

Міністерство освіти і науки України
Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля

Кафедра " Машинознавства та обладнання промислових підприємств "

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проекту (роботи) на тему:

Деградація металу аміакопроводу і визначення критичного терміну експлуатації.

Здобувач вищої освіти гр. ОХП – 17дм _____ Пилипець Є.С.

2019 р.

РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему: «Деградація металу аміакопроводу і визначення критичного терміну експлуатації».

Ключові слова: деградація, аміакопровід, корозія, в'язко-крихкий перехід.

Дипломна робота: листів – 66, ілюстрацій – 23, таблиць – 6, посилань – 37.

Об'єкт дослідження – аміакопровід «Гольятті-Одеса».

Ціль роботи- визначити стан металу та оцінити залишковий ресурс роботи обладнання.

Метод дослідження - знаходження температури точки в'язко-крихкого переходу.

Для досягнення поставленої мети оцінюється поточний стан металу труб і зварних швів, і аналізується характер змін, що відбулись за час тривалої експлуатації. На цей час в промисловості немає чітких критеріїв оцінювання деградації сталей. В провідних нафтохімічних компаніях використовуються власні методи визначення корозійно-втомних пошкоджень металу обладнання і прогнозування залишкового ресурсу. Інколи вони базуються на аналізі змін структури металу. Також використовуються механічні і електрохімічні характеристики. Одночасно необхідно враховувати масштаб змін конкретної величини в процесі експлуатації. За відсутності затвердженої методики і можливості самостійного вибору дослідником величин чутливих до процесів старіння і деградації, зміна цієї характеристики має бути в процесі експлуатації значно більше ніж похибка при її вимірюванні. В іншому разі використання такої характеристики виглядає сумнівним.

Метою цієї роботи є визначення залишкового ресурсу труб аміакопроводу, базуючись на зміні деяких механічних характеристик металу за час тривалої експлуатації.

Для досягнення поставленої мети, в роботі, були поставлені і вирішені наступні задачі:

- дослідити загальні характеристики металу аміакопроводу;
- проаналізувати і визначити характеристики які суттєво змінюються протягом тривалої експлуатації;

-порівняти характеристики металу у стані поставки, та металу діючого трубопровода на п'яти ділянках;

- визначити стан металу та оцінити залишковий ресурс їх роботи.

У роботі використано методи дослідження механічних характеристик, зокрема, знаходження температури точки в'язко-крихкого переходу. Ця точка характерна тим, що в перерізі руйнування при ударі площа крихкої і в'язкої зон складають по 50%. Доведено, що в процесі тривалої експлуатації ця точка у деградованого металу зміщується. За величиною зміщення цієї точки можна орієнтовно прогнозувати залишковий ресурс цього обладнання.

Робота складається з двох розділів:

У першому розділі обґрунтовано вибір механічних характеристик, чутливих до деградації. Також наведені підходи, що використовуються для оцінювання експлуатаційної деградації металів.

У другому розділі наведено результати досліджень металу ASTM A333 Grade 6, із якого були виготовлені труби аміакопроводу, та оцінено залишковий ресурс. Дослідженням було піддано зразки з п'яти труб різних діаметрів, вирізаних з різних ділянок аміакопроводу.

Результати роботи дозволяють підвищити безпеку експлуатації трубопроводного транспорту і планувати та організовувати ремонтні роботи, ґрунтуючись на результатах наукового прогнозу.

ЗМІСТ

	Стор.
Скорочення та умовні позначки.....	5
Вступ.....	6
Розділ 1. Аналітичний огляд.....	9
Розділ 2. Методи досліджень і обладнання.....	21
Розділ 3. Металографія металу після тривалої експлуатації.....	27
Розділ 4. Дослідження механічних характеристик.....	30
Розділ 5. Техніка безпеки.....	51
Висновки.....	62
Література.....	63

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

- n - статистичний коефіцієнт запасу роботоздатності
- N – коефіцієнт старіння
- $T_{\text{зал}}$ - залишковий ресурс
- x - вибіркова середня
- \bar{x} - незміщеність оцінки генеральної середньої
- S - середнє квадратичне відхилення
- \check{S} - незміщена оцінка квадратичного відхилення:
- U – критерій оцінки
- $\sigma_{0,2}$ - умовна границя текучості
- σ_b - умовна границя твердості
- $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ - комплексний показник
- δ – відносне подовження
- KCV - ударна в'язкість, за V критерієм.
- KCU - ударна в'язкість, за U критерієм.
- σ_T - границя текучості
- $d\sigma/d\varepsilon$ - швидкість деформаційного зміцнення за границею текучості при де-
формаційному старінні

ВСТУП

У світі існує не більше десятка аміакопроводів, що виходять за межі технологічних майданчиків хімічних підприємств. По території України і Росії проходить один з найбільш потужних аміакопроводів (до 2,5 млн. т. на рік) «Гольятті - Одеса». Перша черга аміакопроводу була введена в дію в жовтні 1979 року, повністю трубопровід закінчено будувати і введено в експлуатацію в 1981 році.

Труби були зроблені за радянським замовленням у Франції. Вони мають збільшений діаметр на відміну від 8-дюймових американських трубопроводів. Були вжиті ряд заходів по захисту обладнання від корозії.

Але обладнання все-ж старіє, бо експлуатується вже більш ніж 30 років, почастишали аварії. Отже виникло питання попередження пошкодження труб внаслідок експлуатаційної деградації і корозії та визначення залишкового ресурсу безаварійної роботи. На зараз питання визначення залишкового ресурсу в хімічній і нафтопереробній промисловості є дискусійним. Найчастіше застосовується експертний метод.

Для оцінювання старіння металів і переходу його в стан деградації існують різні підходи [1-6]. Як відомо, деградація може бути обумовлена різними причинами: термічним впливом, дією агресивного середовища тощо. На далі обмежимося розглядом лише експлуатаційної деградації, що відбувається тривалий час за обумовлених для певного технічного об'єкта умов. Для сталей процес експлуатаційної деградації містить сукупність різних процесів і чинників: зміну структури металу, зовнішні пошкодження поверхні, погіршення механічних і електрохімічних характеристик тощо. За умови визначення закономірностей старіння і критеріїв переходу в стан деградації можна було би визначити залишковий ресурс роботи апарату або трубопроводу. Але відсутність чітко визначених критеріїв деградації сталей значно ускладнюють задачу. Для окремих випадків провідні компанії запропонували свої підходи [7, 8], що мають практичне застосування для певних металів і середовищ, що транспортуються.

Поняття ресурсу обладнання і устаткування взаємопов'язано з такою характеристикою як надійність. Надійність обладнання, що працює в корозійному середовищі, забезпечується правильним вибором відповідних конструкційних матеріалів і контролем швидкості корозії при експлуатації обладнання. В нафтопереробній і хімічній галузях виробництва надійність значною мірою залежить від корозійної активності технологічних середовищ і обумовлена процесами корозійно-втомного руйнування. Саме корозійно-втомні процеси для таких виробництв в більшості випадків обумовлюють передчасне руйнування обладнання, а отже в вирішальному ступені обумовлюють надійність роботи обладнання. Як відомо, корозійні процеси в промисловості, а саме в нафтопереробних і хімічних виробництвах, ведуть до суттєвих втрат – незаплановані зупинки виробництва на ремонт, демонтаж і заміна пошкодженого обладнання, що в свою чергу обумовлює матеріальні витрати, зниження якості і збільшення собівартості продукції.

Мабуть, самим простим і логічним методом запобігання аваріям і подовження ресурсу є комплексне обстеження обладнання на основі наукових підходів з використанням відповідного інструментарію. Але задача обстеження всієї поверхні надзвичайно складна, а частіше за все і неможлива через недоступність окремих місць обладнання. За останні роки простежується тенденція впровадження безперервного автоматизованого корозійного контролю обладнання в умовах промисловості, що забезпечує: своєчасне виявлення змін технологічних параметрів, які ведуть до розвитку корозійно-механічних пошкоджень; ранню профілактику корозійного руйнування; своєчасність, об'єктивність даних про корозійний стан і оперативне прийняття заходів протикорозійного захисту, а також оцінку його ефективності.

Є кілька методів визначення корозійних-втомних пошкоджень металу обладнання. Найпоширенішими є: електрохімічні методи; за зміною механічних характеристик; за зміною структури; за величиною мікропошкоженості метала. Окремою і чим далі, тим більш актуальною стає проблема наводнювання металу за тривалої експлуатації. З часом наводнювання веде до утворення мікротріщин та

інших дефектів в металі, а потім і до сутєвих змін механічних характеристик, особливо характеристик пластичності.

Електрохімічні методи мають численні переваги: оперативність отримання характеристик, можливість автоматизації. Але отримувати інформацію, в цьому разі, можливо лише для контрольованої ділянки. Неможливо оцінити стан металу «в цілому». Дослідження механічних характеристик переважно ведеться руйнівними методами, з притаманими їм недоліками. Але аналіз механічних характеристик і їх порівняння з характеристиками металу в стані поставки дозволяє відстежити процеси, що притаманні значним ділянкам газо- нафтопроводів або металу обладнання та апаратури. Аналіз даних досліджень зміни характеристик сталей, які пропрацювали значний термін в агресивних середовищах, дозволяє відмітити спільні тенденції, притаманні деградації цих сталей. При проведенні такого аналізу розглядають зміну характеристик міцності і пластичності при проведенні статичних випробувань, досліджень металу на втому, корозійну втому, удар, металографічні дослідження структури сталі, вимірювання наводнювання тощо.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Більша частина обладнання, що використовується в хімічній і нафтопереробній промисловості, було введено в експлуатацію ще за радянських часів, і запланований ресурс обладнання вже давно вичерпано. У свій час, при будівництві аміакопроводу Тольятті-Одеса-Горлівка, було вжито максимальних заходів для запобігання корозії та збільшення терміну експлуатації трубопроводу. Так метал труб зроблено з оцядно легованої сталі з товщиною стінки 8мм, а в місцях підвищеної небезпеки, та поблизу водойм, був застосований принцип «подвійної труби». На цих ділянках стінки внутрішньої та зовнішньої труби збільшено до 13мм, а між ними міститься азот. Також трубопровід має ізоляційне покриття, та електрохімічний захист. Навіть з середини аміакопровод захищен: транспортуемий продукт являє собою суміш аміака і води у співвідношенні 99,6%-0,4%. Цей невеликий процент води запобігає окисленню металу, із якого зроблена труба. Але не зважаючи на усе це, метал обладнання все ж таки старіє з часом та деградує. Тому актуальним постає питання, скільки ще обладнання може безаварійно працювати, та боротьби з передчасним старінням і корозією металу обладнання. Окрему увагу приділено дослідженню ґрунтової корозії трубопроводу, зокрема проаналізовано зміну швидкості корозії труб в процесі експлуатації трубопроводів хімічної та нафтопереробної галузі. Досліджено вплив умов експлуатації трубопроводу на його надійність та довговічність. Розроблено методикку визначення залишкового ресурсу тривало експлуатованих трубопроводів з врахуванням наявних корозійних дефектів, умов експлуатації, та зміни швидкості корозії тіла труби. Аміакопровод Тольятті-Одеса-Горлівка пропрацював 37 років, а перша черга трубопроводу була введена в експлуатацію ще раніше. [1, 2]. Така тривала взаємодія металу труби з навколишнім середовищем призводить не лише до інтенсифікації корозійних процесів, але й до деградації фізико-механічних властивостей матеріалу стінки труби. Як наслідок, сталь різко окрихчується, в ній утворюються тріщиноподібні дефекти, які можуть спричинити руйнування труби. Річ в тім, що експлуатується метал, з якого виготовлено обладнання поза терміном, на який розраховувались

його характеристики. Отже експлуатується металеве обладнання з невідомими характеристиками і невідомою структурою. Враховуючи велику протяжність аміакопровода, масова заміна його неможлива ні з економічних міркувань, ні з огляду великих обсягів такої роботи. Отже, питання в'яснення характеристик сталей і зварних швів обладнання, що давно експлуатується, зміна їх структури і на підставі цього прогнозування залишкового ресурсу є задачею надзвичайно важливою і актуальною.

В науково-технічній літературі поки що недостатньо відомостей про вплив експлуатаційних факторів на механічні і електрохімічні характеристики конструкційних матеріалів протягом тривалої експлуатації. Практика експлуатації магістральних трубопроводів показує, що їх «життя» складається з наступних трьох етапів.

1. Етап припрацювання, яке триває протягом 3-4 років з моменту введення в експлуатацію. У цей період інтенсивність відмов висока, але швидко знижується за рахунок виявлення та ліквідації грубих будівельних і заводських дефектів.

2. Етап стабілізації – настає після етапу припрацювання і триває приблизно до 15-20 років експлуатації. За цей час всі грубі дефекти виявилися раніше, а нові дефекти (за рахунок корозії і втоми) ще не «виросли» до небезпечних розмірів.

3. Етап старіння – особливо помітний після 20 років експлуатації і характеризується монотонним зростанням інтенсивності відмов за рахунок появи небезпечних корозійних дефектів, втомних тріщин, старіння матеріалів (металу, ізоляції). Як показує аналіз вікового складу більше 75% всіх трубопроводів переживає етап старіння. Тому можна тільки чекати монотонного і неминучого збільшення кількості відмов з кожним роком, якщо не застосовувати спеціальних заходів з підвищення надійності. А за десятки років експлуатації з металом можуть відбутися значні зміни, до яких можуть бути віднесені:

- зміни структури і характеристик сталей від тривалої дії підвищених температур, механічних навантажень і агресивного середовища;
- утворення тріщин за сумісної дії циклічних і статичних навантажень;

- окрихчення металу і зварних з'єднань внаслідок наводнювання при дії статичних і циклічних навантажень;

- корозійно-механічні пошкодження внаслідок дії агресивного середовища;

Крім того, що робіт, присвячених цій проблемі поки що небагато, окрема складність полягає в співставленні отриманих результатів. Залежно від галузі застосування, наявного технічного оснащення і фахового досвіду дослідники приділяють увагу різним сторонам процесу деградації метала. Навіть коли аналізується якийсь один напрямок досліджень, наприклад, механічні характеристики, в ролі „відповідальних” за старіння і деградацію часто виступає різна сукупність таких характеристик. Це, безумовно, значно ускладнює порівняння результатів експериментів. Крім відсутності на цей час єдиної методики проведення досліджень, тут відіграє роль і брак належної кількості зразків, що відпрацювали тривалий термін, і неможливість в окремих випадках виготовлення зразків належного розміру і форми з відпрацьованої сталі, і наявність для порівняння сталей тієї ж марки, що експлуатована, виготовленої за тією ж самою технологією (бажано з тієї ж самої партії), але не бувшої в експлуатації. Необхідно враховувати індивідуальність кожного корозивного середовища, накладеним на нього температурним полем зі статичними і циклічними навантаженнями. Але небезпека експлуатації обладнання з невизначеними характеристиками сталей спонукають до ведення робіт в цьому напрямку.

Аналіз останніх досліджень, пов'язаних з визначенням залишкового ресурсу магістральних трубопроводів, а також в напрямку дослідження наявних корозійних дефектів труб показав відсутність методики прогнозування залишкового ресурсу роботи трубопроводу, яка б одночасно враховувала деградацію фізико-механічних властивостей сталі, умови його експлуатації, наявні корозійні дефекти, виявлені за результатами внутрішньотрубної діагностики та зміну швидкості корозії в процесі експлуатації. Це питання є особливо актуальним для тривало експлуатованих аміакопроводів та нафтопроводів.

Найбільш важливо визначити початок розвитку небезпечних локальних видів корозії: міжкристалітної, пітінгової, корозійного розтріскування, корозійної

втоми. Сигналом початку такого руйнування може бути зміна потенціалу обладнання. Проведені дослідження показують, що залишкові деформації і технологічні фактори, які викликають деформацію мають суттєвий вплив на швидкість протікання локальних видів корозії. Отже при обстеженні обладнання і крупнотонажної апаратури особливу увагу слід звертати на зварні з'єднання, днища, кришки, ділянки опор, тощо. Обстеження обладнання в більшості випадків ведеться неруйнівними методами і лише при аварійних випадках слід застосовувати руйнівні методи досліджень. В тих випадках, коли виявлені дефекти є неприпустимими для подальшої експлуатації за своїм характером (наприклад, тріщини), або за глибиною і конфігурацією (виразки), слід розробити рекомендації для проведення відповідного ремонту.

Для оцінювання ресурсу обладнання одним з головних показників є швидкість корозійних процесів. Ресурс при такому підході визначають шляхом поділу запасу товщини стінки обладнання на швидкість корозії. Розроблено також більш точні методи оцінювання довговічності обладнання при поверхневому руйнуванні стінок, що дозволяє прогнозувати ресурс обладнання з заданою достовірністю. Такі методи дозволяють певною мірою прогнозувати ресурс лише за умови протікання рівномірної корозії. Методи контролю швидкості корозії за допомогою зразків стану поставки, корозиметрів, тощо, дозволяють оцінити тільки середню швидкість поверхневої загальної корозії, але в реальних умовах завжди існують коливання параметрів технологічного процесу. Це може суттєво впливати на розвиток корозії. Визначення ресурсу за середньою швидкістю інколи має оцінку близьку до медіанної, тобто має імовірність 50%. Для оцінювання надійності обладнання з більшою вірогідністю необхідні спеціальні методи [2,3,6].

