

О. Г. Архипов

**АНАЛІЗ ЧУТЛИВОСТІ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДО ДЕФОРМАЦІЙНОГО СТАРІННЯ**

В статті наведено аналіз можливості використання ряду механічних характеристик для оцінювання деформаційного старіння метала обладнання хімічних виробництв. Викладено модель змін у часі характеристик міцності.

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, змінюваності 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. 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, враховуючі 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 з використанням різних механічних характеристик або їх сукупністю. Часто визначаються вони як за нормальною, так і робочою температурою. Відмінність останніх і різноманітність технологічних середовищ ускладнюють порівнювальність і співставність отриманих результатів [1-4].

Отже виникає задача оцінювання найбільш поширених характеристик міцності і пластичності з точки зору їх інформативності за час тривалої експлуатації. Обмежимося лише механічними характеристиками конструкційних і оццанологованих сталей, що отримуються руйнівними методами. Аналіз інформації, наведеної в таблиці 1 дозволяє зробити висновок, що в загальному випадку найбільш універсальними і інформативними є такі характеристики як  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$  і  $\delta$ .

Як приклад оцінювання доцільності використання цих характеристик розглянемо зміни в часі характеристик міцності сталі 12X1МФ з якої були виготовлені труби котельної установки ТЕЦ-2 Рубіжанського ВО «Барвник», які відпрацювали близько 10 років з середньою робочою температурою 656 °С і 624°С (рис. 1, 2). Паливо – природний газ. Тиск пари усередині труб змінювався в інтервалі 14,692÷16,212 МПа. Досліджувались лише прямолінійні ділянки пароперегрівальних труб, ділянки що містять гини працюють в суттєво відмінних умовах.

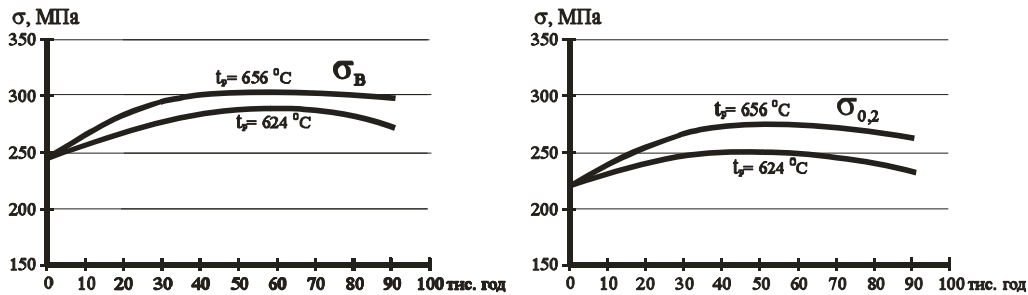
Таблиця 1

## Показники механічних характеристик для оцінювання деградації

Характеристики	Регламентация в нормативній документації	Можливість отримання прямих вимірюванням	Змінюваність за весь період експлуатації	Однозначність тенденцій змін	Можливість аналітичного опису в часі	Чутливість	Температурна чутливість
$\sigma_{0,2}$	+	+	+	+/-	+	+	+
$\sigma_b$	+	+	+	+/-	+	+	+
$\sigma_{0,2}/\sigma_b$	-	-	+	+/-	+	+	+
$\delta$	+	+	+	+/-	+	+	+
$\psi$	+/-	+	+/-	+	+	-	-
КСУ(V)	+/-	+	+/-	+	-	-	+
Утяжка	-	+	д/н	д/н	-	д/н	д/н
Азарод./Арозв.	-	-	+	+	-	+/-	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 стверджувальна; +/- - 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 –  $S = (KC - KCA)/KC \cdot 100\%$ , де  $KC$ ,  $KCA$  – середні арифметичні значення ударної в'язкості до і після деформаційного старіння

Механічні дослідження на розтяг велись на стандартних зразках на машині Р-5 згідно з ГОСТ 1497-84. Статистичну обробку результатів випробувань проводили методом найменших квадратів.

