

## МЕТОДИКА ОЦІНКИ ДЕФОРМАЦІЙНОГО РЕСУРСУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

© 2011 р. Т. І. Матченко<sup>1</sup>, Л. Б. Шаміс<sup>1</sup>, П. Т. Матченко<sup>2</sup>, Л. Ф. Первушова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ПАТ «Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Енергопроект», Київ

<sup>2</sup>ЗАТ «Науково-технічний центр «Ресурс», Київ

Розроблено інженерну методику попередньої оцінки довговічності або залишкового ресурсу зварних з'єднань за величинами швидкостей старіння сталей і факторів, що впливають на старіння.

*Ключові слова:* довговічність, ресурс, зварне з'єднання.

### Вступ

На сьогоднішній день 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;
- домінуючий вплив відмови, обумовлений першими двома факторами.

Ресурс зварних з'єднань визначається їхнім корозійним і деформаційним ресурсом. Основні принципи визначення ресурсу сталевих конструкцій та їхніх 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, що працюють при повторно-статичному навантаженні. Взагалі застосовуються наступні методики: визначають умовну межу деформаційної витривалості  $\varepsilon_N$  при заданих характеристиках циклу  $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$  на обмеженій базі випробувань  $N$  відповідного строку експлуатації зварної конструкції. Кількість повторно-статичних навантажень приймається  $N = 2 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^4$ .

По отриманому значенню  $\varepsilon_N$  і введенням коефіцієнта запасу  $n$  визначають максимально допустиму накопичену деформацію

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

Для зварних з'єднань

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

де  $n = 1,25 \dots 1,4$  і приймається залежно від допустимого технічного стану після вичерпання проектного ресурсу;  $k_{ef}$  – ефективний коефіцієнт концентрації; при статичних навантаженнях  $k_{ef} = \varepsilon_e / \varepsilon_{e3}$  – відношення деформацій, що відповідає тимчасовій межі міцності ( $\sigma_e$ ) до відповідної деформації в зоні термічного впливу зварного з'єднання.

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

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

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

Так, для зварних з'єднань сталі марки 10ХСНД

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

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

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;  $\Delta T_T$  – зсув КТК унаслідок температурного старіння;  $\Delta T_N$  – зсув КТК унаслідок циклічного пошкодження;  $\Delta T_F$  – зсув КТК унаслідок 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  $\tau$  – ресурс зварного з'єднання до початку розтріскування під впливом деформацій розтріскування, перпендикулярних зварному з'єднанню;  $\varepsilon$  – 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;  $A_0, \psi_0, KU_0$  – відповідно відносне здовження, звуження поперечного перерізу й ударна в'язкість металу зони термічного впливу зварного з'єднання на початку експлуатації (табл. 1);  $A_t, \psi_t, KU_t$  – відповідно відносне здовження, звуження поперечного перерізу й ударна в'язкість металу зони термічного впливу зварного з'єднання після ( $t$ ) років експлуатації;  $v_A, v_\psi, v_{KU}$  – швидкості вичерпання ресурсу (див. 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 залежно від приналежності до відповідної групи елементів зварних з'єднань (додаток 8, табл. 83\* [3]). Значення  $K_1$  наведено в табл. 2;

$K_2$  – коефіцієнт впливу залежно від флюенсу нейтронів (табл. 3);

$K_3$  – коефіцієнт впливу залежно від температури (табл. 4);

$K_4$  – коефіцієнт впливу залежно від режиму роботи (табл. 5);

$K_5$  – коефіцієнт прискорення вичерпання деформаційного ресурсу залежно від асиметрії циклу навантаження (табл. б).