Для орієнтовного визначення швидкості корозії, а отже і прогнозування залишкового ресурсу використовують методи пришвидшених корозійних досліджень. Такі методи дають змогу отримати необхідну інформацію в більш стислі терміни, ніж за нормальних умов експлуатації. Серед пришвидшених методів розрізняють наступні: форсованих навантажень, екстраполяції, розрахунково-експериментальні і комбіновані. За методом форсованих навантажень використо-

вують більш жорсткі режими навантажень порівняно з робочими. За методом екстраполяції результати короточасних досліджень за нормальних умов поширюють на більш тривалі терміни експлуатації. За розрахунково-експериментальним методом ведуть перевірку математичної моделі, що описує залежність ресурсу від факторів впливу і експериментально визначають коефіцієнти цієї моделі. За отриманими результатами методи пришвидшених досліджень поділяють на такі, що дають якісні оцінки (стійкій – не стійкій, годиться – чи не годиться) і такі, що дають кількісний результат. Останні дають змогу за результатами випробувань визначити термін роботи досліджених матеріалів або класифікувати їх за корозійною тривкістю. Використання пришвидшених методів передбачає протягом експлуатації, як правило, лінійність в логарифмічних координатах залежності показників корозії від фактору впливу, що не завжди є характерним для переважної більшості систем метал-середовище в хімічній і нафтопереробній промисловості.

Граничним вважається такий стан обладнання, при досягненні якого його подальша експлуатація є недопустимою або недоцільною виходячи з технічних причин, економічних міркувань або порушень правил безпеки експлуатації обладнання і устаткування. Коли після відмови обладнання не підлягає поновленню, воно переходить в граничний стан. Це має місце, наприклад, при загальній корозії поверхні обладнання. Коли вражена відносно незначна частина металу, наприклад, при виразковій корозії, обладнання може бути поновлено і надалі експлуатоване. Ознаки граничного стану обладнання, що встановлені в нормативно-технічній документації, називаються критеріями граничного стану. Технічний ресурс згідно з ГОСТ 27002-87 відповідає запасу можливого напрацювання обладнання від початку його експлуатації до переходу в граничний стан.

Можливість наукового прогнозування залишкового ресурсу забезпечується за наступних умов:

- відомі параметри, що визначають технічний стан обладнання;
- відомі критерії граничного стану;
- можливий періодичний або безперервний контроль параметрів технічного стану;

В тому разі, коли поряд з дією агресивного середовища відбувається і циклічне навантаження, для оцінювання ресурсу теоретично розроблені два підходи. Перший полягає у визначенні границі втоми металів шляхом побудови кривих втоми зразків металів і розрахунків на їх основі допустимих напружень чи деформацій в елементі конструкцій за заданих умов експлуатації.

Другий ґрунтується на встановленні періодів зародження і росту макротріщини в деформованому матеріалі і розрахунку довговічності елементів конструкції в заданих умовах, виходячи з того, що довговічність дорівнює сумі періодів зародження тріщини і її росту. Це дає змогу теоретично оцінити залишковий ресурс. За такого підходу важливо правильно вибрати параметри, що визначають напружений стан як в тілі взагалі, так і в околі тріщини зокрема.

Прогнозування ресурсу, що базується на кінетичних діаграмах втомного руйнування і враховує характерні стадії росту тріщин, теоретично ґрунтовно розглянуті в роботах [5,6]. Зарубіжні джерела [7, 8] викладали нові концепції оцінювання міцності і локального руйнування конструкційних матеріалів за одночасної дії рідких агресивних середовищ і статичних або динамічних навантажень. Загалом, в теоретичному плані це дало змогу розробити нові підходи до оцінювання роботоздатності та довговічності для ряду конструкційних матеріалів. Але в більшості випадків, що стосуються основного обладнання і устаткування нафтопереробної, хімічної галузей, то експлуатація такого обладнання за наявності тріщин заборонена. Виходячи з цього, особлива увага мусить приділятися початковим етапам руйнування, які передують появі макротріщини. Хоча вважається загальноприйнятим, що механічні навантаження переважно ведуть до локалізації анодних процесів на поверхнях мікродеформованих ділянок, а далі до розвитку корозійно-втомних мікротріщин, але загальної методики прогнозування ресурсу і допустимих рівнів навантажень в умовах корозійної втоми поки що нема, хоча в цьому напрямку ведуться плідні роботи. Особливо складні процеси відбуваються на поверхні нержавіючих сталей, де руйнування пасивної плівки внаслідок прикладених циклічних навантажень супроводжується відновленням захисної поверхневої плівки. В зв'язку з широким поширенням нержавіючих сталей в хімічній і

нафтопереробній промисловості останнім часом цим питанням приділяється значна увага і є значні теоретичні зрушення [9,28]. При виникненні на поверхні обладнання розподілених дефектів у вигляді корозійно-механічних пошкоджень оцінювання надійності часто зводиться до оцінювання ймовірності появи дефекту гранично допустимого розміру або певної частки дефектів на поверхні металу. Зважаючи на неможливість обстеження всієї поверхні, вимушені обмежуватись вибірковими вимірюваннями з наступною апроксимацією розподілу згідно з визначеними теоретичними законами. Найчастіше для оцінювання розподілу глибин корозійних пошкоджень застосовують закон Вейбулла, нормальний закон, логарифмічно-нормальний закон, або закон екстремальних значень.

Все більша частина спеціалістів, які займаються проектуванням і виготовленням промислового обладнання надають значної уваги врахуванню ранніх стадій життєвого циклу обладнання на його подальший стан в період експлуатації. Це явище отримало назву технологічної спадщини [22,23]. Особливо ця задача актуальна для звареного обладнання оболонкового типу, яке широко застосовується в нафтопереробці і хімічній галузі. В роботі [27] розглянуті різні стадії експлуатації звареного нафтопереробного обладнання, пов'язані єдиною ймовірнісною моделлю вичерпання ресурсу. Цей підхід сформований на базі моделей Л.М. Качанова, Ю.Н. Работнова, В.В. Новожилова. Запропонований метод оцінювання ресурсу обладнання ґрунтується на наступних положеннях:

- пошкодженням є макрооб'єкт, що порушує суцільність матеріалу;
- накопичення пошкоджень може трактуватися як збільшення числа і розмірів несцільності ;
- накопичення пошкоджень визначається параметрами напружено-деформованого стану матеріалу.

За основу методу взято модель не перевищення. Згідно з цією моделлю під граничним станом обладнання розуміють такий його стан, при якому діюче навантаження R починає дорівнювати несучій здатності S . Умова не перевищення має тоді наступний вигляд: $R < S$.

Збурюючі фактори випадкові за своєю природою, ведуть до того, що і навантаження R , і несуча здатність S , також вважаються випадковими величинами.

Під навантаженням розуміють головні напруження, еквівалентні напруження, інтенсивність напружень. Під несучою здатністю – границя текучості або тимчасовий опір. Збурюючими факторами вважаються флуктуації механічних характеристик матеріалів. Зміну ресурсу обладнання на всіх стадіях його життєвого циклу оцінюють за зміною статистичного коефіцієнта запасу роботоздатності, який визначається за формулою:

$$n = M_s/M_r, \quad (1.1)$$

де M_s – математичні очікування несучої здатності;

M_r – математичні очікування навантаження.

Даний підхід для оцінювання запасу роботоздатності зварного обладнання на стадіях проектування і виготовлення дає можливість уточнити потенційні можливості конструкції опиратися руйнуванню.

Досвід експлуатації трубних сталей 17ГС, 14ХГС, 19Г, 14ГН, 10Г2С в нафтопереробній та хімічній промисловості і при експлуатації трубопроводів довів, що особливістю експлуатаційних пошкоджень у вигляді розривів є відсутність пластичних деформацій в зоні руйнування і їх наявність лише в зоні доламу. Враховуючи, що за статистикою в процесі експлуатації, обладнання і трубопроводи можуть мати в середньому 300...350 і більше циклів повторних навантажень на рік, за запланований термін експлуатації (20 – 25 років) сумарне число циклів навантажень може скласти в середньому 7000...90000 циклів. Таким чином, робиться висновок, що обладнання експлуатується за малоцикловим характером навантаження протягом тривалого терміну, що веде до деформаційного старіння сталей у поєднанні з накопиченням незворотніх мікропластичних пошкоджень і наводнюванням. Відмічається, що за характером розповсюдження втомні тріщини в зістарених сталях які відпрацювали в хімічному середовищі, та в середовищі що містить нафту і нафтопродукти, більш розгалужені, їх критичний розмір значно менший (біля 1 мм). Тоді як у незістарених сталей критичні розміри тріщин втоми

складають 2...2,5 мм. Для визначення залишкового ресурсу встановлюється коефіцієнт старіння з врахуванням режиму роботи, а потім обчислюється ресурс:

$$N=N_0/kc, \quad \text{або} \quad T_{\text{зал}} = (N_0 - n)/\acute{n}c, \quad (1.2)$$

- де N_0 – число циклів до руйнування металу у вихідному стані;
 k – коефіцієнт, який враховує умови навантаження;
 c – коефіцієнт старіння металу труб;
 n – число циклів до моменту визначення $T_{\text{зал}}$;
 \acute{n} – число циклів за один рік експлуатації.

До недоліків цієї методики належить складність адекватного визначення коефіцієнта старіння металу, бо процеси старіння відбуваються за досить складним законом, коли структурні перетворення і деградація механічних характеристик відбуваються ступінчасто.

Як видно, оцінювання ресурсу має приблизний, імовірний характер. Але використання традиційних статистичних методів, які звичайні при оцінюванні надійності обладнання масового виробництва, для переважної більшості видів хімічного і нафтопереробного обладнання малоефективні або взагалі недопустимі, бо для цього необхідна однорідна статистична інформація про випадки виходу з ладу. Отримати таку інформацію для обладнання, що випускається невеликими серіями або взагалі в одному екземплярі складно. Навіть в тих випадках, коли обладнання випускається невеликими серіями (наприклад, насоси), технологічні середовища і параметри технологічних процесів часто суттєво різняться, що веде до зміни швидкості корозії і інших видів руйнування устаткування і обладнання.

Отже, вимушені оцінювання ресурсу здійснювати для кожного конкретного екземпляра індивідуально за результатами періодичного обстеження. В першу чергу вище сказане відноситься до таких видів обладнання: колони, реактори, апарати з пристроями що перемішують, посудини що працюють під тиском, резервуари тощо.

Для досить простих конструкцій, наприклад, трубопроводів в світовій практиці добре зарекомендувала себе методика оцінювання ресурсу, відома як “Кри-

терій B31G” із стандарту ANSI/ASME B31 G-1984 [7]. Передбачається, що внаслідок водневого розшарування і виходу водню на поверхню труби, можливість оцінювання залишкової несучої здатності стає адекватною визначенню залишкової несучої здатності стінки труби, яка пошкоджена виразковою корозією або механічним поверхневим дефектом типу задиру. Місця дефектів необхідно попередньо визначити методами неруйнівного контролю, наприклад, ультразвуком.

Для оцінювання ступеня небезпеки таких дефектів використовуються такі параметри як товщина стінки труби, глибина і довжина корозійного пошкодження, характер розшарування сталі (визначено 6 можливих типів). Потім в координатах “глибина дефекту (h) – довжина дефекту (L)” будується графік, який умовно називають “ремонт потрібен – ремонт не потрібен” (Рисунок 1.1).

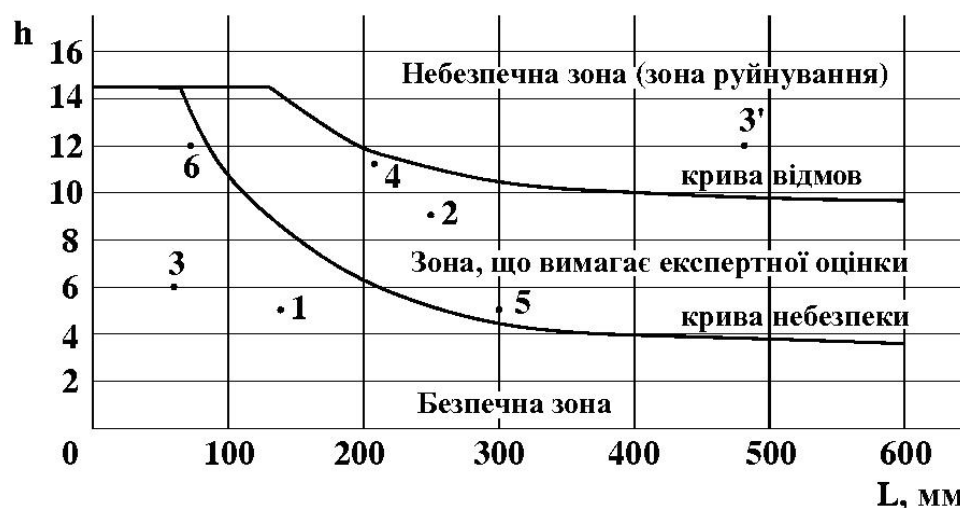


Рисунок 1.1 - Графік “критерію B31G” для оцінки ступеня небезпеки локальних дефектів на поверхні трубопроводу за принципом “ремонт потрібен – ремонт не потрібен”

На графіку між побудованими “кривою відмови” і “кривою безпеки” розташовуються три зони: зона руйнування; зона, яка потребує експертного оцінювання; безпечна зона. В разі попадання дефекту в безпечну зону, зрозуміло, що подальша експлуатація можлива, але з періодичним контролем. Коли ж дефект попадає в зону руйнування, експлуатація мусить бути негайно припинена. В разі попадання в зону, що вимагає експертного оцінювання, то залежно від додаткових

умов, наприклад, місця положення точки, яка відповідає дефекту на графіку, швидкості корозії, індивідуальних вимог приймається рішення про можливий подальший період експлуатації і період контролю за розвитком корозійного дефекту.

Загальним недоліком описаного методу є необхідність проведення попередніх електрометричних і внутрішньотрубних обстежень магнітними методами або за допомогою ультразвукових снарядів – дефектоскопів. Самі обстеження після виявлення дефектів проводять з інтервалом, який задається експертним шляхом і не виключена можливість руйнування в міжінспекційний період. До того ж всі дефекти повинні бути зведені до певного типу, що дещо загроблює розрахункову модель. Враховується і дія інтесифікуючих чинників, наприклад, наводнювання або високої температури на динаміку деградації. Згідно з цією теорією визначено критерій (Рисунок 1.2) застосування теорії розсіяної пошкоджуваності.

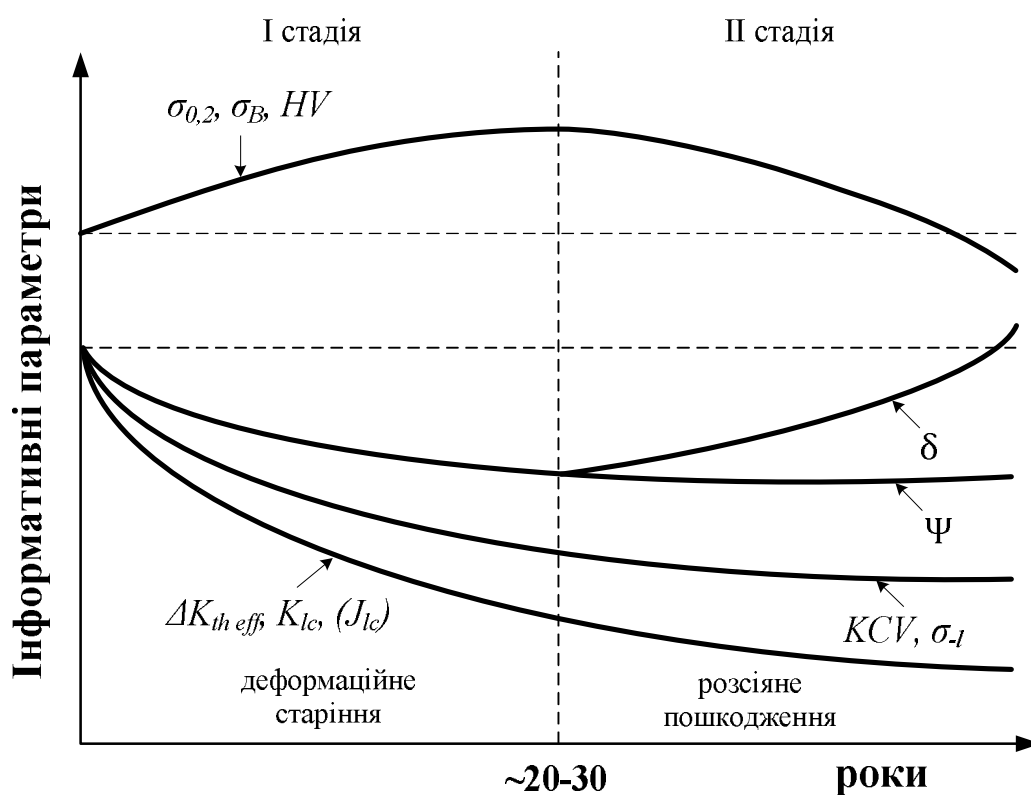


Рисунок 1.2 - Узагальнена схема зміни найвживаніших механічних характеристик трубопровідних сталей в часі їх експлуатації.

