

# Методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики

УДК 620.192.4:620.179

## ОСОБЛИВОСТІ ДЕГРАДАЦІЇ СТРУКТУРИ МАТЕРІАЛІВ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ДОВГОТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ЇЇ ДІАГНОСТУВАННЯ В НАФТОГАЗОВОМУ КОМПЛЕКСІ

В.Д. Миндюк, Є.Р. Доценко, М.О. Карпаш

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
e-mail: tinlaven@mail.ru; dotsenko@nung.edu.ua

*Проведено аналіз особливостей зміни структури у ході експлуатації деяких класів залізовуглецевих сталей, з яких виготовлені металоконструкції відповідальних об'єктів нафтогазової галузі для роботи в складних умовах. Встановлено найбільш виражені параметри структурних змін, які взаємопов'язані з механічними та фізичними властивостями матеріалів. Визначено комплекс фізичних структурночутливих параметрів для структуроскопії неруйнуючими методами.*

Ключові слова: деградація, структура, фаза, розмір зерна, інформативний параметр, механічні властивості, структуроскопія.

*Проанализировано особенности изменения структуры в процессе эксплуатации некоторых классов железуглеродистых сталей, из которых изготовлены металлоконструкции ответственных объектов нефтегазовой отрасли, работающих в сложных условиях. Установлены наиболее выражены параметры структурных изменений, которые взаимосвязаны с механическими и физическими свойствами материалов. Определено комплекс физических структурночувствительных параметров для структуроскопии неразрушающими методами.*

Ключевые слова: деградация, структура, фаза, размер зерна, информативный параметр, механические свойства, структуроскопия.

*The structure change features of some iron-carbon steels classes in working conditions of which are made responsible objects of oil and gas industry working in difficult conditions is analyzed. The most expressed structural changes parameters which are associate with mechanical and physical materials properties are set. The complex of physical structuresensible parameters for non-destructive structurescopy methods certain.*

Keywords: degradation, structure, phase, grain size, informing parameter, mechanical properties, structurescopy.

Питання оцінки фактичного технічного стану металоконструкцій різного призначення у нафтогазовій промисловості стає особливо актуальним в умовах гострої потреби у продовженні терміну експлуатації об'єктів, що відпрацювали свій нормативний ресурс. Ресурс безпечної експлуатації металоконструкцій залежить і від фактичного стану структури та фізико-механічних властивостей металу. Вплив корозійно-активних середовищ, коливання температури, робочих навантажень та напружень, термоциклічні процеси теплонавантаження призводять з часом до деградації структури та

зміни властивостей експлуатованого металу. З огляду на це забезпечення надійності та прогнозування технічного стану металоконструкцій нафтогазового обладнання має надзвичайно велике практичне значення. Однак, в нормативно-технічних документах, що застосовуються при розрахунку залишкового ресурсу металоконструкцій, не враховується рівень деградації матеріалів і конструкцій у процесі експлуатації, що істотно знижує достовірність прогнозу. Забезпечення безаварійної експлуатації бурового та нафтогазопромислового обладнання можливе тільки на основі отримання й аналізу об'єк-



а)



б)

Рисунок 1 – Структура сталей 19Г (а) і 17Г1С (б). Збільшення – М 500:1

тивних інструментальних даних про фактичний стан матеріалів і конструкцій, що підтверджується основними положеннями концепції Державної науково-технічної програми „Ресурс” [1] на 2010-2012 рр.

Тому особливо важливим науково-практичним завданням є всебічне вивчення структурних змін, що відбуваються в сталях промислових об’єктів у процесі тривалої експлуатації [2].

Вітчизняні та зарубіжні вчені за останні 50 років розвинули і постійно вдосконалюють методи, технології та засоби визначення фізико-механічних характеристик різних матеріалів. При цьому порушувались питання аналізу структурних змін матеріалів у ході експлуатації, однак вивчення їх обмежилося теоретичними і лабораторними дослідженнями, результати яких відображені в працях Міхеєва М.Н., Горкунова Є.С., Карпаша О.М., Молодецького І.А., Карпаша М.О., Назарчука З.Т., Тетерка А.Я., Рибачука В.Г., Білокура І.П., Дорофєєва А.Л., Сухорукова В.В. та ін. Однак всі існуючі методи не мають теоретичної бази для встановлення кількісних зв’язків параметрів контролю із важливими фізичними чи механічними характеристиками. Практично всі залежності, які використовуються для контролю, мають емпіричний характер і часто дійсні тільки для однієї марки або типу матеріалу. Тому є необхідність у встановленні і вивченні ознак виражених структурних змін матеріалів та розроблення методів і засобів для їх своєчасного виявлення.

