

УДК 620.192.7

**П.Ясній докт.техн.наук; В.Гуцайлюк**

*Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя*

## **КРИТЕРІЇ ВТОМНОГО РУЙНУВАННЯ І ЗАКОНОМІРНОСТІ ЦИКЛІЧНОГО ПРУЖНОПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ СТАЛІ 15Х2МФА**

*Досліджено основні закономірності циклічного пружнопластичного деформування, енергетичні і деформаційні критерії втомного руйнування сталі 15Х2МФА, а також вплив ефекту масштабу.*

### **Умовні позначення**

- $l$  — довжина робочої ділянки зразка, мм;  
 $d$  — діаметр робочої ділянки зразка, мм;  
 $R_\varepsilon = \varepsilon_{\min}/\varepsilon_{\max} = -1$  — коефіцієнт асиметрії циклу;  
 $\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}$  — найменша і найбільша загальні деформації циклу навантажування;  
 $C_p; C_e; n_p; n_e$  — сталі матеріалу;  
 $N_T$  — кількість циклів до зародження тріщини;  
 $\Delta W_T$  — питома енергія непружної деформації за цикл при напруженні, що дорівнює межі витривалості;  
 $\Delta W_i$  — питома енергія непружної деформації в  $i$ -тому циклі;  
 $W_f$  — енергія втомного руйнування;  
 $\beta$  — параметр, що визначає інтенсивність зростання безпечної частини розсіюваної енергії;  
 $\delta^{(k)}$  — ширина петлі  $k$ -му циклі;  
 $\bar{N}$  — відносна довговічність.

Метою даної роботи було виявлення основних закономірностей циклічно пружно пластичного деформування, а також енергетичних і деформаційних критеріїв втомного руйнування сталі 15Х2МФА з урахуванням впливу ефекту масштабу.

Вплив розмірів зразків (ефект масштабу) оцінюється коефіцієнтом впливу поперечного перерізу зразка (масштабним фактором). Ефект масштабу залежить від властивостей матеріалу, способу навантаження (розтяг, згин, кручення), стану поверхні, концентрації напружень і середовища у якому проводиться випробування [1].

Згідно з [2] при випробуваннях гладких зразків ефект масштабу істотно виявляється при згині і крученні і, очевидно, незначний при умовах однорідного напруженого стану. Багато авторів вважають, що при випробуванні на розтяг-стиск практично ефект масштабу при умові відсутності концентратора не виявляється. Його наявність виявляє значний ефект масштабу за рахунок градієнта напружень [3].

Досліджували сталь 15Х2МФА після термічної обробки, що моделювала радіаційне окрихчення матеріалу під дією нейтронного опромінення на кінець терміну експлуатації корпусу атомного реактора ВВЕР-440. Хімічний склад та характеристики механічних властивостей сталі при кімнатній температурі подані в таблиці 1.

Для випробувань використовували гладкі циліндричні зразки з діаметром робочої ділянки 5 мм та 10 мм і співвідношенням  $l/d = 2$  і  $l/d = 2,5$  відповідно (тут  $l$  - довжина робочої ділянки зразка).

Випробування проводили на електрогідравлічній випробувальній машині СТМ-100, керованій ПК типу ІВМ РС АТ 286. Під час випробувань неперервно вимірювали зусилля і поздовжню деформацію, що записувалася на магнітоносій та виводилися на двокоординатний самописець типу Н110 у координатах: зусилля - деформація як петлі гістерезису.

Таблиця 1

Хімічний склад і характеристики механічних властивостей сталі 15Х2МФА

|                |       |       |      |            |       |       |          |        |       |
|----------------|-------|-------|------|------------|-------|-------|----------|--------|-------|
| C, %           | Mo, % | Si, % | V, % | Mn, %      | Cr, % | S, %  | Ni, %    | P, %   | Ti, % |
| 0,18           | 0,62  | 0,27  | 0,29 | 0,48       | 2,58  | 0,019 | 0,16     | 0,013  | 0,011 |
| $\sigma_{0,2}$ |       |       |      | $\sigma_e$ |       |       | $\delta$ | $\psi$ |       |
| МПа            |       |       |      |            |       |       | %        |        |       |
| 1100           |       |       |      | 1160       |       |       | 16,6     | 67,2   |       |