Рис. 1. Зміна в часі  $\sigma_b$  (а) і  $\sigma_{0,2}$  (б) сталі 12X1МФ

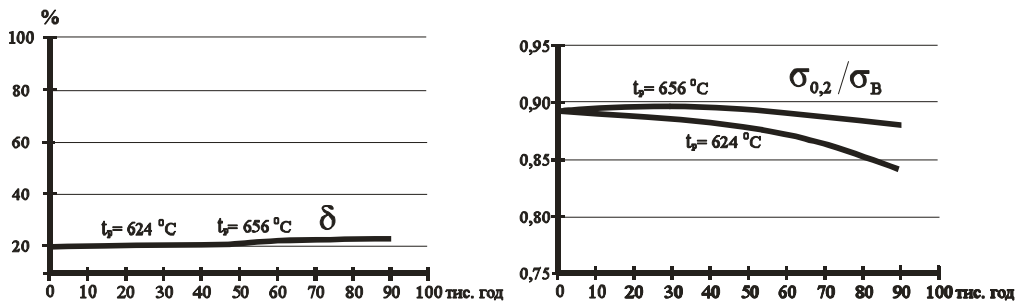


Рис. 2. Зміна в часі  $\delta$  (а) і  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$  сталі 12X1MФ

Деяко інший характер мають зміни характеристики міцності трубної оцаднолегованої сталі A333 Grade 6 що відпрацювала близько 30 років за середньої робочої температури від 0 °C до +21,5 °C в складі аміакопроводу Тольяті-Одеса.

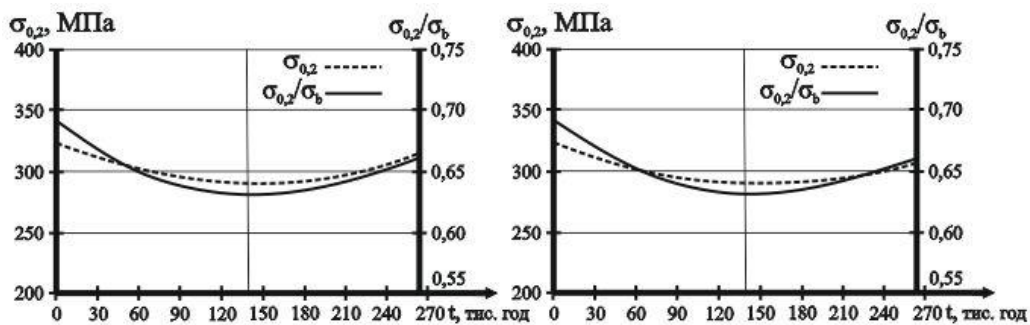


Рис. 3. Зміна в часі  $\sigma_{0,2}$  і  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ :  
а – труби №1; б – труби №2 аміакопроводу зі сталі A333 Grade 6.

З наведених графіків видно, що за час експлуатації в наведених випадках часові тенденції змін механічних характеристик мають принципово різний характер. Але метою даної роботи не є аналіз причин розбіжності змін характеристик міцності в часі, хоча це є окремою і важливою задачею з точки зору розуміння протікання деградаційних процесів в структурі металу.

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

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

де  $\sigma_0$  – 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. Як правило процес деформаційного старіння супроводжується подрібненням зерна (зменшенням  $d$  і бар'єрів у вигляді

новоутворених карбідів на границі зерен), що напряму впливає на величину  $\sigma_{0,2}$ . За границею текучості крива розтягу апроксимується відомим виразом:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2)$$

де  $\sigma$  і  $\varepsilon$  – відповідно істинні напруження і деформації;

$n$  – коефіцієнт зміцнення;

$K$  – постійна для даного стану.

