

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ДЕФОРМАЦІЙНОГО РЕСУРСУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

**Матченко Т.І.,
Шаміс Л.Б.,**

ВАТ «Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «ЕНЕРГОПРОЕКТ»

**Матченко П.Т.,
Первушова Л.Ф.**

ЗАТ «Науково-технічний центр «Ресурс»

Вступ

На сьогодні методи розрахунку довговічності або залишкового ресурсу зварних конструкцій, що враховують специфіку впливу агресивних середовищ, не відпрацьовані у зв'язку з недостатньою вивченістю впливу агресивних середовищ і радіаційних потоків на швидкість вичерпання деформаційного ресурсу.

Для моделювання процесу вичерпання деформаційного ресурсу зварних з'єднань необхідно врахувати:

- теплофізичний вплив зварювання;
- хіміко-металургійний вплив;
- вплив підготовки під зварювання;
- вплив конструкції зварних елементів;
- специфічні впливи радіаційних потоків і агресивних середовищ;
- переважальний вплив відмови, обумовлений першими двома факторами.

Ресурс зварних з'єднань визначається їх корозійним і деформаційним ресурсом. Основні принципи визначення ресурсу сталевих конструкцій і їх зварних з'єднань викладено в роботі [1]. Основні фактори, що впливають на вичерпання деформаційного ресурсу зварних з'єднань, розглянуто в роботі [2]. Методика оцінки корозійного ресурсу зварних з'єднань конструкційних сталей буде найближчим часом опублікована в цьому збірнику.

Основний зміст

Не існує загально прийнятих методів розрахунку довговічності зварних з'єднань, які працюють при повторно-статичному навантаженні. Взагалі застосовуються наступні методики: визначають умовну межу деформаційної витривалості ε_N при заданих характеристиках циклу

$r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ на обмеженій базі випробувань N відповідного строку експлуатації зварної конструкції. Кількість повторно-статичних навантажень приймається $N = 2 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^4$.

За отриманим значенням ε_N і введенням коефіцієнту запасу n визначають максимально допустиму накопичену деформацію:

$$[\varepsilon_N] \geq \varepsilon_N / n$$

Для зварних з'єднань:

$$[\varepsilon_N] \geq \varepsilon_N / (n \cdot k_{\text{эф}}) \quad (1)$$

де $n = 1, 2, 5 \dots 1, 4$ і приймається в залежності від допустимого технічного стану після вичерпання проектного ресурсу;

$k_{\text{эф}}$ – ефективний коефіцієнт концентрації; при статичних навантаженнях $k_{\text{эф}} = \varepsilon_s / \varepsilon_{\text{сз}}$ – відношення деформацій, що відповідає межі тимчасової міцності (σ_s) до відповідної деформації в зоні термічного впливу зварного з'єднання.

Максимально допустимі накопичені деформації $[\varepsilon]$ неоднакові для різних температур середовища. Інакше кажучи, сталева конструкція або зварне з'єднання можуть зруйнуватися на морозі і нормально працювати в спеку. Тому рівняння (1) можна записати у вигляді

$$[\varepsilon_N - \Delta\varepsilon] \geq \varepsilon_N / (n \cdot k_{\text{эф}})$$

де $\Delta\varepsilon$ – зменшення допустимих деформацій в залежності від температури середовища.

Так, для зварних з'єднань сталі марки 10ХСНД:

$$\Delta\varepsilon = (0.012 \exp(0.004(T - T_K)) - 0.002) / l \quad \text{при } (-100) \leq (T - T_K) \leq 0^\circ\text{C};$$

$$\Delta\varepsilon = (0.012 \exp(0.023(T - T_K)) - 0.002) / l \quad \text{при } 0 < (T - T_K) \leq 140^\circ\text{C},$$

де l – відстань між нерухомими опорами конструкції із зварним з'єднанням;

T – температура середовища;

T_K – критична температура крихкості сталі

$$T_K = T_{K0} + \Delta T_T + \Delta T_N + \Delta T_F$$

де T_{K0} – критична температура крихкості (КТК) сталі у вихідному стані;

ΔT_T – зсув КТК внаслідок температурного старіння;

ΔT_N – зсув КТК внаслідок циклічного пошкодження;

ΔT_F – зсув КТК внаслідок впливу нейтронного опромінювання.