Метою даної публікації є аналіз особливостей деградації структури деяких класів залізовуглецевих сталей, з яких виготовлені металоконструкції відповідальних об’єктів нафтогазового комплексу, що працюють в складних умовах, а також встановлення найбільш небезпечних з токи зору необоротної пошкодженості матеріалу параметрів структурних змін, які можна виявити сучасними фізичними методами діагностики.

Для різного типу конструкцій і матеріалів, з яких вони виготовлені, процеси деградації та зміни структури металу виражаються по різному. Це пояснюється особливостями експлуата-

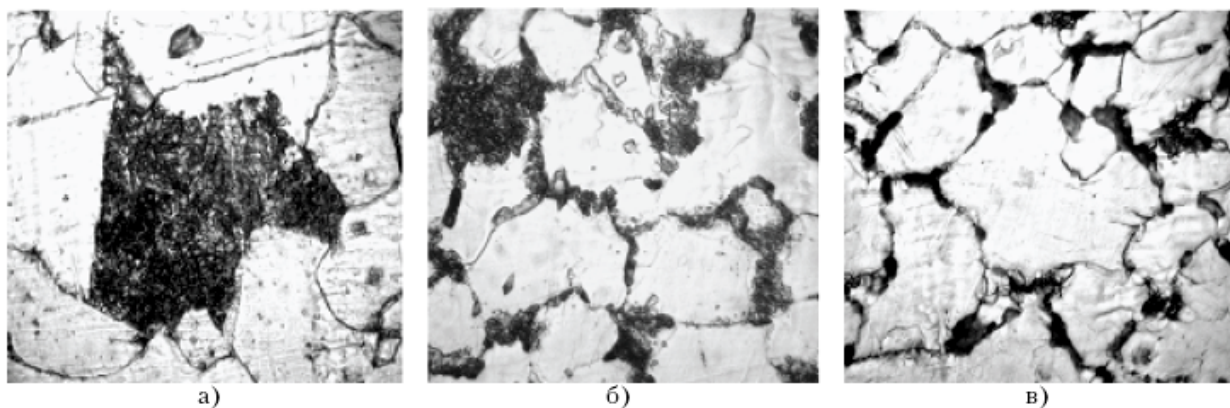
ції та чинниками, що діють на них. Розглянемо найбільш характерні з них.

Мікроструктура *конструкційних низьковуглецевих і низьколегованих сталей* (типу 10Г2С, 20Г, 09Г2С, 17Г2СФ, 14ХГС, що використовуються часто як матеріал для трубопроводного транспорту [3]) у вихідному стані, як правило, являє собою структуру перліту і фериту, що відповідає нормалізованому стану (рис. 1, а, б) – [4].

Для цього типу структури характерна дрібнозернистість (бал феритного зерна варіюється в межах 9–10 балів), що пояснює хороше поєднання міцнісних і пластичних властивостей, одержаних при механічних випробуваннях цих матеріалів. Перлітні області складаються з декількох колоній невеликих розмірів з тонкопластичними прошарками цементиту. У структурі перліту відсутні сліди відпуску. За незначного вмісту марганцю для структури характерна феритно-перлітна структура з часткою бейніту. Колонії тонкопластинчастого перліту і бейніту часто об’єднані в одну область. За морфологією бейніт можна віднести до високотемпературної форми. На границях зерен і субзерен фериту спостерігають смужкові виділення цементиту, характерні для високотемпературного розпаду аустеніту при термічному обробленні.

Слід зауважити, що нафто- і газопроводи, виготовлені з низьковуглецевих сталей, сприймають три види навантаження [3]: постійне статичне навантаження від внутрішнього тиску, вібраційне навантаження поблизу компресорних станцій та періодичні перевантаження (порядку  $10^5$  циклів за час експлуатації) у разі зміни параметрів експлуатації. Хоча всі ці навантаження в низьколегованих і низьковуглецевих сталях значно менші статичної границі плинності, все ж таки тут протікають процеси мікропластичної деформації та пов’язаного з цим динамічного деформаційного та структурного старіння [2].