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

$$d\sigma/d\varepsilon = Kn\varepsilon^{n-1} \quad (3)$$

Ґрунтуючись на результатах робіт [1], зміну характеристик за статичного розтягу під час деформаційного старіння можна представити у вигляді схеми:

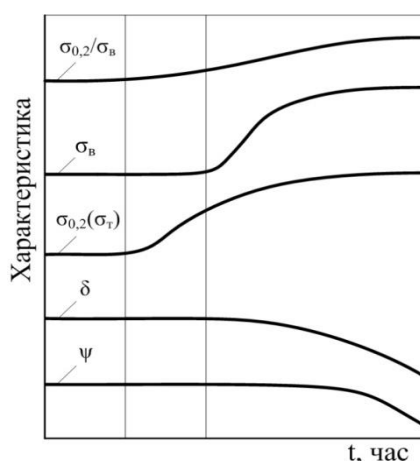


Рис. 4. Динаміка змін чутливості механічних характеристик.

Аналіз кривих рис. 4 дозволяє зробити висновок, що чутливість до деформаційного старіння у  $\sigma_b$  і  $\delta$  порівняно з  $\sigma_{0,2}$  починається на більш пізніх етапах експлуатації. Отже з огляду безперервності відслідковування деградаційних процесів металу використання  $\sigma_{0,2}$  вбачається найбільш раціональним. Треба зазначити, що наведені вище підходи в основному експериментально ґрунтуються на дослідженнях, що проводились на зразках штучно зістарених методом термомеханічного циклювання. В умовах реальної експлуатації процеси, що відбуваються, мають більш складний характер.

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 [5-7]. 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  $\psi$  перестає суттєво змінюватись [8, 9]. До схожих висновків можна прийти і спираючись на теорію розсіяної в металі пошкодженості [5, 6].

Окремою проблемою є визначення характеристик металу на момент початку експлуатації. Як правило, після тривалої експлуатації зразки металу в

стані поставки відсутні. Тому приходится орієнтуватися на довідкові дані, які можуть дещо різнитися від характеристик металу, що використаний для виготовлення обладнання. В зв'язку з цим при побудові графіка змін характеристик міцності і пластичності в часі виникає проблема «0» 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 [8, 9]. Це обґрунтовано тим, що різним партіям металу може бути властивий істотний розкид за властивостями міцності, проте не слід очікувати значних змін у відношенні  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ .

Узагальнюючи раніше сказане, можна зробити наступні висновки. Найбільш інформативною, з точки зору процесів деформаційного старіння за час тривалої експлуатації 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  $\delta$ , 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» (за табл. 1), 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.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кеннеди А. Д. Ползучесть и усталость в металах. - М. : Metallurgiya, 1965. - 361 с.
2. Горынин Н. В. Старение материалов оборудования атомных электростанций после проектного ресурса / Н. В. Горынин, Б. Т. Тимофеев // Фіз.- хім. механіка матеріалів. – 2006. - № 2. – С. 13 – 27.
3. Бугай Н. В. Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования / Бугай Н. В., Березина Т. Г., Трунин Н. И. – М. : Энергоиздат, 1994. – 214 с.
4. Ильин С. И. Изменение структуры и свойств трубной стали во время длительных выдержек под нагрузкой / С. И. Ильин, М. А. Смирнов, Ю. И. Пашков [и др.] // Изв. Челябинского науч. центра. – 2002. - №4. – С. 42-46.
5. Крижанівський Є. І. Особливості корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів і резервуарів зберігання нафти / Крижанівський Є. І., Никифорчин Г. М. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – № 2. – С. 11-20.
6. Environmentally assisted “in-bulk” steel degradation of long term service gas trunkline / Н. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyurulnyk [et al] // Engineering Failure Analysis. – 2010. – V. 17. – P. 624-632.
7. Ямалеев К. М. Старение металла труб в процессе эксплуатации нефтепродуктов / Ямалеев К. М. – М. : ВНИИОЭНГ, 1990. – 62 с.
8. Архипов О. Г. Зміни властивостей низьколегованих сталей внаслідок процесу старіння / Архипов О. Г., Борисенко В. А., Галабурда Н. І. // Восточно-европейский журн. передовых технологий. - 2007. - № 5. – С. 53-58.
9. Деградація сталі 09Г2С в умовах нафтопереробних підприємств / Архипов О. Г., Хома М. С., Борисенко В. А. [та ін.] // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. - № 5. – С. 65-70.