Таким чином, деформаційний ресурс зварного з'єднання можна визначити за формулою

$$\tau = a_0 - (a_1 \cdot \varepsilon + a_2 \cdot \varepsilon^2) \cdot \prod_{i=1}^n (K_i),$$

де τ – ресурс зварного з'єднання до початку розтріскування під впливом деформацій розтріскування, перпендикулярних зварному з'єднанню;
 ε – деформації, які можуть бути накопичені під час експлуатації;
 a_0, a_1, a_2 – коефіцієнти моделі.

Для інженерних розрахунків значення механічних характеристик зварного з'єднання після t років експлуатації можна оцінити за формулами

$$A_t = A_0 - t \cdot v_A \cdot \prod_{i=1}^n (K_i);$$

$$\psi_t = \psi_0 - t \cdot v_\psi \cdot \prod_{i=1}^n (K_i);$$

$$KU_t = KU_0 - t \cdot v_{KU} \cdot \prod_{i=1}^n (K_i),$$

де t – час експлуатації конструкції, рік;

A_0, ψ_0, KU_0 – відповідно відносно видовження, звуження поперечного перерізу і ударна в'язкість металу зони термічного впливу зварного з'єднання на початку експлуатації (табл. 1);

A_t, ψ_t, KU_t – відповідно відносно видовження, звуження поперечного перерізу і ударна в'язкість металу зони термічного впливу зварного з'єднання після t років експлуатації;

v_A, v_ψ, v_{KU} – швидкості вичерпання ресурсу (табл. 1);

$\prod_{i=1}^n$ – знак добутку коефіцієнтів впливу факторів на швидкість вичерпання деформаційного ресурсу;

K_i – коефіцієнти впливу факторів з індексом i на швидкість вичерпання деформаційного ресурсу (табл. 2-6):

K_1 – коефіцієнт впливу в залежності від приналежності до відповідної групи елементів зварних з'єднань (Додаток 8, табл. 83* [3]). Значення K_1 приведено в табл. 2;

K_2 – коефіцієнт впливу в залежності від флюенсу нейтронів (табл. 3);

K_3 – коефіцієнт впливу в залежності температури (табл. 4);

K_4 – коефіцієнт впливу в залежності від режиму роботи (табл. 5);

K_5 – коефіцієнт прискорення вичерпання деформаційного ресурсу в залежності від асиметрії циклу навантаження (табл. 6);

Таблиця 1

Марка (ГОСТ або ТУ)	Відносне видовження A , %, не менш	Звуження поперечного перерізу ψ , %, не менш	Ударна в'язкість KU , Дж		Швидкості деградації A, ψ, KU за рік		
			При +20°C	При нижній межі застосування	v_A , % рік	v_ψ , % рік	v_{KU} , % рік
ВСт3кп2 (ГОСТ 380-71*)	26	-	-	-	0,12	-	-
ВСт3сп3 (ГОСТ 380-71*)	25	-	90	30 при -20°C	0,11	-	0,42
ВСт4сп3 (ГОСТ 380-71*)	23	-	70	-	0,10	-	0,32
ВСт5сп2 (ГОСТ 380-71*)	19	-	50	-	0,09	-	0,23
10, 20, 25, 30, 35, 40, (ГОСТ 1050-60*)	31	55	-	-	0,14	0,25	-
	25	55	90	-	0,11	0,25	0,42
	23	50	70	-	0,10	0,23	0,32
	21	50	70	-	0,09	0,23	0,32
	20	45	60	-	0,09	0,21	0,28
	19	45	60	-	0,08	0,21	0,28
09Г2С (ГОСТ 5058-65*)	21	-	-	30 при -70°C	0,09	-	-
10Г2 (ГОСТ 4543-71)	22	50	60	25 нижче - 30°C	0,10	0,23	0,28
35Х (ГОСТ 4543-71)	13	45	60	-	0,06	0,21	0,28
38ХА (ГОСТ 4543-71)	13	45	60	-	0,06	0,21	0,28
40Х (ГОСТ 4543-71)	13	45	60	-	0,06	0,21	0,28
0Х13 (ГОСТ 5632-72)	20	60	100	-	0,09	0,28	0,40
30ХМ	13	45	60	-	0,06	0,21	0,28
30ХМА13 (ГОСТ 451343-71)	13	50	60	-	0,06	0,23	0,28
35ХМ (ГОСТ 4543-71)	13	45	60	-	0,06	0,21	0,28
20ХНЗА (ГОСТ 4543-71)	13	50	60	30 нижче - 40°C	0,06	0,23	0,28
25Х1МФ (ЭИ-10) (ГОСТ 10500-63)	16	50	60	-	0,07	0,23	0,27
25Х2М1Ф (ЭИ-723) (ГОСТ 10500-63)	12	50	50	-	0,05	0,23	0,23
20ХМФБР (ЭП-44) (ЧМТУ1-812-69)	14	50	60	-	0,06	0,23	0,27