Детальним вивченням структури сталей даного класу у вихідному стані й після визначеного терміну експлуатації зафіксовано, що у вихідному стані (як уже було зазначено вище) в



а – вихідна сталь; б – деградована сталь ТОВ „Лінос“ (термін служби 20 років);  
в – деградована сталь ЗАТ „Северодонецьке об'єднання Азот“ (термін служби 30 років)

Рисунок 2 – Структурні зміни сталі 20

нормальній феритно-перлітній структурі вуглецевих сталей (рис.2, а) перліт має пластинчасту або зернисту будову [5]. У деградованій структурі (рис.2, б, в) спостерігається розпад перліту, його сфероїдизація, карбідна складова перліту зміщується до границь зерен. Відбувається коагуляція карбідів, збільшується товщина границь зерен і кінцева структура являє собою ферит плюс карбідна сітка. У сталях, які експлуатують за температур нижчих  $100^{\circ}\text{C}$ , видимих в оптичному мікроскопі змін не спостерігається.

Процеси „старіння“ структури у нормалізованих сталях протікають і без навантаження. При цьому дещо підвищуються міцнісні властивості (особливо границя плинності) і знижуються характеристики пластичності [3]. Під навантаженням (статичним або циклічним) і за підвищених температур експлуатації процеси динамічного деформаційного старіння інтенсифікуються [5,6]. Оскільки процеси руху та „розмноження“ дислокацій в локальних об'ємах металу протікають за напружень значно менших статичної границі плинності, то і процеси деформаційного старіння у трубних сталях протікають при експлуатаційних навантаженнях. У роботах [4, 7] було показано, що статичне та динамічне деформаційне старіння в низьковуглецевій сталі при повторному розтягу спостерігається за напружень, значно менших границі плинності. Деформаційне зміцнення й старіння призводить також до зниження характеристик тріщиностійкості та ударної в'язкості.

Отже, структурне старіння низьковуглецевих сталей у залежності від умов роботи конструкції відбувається у двох напрямках: у структурі деградованих сталей даного класу можливий розпад перліту та коагуляція карбідів (як правило, даний процес протікає при підвищеній температурі), а також деградація властивостей металу труб у ході тривалої експлуатації може бути наслідком протікання деформаційного старіння, механізм якого полягає у зменшенні концентрації атомів вуглецю і азоту у вільному стані та зменшенні рухливості дислокацій, що призводить до зниження пластичних властивостей металу і показників опору крихкому руйнуванню (ударної в'язкості та тріщиностійко-

сті). При цьому загальний структурний стан трубопровідних маловуглецевих сталей після нормативного терміну експлуатації свідчить, що морфологія та співвідношення фазових складових не мають негативних особливостей і не містять структурних ознак, що свідчать про помітне прискорення розвитку деградаційних процесів з продовженням терміну експлуатації трубопроводів. Тонка структура трубних сталей свідчить, що на дислокаціях, границях зерен і субзерен скупчень атомів впровадження і частинок вторинної фази не виявляються. Це вказує на те, що за період експлуатації понад 40 років процеси деформаційного старіння і втоми не одержали значного розвитку [7].

Мікроструктура *жаростійких сталей* перлітного класу, з яких часто виготовляють труби, засувки, кріплення й інші відповідальні деталі, від яких вимагається стійкість до окислення за температур до  $600 - 650^{\circ}\text{C}$ , а також конструкції енергетичних об'єктів, після прогнозованого терміну експлуатації набуває вигляду феритно-карбідної суміші з різним ступенем дисперсності, сфероїдизації та коагуляції карбідної фази [8]. Прогнозування працездатності металу при підвищених температурах завжди припускає необхідність дослідження мікроструктури стосовно конкретного часу роботи. Дослідження методами оптичної та електронної мікроскопії показали, що у вихідному стані сталі типу 15X5МУ характеризуються змішаною структурою з значними виділеннями крупних сегрегатів по границях і більш дисперсних – в тілі феритних зерен [8]. Дані мікродифракції свідчать, що в неексплуатованому металі переважаючим типом виділень у феритній матриці є стержнеподібні карбіди  $\text{M}_7\text{C}_3$ , а по межах зерен – брилоподібні карбіди  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ .

Зміна структури в результаті 70 тис. год. експлуатації характеризується більш рівномірним розподілом сегрегатів, зменшенням кількості дрібних виділень в тілі феритних зерен і їх сфероїдизації за рахунок прямого перетворення  $\text{M}_7\text{C}_3 \rightarrow \text{M}_{23}\text{C}_6$  або шляхом розчинення  $\text{M}_7\text{C}_3$ . Після 100 тис. год. експлуатації металу цей процес майже завершується, і внаслідок

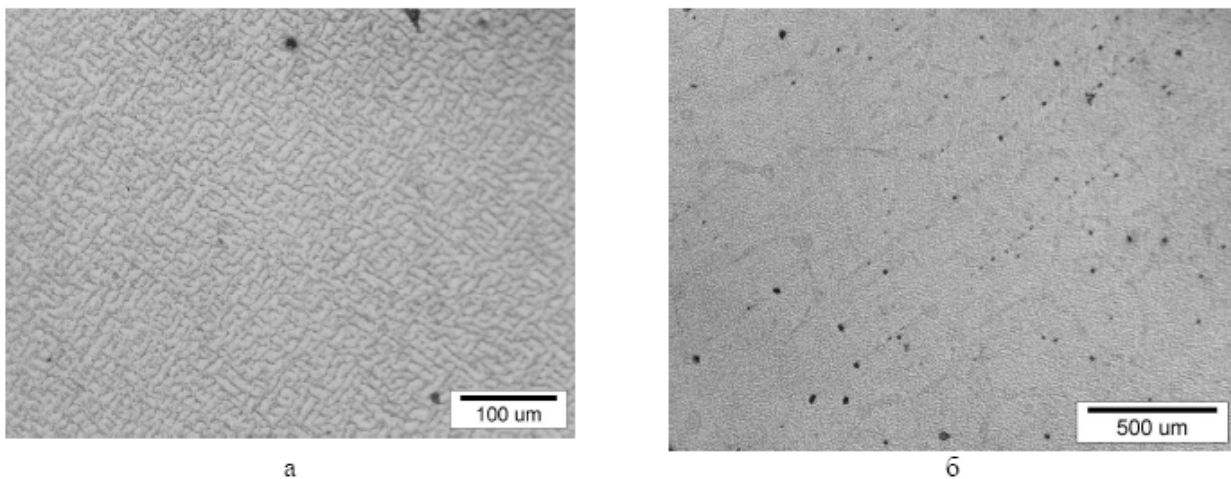


Рисунок 3 – Мікроструктура теплостійких сталей перлітного класу на прикладі марки 25X1M1Ф у вихідному стані за різного масштабу збільшення

стабілізації мікроструктура більшості елементів обладнання істотних змін не зазнає.

Більш істотні зміни спостерігаються у структурі марок жаростійких сталей зі значним збідненням молібденом феритної матриці: окрім переважно брилоподібних карбідів  $M_{23}C_6$  і значної частки структурно вільного фериту на екстракційній репліці в навколограничних зонах спостерігається утворення пластинчастих дисперсних карбідів  $M_2C$  внаслідок підвищення вмісту молібдену в сегрегатній фазі [5, 8]. Загалом дослідженнями тонкої структури не виявлено мікропошкоджень металу типу „пористості“ або „розпушування“ по границях зерен, а це дає підстави припускати, що виявлені експлуатаційні структурні зміни контролюються виключно дифузійними процесами, як і при тих, що мають місце при відпалі. Наслідком виділення карбідних фаз у процесі експлуатації сталей даного класу є небезпека руйнування конструкцій внаслідок підвищення повзучості на перших етапах роботи, а далі – втрата пластичності металу, що спричиняє небезпеку надшвидкого крихкого руйнування.

Отже, зміна структури жаростійких сталей в процесі експлуатації відбувається здебільшого в напрямку більш рівномірного розподілу карбідних виділень у тілі зерна. Зі збільшенням терміну експлуатації цей процес значно сповільнюється і мікроструктура більшості марок жаростійких сталей стає ідентичною й характерною для тривало зістареного під напруженням металу. Це пояснюється стабільністю фізико-механічних властивостей такого типу сталей, що, в свою чергу, повинно забезпечувати достатню працездатність металу в умовах повзучості на період до 150 тис. год. без вирізування металу для досліджень при позитивних результатах ревізії діагностичними методами.

Для **теплостійких сталей** перлітного класу, що знайшли застосування в енергетичному машинобудуванні, характерними є такі особливості. Сталі такого типу у вихідному стані характеризуються феритно-перлітною структурою із включеннями карбідів. Феритні

зерна є практично вільними від дислокацій та містять значну кількість рівномірно розташованих дисперсних карбідів (рис. 3) – [9].