Як критерій слугує точка мінімуму відносного звуження. При переході на цю стадію автори пропонують не враховувати як чутливу величину відносно видовження, через численні мікротріщини в об'ємі металу. Г.М. Никифорчиним і О.Т. Цирульником вперше розроблені підходи до кореляції змін механічних і електрохімічних характеристик протягом тривалої експлуатації в агресивному середовищі. Вони запропонували методику визначення залежності між корозійно-втомною витривалістю сталей та зарядом окиснення q (Рисунок 1.3).

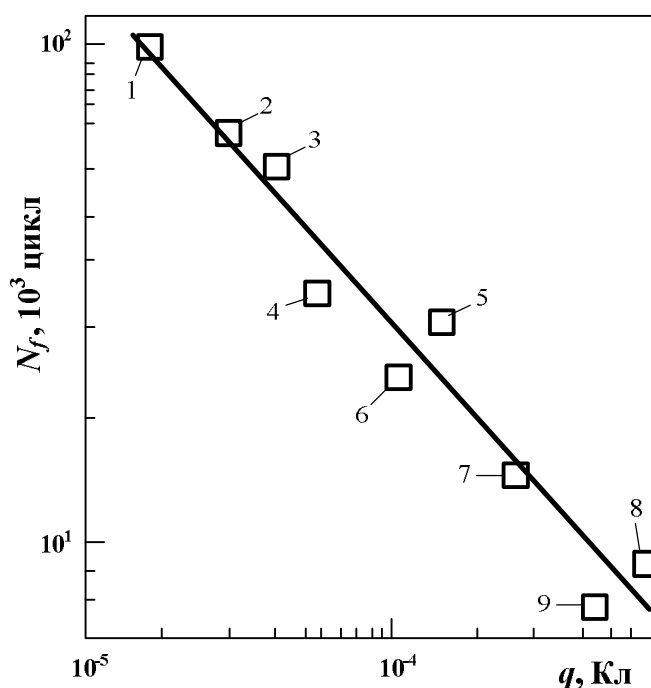


Рисунок 1.3 - Залежність між корозійно-втомною витривалістю N_f сталей та зарядом окиснення q , 1-9 марки сталей, що підлягали дослідженням

Зараз теорія розсіяної пошкоджуваності плідно розвивається науковою школою професора Г.М. Никифорчина.

Як показав проведений аналіз сучасних підходів до визначення деградації сталей в умовах тривалої експлуатації, залежно від умов експлуатації і використаних марок сталей, застосовуються принципово різні підходи, що ґрунтуються на відмінних чутливих величинах. Саме питання визначення залишкового ресурсу є на цей час актуальним і до кінця не розв'язаним.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Об'єкти досліджень

Об'єктом досліджень була вибрана оццаннолегована сталь марки ASTM A333 Grade 6, з якої були виготовлені труби магістрального аміакопроводу Тольяті-Горлівка-Одеса, що відпрацювали в умовах транспортування рідкого аміаку з робочим тиском середовища $P_{роб} = 8,3 - 13,5$ МПа за середньої робочої температури від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+21,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ близько 262800 годин (30 років) в умовах транспортування рідкого аміаку [7]. Сталь ASTM A333 Grade6 є конструкційною низькотемпературною оццаннолегованою сталлю, яка використовується для виготовлення трубопроводів, що працюють за нормальних температур.

Хімічний склад сталі A333 Grade 6 згідно стандарту ASTM у стані поставки і після тривалої експлуатації приведений у (Таблиці 2.1)

Таблиця 2.1 - Хімічний склад сталі ASTM A333 Grade 6

Стан сталі	C	Si	Mn	S	P
Поставка	$\leq 0,30$	$\leq 0,10$	0,29-1,06	$\leq 0,058$	$\leq 0,048$
Експлуатована	0,167	0,18	0,58	0,023	0,012

За хімічним складом досліджувана сталь близька до вітчизняної сталі марки 10Г. Структура металу дрібнозерниста, що характерно для прокату низковуглецевих сталей зі строкато витягнутою феритною і перлітною складовою та сульфідними включеннями (2 – 3 бал за ГОСТ 1778-82), переважно зконцентрованими по феритним стрічкам.

Для зразків з вихідної і деградованої сталі визначалися характеристики міцності: границя текучості (умовна границя текучості $\sigma_{0,2}$) і границя міцності (тимчасовий опір σ_b), на основі отриманих результатів розраховувався комплексний показник $\sigma_{0,2}/\sigma_b$. Механічні дослідження на розтяг велись на стандартних зразках на машині Р-5М згідно з ГОСТ 1497-84 за температури $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ударну в'язкість

визначали на маятниковому копрі МК-30А за температури від $+20^{\circ}\text{C}$ до -60°C згідно з ГОСТ 9454-59 і ГОСТ 9456-59. Використовували стандартні зразки розміром $55 \times 10 \times 10$ мм. Досліджувались лише прямолінійні ділянки труб. З метою визначення інформативності і адекватності оцінювання ступеня деградації досліджували також зміну величини утяжки перерізу зразка при ударі. Утяжка це величина, що характеризує пластичну деформацію при утворенні зламу. Її оцінювали величиною максимальної деформації за двома боковими площинами, що паралельні напрямку прикладеного навантаження. Вона залежить від абсолютних розмірів зразка і пропорцій, механічних характеристик металу і температури при проведенні експериментів. Величину утяжки вимірювали штангенциркулем з точністю 0,05 мм. Травлення шліфів виконувалось 4% водним розчином азотної кислоти в етиловому спирті. Вирізку заготовок з експлуатованої сталі проводили шляхом застосування кисневого різання. При виготовленні зразків приймалися запобіжні заходи (охолодження, відповідні режими обробки), що виключають можливість зміни властивостей металу при нагріві або наклепі, які виникають в результаті механічної обробки.

Для визначення вмісту водню в металі труб вирізали циліндричні зразки діаметром 5мм і довжиною 10 мм на внутрішній і зовнішній поверхні та із середини труби. Кінцеве значення для кожного шару знаходили як середнє із трьох замірів.

Механічні дослідження на розтяг велись на стандартних зразках діаметром 5мм на машині Р-5 згідно з ГОСТ 1497-84, ударну в'язкість визначали на маятниковому копрі МК-30А згідно з ГОСТ 9454-59 і ГОСТ 9456-59. 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 термopарою типу ТХА, автотрансформатора для регулювання температури в печі. Дослідження на ударну в'язкість зварних з'єднань труб після тривалої експлуатації проводили на нестандартних зразках перерізом 5×10 мм через значні зміщення труб при зварюванні. Вирізку зразків з поковок вели на фрезерному верстаті з застосуванням охолод-

жуючої речовини. Завершувальну обробку проводили на круглошліфувальному верстаті моделі 312М алмазними кругами з застосуванням охолоджуючої речовини.

Зразки для досліджень сталей на ударну в'язкість та корозивну тривкість показані на (Рисунку 2.1).

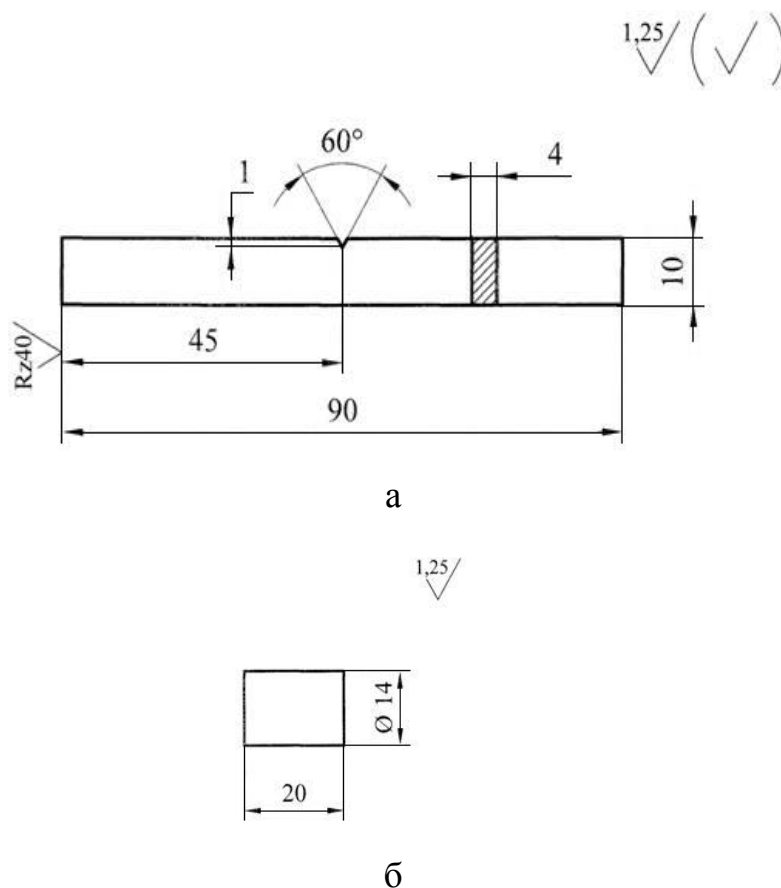


Рисунок 2.1 - Зразки для досліджень:

а - плоский зразок для визначення ударної в'язкості;

б - для корозійних досліджень.

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

Заміри твердості основного металу і зварного шва проводили на поперечному перерізі твердомірами ТШ-2М згідно з ГОСТ 9012-59 і ТК-2М згідно з ГОСТ 9013-59.

Вимір геометричних характеристик проводили штангенциркулями, що відповідали ГОСТ 166-89, мікрометри відповідають вимогам ГОСТ 6507-90.

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.

Травлення шліфів із нержавіючих сталей проводили електролітично 10% водним розчином CrO_3 . Для макродосліджень використовувалась “царська горілка”. Травлення зразків зі сталі ASTM A333 Grade 6 проводили 10%-м водним розчином HNO_3 і 4%-м розчином HNO_3 в етиловому спирті.

Аналіз на вміст водню проводили приладом “Лесо RH-407”, спектральним методом на газоаналізаторі ГОУ-1.

Дослідження на втому вели на повітрі. Корозійно-втомні випробування проводили в 3%-му водному розчині NaCl за температури $293 \pm 0,5$ °К і в модельному розчині оборотної води, котрий містив 300 мг/л SO_4^{2-} , 400 мг/л Cl^- і мав рН 6,9. Після інтенсивного перемішування розчинів їхню кислотність перевіряли на рН-метрі рН-673 М.

Робочий розчин готували з водогінної води, щоб забезпечити умови близькі до промислових.

Для вивчення процесів корозії оцценолегованої сталі A333 Grade 6 використовувався 1% розчин H_2SO_4 за температури 60 °С.

Випробування сталей, які використовуються для виробництва обладнання карбаміду проводили в 11% розчині карбаміду в дистильованій воді.

Методика досліджень сталей на опір втомному та корозійно-втомному руйнуванню.

Дослідження зразків діаметром робочої частини $d = 5$ мм на циклічну довговічність проводили на машинах ІМА-5 при деформації чистим згином з обертанням з частотою навантаження 50 Гц. Досліджували зразки з биттям не вищим за 0,01 мм. Циліндричні гладкі зразки мали довжину робочої частини 25 мм і відповідали ГОСТ 23026-78 (Рисунок 2.2). Для виділення робочої частини на галтелі зразків наносили ізоляційне водостійке покриття (ТУ 6-15-1129-78).

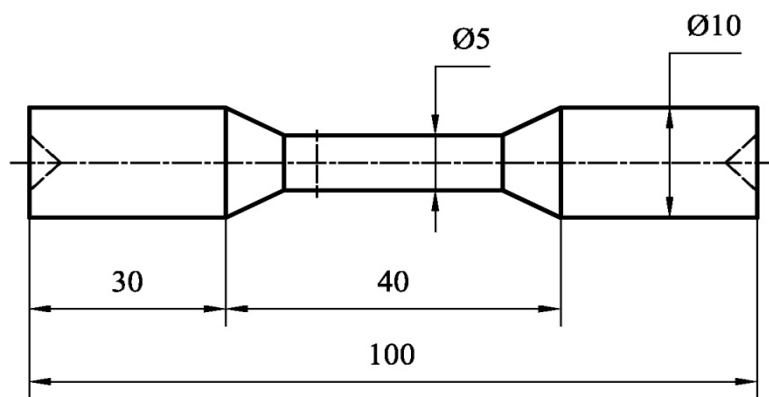


Рисунок 2.2 Зразок для досліджень на втому і корозійну втому при чистому згині з обертанням

2.2 Математичне забезпечення оптимізації 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:

$$\bar{x} = 1/n \sum x \quad (2.1)$$

Середнє квадратичне відхилення є оцінкою для генерального середнього квадратичного відхилення:

$$S = + \sqrt{S^2}, S^2 = 1/(n-1) \sum (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.2)$$

Незміщена оцінка квадратичного відхилення:

$$\check{S} = M(v)S, \quad (2.3)$$

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:

$$U = (x_i - \bar{x}) / S \quad (2.4)$$

Значення коефіцієнта h залежить від обсягу вибірки і прийнятої імовірності.

РОЗДІЛ 3. МЕТАЛОГРАФІЯ МЕТАЛУ ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

За хімічним складом досліджувана сталь близька до вітчизняної сталі марки 10Г. Структура металу дрібнозерниста (Рисунок 3.1), що характерно для прокату низковуглецевих сталей зі строкато витягнутою феритною і перлітною складовою та сульфідними включеннями (2 – 3 бал згідно ГОСТ 1778-82), переважно зконцентрованими по феритним стрічкам (Рисунок 3.2).

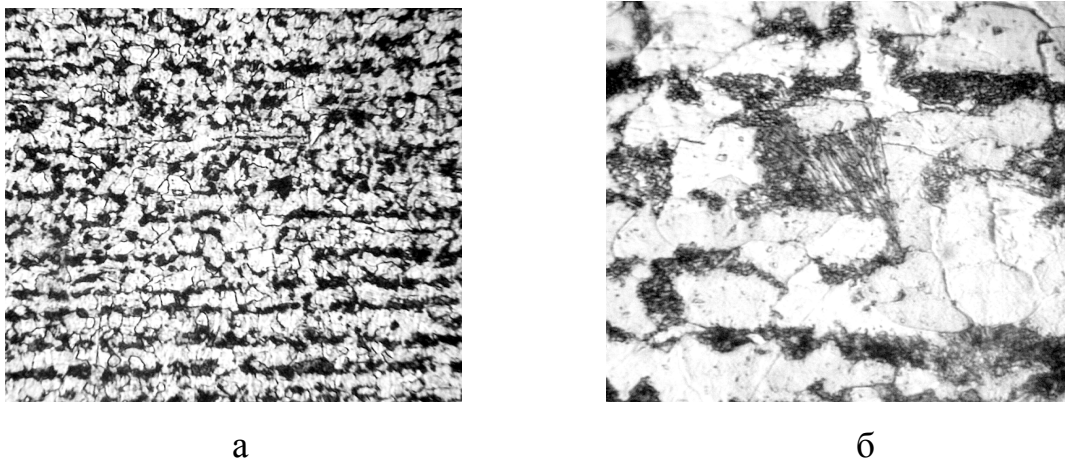


Рисунок 3.1. Мікроструктура сталі A333 Grade 6 після тривалої експлуатації:
а - $\times 150$; б - $\times 900$

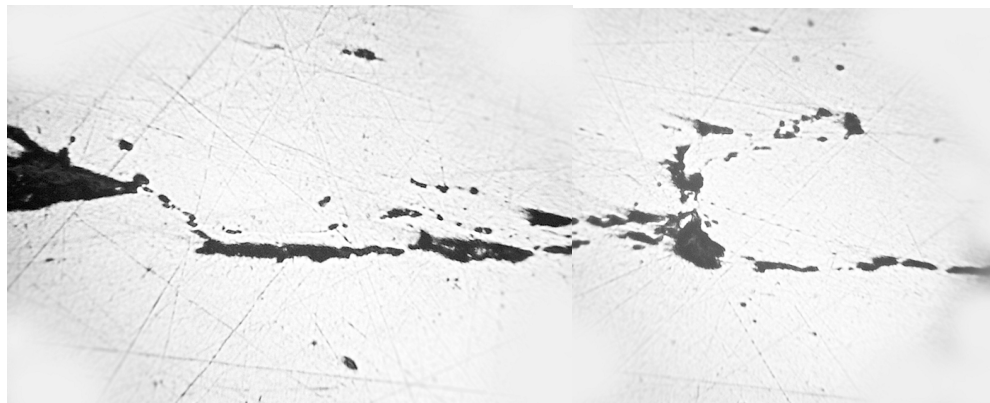
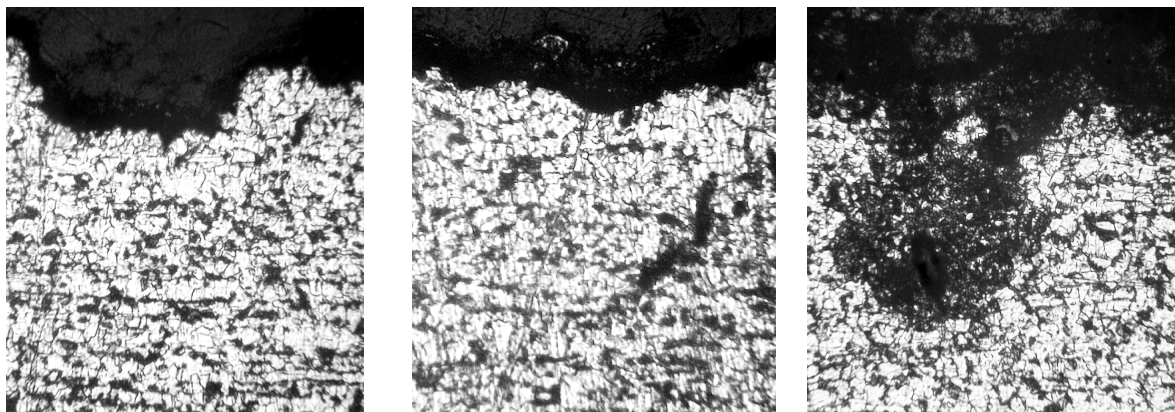