Пружнопластичне деформування зразків здійснювалось у режимі жорсткого навантажування при коефіцієнті асиметрії циклу  $R_\epsilon = \epsilon_{min}/\epsilon_{max} = -1$  і частоті 0,25 Гц; тут  $\epsilon_{min}$ ,  $\epsilon_{max}$  - найменша і найбільша загальні деформації циклу навантажування [4]. Амплітуда пружнопластичної деформації  $\epsilon_a$  змінювалася у межах 0,3...0,8 %. Температура випробувань становила 293 К. Циклічну міцність оцінювали за допомогою деформаційних та енергетичних критеріїв руйнування. Відомо, що амплітуда пружнопластичної деформації від кількості циклів до руйнування описується залежністю [5,6]

$$\epsilon_a = \epsilon_e + \epsilon_p = C_p N_T^{n_p} + C_e N_T^{n_e}, \quad (1)$$

де  $\epsilon_e$ ,  $\epsilon_p$  - відповідно амплітуда пружної та пластичної деформації;  $C_p$ ;  $C_e$ ;  $n_p$ ;  $n_e$  - сталі для даних умов випробувань;  $N_T$  - кількість циклів до зародження тріщини.

Криві циклічної міцності сталі 15Х2МФА побудовані за даними табл.2 за появою поверхневої втомної тріщини довжиною 0,5...1,2 мм подано на рис.1.

Таблиця 2

Результати випробувань на довговічність зразків діаметром 10 і 5 мм

| Кількість циклів до появи тріщини<br>$N_T$ | Повна амплітуда деформації<br>$\epsilon_a, \%$ | Амплітуда пластичної деформації<br>$\epsilon_{ap}, \%$ | Амплітуда пружної деформації<br>$\epsilon_{ae}, \%$ |
|--|--|--|---|
| 200*                                       | 0,8  | 0,32   | 0,48  |
| 420  | 0,76   | 0,4  | 0,57  |
| 750  | 0,72   | 0,17   | 0,55  |
| 525*                                       | 0,6  | 0,1  | 0,5   |
| 780*                                       | 0,6  | 0,1  | 0,5   |
| 1200                                       | 0,6  | 0,1  | 0,5   |
| 2700                                       | 0,6  | 0,1  | 0,5   |
| 4200                                       | 0,5  | 0,02   | 0,48  |
| 19000                                      | 0,45   | 0,05   | 0,4   |

\* — зразки діаметром 5 мм

Їх аналіз свідчить, що незалежно від діаметра зразка всі експериментальні дані про втомну довговічність можна описати однією залежністю (1) з такими коефіцієнтами  $C_p=70,9$ ;  $C_e=0,798$ ;  $n_p=-0,957$ ;  $n_e=-0,10$ .

Згідно з [2] матеріал, незалежно від кількості циклів навантаження, руйнується коли енергія непружного гістерезису досягає критичного значення:

$$W_f = \sum_{i=1}^{N_T} \left[ \Delta W_i - \Delta W_r \left( \frac{\Delta W_i}{\Delta W_r} \right)^\beta \right] = const, \quad (2)$$

де  $\Delta W_r$  - питома енергія непружної деформації за цикл при напруженні, що дорівнює

межі витривалості;  $\Delta W_i$  - питома енергія непружної деформації у  $i$ -тому циклі; Параметр  $\beta$  визначає інтенсивність зростання безпечної частини розсіюваної енергії із збільшенням  $N_T$ . Для даного випадку  $\beta = 0$ .