Після термоциклічного напруження спостерігається наявність відмінностей міцнісних і пластичних властивостей досліджуваних зразків. Спочатку в матеріалі відбувається інтенсивне генерування дислокацій, хаотично розподілених у тілі зерна. Матеріал окрихлюється за умови зростання мікронапружень окремих структурних складових. Найбільш інтенсивно дислокації зароджуються у приповерхневих шарах і місцях наявності карбідів, що є причиною накопичення мікронеоднорідностей [9]. На локальну концентрацію напружень має значний вплив форма, розміри та розподіл мікронеоднорідностей. Згідно з основними положеннями теорії руйнування, глибина пошкодженого шару визначатиметься напружено-деформованим станом та енергетичними умовами термоцилювання та розтягу зразка. Матеріал при цьому пластично деформується за відсутності тріщин із формуванням виступів поверхневого мезорельефу. Проте за напруження більше 1000 циклів у зернах матеріалу виникають площини плинності, що сприяють пластичному деформуванню матеріалу.

Загальною особливістю структурної деградації сталей цього класу є те, що після термоциклічного напруження у матеріалі частково втрачається пластичність (зростає межа плинності), накопичується неоднорідність окремих локальних зон металу. Процес окрихлення після  $N = 1000 \dots 2000$  термоциклів знижується. Із зростанням термоциклічного напруження значну роль відіграють процеси термічного повороту, зумовлені перерозподілом дислокацій.

**Аустенітні сталі** відносяться до металів, що володіють високою стійкістю до загальної, контактної та щільної корозії [10]. До цього класу слід віднести корозійностійкі, жаростійкі, жаротривкі конструкційні сталі, що набули широкого використання в енергетичному машинобудуванні, хімічній, нафтохімічній та харчовій галузях промисловості. Суттєвим не-

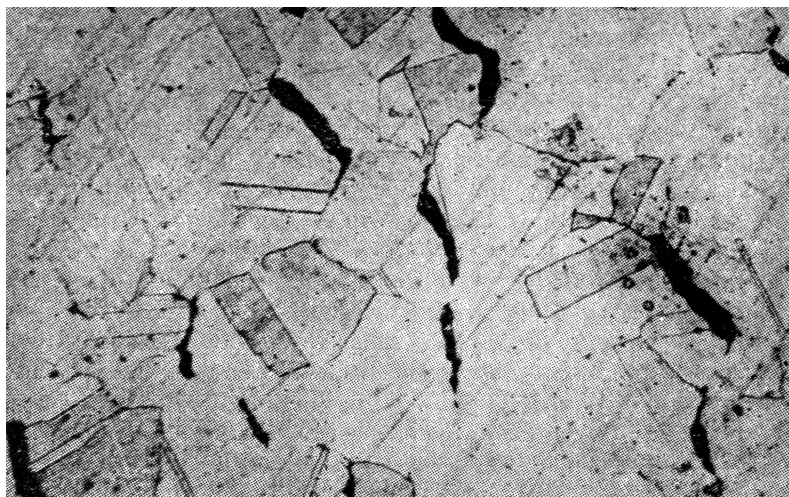


Рисунок 4 – Характер розвитку тріщин при міжкристалічній корозії аустенітних сталей

доліком цих сталей можна вважати піддатливість корозії під навантаженням (так зване корозійне розтріскування). У деяких аустенітних сталях інтенсивна структурна корозія може відбуватися за відсутності зовнішніх напружень. Роль напружень у цьому процесі полягає, головним чином, у руйнуванні послаблених корозією або крихких границь зерен металу, що забезпечує проникнення корозійного середовища у глибину металу. Процес розвитку тріщин відбувається до тих пір, поки не розтріскана частина металу витримує прикладене навантаження, після чого відбувається процес механічного руйнування.

Зовнішня відмінність між міжкристалічним корозійним розтріскуванням і міжкристалічною корозією металу полягає в тому, що розтріскування концентрується на окремих ділянках, розташованих перпендикулярно діючим напруженням розтягу, а міжкристалічна корозія поширюється рівномірно поверхнею металу, що безпосередньо контактує з агресивним середовищем, і відбувається навіть за відсутності напружень.

Структура металу залежить від способу виготовлення деталей, термічної обробки і ступеня старіння у ході експлуатації. Усі ці чинники впливають на його механічні властивості та стійкість до розтріскування. Тріщини поширюються найчастіше через границі зерен, а також через ділянки з виділеною вторинною фазою. Прийнято також вважати, що корозійно активними шляхами є зони, збагнені хромом в результаті виділення карбідів (рис. 4) – [10].