Рисунок 3.2 - Сульфідні включення в сталі A333 Grade 6, $\times 150$

На внутрішній і зовнішній поверхні труб спостерігалась нерівномірна корозія з максимальною глибиною до 0,20 мм на зовнішній поверхні і до 0,16 мм на внутрішній, що вкрита тонким шаром продуктів корозії (Рисунок 3.3)



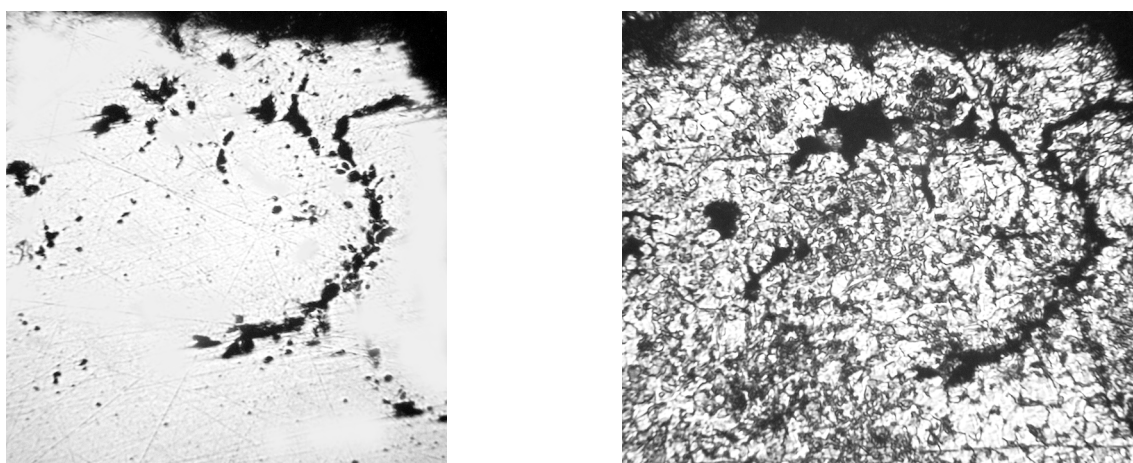
а

б

Рисунок 3.3 - Характер корозії внутрішньої поверхні труб:

а $\times 150$; б – зона рихлення металу $\times 150$

Крім того, в приповерхневих шарах спостерігається зонне рихлення металу (Рисунок 3.4).



а

б

Рисунок 3.4 - Рихлення металу труби:

а – шліф не травлено, $\times 150$; б – $\times 150$

Окремі внутрішні об'єми металу піддалися інтенсивному розтріскуванню (Рисунок 3.5), в утворених пустотах можливо міг концентруватись водень.

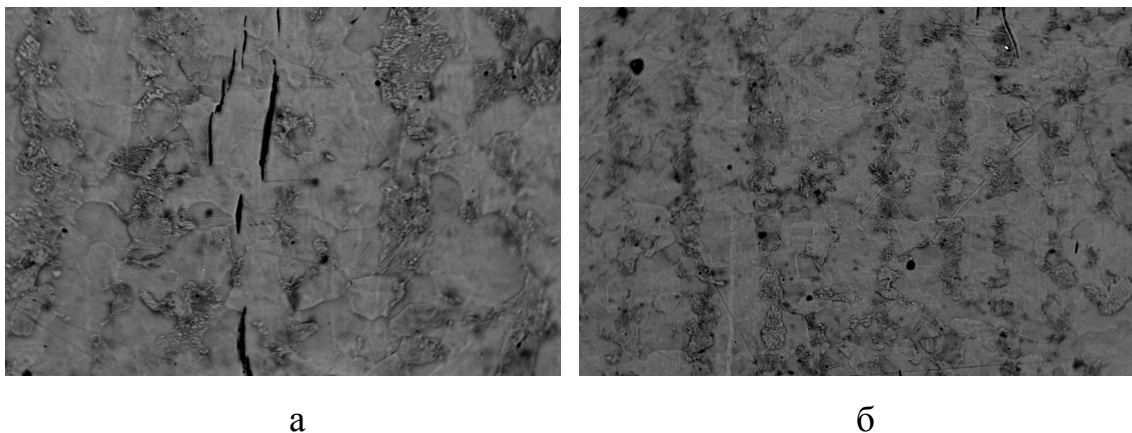


Рисунок 3.5 - Поздовжні тріщини (а) і карбіди в структурі металу (б), $\times 750$

В цілому металографічні дослідження дозволяють зробити висновок, що метал труби при відповідній до норми ферито-перлітній структурі підлягав нерівномірній корозії глибиною до 0,2 мм (Рисунок 3.5), але за час експлуатації розпочалось утворення пористості і розклад сульфідних включень внаслідок наводнення сталі.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

4.1 Обґрунтування вибору чутливих до деградації характеристик

Оцінювання поточного стану обладнання в хімічній і нафтопереробній промисловості і прогнозування на основі цього залишкового ресурсу задача складна і багатогранна. Складність полягає у великих габаритах технічних об'єктів, зміні середовища і температури в процесі виконання технологічних операцій, часто навіть в об'ємах одного апарату. Відносно великі часові проміжки між обстеженнями, їх проведення різними організаціями не сприяють деталізації і поглибленню аналізу щодо стану обладнання. Найбільш прогресивним вбачається постійний моніторинг, принаймні найбільш відповідальних складових технологічного ланцюга. Але, на відміну від постійного контролю характеристик технологічного процесу, контроль поточного стану металу конструкцій ведеться з інтервалом в декілька років. Зараз у вітчизняній промисловості практично відсутній корозійний моніторинг в режимі реального часу. Про контроль напружено-деформованого стану металу питання навіть не ставиться. А такий контроль для конструкцій, що експлуатується десятиріччями, враховуючи особливу небезпеку експлуатації такого обладнання, необхідний. Оцінювання змін механічних характеристик ведеться планово періодично під час капітальних ремонтів або з причин виникнення аварійних зупинок. Для різних технічних об'єктів: трубопроводів, колонної апаратури, насосів, компресорів тощо аналіз стану металу ведеться за різними механічними характеристиками або їх сукупністю. Часто визначають їх як за нормальної, так і робочої температури. Відмінність останніх і різноманітність технологічних середовищ ускладнюють порівнювальність і співставність отриманих результатів.

Отже виникає задача оцінювання найбільш поширених характеристик міцності і пластичності з огляду їх інформативності за час тривалої експлуатації. Обмежимось лише механічними характеристиками конструкційних і оццанологованих сталей, що отримують руйнівними методами. Аналіз інформації, наведеної в

таблиці 4.1 дає змогу зробити висновок, що в загальному випадку найбільш універсальними і інформативними є такі характеристики як $\sigma_{0,2}$, σ_b , $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ і δ .

Таблиця 4.1 - Показники механічних характеристик для оцінювання деградації

Характеристики	Регламентация в нормативній документації	Можливість отримання прямим вимірюванням	Змінюваність за весь період експлуатації	Однозначність тенденцій змін	Можливість аналітичного опису в часі	Чутливість	Температурна чутливість
$\sigma_{0,2}$	+	+	+	+/-	+	+	+
σ_b	+	+	+	+/-	+	+	+
$\sigma_{0,2}/\sigma_b$	-	-	+	+/-	+	+	+
δ	+	+	+	+/-	+	+	+
ψ	+/-	+	+/-	+	+	+/-	-
КСУ (V)	+/-	+	+/-	+	-	-	+
утяжка	-	+	д/н	д/н	-	д/н	д/н
$A_{\text{за-род.}}/A_{\text{розв.}}$	-	-	+	+	-	+/-	д/н
кут загину	+/-	+	д/н	+	-	-	д/н
індекс	-	-	д/н	+	-	+	д/н
твердість	+/-	+	+/-	+	-	-	д/н
Температура вязкокрихкого переходу	-	-	д/н	д/н	-	-	-

Примітки:

+ - в більшості випадків відповідь ствердна;

+/- - відповідь неоднозначна, або регламентується не конкретне значення, а граничне (\leq , \geq);

д/н – даних недостатньо;

Азарод., Арозв. – робота зародження і розвитку тріщини відповідно при дослідженнях на удар;

Індекс – $C = (КС - КСА)/КС \cdot 100\%$,

де КС, КСА – середні арифметичні значення ударної в'язкості до і після деформаційного старіння.

4.2. Порівняльний аналіз змін структури металу і розвиток мікропошкоджень і змін механічних характеристик.

Дослідження стану основного матеріалу і зварних швів проведені групою дослідників на чолі з Ф.А. Хромченком [9] для оццюваних хромомолібденованадієвих сталей, які тривалий час використовували в складі паронагрівального обладнання. Ним були запропоновані для оцінювання залишкового ресурсу спеціальні шкали, які дозволили за структурним фактором шляхом формалізації мікропошкоджень і змін мікроструктури оцінювати ступінь деградації сталі. Найбільш інтенсивно деструктивні процеси відбуваються в зоні термічного впливу. Отже, як індикатор розглядають шар металу на відстані 2-4 мм від лінії сплаву. В результаті аналізу було встановлено кореляцію між мікроструктурними змінами і мікропошкоджуваністю та вичерпуванням ресурсу зварних з'єднань. Зміни мікроструктури запропоновано розбити на три стадії, причому вичерпування ресурсу оцінювали не в абсолютних величинах, а в відносних: $\tau_n/\tau_{пр}$, де τ_n – напруження на час обстеження; $\tau_{пр}$ – час максимальної експлуатації. На першій стадії (до 30% вичерпання ресурсу) змін мікроструктури не виявлено. Метал зони термічного впливу зберігає ферито-перлітну структуру з дисперсними карбідами, що переважно розташовані по границям зерен. На другій стадії (30-60% вичерпання ресурсу) відбувається укрупнення карбідних частинок до 1-1,5 мкм і одночасно обіднення карбідами приграничних ділянок шириною до 2-3 мкм в тілі зерна. Відбувається розмивання границь зерен і сферізація продуктів розпаду перлітної складової. На третій стадії (60-100% вичерпання ресурсу) відбувається подальше укрупнення карбідних частинок до 1,5-2 мкм і їх скупчення у вигляді ланцюгів по границям зерен, посилення сфероїзації структури до 4-5 балів, утворюються цементитні прошарки-плівки.

Процес розвитку мікропошкоджуваності розбито на п'ять стадій. На першій стадії (до 50% вичерпання ресурсу) мікропошкоджуваність не виявляється. Автори припускають, що в кінці першої стадії зароджуються мікропори повзучості розміром 0,05-0,5 мкм. На другій стадії (50-70% вичерпання ресурсу) виявляються

одиночні пори розміром до 2мкм в кількості до однієї – трьох пор на поле, що охоплюється окуляром мікроскопу при збільшенні $\times 100$. На третій стадії (70-80% вичерпання ресурсу) відбувається укрупнення пор до 2,5-3 мкм і поява нових пор розміром до 1,2 мкм з загальним збільшенням їх кількості до п'яти–восьми пор на полі окуляра. На четвертій стадії (80-90% вичерпання ресурсу) пори повзучості у вигляді ланцюгів розвиваються по границям зерен або у вигляді скупчень до 10-15 пор з зародженням мікротріщин і їх розвитком до довжини 50-200 мкм. На п'ятій стадії (90-100% вичерпання ресурсу) відбувається міжзеренне крихке макропошкодження з появою макротріщин довжиною $\sim 1,5$ мм і їх об'єднання в магистральну тріщину.

Комплексний взаємозв'язок стадій змін мікроструктури, пошкоджуваності і вичерпування ресурсу наведено в (Таблиця 4.2)

Таблиця 4.2 - Взаємозв'язок стадій змін мікроструктури і мікропошкоджуваності з вичерпанням ресурсу зварних з'єднань сталі 12Х1МФ при повзучості

Стадія зміни мікроструктури	Стадія мікропошкоджуваності	Вичерпування ресурсу	
		%	$\tau_{\text{ж}} / \tau_{\text{ш}}$
I _м	I _п	0	0
		20	0,2
II _м	II _п	40	0,4
		60	0,6
III _м	III _п	80	0,8
	IV _п	100	1
	V _п		

В більшості технічної документації оцінювання поточного стану обладнання і встановлення терміну подальшої експлуатації робиться на основі порівняння поточних значень механічних величин з мінімально допустимими їх величинами.

Оцінювання змін механічних характеристик ведеться планово періодично під час капітальних ремонтів або з причин виникнення аварійних зупинок. Для різних технічних об'єктів: трубопроводів, колонної апаратури, насосів, компресорів тощо аналіз стану металу ведеться з використанням відмінних механічних характеристик [7, 8]. В загальному випадку найбільш універсальними і поширеними є такі механічні характеристики як $\sigma_{0,2}$, σ_b , $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ і δ , ψ .

Для аналізу доцільності використання характеристик $\sigma_{0,2}$, σ_b , $\sigma_{0,2}/\sigma_b$, δ , і ψ можна скористатись дислокаційною теорією. Згідно з теорією Петча – Холла опір пересуванню дислокації тим більший, чим менший розмір зерна. Границя текучості згідно з рівнянням Петча - Холла визначається:

$$\sigma_T = \sigma_0 + Kd^{-1/2}, \quad (4.1)$$

де σ_0 – напруження для підтримки ковзання в діючих площинах ковзання всередині зерен, між котрими відбувається естафетна передача ковзання;
 $Kd^{-1/2}$ – напруження для естафетної передачі ковзання між зернами розміром d .

Параметр K за Котрелом характеризує «трудність» збудження ковзання в сусідньому зерні, а Петч додав, що він визначається також і коефіцієнтом розорієнтації активних поверхонь ковзання в зернах, між якими відбувається естафетна передача ковзання. Границя зерен є бар'єром на шляху просування дислокації. Подрібнення зерна веде до зменшення його розміру d , тобто збільшення опору деформації, отже зміцнення металу. Причому це відбувається навіть за умови ідеальної будови кристала. В наведених нище дослідженнях доведено, що процес старіння і деградації супроводжується двійникуванням і подрібненням зерна, отже збільшенням кількості бар'єрів цього типу. Причому на відміну від ідеальної структури, орієнтація зерен в металі, як правило, довільна. Це обумовлює зміну напрямку розповсюдження дислокації. В свою чергу зміна напрямку просування дислокації веде до розщеплення дислокації і обумовлює появу бар'єра Ломер-Котрелла [34, 35]. На подолання цього бар'єра теж необхідна додаткова енергія, що також веде за собою зміцнення сталі. Наступний бар'єр обумовлений

взаємодією дислокації, що рухається, з дислокаціями «лісу» всередині кристалу, що обумовлює утворення в структурі кристалу східців, які гальмують рух дислокації і вимагають прикладання додаткової енергії. В процесі експлуатації у всіх сталях відмічається утворення на границях кристалів різних неметалевих включень. Їх поява з точки зору теорії розповсюдження дислокацій може класифікуватись як дефект кристалітної структури. Крім цього, всередині кристалів за рахунок дії механічних, теплових і інших навантажень також утворюються дефекти. В процесі руху дислокація взаємодіє з дефектом. Залежно від когерентності чи некогерентності зв'язку дефекту і кристала можливо або перерізання дефекту дислокацією, або його огинання. Але в обох випадках це вимагає витрат додаткової енергії. Судячи з того, що зафіксовані випадки зміцнення і зменшення пластичності не перевершують декілька десятків процентів, можна зробити висновок, про переважну некогерентність зв'язку дефекту і кристала.

З часом на границях зерен, блоків відбувається накопичення дислокацій, що веде до створення місцевих концентраторів напружень, які з часом можуть бути джерелами мікротріщин. Також відбувається скупчення дислокацій біля дефекту у вигляді некогерентної частинки, саме в цих місцях з часом утворюються залежно від величини напружень і середовища, джерела розвитку корозійного розтріскування або міжкристалітної корозії. В багатьох випадках зафіксовані фазові структурні перетворення в аустенітних сталях. Типовим випадком є розклад перліту на складові частини. Утворені частинки цементиту можуть розглядатися як субкристалітні дефекти, поява яких веде до тих же наслідків, що і раніше.