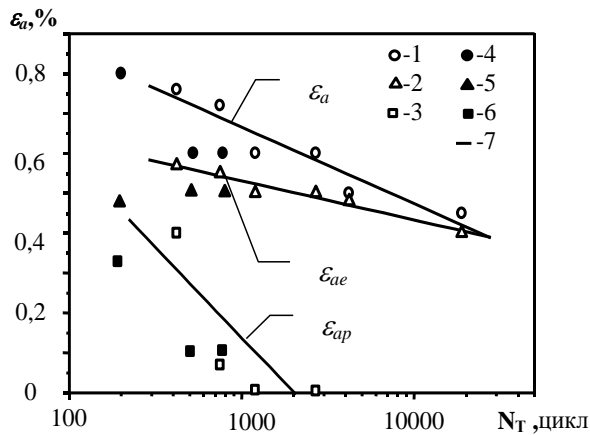


Рис.1. Залежність амплітуди деформації  $\epsilon_a$  (1,4)  $\epsilon_{ae}$  (2,5) і  $\epsilon_{ap}$  (3,6) від кількості циклів до появи тріщини. 1-6 експеримент; 7- апроксимація результатів; — діаметр зразка 10 мм (1-3) і 5 мм (4-6).

На рис.2 подано залежності сумарної пружнопластичної енергії деформації  $W$  і енергії  $\Delta W$ , що розсіюється у матеріалі за цикл навантаження. Із збільшенням кількості циклів до зародження тріщини від  $2 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^4$  сумарна питома енергія деформації  $W$  для сталі 15X2МФА змінюється неістотно. Проте розсіювання енергії  $\Delta W$  при циклічному навантаженні досить істотне. Не виявлено значного впливу діаметру зразка на енергію втомного руйнування.

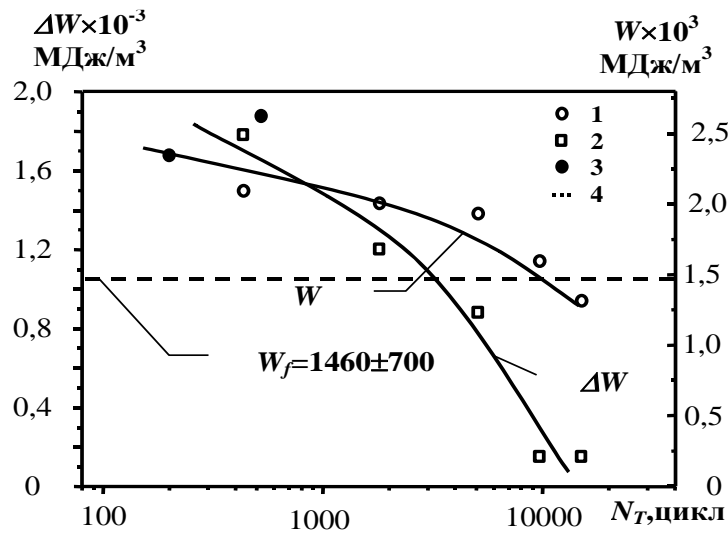


Рис.2. Залежність  $\Delta W$ (1,3),  $W$ (2) і  $W_f$ (4) сталі 15X2МФА від кількості циклів до зародження тріщини при 293 К,  $R_\epsilon = -1$  Діаметр зразка  $\varnothing = 10$  мм (1,2) і 5 мм (3,4).

Аналіз результатів випробувань при  $\epsilon_a > 0,5\%$  свідчить, що сталь 15X2МФА є циклічно знеміцнювальною (рис.3), оскільки, коли знехтувати нестабільною зміною ширини петлі гістерезису  $\delta^k$  при напрацюванні  $\bar{N} < 0,1 \dots 0,2$  то надалі із збільшенням кількості циклів навантаження переважно збільшується  $\delta^k$ . Проте при  $\epsilon_a < 0,5\%$  із збільшенням кількості циклів навантаження ширина петлі практично не змінюється.

