ю. С., Наумкин Е. А., Кузеев И. Р. Накопление повреждений в материале сосудов давления при длительном воздействии квазистатической нагрузки // Актуальные проблемы технических, естественных и гуманитарных наук: Материалы Междунар. науч.-техн. конф., 20 ноябр. 2013 г. Уфа, 2013. Вып. 7. С. 98-101.

46. Барышов С. Н. Разработка методического подхода к анализу рассеяния характеристик повреждений и оценке вероятности разрушения оборудования, длительно эксплуатируемого в H<sub>2</sub>S-содержащих средах// Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2008. № 7. С. 22-29.

47. Махутов Н. А., Таранов Р. А., Качанов С. А. Оптимизация мероприятий по повышению защищенности критически важных для национальной безопасности объектов Российской Федерации и населения от угроз техногенного, природного характера и террористических проявлений // Технологии гражданской безопасности. 2010. Т. 7, № 1-2 (23-24). С. 83-88.

48. Архипов О.Г. Дослідження процесів деградації сталі 09Г2С і біметалу на її основі / О.Г. Архипов, О.В. Зінченко, Р.Г. Заїка // Строительство, материало-ведение, машиностроение: сб. научн. трудов. Вып. 53 / Приднп. гос. ак. строит. и archit. – Дн-вск: ПГАСА, 2010. –С. 131-135

49. Архипов О.Г. Аналіз чутливості механічних характеристик до деформаційного старіння / О.Г. Архипов // Вісник СНУ ім. В.Даля, № 13 (202). – 2013. –С. 74-79

50. Архипов О.Г. Зміна структури і механічних характеристик як показники деградації металу в корозійно-активному середовищі/ О.Г. Архипов // Фізико-хімічна механіка матеріалів. Спец. випуск №10, Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів. -Львів, 2014. –С. 59-62