Крім того, взаємодія дислокацій з домішковими атомами веде до накопичування домішок поблизу ліній дислокацій і утворенню біля них хмар Котрелла. Дифузія і концентрація домішок внаслідок руху дислокацій, таким чином, сприяють посиленню процесів старіння і деградації сталі. На думку деяких авторів домінуюча роль в цьому процесі визначається ефективною концентрацією $C+N$. Остання, як відомо, суттєво залежить від температури за якої відбувається старіння. Отриманні данні природного старіння сталей в промислових умовах за високих температур певною мірою підтверджують цей висновок. В результаті перера-

хованих типів взаємодії дислокації з дефектами кристалітної структури відбувається зміцнення металу.

Запропонована дислокаційна модель не лише адекватно пояснює механізм зміцнення сталей і сплавів в процесі експлуатації в агресивному середовищі, але і обґрунтовує причини сповільнення деградаційних процесів з часом, що відмічалось в приведених випробуваннях, а також деякими авторами при дослідженнях реальних конструкцій [20]. Згідно з запропонованою моделлю швидкість зміцнення залежить від густини дислокацій на одиниці площі. Відомо, що умовно виділяється три ділянки зростання міцності. Кожна з них характерна певною швидкістю зростання міцності і її функціональною залежністю від густини дислокацій на одиниці поверхні. Першій ділянці, з кількістю дислокацій $10^6 - 10^9$ одиниць на квадратному сантиметрі, притаманне лінійне зростання міцності, друга характерна різким нелінійним зростанням міцності, а третя відрізняється різким гальмуванням зміцнення в міру наближення на третій стадії до критичного значення густини дислокацій - 10^{12} одиниць дислокацій/см², після чого конструкція руйнується. Реальні елементи конструкцій мають не ідеальну будову, але тенденції змін зберігається і в цьому випадку. Отже, запропонований підхід дозволяє в основному пояснити механізми, що відбуваються в процесі експлуатації в корозивно агресивних середовищах.

Проаналізуємо далі інформативність інших характеристик. За границею текучості крива розтягу апроксимується відомим виразом:

$$\sigma = K_1 \varepsilon^n, \quad (4.2)$$

де σ і ε – відповідно істинні напруження і деформації;

n – коефіцієнт зміцнення;

K_1 – постійна для даного стану.

Виходячи з цього швидкість деформаційного зміцнення за границею текучості при деформаційному старінні визначається виразом:

$$d\sigma/d\varepsilon = K_1 n \varepsilon^{n-1} \quad (4.3)$$

Грунтуючись на результатах ряду робіт [10, 11], зміну характеристик за статичного розтягу під час деформаційного старіння можна представити у вигляді схеми (Рисунок 4.1)

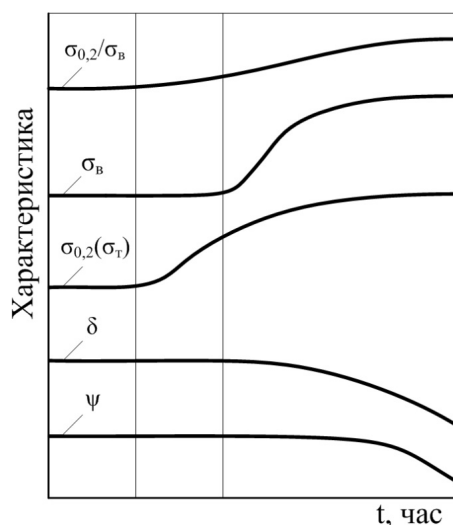


Рисунок 4.1 - Динаміка змін чутливості механічних характеристик

Аналіз кривих з (Рисунка 4.1) дозволяє зробити висновок, що чутливість до деформаційного старіння у $\sigma_{\text{в}}$ і δ порівняно з $\sigma_{0,2}$ починається на більш пізніх етапах експлуатації. Отже з погляду безперервності відслідковування деградаційних процесів металу використання $\sigma_{0,2}$ вбачається найбільш раціональним.

На користь запропонованої моделі свідчить і те, що величини відносного видовження і відносного звуження в процесі експлуатації мають більш складний характер взаємодії з деформацією ніж напруження [12, 13, 14]. Їх значення залежать як від розподілу дислокацій, так і від структури сталі. Отже за зміною величин відносного видовження і відносного звуження складніше оцінити ступінь деградації сталі, що і підтверджено практикою. До того ж дослідження довели, що в разі окрихчення металу, особливо при експлуатації за високих температур значення ψ перестає суттєво змінюватись [15]. До схожих висновків можна прийти і спираючись на теорію розсіяної в металі пошкодженості.

Окремою проблемою є визначення характеристик металу на момент початку експлуатації. Як правило, після тривалої експлуатації зразки металу в стані поставки відсутні. Тому приходиться орієнтуватися на довідкові дані, які можуть дещо різнитися від характеристик металу, що використаний для виготовлення

конкретного обладнання. В зв'язку з цим при побудові графіка змін характеристик міцності і пластичності в часі виникає проблема «О»-точки, тобто значення механічної характеристики на момент поставки. Використання показника $\sigma_{0,2}/\sigma_B$, як характеристики? здатної об'єктивно відстежувати процеси старіння в часі, дозволяє певною мірою усунути цю проблему. Це обґрунтовано тим, що різним партіям металу може бути властивий істотний розкид за властивостями міцності, проте не слід очікувати значних змін у співвідношенні $\sigma_{0,2}/\sigma_B$.

Узагальнюючи раніше сказане, можна зробити наступні висновки. Найбільш інформативною, з точки зору процесів деформаційного старіння є $\sigma_{0,2}$. За умови відсутності відомостей про характеристики міцності на момент поставки перевагу слід віддати $\sigma_{0,2}/\sigma_B$. Чутливість інших названих характеристик з'являється на більш пізніх етапах експлуатації. Але характеристики міцності треба доповнити характеристиками пластичності. Перевагу серед них має δ , як така, що здатна оцінювати процес старіння більш тривалий час. Слід зауважити, що навіть в разі переважно негативної оцінки характеристики в цілому з точки зору її «загальної інформативності», це не зменшує її значущості для застосування в окремих випадках. Наприклад, кут загину і індекс при всіх загальних недоліках є одними з визначальних показників для оцінювання деформаційного старіння труб в першому випадку, або обладнання, що працює в умовах ударів і циклічних навантажень, в другому.

За даними ряду авторів використання характеристик ударної в'язкості KCV і KCU до моменту вичерпання ресурсу (запланованого) є надійними показниками ступеня деградації трубних сталей, що транспортують нафту і газ. Крім того, фрактографія перерізу руйнування при ударі і аналіз змін розмірів перерізу внаслідок удару (утяжка) дозволяють додатково розширити інформацію, що звично аналізується при дослідженнях на удар. Що важливо, це не потребує додаткових затрат.

Одним з методів аналізу стану металів, є метод знаходження температури точки в'язко-крихкого переходу. Ця точка характерна тим, що в перерізі руйнування при ударі площа крихкої і в'язкої зон складають по 50%. Для досліджень

запропоновано взяти стандартні зразки на удар, вирізані з труб в стані поставки і труб, що були тривалий час в експлуатації. За різних температур проводяться стандартні дослідження на удар. За кожної температури в місці зламу визначають частку крихкої і в'язкої зон. Будуються відповідні графіки в координатах ударна в'язкість (КСУ) – температура (градус °С). Потім після знаходження точки в'язко-крихкого переходу на зразках з труб в стані поставки і труб по тривалій експлуатації, робиться висновок щодо температури точки в'язко-крихкого переходу.

Ця характеристика, на думку ряда авторів, також може бути показником деградації металу.

При виборі величин для кожної задачі треба враховувати, так би мовити, масштаб змін конкретної величини в процесі експлуатації. Як було сказано раніше, чутливих величин може бути досить багато. За відсутності нормативних документів дослідник сам може використовувати ті чи інші характеристики, виходячі з наявного обладнання, традицій організації або умов з боку замовника. Але коли за тривалий час експлуатації, наприклад, декілька десятків років зміна величини співставна з похибкою вимірювань, використання такої характеристики виглядає сумнівним.

Для багатьох трубопроводів причиною погіршення механічних характеристик є наводнювання металу, обумовлене складом робочого середовища. Саме воно змінює мікроструктуру металу. Тому при аналізі змін механічних характеристик таких об'єктів необхідно вимірювати наводнювання металу. Небезпека наводнювання полягає в тому, що пошкодженню підлягають не локалізовані частини трубопроводу, а метал в цілому. В цьому напрямку плідно розвивається теорія об'ємної пошкоджуваності школою професора Никофорчина в Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України [30].

4.3. Дослідження експлуатаційної деградації сталі а333 gr6 і підходи до оцінювання границі експлуатації.

Об'єктом досліджень була вибрана оццаннолегована сталь марки ASTM A333 Grade 6, яка є матеріалом труби магістрального аміакопроводу Тольяті-Горлівка-Одеса.

Механічні характеристики досліджувались після 140160 і 262800 годин експлуатації трубопроводу (за даними технічних звітів). Характеристики на момент початку експлуатації вибирались на основі паспортних даних. Дослідженню підлягали 5 труб, які мали наступні геометричні характеристики: труби №1, 2, 4- $\varnothing 323,8 \times 17,4$ мм; труба №3- $\varnothing 273 \times 10,31$ мм; труба №5- $\varnothing 317 \times 17,4$ мм. З усіх труб зразки виготовлялись з орієнтацією волокон паралельно поздовжній осі труби і визначалась умовна границя текучості $\sigma_{0,2}$ і визначався комплексний показник $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ (Рисунок 4.2, 4.3, 4.4, 4.5), а для труби №4 досліджувались зразки ще і з поперечним напрямком волокон (Рисунок 4.4, а). Крім того з труби №5 додатково були виготовлені зразки, що містили зварний шов (Рисунок 4.4, б).

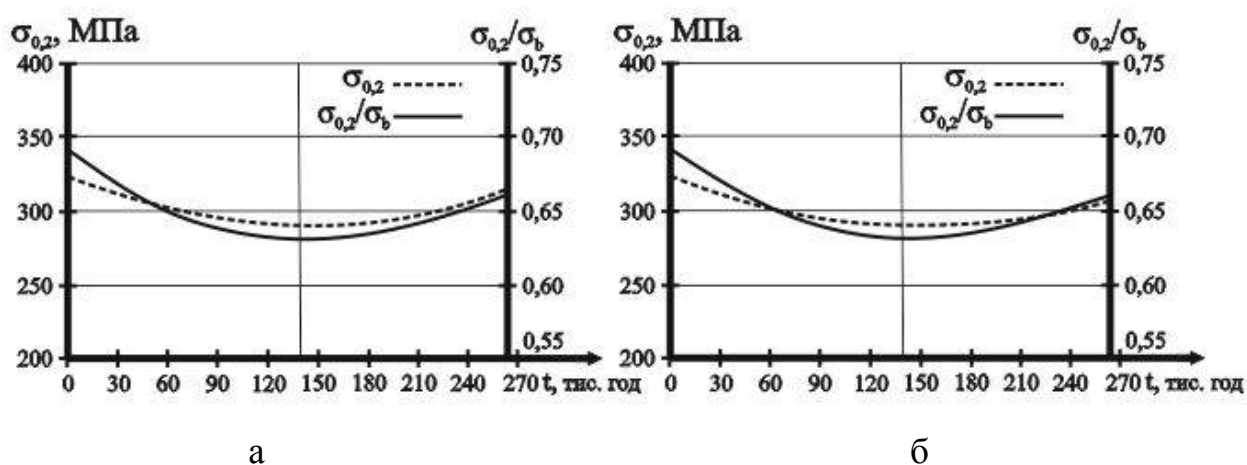


Рисунок 4.2 - Характеристика зміни умовної границі текучості і комплексного показника: а - труби №1; б - труби №2, зразки поздовжні.

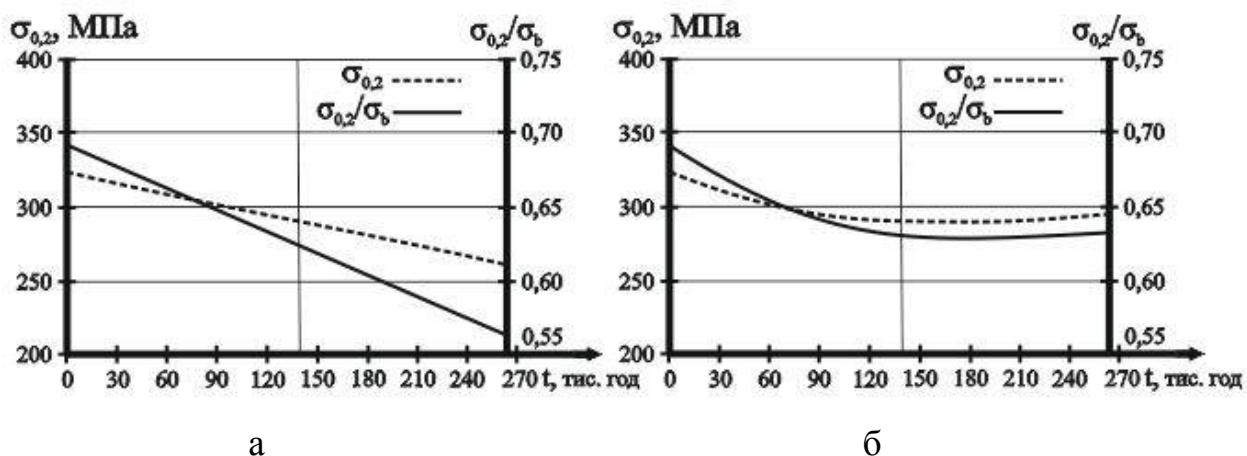


Рисунок 4.3 - Характеристика зміни умовної границі текучості і комплексного показника: а - труби №3, зразки поздовжні; б - труби №4, зразки поздовжні.

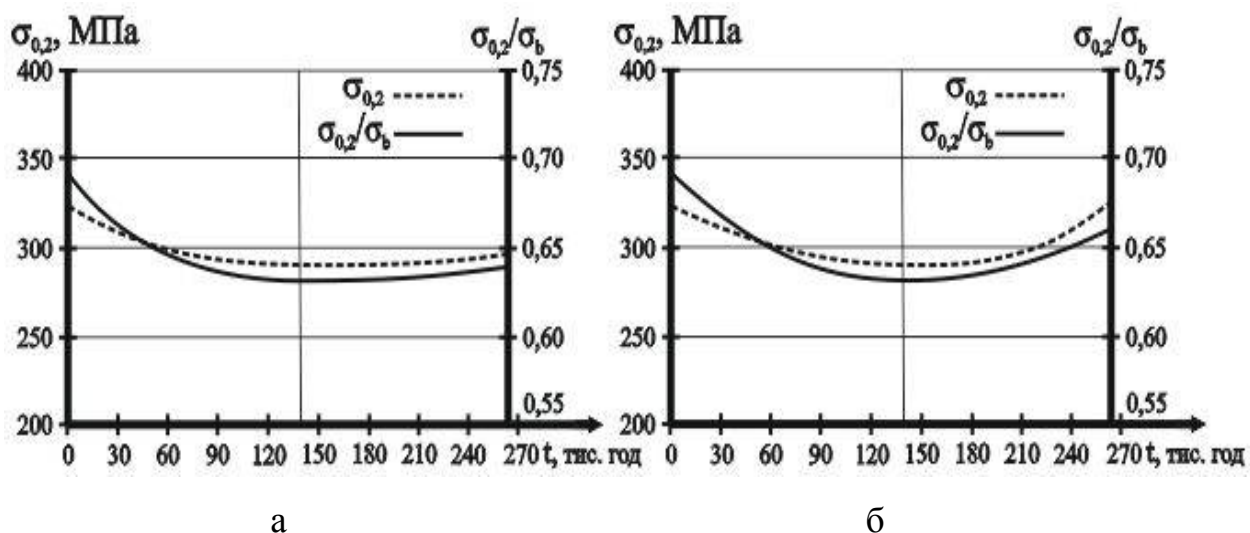


Рисунок 4.4 Характеристика зміни умовної границі текучості і комплексного показника: а – труби №4, зразки поперечні; б – труби №5, зразки зі швом.

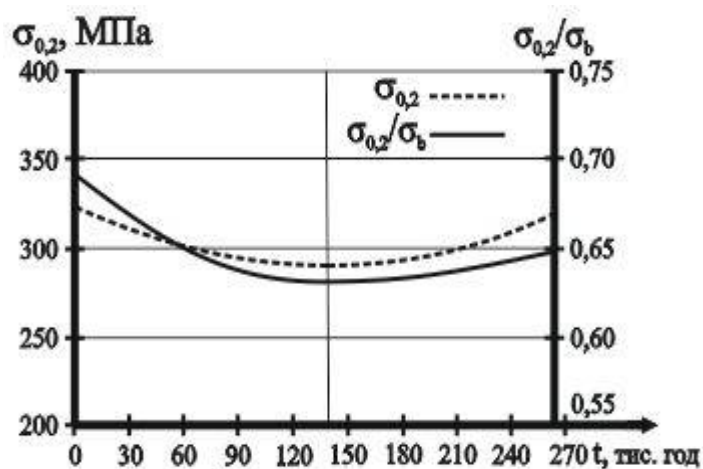


Рисунок 4.5 - Характеристика зміни умовної границі текучості і комплексного показника труби №5, зразки поздовжні.