Таблиця 1

| Марка<br>(ГОСТ або ТУ)                                    | Відносне уздовження<br>$A$ , %, не менш | Звуження поперечно-<br>го перерізу $\psi$ , %, не<br>менш | Ударна в'язкість $KU$ , Дж |                                 | Швидкості деградації<br>$A$ , $\psi$ , $KU$ за рік |                     |                     |
|---|---|---|----------------------------|---------------------------------|--|---------------------|---------------------|
|   |   |   | При +20 °С                 | При нижній межі<br>застосування | $v_A$ , %<br>рік                                   | $v_\psi$ , %<br>рік | $v_{KU}$ , %<br>рік |
| ВСт3кп2<br>(ГОСТ 380-71*)                                 | 26                                      | -   | -                          | -                               | 0,12   | -                   | -                   |
| ВСт3сп3<br>(ГОСТ 380-71*)                                 | 25                                      | -   | 90                         | 30 при -20 °С                   | 0,11   | -                   | 0,42                |
| ВСт4сп3<br>(ГОСТ 380-71*)                                 | 23                                      | -   | 70                         | -                               | 0,10   | -                   | 0,32                |
| ВСт5сп2<br>(ГОСТ 380-71*)                                 | 19                                      | -   | 50                         | -                               | 0,09   | -                   | 0,23                |
| 10,<br>20,<br>25,<br>30,<br>35,<br>40,<br>(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<br>(ГОСТ 5058-65*)                                  | 21                                      | -   | -                          | 30 при -70 °С                   | 0,09   | -                   | -                   |
| 10Г2<br>(ГОСТ 4543-71)                                    | 22                                      | 50  | 60                         | 25 нижче -30 °С                 | 0,10   | 0,23                | 0,28                |
| 35Х<br>(ГОСТ 4543-71)                                     | 13                                      | 45  | 60                         | -                               | 0,06   | 0,21                | 0,28                |
| 38ХА<br>(ГОСТ 4543-71)                                    | 13                                      | 45  | 60                         | -                               | 0,06   | 0,21                | 0,28                |
| 40Х<br>(ГОСТ 4543-71)                                     | 13                                      | 45  | 60                         | -                               | 0,06   | 0,21                | 0,28                |
| 0Х13<br>(ГОСТ 5632-72)                                    | 20                                      | 60  | 100                        | -                               | 0,09   | 0,28                | 0,40                |
| 30ХМ  | 13                                      | 45  | 60                         | -                               | 0,06   | 0,21                | 0,28                |
| 30ХМА13<br>(ГОСТ 451343-71)                               | 13                                      | 50  | 60                         | -                               | 0,06   | 0,23                | 0,28                |
| 35ХМ<br>(ГОСТ 4543-71)                                    | 13                                      | 45  | 60                         | -                               | 0,06   | 0,21                | 0,28                |
| 20ХН3А<br>(ГОСТ 4543-71)                                  | 13                                      | 50  | 60                         | 30 нижче -40 °С                 | 0,06   | 0,23                | 0,28                |
| 25Х1МФ (ЭИ-10)<br>(ГОСТ 10500-63)                         | 16                                      | 50  | 60                         | -                               | 0,07   | 0,23                | 0,27                |
| 25Х2М1Ф<br>(ЭИ-723)<br>(ГОСТ 10500-63)                    | 12                                      | 50  | 50                         | -                               | 0,05   | 0,23                | 0,23                |
| 20ХМФБР<br>(ЭП-44)<br>(ЧМТУ1-812-69)                      | 14                                      | 50  | 60                         | -                               | 0,06   | 0,23                | 0,27                |

|   |    |    |     |   |      |      |      |
|---|----|----|-----|---|------|------|------|
| 20Х1М1Ф1ТР<br>(ЭП-182)<br>(ЧМТУ1-812-69)          | 15 | 50 | 60  | - | 0,07 | 0,23 | 0,27 |
| 2Х12ВМБФР<br>(ЭИ-993)<br>(ГОСТ 5632-72)           | 12 | 45 | 60  | - | 0,05 | 0,20 | 0,27 |
| 18Х2Н4ВА<br>(ГОСТ 4543-71)                        | 12 | 50 | 100 | - | 0,05 | 0,23 | 0,46 |
| Х18Н10Т<br>(ГОСТ 5632-72)                         | 40 | 55 | -   | - | 0,18 | 0,25 | -    |
| 4Х14Н14В2М<br>(ЭИ-69)<br>(ГОСТ 5632-72)           | 20 | 35 | 50  | - | 0,09 | 0,16 | 0,23 |
| 4Х12Н8Г8МФБ<br>(ЭИ-481)<br>(ГОСТ 5632-72)         | 10 | 20 | 40  | - | 0,04 | 0,09 | 0,18 |
| 1Х13  | 20 | 60 | 90  | - | 0,09 | 0,27 | 0,41 |
| 2Х13  | 16 | 55 | 80  | - | 0,07 | 0,25 | 0,37 |
| 3Х13<br>(ГОСТ 5632-72)                            | 12 | 45 | 40  | - | 0,05 | 0,20 | 0,18 |
| Х17Н13М2Т   | 40 | 55 | -   | - | 0,18 | 0,25 | -    |
| Х17Н13М3Т   | 40 | 55 | -   | - | 0,18 | 0,25 | -    |
| 0Х17Н16М3Т<br>(ГОСТ 5632-72)                      | 35 | 45 | -   | - | 0,16 | 0,20 | -    |
| 0Х23Н28М3Д3Т<br>(ЭН-943)<br>(ГОСТ 5632-72)        | 35 | 45 | -   | - | 0,16 | 0,20 | -    |
| Х21Г7АН5<br>(ЭП-222)<br>(ЧМТУ/ЦНИИЧМ<br>1-141-67) | 40 | 50 | 130 | - | 0,18 | 0,23 | 0,60 |
| Х14Г14Н3Т<br>(ЭИ-711)<br>(ГОСТ 5832-72)           | 35 | 50 | -   | - | 0,16 | 0,23 | -    |
| 3Х19Н9МВБТ<br>(ЭИ-572)<br>(ГОСТ 5632-72)          | 30 | 40 | 50  | - | 0,14 | 0,18 | 0,23 |
| Х15Н24В4Т<br>(ЭИ-164)<br>(ЧМТУ 1-181-67)          | 18 | 30 | 80  | - | 0,08 | 0,13 | 0,37 |
| Х16Н6 (ЭП-288)<br>(ТУ 14-1-205-72)                | 12 | 50 | 70  | - | 0,05 | 0,23 | 0,32 |
| 0Х14Н20В3Т<br>(ЭП-712)<br>(ТУ 157-68)             | 18 | 30 | 80  | - | 0,08 | 0,13 | 0,37 |