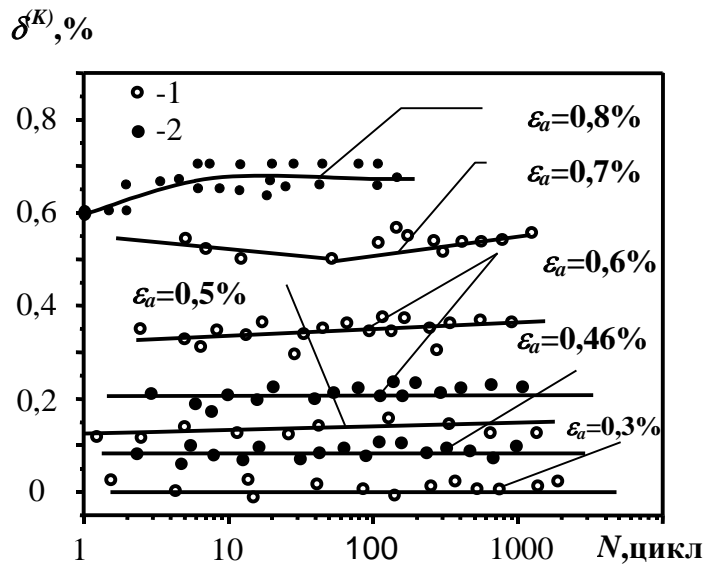


Рис.3. Залежність ширини петлі гістерезису від кількості циклів навантаження для сталі 15Х2МФА при 293 К,  $R_\epsilon = -1$ .  
Діаметр зразка 10 мм (1) і 5 мм (2).

Таблиця 3

Залежність межі текучості сталі від амплітуди пружнопластичної деформації при  $\bar{N} = 0,3$

| Границя текучості $\sigma_{0,2}$ , МПа                 | 930 | 820  | 800 | 834* | 810* | 794* |
|--|-----|------|-----|------|------|------|
| Амплітуда пружнопластичної деформації $\epsilon_a$ , % | 0,3 | 0,45 | 0,7 | 0,46 | 0,6  | 0,8  |

\* — зразки діаметром 5 мм

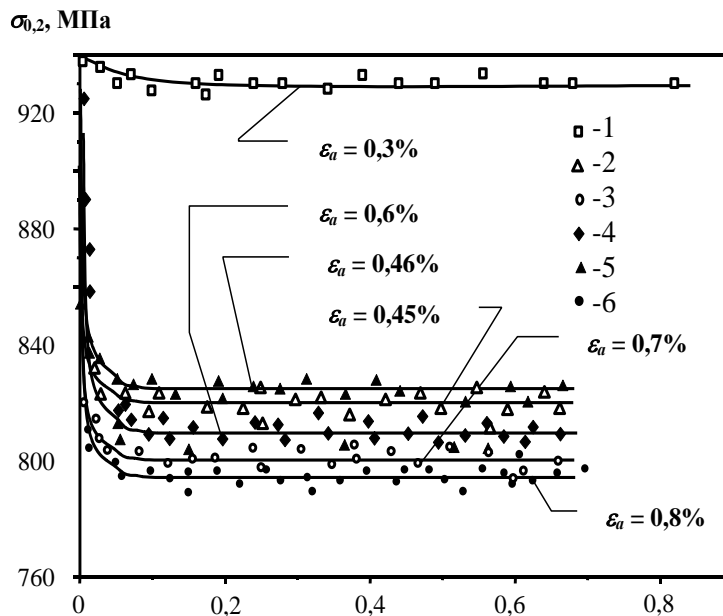


Рис.4. Залежність границі текучості  $\sigma_{0,2}$  від кількості циклів навантаження для сталі 15Х2МФА при 293 К,  $R_\epsilon = -1$ .  $\epsilon_a = 0,3\%$  (1);  $\epsilon_a = 0,6\%$  (4);  $\epsilon_a = 0,46\%$  (5);  $\epsilon_a = 0,45\%$  (2);  $\epsilon_a = 0,7\%$  (3);  $\epsilon_a = 0,8\%$  (6).  
Діаметр зразка 10 мм (1-3) і 5 мм (4-6).

Відомо, що попереднє циклічне навантаження впливає як на мікроструктуру, так і на механічні властивості матеріалу. Для сталі 15Х2МФА в усіх випадках ( $\epsilon_a = 0,3 \dots 0,8\%$ ) циклічне навантаження знижує поріг текучості (рис.4). Проте при

напрацюванні  $\bar{N} > 0,1$  поріг текучості практично стабілізується і залишається незмінним до появи макротріщини.