Установлено, що згідно з характером змін в часі умовної границі текучості $\sigma_{0,2}$, на першому етапі експлуатації матеріал труб № 1, 2, 4, 5 підлягав розміцненню, а другий етап навпаки характеризувався зміцненням сталі. Матеріал труби № 3 проявив протягом експлуатації стійку тенденцію до розміцнення. Можливою причиною відмінностей характеристик труби №3 є її менші геометричні розміри і той факт, що вона, на відміну від інших була закопана в землю. Отже протягом експлуатації не піддавалась впливу змін зовнішньої температури.

В результаті обробки експериментальних даних установлено, що зміна в часі умовної границі текучості $\sigma_{0,2}$ описується рівнянням:

$$\sigma_{0,2} = k - mt + nt^2, \quad (4.4)$$

де k, m, n – сталі величини;

t – час, тис. год.

Значення величин k, m, n наведено в (Таблиці 4.3)

Таблиця 4.3 - Значення величин k, m, n для рівняння умовної границі текучості $\sigma_{0,2}$

	k	m	n
Труба №1, зразки поздовжні	326,3525	0,5780	0,00230
Труба №2, зразки поздовжні	327,7367	0,61416	0,00242
Труба №3, зразки поздовжні	335,4425	0,8192	0,00317
Труба №4, зразки поперечні	326,885	0,6714	0,00263
Труба №4, зразки поздовжні	329,066	0,65	0,00256
Труба №5, зразки поздовжні	326,015	0,5692	0,00227
Труба №5, зразки зі швом	320,81	0,5094	0,00203

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

$$\sigma_{0,2}/\sigma_b = a + bt - ct^2, \quad (4.5)$$

де a, b, c – сталі величини;

t – час, тис. год.

Значення величин a, b, c наведено в (Таблиці 4.4)

Таблиця 4.4 - Значення величин a, b, c для рівняння комплексного показника $\sigma_{0,2}/\sigma_b$

№ зразка	a	b	c
Труба №1, зразки поздовжні	0,702	0,000866	0,00000346
Труба №2, зразки поздовжні	0,702	0,000866	0,00000346
Труба №3, зразки поздовжні	0,733	0,001552	0,00000583
Труба №4, зразки поперечні	0,717	0,001283	0,00000495
Труба №4, зразки поздовжні	0,719	0,001324	0,00000509
Труба №5, зразки поздовжні	0,7168	0,001258	0,00000485
Труба №5, зразки зі швом	0,702	0,000866	0,00000346

Отримані дані підтверджують результати робіт інших дослідників [4, 5, 6] про тенденцію конструкційних матеріалів обладнання, що працює в умовах дії агресивного середовища до зміцнення протягом тривалої експлуатації.

Аналіз результатів випробувань на удар і отриманих значень величин KCV і KCU (Рисунок 4.5 – 4.8) і відповідності їх вимогам СНиП 2.05.06-85 дозволяє зробити наступні висновки.

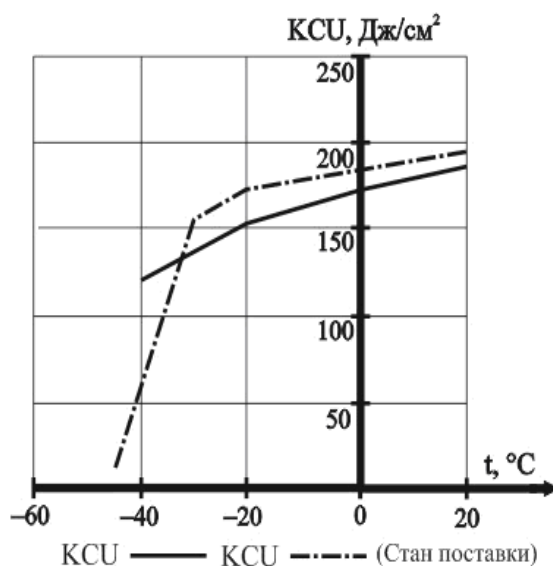


Рисунок 4.5 - Ударна в'язкість труби №1

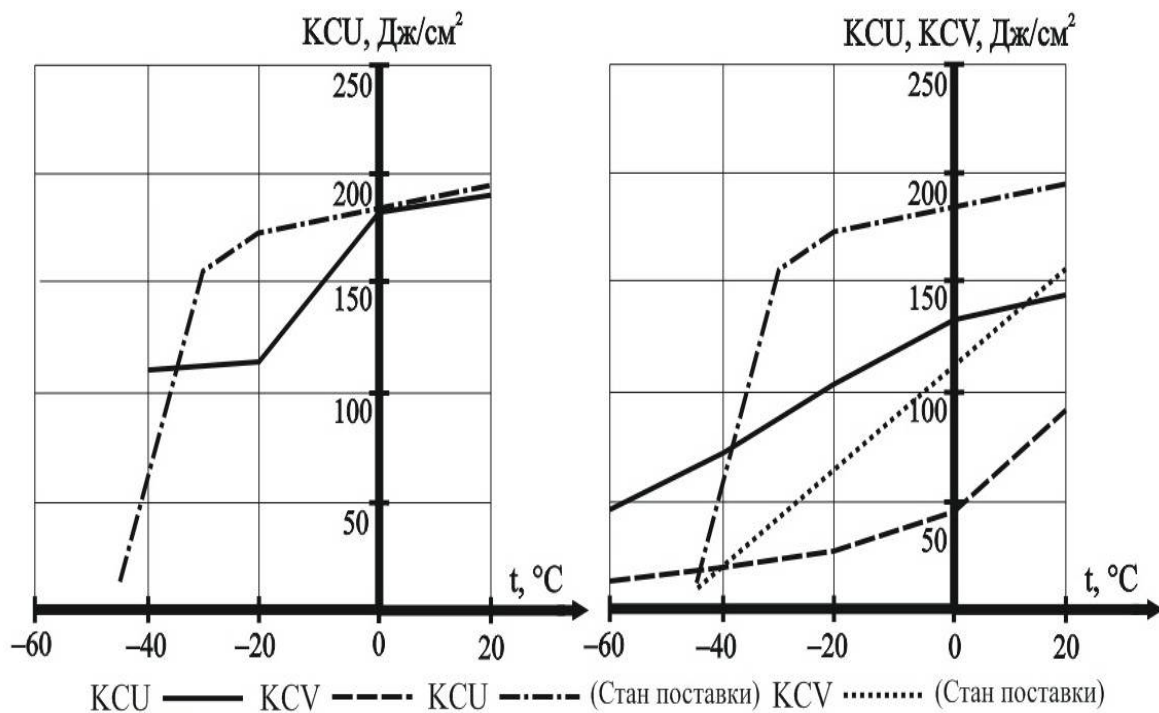


Рисунок 4.6 - Ударна в'язкість труби №2 і №3

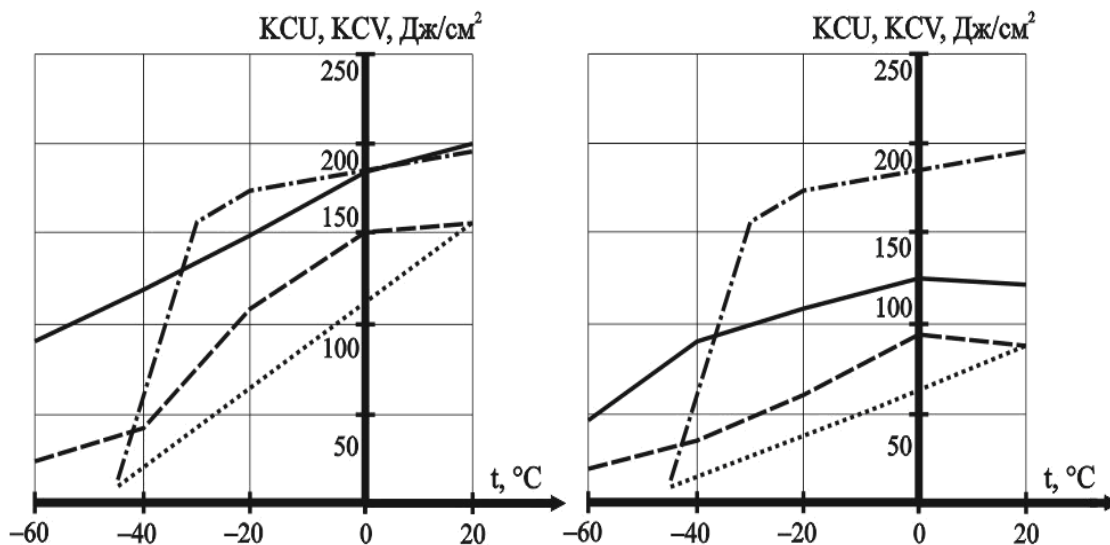


Рисунок 4.7 - Ударна в'язкість труби труби №4, зразки: а-поздовжні, б-поперечні

Метал труби №1 після тривалої експлуатації за характеристикою KCU мало відрізняються від характеристик металу в стані поставки і має практично лінійну залежність від температури. Метал труби №2 при граничних температурних значеннях +20°C і -60°C має тіж самі значення KCU, що і у труби №1. Як показали подальші дослідження % вмісту волокнистості, у метала труби №2 і інших труб,

температура - 20°C характеризує перехід від в'язкого руйнування до крихкого. Метал труби №3 за показниками KCV і KCU значно поступається металу в стані поставки. Метал з повздовжніх зразків труби №4 за характеристикою KCU аналогічний металу труб №1 і №2. А за KCV для зразків як з повздовжнім напрямком волокон так і з поперечним у всьому діапазоні температур навіть має кращі характеристики ніж метал в стані поставки (за літературними даними). Основний метал труби №5 після тривалої експлуатації за KCU має співставні характеристики з металом труб №1, 2,4.

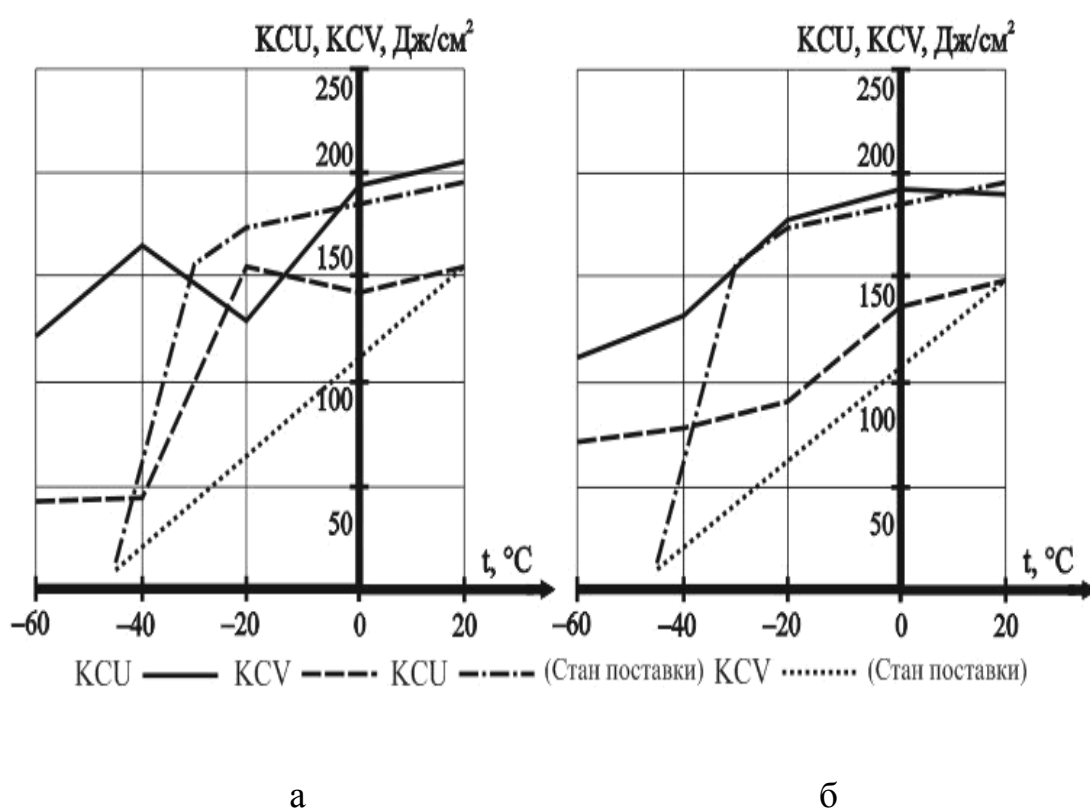


Рисунок 4.8 - Ударна в'язкість труби №5: а- зона термічного впливу, б- основний матеріал

В цілому можна відмітити, що метал усіх досліджених труб має задовільні характеристики. Хоча у метала труби №3 ударна в'язкість за температури +20°C має значення близьке до критичного.

На основі проведених досліджень були побудовані серіальні криві: залежність % волокнистості від температури при дослідженнях на удар. Для труб

були визначені T_v – верхня критична температура крихкості, де переріз зламу має не менше 95% волоктисності і T_n – нижня критична температура крихкості, де воловнистість менше 5%. На основі отриманих результатів можна зробити наступні висновки щодо змін % волокнистості при зміні температури випробувань.

Для труби №3 верхня критична температура крихкості T_v як за КСУ так і КСВ більше 20°C , T_n відповідно дорівнює -55°C і -40°C . Поріг холодноломкості за КСУ більше 75°C , за КСВ складає 60°C . Враховуючи, що мінімальна температура експлуатації дорівнює 0°C , можна констатувати відсутність запасу в'язкості за величиною середини порогу холодноломкості T_{50} як за КСУ, так і КСВ.

Для труби №4 T_v за обома показниками близька до 0°C , T_n для КСУ і КСВ більше -60°C . Поріг холодноломкості за КСУ і КСВ більше 60°C . Запас в'язкості за характеристикою T_{50} за КСУ дорівнює 30°C , а за КСВ 20°C .

Для труби №5 T_v за обома показниками близька до 20°C , T_n в обох випадках більше -60°C . Поріг холодноломкості за КСУ і КСВ більше 80°C . Запас в'язкості за характеристикою середини порогу холодноломкості T_{50} за КСУ дорівнює 30°C , а за КСВ 25°C .

Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки. Запас в'язкості для труби №3 вичерпано. Запас за нижньою температурою складає за КСУ і КСВ труби №3 відповідно 55°C і 40°C . Для труби №4 за нижньою температурою за обома показниками запас складає близько 60°C . Для труби №4, що закопана в землю T_n має значення нижче за мінімальну температуру експлуатації 0°C , що дозволяє подальшу експлуатацію. Для труби №5 мінімальна допустима температура під час експлуатації дорівнює -40°C , а T_n близько до -60°C , отже запас за температурою за обома показниками складає лише 20°C . Великий поріг хладноломкості характерний для всіх досліджених труб і досить великий розкид значень цієї характеристики (більше 20°C) говорить про суттєві деградаційні процеси в структурі металу, що відбулись за час тривалої експлуатації. Як відомо, величина порогу хладноломкості залежить від структури металу і його складу

[17]. Відмічені вище особливості змін цієї характеристики дозволяють передбачати відповідні аномалії, що і було підтверджено вимірюванням вмісту водню (Таблиця 4.5) і металографічними дослідженнями.

Таблиця 4.5 - Пошаровий вміст водню в трубах

Номер труби	Марка сталі	Вміст H ₂ , см ³ /100 г металу		
		Внутрішня поверхня	Середина перетину	Зовнішня поверхня
1	A333 Grade 6	8,63	7,85	5,85
2	A333 Grade 6	5,93	9,60	8,92
3	A333 Grade 6	6,95	27,71	3,60
4	A333 Grade 6	3,34	7,54	7,90
5	A333 Grade 6	17,51	87,75	10,10

Сталі такого класу в стані поставки мають максимальний вміст водню в інтервалі значень 1-3 см³/100 г металу. Для всіх труб відмічається високий вміст водню (перевершує норму в 2-30 раз), чіткого розподілу водню за товщиною труби не спостерігається. Корисні порівняння отриманих результатів можна провести з результатами робіт [29,32].

Для досліджень утяжки використовувались зразки, що пройшли випробування на ударну в'язкість всіх труб зі сталі A333 Grade 6 і труби №6 з оцаднолегованої сталі X46 (Рисунок 4.9 – 4.12).

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити наступні висновки. За час тривалої експлуатації сталей A333 Gr6 утяжка залишається характеристикою чутливою до зміни температури. Метал труби №3 (Рисунок 4.9) має практично лінійну залежність у всьому інтервалі змін температури як за KCV так і за KCU. Інтервал значень утяжки складає 1,5 мм і чутливість зберігається у всьому температурному діапазоні від +20°C до - 60°C.