Таблиця 2

Таблиця 3

| Група елементів | Значення $K_1$ |
|-----------------|----------------|
| 2               | 1,0            |
| 3               | 1,5            |
| 4               | 2,0            |
| 5               | 2,5            |
| 6               | 3,0            |

| Флюенс нейтронів<br>(нейтрон/см <sup>2</sup> ) | 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           |

|   |     |
|---|-----|
| 7 | 3,5 |
| 8 | 4,0 |

Таблиця 4

|                         |      |
|-------------------------|------|
| $10^{17} \dots 10^{18}$ | 1,30 |
| $10^{18} \dots 10^{19}$ | 1,50 |
| $> 10^{20}$             | 2,0  |

Таблиця 5

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

| 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 $K_5$ залежно від асиметрії циклу навантаження $\sigma_{S \min} / \sigma_{S \max}$ |      |      |      |      |      |     |
|------------------------------|--|---|------|------|------|------|------|-----|
|                              |  | 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 |
| C245                         | 3, 4                                       | 1,5   | 1,42 | 1,3  | 1,1  | 1,0  | 1,0  | 1,0 |
| C255                         | 5, 6                                       | 4,0   | 3,3  | 2,8  | 2,0  | 1,5  | 1,15 | 1,0 |
| C275                         | 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 |
| C345                         | 3, 4                                       | 1,6   | 1,5  | 1,5  | 1,4  | 1,3  | 1,15 | 1,0 |
| C345K                        | 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 |
| C390                         | 4, 5, 6                                    | -   | -    | 1,3  | 1,3  | 1,25 | 1,1  | 1,0 |
| C390K                        | 7, 8                                       | -   | -    | 3,3  | 2,8  | 1,8  | 1,4  | 1,0 |
| C440                         | 1, 2, 3                                    | -   | -    | 1,05 | 1,05 | 1,0  | 1,0  | 1,0 |
| C590                         | 4, 5, 6                                    | -   | -    | 1,3  | 1,3  | 1,25 | 1,1  | 1,0 |
| C590K                        | 7, 8                                       | -   | -    | 2,8  | 2,5  | 2,0  | 1,4  | 1,0 |

Деформаційний ресурс зварного з'єднання ( $\tau_p$ ) визначається за такими 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  $A$ ,  $\psi$ ,  $KU$ , менше яких конструкція або зварне з'єднання непридатне для нормальної експлуатації. Значення  $[A]$ ,  $[\psi]$ ,  $[KU]$  наведено 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  |
| Непридатний до нормальної експлуатації | 0,80 - 0,70  |
| Аварійний                              | 0,70 і менше |

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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. - С. 94 - 102.
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.

### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕСУРСА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

**Т. И. Матченко, Л. Б. Шамис, П. Т. Матченко, Л. Ф. Первушова**

Разработана инженерная методика предварительной оценки долговечности или остаточного ресурса сварных соединений по величинам скоростей старения сталей и факторов, влияющих на старение.

*Ключевые слова:* долговечность, ресурс, сварное соединение.

### ESTIMATION PROCEDURE OF THE DEFORMATIVE RESOURCE OF THE WELDED JOINTS IN CONSTRUCTIONAL STEEL

**T. I. Matchenko, L. B. Shamis, P. T. Matchenko, L. F. Pervushova**

Engineering preliminary estimation procedure of longevity or remaining life of welded joints by value of ageing rates of steel and factors, which affect on ageing, is worked out.

*Keywords:* longevity, resource, welded joints.

Надійшла до редакції 29.09.10