Вкажемо характеристики основних типових дефектів структури аустенітних сталей, що виникають у ході їх експлуатації.

#### Поверхнєве знеуглецьовування

Поверхнєве знеуглецьовування – збагнення сталі вуглецем, що починається з поверхні. Структура повністю знеуглецьованої зони є чистим феритом, структура перехідного шару якої характеризується поступовим зменшенням частки фериту до осердя. Враховуючи, що межа міцності знеуглецьованого шару низька,

при глибині знеуглецьовування 8–10% товщини стінки перевірка механічних властивостей обов'язкова. Часто причиною знеуглецьовування є взаємодія вуглецю сталі переважно з киснем і частково з воднем. Дифузія кисню та водню у сталь збільшується зі зростанням температури.

Основні причини знеуглецьовування:

- знеуглецьовуюча атмосфера при нагріванні сталі до температури гарячої деформації або при нормалізації;
- недостатнє видалення окалини з поверхні перед термічною обробкою;
- знеуглецьована поверхня у вихідних заготовках.

Наслідок – зниження межі міцності знеуглецьованих шарів.

#### Смугасті структури та неметалеві включення

Смугаста будова сталі характеризується тим, що структурні складові витягнуті вздовж напрямку деформації. У тому випадку, коли зерна фериту й перліту дрібні, а смуги, утворені ними, вузькі – структура називається смугастою. Смугаста структура утворюється у результаті забруднення сталі домішками сірки, кисню, фосфору, що хімічно взаємодіють із залізом і марганцем, а утворені сполуки сприяють появі значних ліквацій.

Чим більше домішок у сталі, тим виразніша смугастість. Якщо на поверхні мікросліфа спостерігаються світлі смуги фериту значної ширини, то їх називають світловинами.

Механічні властивості деталей (зокрема межі міцності та плинності, а також пластичність), що мають смугасту будову, не однакові у напрямі прокатування і упоперек.

#### Крупнозернистість

Для кожної марки сталі нормальна структура характеризується визначеною величиною зерна, від якої залежать механічні властивості металу (особливо значення твердості і межі міцності). Причиною виникнення крупнозернистості та різнозернистості є недотримання заданої технології обробки тиском або термооброб-

ки, наприклад, висока температура (перегрівання), надмірно тривала витримка у ході нагрівання, сповільнене охолодження, висока температура кінця обробки тиском та ін.

Залежно від розміру початкового дефекту та умов роботи металу через заводські дефекти виявляються після різних термінів експлуатації. Найбільш грубі дефекти можуть виявлятися при гідравлічних випробуваннях, проте інші дефекти залежно від швидкості їх розвитку виявляються після різних напрацювань.

Руйнування трубних елементів з аустенітних сталей, викликані різними технологічними дефектами, характеризуються крихкими зламами без помітних слідів пластичної деформації. Механічні властивості труб майже завжди знаходяться на рівні вимог технічних умов. Проте наявність концентраторів напружень, якими є глибокі риси, закати, призводить до того, що зразки труб не витримують технологічної проби на стискання. Результати металографічного аналізу свідчать, що край багатьох тріщин і закатів знеуглецьований, при цьому знеуглецьований шар розповсюджується від тріщини вглиб металу. Отже, утворення дефекту може відбутися як у процесі виготовлення елементів та при подальшій термічній обробці на заводі, так і у ході експлуатації під дією окислювачів і високих температур. При цьому часто відбувається знеуглецьовування кромки і зниження межі міцності. Розвиток тріщин переважно транскристалічний.

Оскільки аустенітна фаза є високотемпературною модифікацією сплаву заліза з вуглецем, робимо висновок, що внаслідок дії на сталі такого класу зовнішніх чинників спостерігаються структурні зміни, які характеризуються виділенням феритної, менш стійкої фази, що призводить до утворення з надлишкового вуглецю крихких карбідних сполук і міжкристалічної корозії, що знижують показники міцності металу і його тріщиностійкість.

Аналіз процесів деградації структури основного металу та її наслідків показав, що конструкції та споруди з різних матеріалів, що експлуатуються понаднормовий термін, вимагають особливої уваги для забезпечення їх надійності та довговічності. Для цього необхідна діагностика їх реального технічного стану, яка повинна включати оцінку їх цілісності та, що не менш важливо, змін структурного стану металу в результаті розвитку деградаційних процесів у процесі експлуатації. Всі описані вище зміни в структурі матеріалу в ході експлуатації викликають часто деформації-руйнування, зародження і розвиток мікропошкоджень, які відбуваються у відповідних змінах фізичних та механічних властивостей.