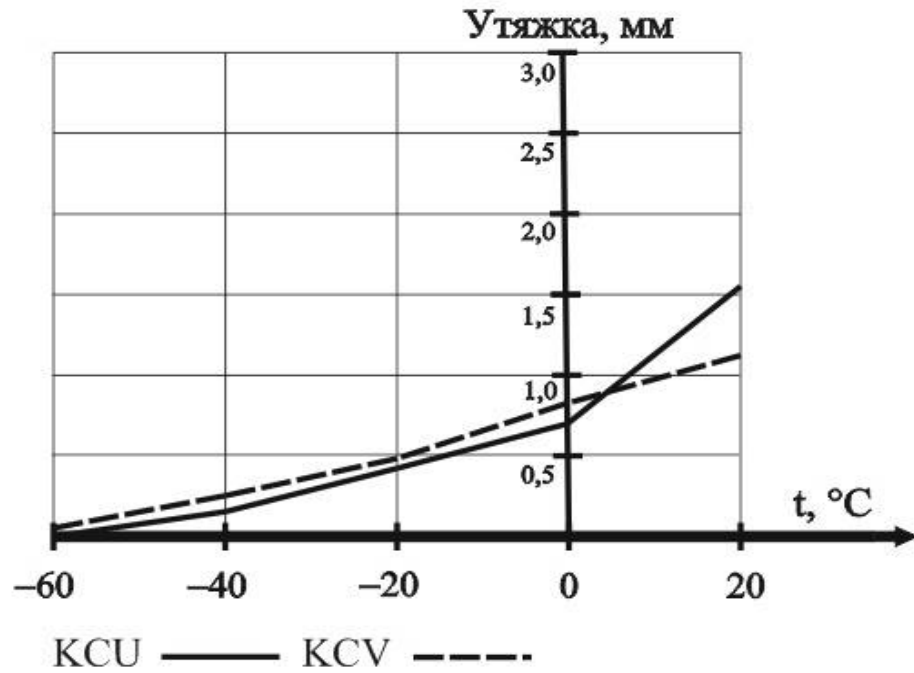


Рисунок 4.9 - Утяжка труби №3

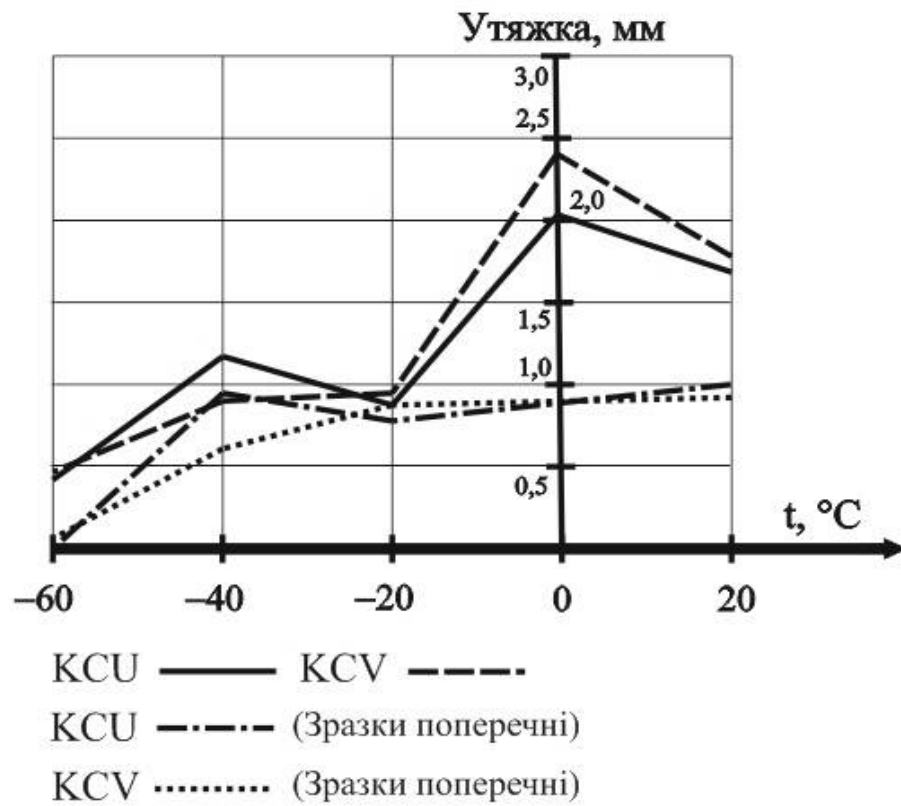


Рисунок 4.10 - Утяжка труби №4

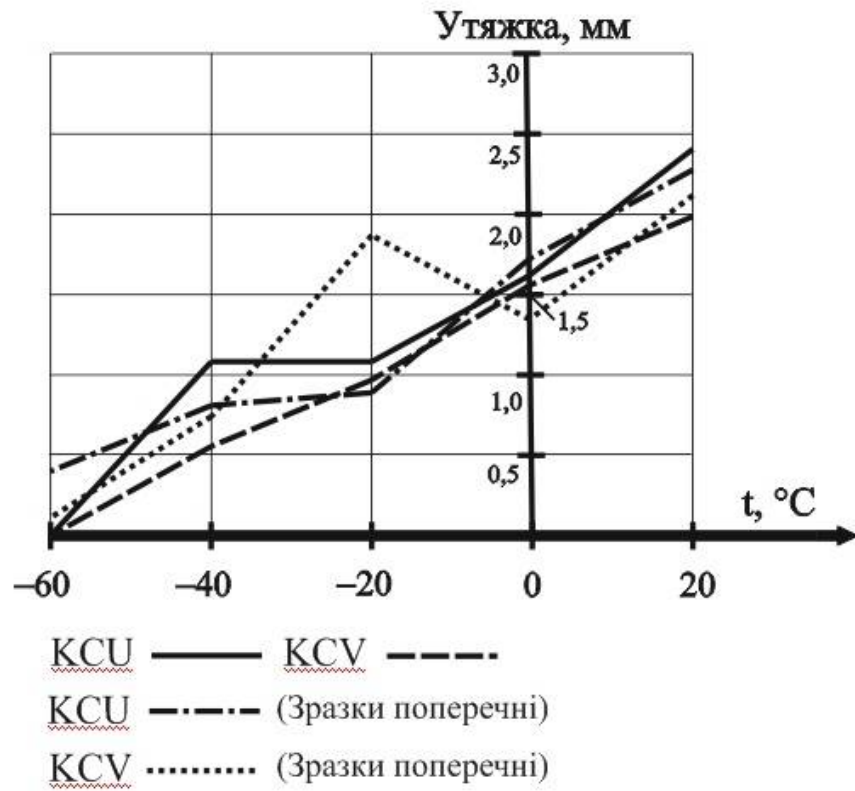


Рисунок 4.11. - Утяжка труби №5

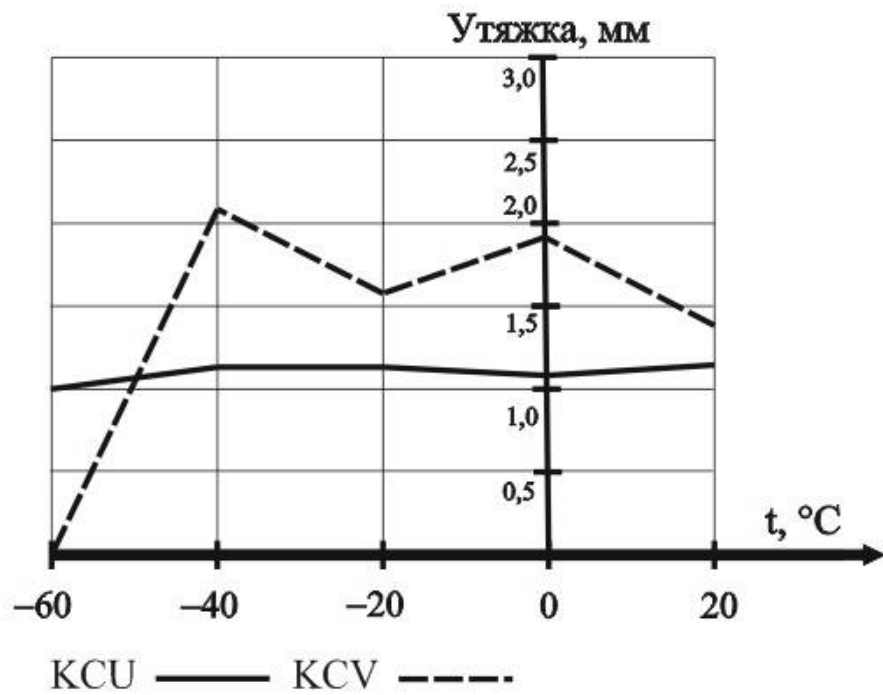


Рисунок 4.12 - Утяжка труби №6

Для труби №4 і №5 інтервал змін величини утяжки складає близько 2,5 мм. Додаткові дослідження % вмісту волокнистості в перерізі зламу дозволив пояснити перелам на графіку (Рисунок 4.9– 4.10) за температури -20°C тим, що за цієї температури відбувається перехід характеру зламу від в'язкого до крихкого. При зьому змінюється механізм руйнування.

Труба №6 зроблена з металу іншого хімічного складу. Можна відмітити, що за характеристика КСУ (Рисунок 4.12) при зміні температури залишається практично однаковою, тобто є нечутливою до зміни температури. Більш гострий концентратор напружень (характеристика КСV) дозволив підвищити чутливість утяжки до зміни температури.

Щодо використання величини утяжки для оцінювання деградації сталей можна зробити наступні висновки. Утяжка залишається чутливою характеристикою для сталі A333 Gr6 і після тривалої експлуатації. За умови наявності для досліджених металів аналогічних характеристик на момент початку експлуатації їх порівняння дозволило б більш повно оцінити ступінь деградації металу за час експлуатації. При аналізі змін утяжки слід враховувати те, що верхня критична температура крихкості T_v для цих сталей має досить велике значення. При проведенні досліджень в інтервалі температур від $+20^{\circ}\text{C}$ до -60°C за температури близько -20°C відбувається зміна механізму руйнування від в'язкого до крихкого. Отже необхідно при аналізі характеристик пов'язаних з випробуваннями на удар враховувати цю суттєву особливість.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

При виконанні магістерської роботи, в учбовому закладі нам треба було дотримуватись деяких інструкцій з техніки безпеки, а саме «Інструкція з безпеки життєдіяльності № 4». Яка діє при проведенні навчального процесу у комп'ютерних лабораторіях кафедри машинознавства та обладнання промислових підприємств (МОПП).)», «Інструкція з безпеки життєдіяльності № 8 при виконанні лабораторних робіт студентами кафедри машинознавства та обладнання промислових підприємств (МОПП)», Та «Інструкція з охорони праці № 11». Яку треба дотримуватись при роботі на електрообладнанні, вимірювальних приладах і персональному комп'ютері на кафедрі машинознавства та обладнання промислових підприємств (МОПП)».

Зпочатку розглянемо загальні положення інструкції з безпеки життєдіяльності №4. В яких говориться, про обов'язкове дотримання цієї інструкції під час роботи в комп'ютерних лабораторіях закладу. Для роботи із засобами обчислювальної техніки допускаються особи, які пройшли медичний огляд та інструктаж з питань охорони праці та безпеки життєдіяльності: вступний - при зарахуванні до університету; первинний - перед початком занять в комп'ютерній лабораторії; плановий - при зміні умов виконання навчальних завдань, при порушенні студентами вимог нормативно-правових актів про охорону праці. Студенти, які не пройшли медичний огляд і інструктаж з питань охорони праці та безпеки життєдіяльності у встановлені терміни, до занять в лабораторіях не допускаються.

Категорично забороняється:

- приступати до роботи із засобами обчислювальної техніки в стані алкогольного, наркотичного та токсичного сп'яніння.
- користуватися електронагрівальними приладами, встановлювати на вікнах глухі решітки, користуватися відкритим вогнем у приміщеннях комп'ютерних лабораторій.

Небезпечними і шкідливими виробничими факторами при роботі із засобами обчислювальної техніки є:

- електромагнітне і рентгенівське випромінювання;
- електростатичне поле між екраном монітора і користувачем.

Тому робочі місця студентів при роботі із засобами обчислювальної техніки в комп'ютерних лабораторіях повинні бути організовані відповідно до таких вимог:

- комп'ютерні приміщення, повинні мати підлоги з поверхнею, пристосованої до вологого прибирання;
- площа на одного студента, який працює з персональним комп'ютером, повинна становити не менше $6,0 \text{ м}^2$, загальний обсяг - не менше 20 м^2 ;
- при оформленні приміщень комп'ютерних лабораторій забороняється застосовувати полімерні матеріали (деревинно-стружкові плити, пенопласт, синтетичні матеріали та інші.), які виділяють в навколишнє середовище шкідливі хімічні речовини.
- на вікнах повинні бути жалюзі або штори.

Освітлення

- комп'ютерні лабораторії повинні мати природне і штучне освітлення;
- при штучному освітленні повинні застосовуватися переважно люмінесцентні лампи;
- необхідно проводити очищення вікон і світильників не рідше двох разів на рік, а також заміну перегорілих ламп по мірі їх виходу з ладу;
- необхідно забезпечення правильного розміщення робочих місць відносно джерел світла.

Мікроклімат

- в комп'ютерних лабораторіях температура повітря повинна бути $19,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$; відносна вологість повітря $60 \pm 5\%$, швидкість руху повітря не більше $0,1 \text{ м/с}$;
- для охолодження і очищення повітря від пилу необхідно встановлювати кондиціонери.

Обладнання та організації робочого місця:

- основним обладнанням робочого місця з персональним комп'ютером є монітор, клавіатура, стілець (крісло), робочий стіл, допоміжним - пюпітр, підставка для ніг та інше;
- робочій стол повинен забезпечувати можливість оптимального розміщення на його поверхні обладнання.
- стілець (крісло) повинен забезпечувати підтримку раціональної пози при виконанні робочих операцій, створювати умови для зміни пози з метою зниження статичного напруження м'язів шийно-плечової області і спини та попередження стомлюваності.

Електробезпека:

- комп'ютерна лабораторія має бути обладнана автономним заземленням; це робиться за допомогою штатного кабелю живлення з заземлювальним провідником і триполюсні розетки;
- неприпустимо підключення комп'ютера і периферійних пристроїв до звичайної двопровідної мережі, в тому числі з використанням перехідних пристроїв;
- електричні кабелі не повинні зашкоджати ногам користувачів. Кабелі які йдуть по підлозі, повинні бути прокладені в спеціальних коробах де забезпечується їх захист від механічних пошкоджень.

Пожежна безпека:

- забороняється користуватися електронагрівальними приладами;
- встановлювати на вікнах глухі решітки;
- користуватися відкритим вогнем.

Перед початком роботи

- оглянути справність кабелів живлення, вилок, розеток, заземлення.
- переконатися в достатності освітлення місця роботи.

- при виявленні будь-яких негараздів негайно повідомити викладачеві, або зав. лабораторією.

Після закінчення роботи

- вийти з програми, та завершити роботу з компом. Знеструмити робоче місце.

- повідомити про закінчення роботи викладачеві, який проводив заняття або зав. лабораторією.

Аварійні ситуації

- при виникненні будь-якої аварійної ситуації негайно повідомити викладачеві, або іншому дорослому.

Інструкція з безпеки життєдіяльності розроблена з урахуванням правил роботи з електроустановками та електроприладами для студентів при виконанні лабораторних робіт у лабораторіях кафедри електронних апаратів.

- для виконання лабораторних робіт допускаються студенти, які пройшли медичний огляд і інструктаж з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

- студенти допускаються до виконання робіт тільки під керівництвом викладача.

- при виконанні лабораторних робіт на кафедрі електронних апаратів є можливість ураження електричним струмом. Напруга вище 36 В змінного струму є небезпечним для життя.

- усі хто знаходяться в лабораторії під час лабораторних робіт, повинні вміти надати першу допомогу потерпілому при ураженні електричним струмом.

- також треба знати місце розташування первинних засобів пожежогасіння та вміти ними користуватися при необхідності.

- забороняється приймати їжу у лабораторії.

- забороняється виконувати лабораторні роботи в стані алкогольного, наркотичного та токсичного сп'яніння.

Перед початком роботи необхідно візуально перевірити справність обладнання, проводки, вилок, розеток, перевірити достатність освітлення робочих місць, цілісність заземлюючих провідників і надійність заземлюючих контактів на робочих столах і на контурі захисного заземлення.

При виявленні будь-яких негараздів, до роботи не приступати, негайно повідомити викладачеві, або зав. лабораторією.

При виконанні роботи працювати тільки на справному обладнанні, підключати і відключати електроприлади необхідно тільки тримаючись за вилку.

Забороняється:

- торкатись електрообладнання та електроприладів мокрими або вологими руками;

- самовільно виконувати будь-які ремонтні роботи на електрообладнанні і електроприладах, переміщати з місця на місце включені в мережу електроприлади;

- підключати кілька споживачів електроенергії до однієї мережевої розетки, для уникнення перевантаження;

- всіляко перешкоджати доступу до електричних пристроїв (шаф, автоматичних вимикачів, розеток) і відкривати їх.

Після закінчення роботи необхідно відключити електроприлади та електрообладнання, навести порядок на робочому місці.

Аварійні ситуації:

- загоряння горючих матеріалів;

- ураження електричним струмом.

Серед причин займання горючих матеріалів, можуть бути: перегрів електронних компонентів схем, проводів, утворення електричних іскор і дуг.