Кінець табл. 1

Марка (ГОСТ або ТУ)	Відносне видовження A , %, не менш	Звуження поперечного перерізу ψ , %, не менш	Ударна в'язкість KU , Дж		Швидкості деградації A, ψ, KU за рік		
			При +20°C	При нижній межі застосування	v_A , % рік	v_ψ , % рік	v_{KU} , % рік
20X1M1Ф1ТР (ЭП-182) (ЧМТУ1-812-69)	15	50	60	-	0,07	0,23	0,27
2X12ВМБФР (ЭИ-993) (ГОСТ 5632-72)	12	45	60	-	0,05	0,20	0,27
18X2H4BA (ГОСТ 4543-71)	12	50	100	-	0,05	0,23	0,46
X18H10T (ГОСТ 5632-72)	40	55	-	-	0,18	0,25	-
4X14H14B2M (ЭИ-69) (ГОСТ 5632-72)	20	35	50	-	0,09	0,16	0,23
4X12H8Г8МФБ (ЭИ-481) (ГОСТ 5632-72)	10	20	40	-	0,04	0,09	0,18
1X13	20	60	90	-	0,09	0,27	0,41
2X13	16	55	80	-	0,07	0,25	0,37
3X13 (ГОСТ 5632-72)	12	45	40	-	0,05	0,20	0,18
X17H13M2T	40	55	-	-	0,18	0,25	-
X17H13M3T	40	55	-	-	0,18	0,25	-
0X17H16M3T (ГОСТ 5632-72)	35	45	-	-	0,16	0,20	-
0X23H28M3Д3T (ЭН-943) (ГОСТ 5632-72)	35	45	-	-	0,16	0,20	-
X21Г7АН5 (ЭП-222) (ЧМТУ/ЦНИИЧМ 1-141-67)	40	50	130	-	0,18	0,23	0,60
X14Г14Н3Т (ЭИ-711) (ГОСТ 5832-72)	35	50	-	-	0,16	0,23	-
3X19H9MBBT (ЭИ-572) (ГОСТ 5632-72)	30	40	50	-	0,14	0,18	0,23
X15H24B4T (ЭИ-164) (ЧМТУ 1-181-67)	18	30	80	-	0,08	0,13	0,37
X16H6 (ЭП-288) (ТУ 14-1-205-72)	12	50	70	-	0,05	0,23	0,32
0X14H20B3T (ЭП-712) (ТУ 157-68)	18	30	80	-	0,08	0,13	0,37