Механічні та фізичні властивості матеріалів „закладаються“ на рівні структури і взаємопов'язані [11]. За зміною фізичних властивостей можна судити про зміну фазового складу сплавів і про протікання структурних перетворень внаслідок деградації матеріалів [12].

Зв'язок між комплексом фізичних властивостей (акустичних, магнітних, електричних,

магнітопружних та ін.), з одного боку, і кристалографічною структурою, дефектністю, рівнем і характером напружень, механічними й іншими експлуатаційними характеристиками – з іншого боку, лежить в основі такого напрямку контролю, як структуроскопія.

У сучасному розвитку методів структуроскопії виділяють два основні напрямки [13]:

пошук нових параметрів контролю та розробка відповідних методик вимірювання та вимірювальних перетворювачів;

багатопараметровий контроль з використанням одночасно двох чи більше інформативних параметрів.

Можливості першого напрямку здебільшого вже реалізовані, а розвиток багатопараметрової структуроскопії стимулюється не тільки ускладненням задач контролю, але і бурхливим розвитком комп'ютерних технологій збору та обробки вимірювальної інформації.

Враховуючи специфіку деградаційних змін структури матеріалів металоконструкцій у ході тривалої експлуатації, доцільно використовувати структурночутливі та фазочутливі фізичні властивості. До перших відносяться властивості, що реагують на зміну ступеня спотвореності кристалічної ґратки, на концентрацію домішкових атомів, порядок у розташуванні атомів компонентів, на розмір зерна, на появу частинок надмірної фази, зміна їх дисперсності та на інші особливості структури. Структурночутливими властивостями є електричні, акустичні, гальваноманітні, деякі магнітні властивості (наприклад, коерцитивна сила), внутрішнє тертя.

Фазочутливі фізичні властивості дозволяють з високою точністю фіксувати зміну складу фаз і кількісного співвідношення між ними, тобто фазового складу сплавів. До таких властивостей насамперед слід віднести намагніченість насичення.

Для реалізації структуроскопії більш доцільним в плані збереження цілісності матеріалу чи виробу доцільно використовувати неруйнівний контроль з високою просторовою роздільною здатністю тих параметрів, які є найбільш чутливими до змін структури матеріалу. При цьому є можливість забезпечити широкий динамічний діапазон окремого методу, щоб виявляти малі зміни параметрів структури матеріалу.

Насамкінець слід зауважити, що діагностика структурних змін, які виникають внаслідок деградації матеріалів металоконструкцій тривалої експлуатації, є передумовою для достовірної оцінки фактичних механічних властивостей сталей (границі плинності, граници міцності, ударної в'язкості та ін.), значення яких використовують у сучасних методах розрахунку залишкового ресурсу металоконструкцій, що відпрацювали нормативний термін експлуатації.

## **Висновки**

На основі вивчення особливостей процесів старіння сталей металоконструкцій довготривалої експлуатації можна виділити основні па-

раметри, що характеризуватимуть незворотні структурні зміни матеріалу. Детальний аналіз такого роду змін свідчить, що показниками деградації структури металу, які варто піддавати діагностиці, є наступні:

– зміна розмірів і орієнтації зерен окремих структурних фаз з часом (різномірність), що призводять до анізотропії механічних і фізичних властивостей у різних напрямках матеріалу як локально, так і по матеріалу загалом;

– морфологічна зміна окремих фаз і зміна їх співвідношення у структурі, що значно впливають на зміну окремих фізичних властивостей матеріалів, а, особливо, – структурночутливих параметрів (магнітних, електричних, акустичних тощо);

– виділення вторинних фазових складових (наприклад, карбідів легуючих елементів або низькотемпературних модифікацій металу з високотемпературної) з основних фаз і розподіл їх по границях зерен, групування в окремі зони. Ці процеси мають дифузійний характер і призводять до значної хімічної неоднорідності локальних зон. Фізико-механічні властивості при цьому окремих локальних зон значно відрізнятимуться;

Структурні зміни у металі призводять до деградації важливих механічних характеристик, що виражаються, з одного боку, у підвищенні показників міцності (границі плинності, границі міцності), з іншого боку – в зниженні в'язкопластичних показників (відносне видовження, відносне звуження) і показників опору крихкому руйнуванню (ударна в'язкість, тріщиностійкість) порівнянні зі своїми номінальними значеннями;