Якщо сталось загоряння, слід негайно знеструмити електрообладнання загальним автоматичним вимикачем і приступити до гасіння пожежі первинними за-

собами пожежогасіння. Доповісти про спалах викладачу, зав. лабораторією і надалі діяти за їх вказівками.

У разі ураження чоловіка електричним струмом треба: знеструмити електрообладнання, надати першу допомогу потерпілому, при необхідності викликати швидку допомогу за тел. 103. Негайно повідомити про подію викладачеві, зав. лабораторією.

Тепер детальніше розглянемо інструкцію з охорони праці

Як вже писалось раніше напруга вище 36 V змінного струму і 110 V постійного струму є небезпечним для життя. При роботі на електроустановках до 1000 V потрібно суворо дотримуватися правил техніки безпеки. За порушення вимог цієї інструкції винні притягуються до відповідальності.

- до роботи з електрообладнанням в лабораторіях допускаються абітурієнти не молодше 18 років, які мають відповідну кваліфікацію, пройшли медичний огляд і визнані придатними до виконання даних робіт.

- до роботи з електрообладнанням допускаються студенти, які пройшли інструктаж, навчання та перевірку знань з питань охорони праці.

- працівники, зайняті на роботах з електрообладнанням і приладами кафедри МОПП, повинні мати 2 групу з електробезпеки, та щорічно проходити медичний огляд і перевірку знань з питань охорони праці.

- лаборанти, зайняті на роботах з електрообладнанням і приладами на кафедрі МОПП, повинні бути забезпечені спецодягом та іншими засобами індивідуального захисту відповідно до норм: халат бавовняний - 12 міс.

- спецодяг та інші засоби індивідуального захисту зберігаються в спеціально відведеному місці. Користуватися можна тільки особистом спецодягом. Забороняється перебувати в лабораторії в верхньому одязі і класти одяг на обладнання лабораторії, та столи.

- працівники кафедри МОПП зобов'язані дотримуватися правил особистої гігієни. Мити руки перед їжею. Забороняється приймати їжу на робочому місці.

- у приміщеннях, де експлуатуються персональні комп'ютери та інша техніка, має застосовуватися змішане освітлення. Не рекомендується працювати на комп'ютері в повній темряві.

- у лабораторії обов'язково повинна бути аптечка для надання першої допомоги при порізі, опіку, отруєння та інших нещасних випадках.

- для запобігання можливих загорянь і пожеж, лабораторії повинні бути оснащені необхідними засобами пожежогасіння (вогнегасники, ящики з піском)

- якщо є потреба руху з робочого місця до будь-якого об'єкта, за розпорядженням керівника робіт, необхідно пересуватися згідно з правилами дорожнього руху.

Перед початком роботи:

Необхідно одягнути спецодяг, перевірити з'єднання обладнання з контуром захисного заземлення, справність обладнання, інструменту, автоматичних вимикачів, розеток, вилок, освітлення, а також наявність первинних засобів пожежогасіння.

Перед підключенням обладнання до мережі необхідно перевірити заземлення в мережевих розетках. Підключення системного блоку комп'ютера і монітора до мережі змінного струму здійснювати за допомогою спеціальної розетки, що має заземлюючий контакт. Заземлювальні контакти розеток повинні бути надійно з'єднані з контуром захисного заземлення.

Перед початком роботи заземлити прилади, принтери та інші периферійні пристрої.

При роботі на електрообладнанні необхідно строго керуватися правилами, викладеними в технічному паспорті. Особливу увагу слід приділяти електрообладнанню, яке цілодобово працює.

При виявленні несправностей електрообладнання, приладів, стендів, захисного заземлення повідомити про це завідувачому кафедрою, завідувачеві лабораторії чи іншого керівника робіт.

Працівникам і студентам дозволяється працювати тільки на справних вимірювальних приладах, персональних комп'ютерах і іншому електрообладнанні.

При роботі з електрообладнанням і електроприладами можливі випадки ураження людей електричним струмом.

Причинами цього можуть бути:

- одночасний дотик руками або металевим предметом до корпусу електрообладнання і оголених проводів;
- робота на несправному електрообладнанні;
- порушення правил користування електрообладнанням.

Працівникам і студентам забороняється:

- працювати на вимірювальних приладах, персональному комп'ютері при знятому кожусі, з'єднувачі сполучати ривками, докладаючи значних зусиль;
- висмикувати штепсельні роз'єми, вилки і фішки, взявшись за провід. Відключення виробляти тільки взявшись за роз'єм, вилку або фішку, щоб уникнути короткого замикання і можливого при цьому нещасного випадку (опіку);
- працювати на вимірювальних приладах, персональному комп'ютері у вологому одязі, вологими руками, перебувати від монітора або телевізора на відстані менше 50 см, перекривати вентиляційні отвори в корпусі системного блоку і приладах, встановлювати на корпус персонального комп'ютера і іншу оргтехніку сторонні предмети;
- палити в лабораторіях;
- залишати без нагляду, ремонтувати і переносити включене в мережу електрообладнання;
- підключати кілька споживачів електроенергії до однієї змінного струму;
- заміна перегорілих запобіжників «жучками». Необхідно застосовувати тільки калібровані запобіжники заводського виготовлення.
- захаращувати підступи до електричних пристроїв (шаф, автоматичних вимикачів, розеток), а також відкривати їх;
- використання бензину, гасу та інших легкозаймистих рідин при проведенні профілактичних і ремонтних робіт, також зберігати ці речовини більш ніж 0,5літра.

Роботи по ремонту вузлів, блоків персонального комп'ютера і приладів безпосередньо в лабораторії не допускаються. Ремонт електрообладнання та вимірювальних приладів повинні виконувати працівники кафедри і в окремих приміщеннях.

При раптовому припиненні подачі електроенергії все вимикачі і рубильники повинні бути негайно вимкнені.

Не допускається залишати неізольованими оголені дроти, перевантажувати електромережу, користуватися розбитими вилками, розетками та вимикачами.

Роботи з ремонту апаратури і проведення експериментів на відкритих схемах з небезпечним для життя напругою виконувати тільки вдвох.

При роботі з електропаяльником слід використовувати вогнетривку підставку з пристроєм для зменшення споживаної потужності в неробочому стані.

Робоче місце містити в сухому і чистому стані.

При виявленні несправностей електрообладнання, вимірювальних приладів, стендів, при відсутності їх заземлення, а також при появі іскріння або характерного запаху перегрітої ізоляції, негайно знеструмити їх і повідомити про це керівнику занять, обслуговуючому персоналу або безпосередньо керівнику.

Приступати до роботи дозволяється тільки після усунення помічених несправностей електрообладнання, вимірювальних приладів і стендів.

Приміщення, в якому встановлені персональні комп'ютери та інша техніка, має мати автономний контур захисного заземлення.

Обладнання має бути, розташоване, на відстані не менше 1 м від нагрівальних приладів і не повинна бути під впливом прямих сонячних променів.

При проведенні профілактичних і ремонтних робіт дозволяється використовувати ізопропіловий або етиловий спирт.

Дозволяється зберігати запас легкозаймистих рідин, що не перевищує 0,5 літра. Зберігання запасу дозволяється в неспаленої тарі з щільно закритою кришкою.

Після закінчення роботи необхідно вимкнути прилади, персональні комп'ютери, стенди, всі автоматичні вимикачі, відключити використовувані подовжувачі мережі 220 V.

Один раз в квартал проводити очищення від пилу і бруду за допомогою пилососа, щітки і бязі вузлів вимірювальних приладів, персональних комп'ютерів, макетів, і іншого електроустаткування.

Забороняється проводити очищення від пилу і бруду включене в мережу 220 V електрообладнання.

Зняти спецодяг, помістити її в спеціально відведене місце.

При відході з приміщення необхідно вимкнути всі споживачі електроенергії.

Про виявлені під час роботи і після закінчення роботи про несправності й неполадки електроустаткування повідомити керівнику занять, обслуговуючому персоналу або безпосередньо керівнику робіт.

Здати ключі від лабораторії сторожу-вахтеру.

При роботі з електрообладнанням і вимірювальними приладами на кафедрі МОПП можливі наступні аварійні ситуації:

- загоряння горючих матеріалів;
- поразка електричним струмом.

Джерелами загоряння в лабораторіях, комп'ютерному класі можуть бути електронні вузли приладів і блоки комп'ютерів, принтерів, приладів, пристроїв електроживлення, електропаяльники, де в результаті різних порушень перегріваються електронні компоненти схем, дроти, утворюються електричні іскри і дуги, здатні викликати загоряння горючих матеріалів.

Обслуговуючий персонал і користувачі вимірювальних приладів, персональних комп'ютерів зобов'язані знати розташування засобів пожежогасіння та вміти ними користуватися.

При пожежі:

- негайно знеструмити все електрообладнання загальним автоматичним вимикачем;

- негайно евакуувати в безпечне місце постраждалих людей;
- повідомити по телефону 101 до служби порятунку;
- видалити в безпечне місце неушкоджені комп'ютери та прилади;
- приступити до гасіння пожежі первинними засобами пожежогасіння;
- довести до відома керівництво інституту про те, що сталося;
- електрообладнання гасити вуглекислотними вогнегасниками (ВВ), порошковими вогнегасниками (ВПУ) або сухим піском;
- гасити електрообладнання і дроти водою забороняється.

У разі ураження електричним струмом слід негайно знеструмити електрообладнання і викликати швидку допомогу за телефоном 103. Працівники та студенти зобов'язані знати заходи надання першої допомоги потерпілому при ураженні електричним струмом і вміти надати при необхідності.

Негайно повідомити про нещасний випадок безпосереднього керівника робіт, завідувачу кафедри або завідувачу лабораторії.

ВИСНОВКИ

Узагальнюючі результати роботи з визначення механічних характеристик сталі A333 Gr6, можна зробити наступні висновки:

- підтверджена висока чутливість умовної границі текучості $\sigma_{0,2}$ і комплексного показника $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ до деградації конструкційних сталей;
- установлені функціональні залежності змін в часі умовної границі текучості $\sigma_{0,2}$ і комплексного показника $\sigma_{0,2}/\sigma_b$, що дозволяє прогнозувати поведінку цих величин принаймні в близькій перспективі (декілька тисяч годин);
- визначені пороги холодноламкості, запас в'язкості і досліджено характер змін утяжки для металу досліджених труб;
- досліджено величину наводнювання металу труб і розподіл його по товщині стінки;

Щодо залишкового ресурсу досліджених труб можна зробити наступні висновки. Труба №3 вичерпала свій ресурс і підлягає заміні. Інші труби можуть експлуатуватись і далі. Але враховуючи значне наводнювання, стійкі тенденції до зміцнення у всіх досліджених труб і отримані результати при ударі термін до чергового обстеження орієнтовно складає 1-1,5 року.

В цілому результати проведеної роботи дозволяють більш точно прогнозувати зміну механічних характеристик в часі, що підвищує безпеку експлуатації і забезпечує точніше прогнозування залишкового ресурсу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Похмурский В. И. Коррозионная усталость материалов / В. И. Похмурский – М: Металлургия, 1985. - 208 с.
2. Панасюк В. В. Механіка руйнування і міцність матеріалів. 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.
3. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
4. Андрейкив А. Е. Усталостное разрушение и долговечность конструкций / А. Е. Андрейкив, А. И. Дарчук. – К.: Наук. думка, 1992. – 183 с.
5. Похмурський В. І. Корозійна втома металів і сплавів / В. І. Похмурський, М.С. Хома. – Львів: Сполом, 2008. – 301 с.
6. Архипов О. Г.. Оцінка ступеня деградації сталей комплексом механічних характеристик / О. Г. Архипов // Фіз. – хім. механіка матеріалів. – 2008. - Спец. вип. № 7. – С. 744 - 749.
7. ANSI / ASME B31G – 1991. Manual for Determining the Remaining Strengyth of Corroded Pipelins. – ASME. New – York
8. Rietjens I.P. Safely weld and repail inservice pipe lines // Pipe Line Industry. 1986. December. – P. 26-29.
9. Хромченко Ф. А. Оценка остаточного ресурса сварных соединений паропроводов для условий ползучести / Ф. А. Хромченко, В. А. Лаппа // Сварочное производство. – 1996. - № 5. – С. 14-17.
10. Кеннеди А. Д. Ползучесть и усталость в металлах / М.: Металлургия. 1965. - 361 с.
11. Dolby R. E., Cane M. Assessment of degradation of mechanical properties of steels and weldments for pressure vessels and piping // Metal Constr. And Brit. Weld. J., 1971, 3, № 9, P. 351 – 354.

12. Крижанівський Є. І. Особливості корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів і резервуарів зберігання нафти / Є. І Крижанівський., Г. М Никифорчин. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – № 2. – С.11-20.

13. Environmentally assisted “in-bulk” steel degradation of long term service gas trunkline / Н. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsygulnyk, et al. // Engineering Failure Analysis. – 2010. – V. 17. – P. 624-632.

14. Ямалеев К. М. Старение металла труб в процессе эксплуатации нефтепродуктов / К. М. Ямалеев– М.: ВНИИОЭНГ, 1990. – 62 с.

15. Архипов О. Г. Зміни властивостей низьколегованих сталей внаслідок процесу старіння / О. Г. Архипов, В. А. Борисенко.

16., Галабурда Н. І. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. - 2007. - №5. – С. 53-58.

17. Гумеров А. Г. Характер разрушения металла труб нефтепроводов при малоцикловом нагружении / А. Г. Гумеров, К. М. Ямалеев // Нефтяное хозяйство. – 1985. - №6. – С. 46-48.

18. Гуляев А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. - М.: Металлургия, 1974. – 476 с.

19. Колотыркин Я. М. Металл и коррозия / Я. М. Колотыркин. – М.: Металлургия, 1985. – 88 с.

20. Карпенко Г.В. Прочность стали в коррозионной среде / Г.В. Карпенко. – М.: Машгиз, 1963. – 185 с.

21. Кузюков А. Н. Обследование и защита от коррозии химического оборудования / [А. Н. Кузюков., В. А. Борисенко., Л. Б. Березовский., Б. Н. Лищина.]. – К.: Техніка, 1982. – 104 с.

22. Новицкий В.С. Контроль коррозионного состояния технологического оборудования по потенциалу коррозии / В. С. Новицкий, В. С. Кузуб // Физ.- хим. механика материалов. – 1985. - № 1. – С. 76-82.

23. ГОСТ 9. 908 – 85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. - М.: Изд-во стандартов, 1986.

24. Маннапов Р. Г. Оценка надежности химического и нефтяного оборудования при поверхностном разрушении / Р. Г. Маннапов - М.: ЦИНТИ химнефтемаш, 1988. – 47 с. (Обзор. информ. Сер. ХМ – 1).

25. Писаренко Г. С. Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях / Г. С. Писаренко – К.: Наук. думка, 1980. – Т. 1. – 535 с.

26. Трощенко В. Т. Усталость и неупругость металлов / В. Т. Трощенко – К.: Наук. думка, 1971. – 179 с.

27. Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов / В. В. Панасюк. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.

28. Дмитрах І. М., Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень / І. М. Дмитрах, В. В. Панасюк. – Львів: НАН України, Фізико – механічний інститут ім. Г. В. Карпенка, 1999. – 341 с.

29. Хома М. С. Розвиток локальних корозійних процесів при циклічному деформуванні нержавіючих сталей / М. С. Хома // Вісник ДУ “Львівська політехніка”. Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 1997. - № 333. – С. 59-61.

30. Похмурський В. І. Характер локалізації корозійних пошкоджень при циклічних навантаженнях та їх вплив на витривалість корозійнотривких сталей / В. І. Похмурський, М. Хома // Фіз.- хім. механіка матеріалів. Спец. випуск №1. – 2000. – С. 9-15.

31. Хома М. С. Теоретичні основи початкової стадії корозійно-втомного руйнування корозійнотривких сталей і сплавів та розробка методів прогнозування їх границі витривалості: дис. ... доктора техн. наук: 05.17.14. / М. С. Хома. – Львів, 2003. – 292 с.

32. Маннапов Р. Г. Статистические закономерности коррозионного разрушения поверхности металлов / Р. Г. Маннапов // Надежность и контроль качества. – 1988. - № 9. – С. 48-52.

33. Александров А. А. Прогнозирование механических характеристик металла оборудования и трубопроводов при эксплуатации / А. А. Александров. – Уфа: БЭСТС, 2004. – 42 с.

34. Зайнуллин Р. С. Расчет ресурса оборудования и трубопроводов с учетом механохимической коррозии и неоднородности / Р. С. Зайнуллин. – Набережные Челны: Изд-во Камского гос. политехн. института, 2003.- 282 с.

35. Кузюков А. Н. Теория и практика коррозии и защиты металлов и оборудования химических и нефтехимических производств / А. Н. Кузюков. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2004. – 184 с.

36. Чигал В. С. Межкристаллитная коррозия нержавеющей сталей / В. С. Чигал. – Л.: Химия, 1969. – 232 с.

37. Гуляев А. П. Разложение ударной вязкости на ее составляющие по данным испытания образцов с разным надрезом / А. П. Гуляев // Заводская лаборатория. – 1967. - №4. – С. 473-475.