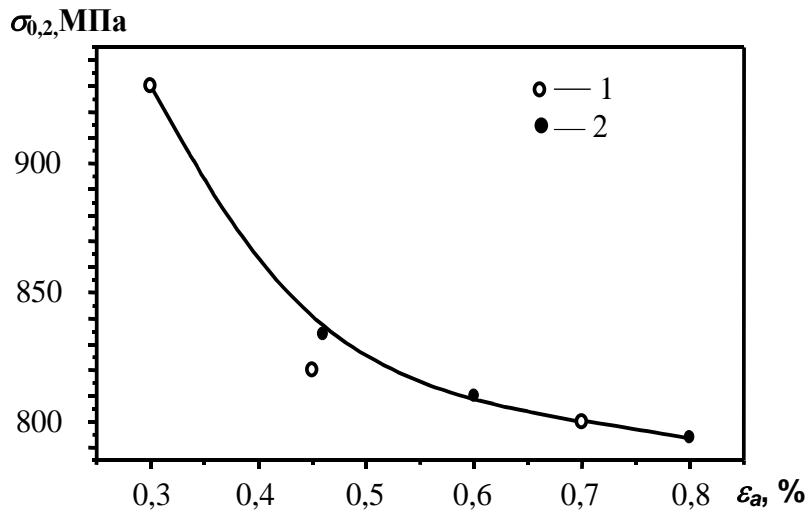


Рис.5. Залежність границі текучості сталі 15X2МФА при 293 К  $\sigma_{0,2}$  від амплітуди пружнопластичної деформації,  $\bar{N} = 0,3$ .  
Діаметр зразка 10 мм (1) і 5 мм (2).

Збільшення діаметра зразка з 5 до 10 мм істотно не впливає на закономірності пружнопластичного деформування, зміну ширини петлі гістерезису і межу текучості (рис.2, рис.3).

Одночасно при циклічному напрацюванні зменшується  $\sigma_{0,2}$  при збільшенні амплітуди пружнопластичної деформації (рис.5).

Узагальнюючи результати даного дослідження, можна зробити такі висновки:

1. Енергія втомного руйнування  $W_f$  сталі 15X2МФА в умовах симетричного жорсткого пружнопластичного деформування не залежить від кількості циклів навантаження до зародження тріщини, а також діаметра зразка в діапазоні  $2 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^4$  циклів.

2. Пружнопластичне циклічне деформування сталі 15X2МФА приводить до збільшення ширини петлі  $\delta^k$  при  $\epsilon_a > 0,5\%$  та зменшення границі текучості матеріалу із збільшенням амплітуди загальної деформації.

*Investigation principal regularities of cyclic elasto-plastic deformation, and also energy and deformation criteria of fatigue failure for of steel 15Cr2MoV . Investigation influence of a scale effect.*

### Література

1. В.Т.Трощенко, А.Я. Красовский, В.В.Покровский, и др. Соппротивление материалов деформированию и разрушению: Справочное пособие. В 2 - х томах. Т.2.-Киев: Наук. думка, 1994.-С.700.
2. Трощенко В.Т. Прочность металлов при переменных нагрузках.-Киев: Наук. думка, 1971.-С.268.
3. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие / Под общей ред.Панасюка В.В.-Киев.Наук. думка, 1988-1990; Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / Романив О.Н, Ярема С.Я., Никифорчин Г.Н. и др. - К., 1990. - 680 с.
4. Пластично деформовані матеріали: втомі і тріщинозривкість / За ред. П.В.Яснія.- Львів: Світ, 1998. - 292 с.
5. Прочность при малоцикловом нагружении/ С.В.Серенсен, Р.М.Шнейдерович, А.П.Гусенков и др. - М.: Наука, 1975.-286 с.
6. Трощенко В.Т. Критерий усталостной прочности металлов и сплавов, основанный на учете рассеяния энергии при колебаниях систем.-Киев: Наук. думка, 1966.-С.168-177.

Одержано 09.10.2000 р.