Таблиця 2

Група елементів	Значення K_1
2	1,0
3	1,5
4	2,0
5	2,5
6	3,0
7	3,5
8	4,0

Таблиця 3

Флюенс нейтронів (нейтр/см ²)	Значення K_2
$< 10^{13}$	1,00
$10^{13} \dots 10^{14}$	1,05
$10^{14} \dots 10^{15}$	1,10
$10^{15} \dots 10^{16}$	1,15
$10^{16} \dots 10^{17}$	1,20
$10^{17} \dots 10^{18}$	1,30
$10^{18} \dots 10^{19}$	1,50
$> 10^{20}$	2,0

Таблиця 4

Температура	Значення K_3
-20°C	1,4
+20°C	1,0
+40°C	1,0
+80°C	1,2
> +100°C	1,4

Таблиця 5

Режим роботи	Значення K_4
Не навантажено	1
Легкий	1,1
Середній	1,25
Важкий	1,5

Таблиця 6

Клас сталі за СНиП II-23-81*	Група зварного з'єднання за СНиП II-23-81*	Коефіцієнт K_5 в залежності від асиметрії циклу навантаження $\sigma_{Smin}/\sigma_{Smax}$						
		0	0,2	0,4	0,7	0,8	0,9	1,0
C235	1, 2	1,1	1,05	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	3, 4	1,5	1,42	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0
	5, 6	4,0	3,3	2,8	2,0	1,5	1,15	1,0
	7, 8	5,0	5,0	4,0	3,3	2,2	1,5	1,0
C285	1, 2	1,1	1,05	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	3, 4	1,6	1,5	1,5	1,4	1,3	1,15	1,0
	5, 6	5,0	4,0	3,3	2,2	1,6	1,25	1,0
	7, 8	6,5	5,0	5,0	3,3	2,5	1,6	1,0
C375	1, 2, 3	-	-	1,05	1,05	1,0	1,0	1,0
	4, 5, 6	-	-	1,3	1,3	1,25	1,1	1,0
	7, 8	-	-	3,3	2,8	1,8	1,4	1,0
C390K	1, 2, 3	-	-	1,05	1,05	1,0	1,0	1,0
	4, 5, 6	-	-	1,3	1,3	1,25	1,1	1,0
	7, 8	-	-	2,8	2,5	2,0	1,4	1,0
C440	1, 2, 3	-	-	1,05	1,05	1,0	1,0	1,0
	4, 5, 6	-	-	1,3	1,3	1,25	1,1	1,0
	7, 8	-	-	2,8	2,5	2,0	1,4	1,0

Деформаційний ресурс зварного з'єднання (τ_p) визначається за формулами:

$$\tau_{pA} = \frac{A_0 - [A]}{v_A \cdot \prod_{i=1}^n (K_i)};$$

$$\tau_{p\psi} = \frac{\psi_0 - [\psi]}{v_\psi \cdot \prod_{i=1}^n (K_i)};$$

$$\tau_{pKU} = \frac{KU_0 - [KU]}{v_{KU} \cdot \prod_{i=1}^n (K_i)},$$

де $[A], [\psi], [KU]$ – мінімально допустимі значення A, ψ, KU , менше яких конструкція або зварне з'єднання не придатне для нормальної експлуатації. Значення $[A], [\psi], [KU]$ приведено в табл. 7.

Таблиця 7

Допустимий технічний стан	Значення відношень $\frac{[A]}{A_0}, \frac{[\psi]}{\psi_0}, \frac{[KU]}{KU_0}$
Добрий	1,0-0,95
Задовільний	0,95-0,90
Незадовільний	0,90-0,80
Не придатний до нормальної експлуатації	0,80-0,70
Аварійний	0,70 і менше

Література

1. Шаміс Л.Б., Матченко Т.І., Первушова Л.Ф. Моделювання старіння сталей при визначенні ресурсу металевих конструкцій АЕС / Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля, 2010, вип. 13.
2. Верюжський Ю.В., Матченко Т.І., Дмитрієнко М.В., Рожновська О.С. Аналіз факторів пошкодження зварних з'єднань облицювання шахти реактора / Будівництво України, 2005, № 6. – С. 21-27.
3. СНИП II-23-81* Стальные конструкции. М.: Госстрой СССР, 1990. – 94 с.