Можливість застосування фізичних методів контролю для оцінки деградації структури та механічних характеристик базується на тому, що між зміною структурного стану металевих сплавів і зміною фізичних властивостей існує певний зв'язок;

З метою підвищення достовірності контролю деградації структури та механічних характеристик матеріалів необхідно розробляти нові багатопараметрові методи діагностики і неруйнівного контролю, які передбачають комплексне використання структурно- і фазочутливих інформативних параметрів. Роботи за даним напрямком є метою подальших теоретично-прикладних досліджень.

### Література

1 Про затвердження Державної науково-технічної програми „Ресурс”: від 8 жовтня 2004 р. № 1331 / Постанова Кабінету Міністрів України. – Режим доступу: <http://www.kmu.gov.ua/control/uk/meetings/agenda?mid=8851097>.

2 Яковлева Т.Ю. Локальная пластическая деформация и усталость металлов / Т.Ю. Яковлева. – К.: Наукова книга, 2003. – 235 с.

3 Старение труб нефтепроводов / А.Г. Гумеров, Р.С. Зайнуллин, К.М. Ямалеев, А.В. Росляков – М.: Недра, 1995. – 222с. – ISBN 5-247-03080.

4 Лякишев Н.П. Исследование структуры металла газопроводов после их длительной эксплуатации / Н.П. Лякишев, М.М. Кантор, В.Н. Воронин // Металлы. – 2005. – №1. – С.3–16.

5 Архипов О.Г. Оцінка деградації сталей обладнання нафтопереробних і хімічних виробництв / О.Г. Архипов, О.В. Зінченко, Д.О. Ковальов, Р.Г. Заїка. // Металеві конструкції. – 2009. – № 2. – Т.15. – С.115-122.

6 Оценка степени деградации механических свойств и остаточного ресурса работоспособности трубных сталей с использованием методов акустической эмиссии и кинетической твердости / А.Г. Пенкин, В.Ф. Терентьев, Л.Г. Маслов // 2004 г. – Режим доступу: <http://www.sds.ru/articles/degradation/index.html>

7 Волжанин А.В. Диагностика состояния основного металла магистральных трубопроводов со сроком эксплуатации более 40 лет / А.В. Волжанин, А.И. Любомудров, Т.К. Сергеева // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2006. – № 3. – С. 5–13.

8 Исследование физико-механических свойств металла труб печных змеевиков установок каталитического риформинга, отработанных проектный срок / Л.Е. Ватник, И.Н. Копелян, В.Н. Мухин, И.Г. Шевкун // Контроль, ремонт и защита от коррозии нефтезаводского оборудования: Сборник научных трудов. – Москва, ЦНИИТЭнефтехим, 1982. – С. 39–46.

9 Марущак П. Кінетика статичного деформування та руйнування теплостійкої сталі 25Х1М1Ф після попереднього термоциклічного напруження / П. Марущак, Р. Бішак, А. Пилипенко // Вісник ТДТУ. – 2008. – № 4. – Т.13. – С.56-60.

10 Бугай Н.В. Повышение надежности котлов электростанций / Н.В. Бугай, Г.В. Мухопад, А.Я. Красовский. – К.: Техніка, 1986. – 176 с.

11 Карпаш О.М. Дослідження взаємозв'язку між структурним станом сталей та фізико-механічними характеристиками сталей / О.М. Карпаш, М.О. Карпаш, Є.Р. Доценко // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: В 2-х т. / Спецвипуск журналу «Фізико-хімічна механіка матеріалів». – №7. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2008. – Т. 2. – С. 724-729.

12 Карпаш О.М. Питомий електричний опір як інформативний параметр визначення фактичних фізико-механічних характеристик конструкційних сталей / О.М. Карпаш, Є.Р. Доценко, М.О. Карпаш, А.В. Василик // Металлофізика и новейшие технологии. – 2008. – Спец. вып., т. 30. – С.213-219.

13 Костин В.Н. Многопараметровые методы структуроскопии стальных изделий с использованием магнитных свойств вещества / В.Н. Костин, А.А. Осинцев, А.Н. Сташков, Т.П. Царькова // Дефектоскопия. – 2004. – №3. – С.70-81.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
01.06.11

Рекомендована до друку професором  
Я. М. Дрогомирецьким