

УДК 539.3

В. Ясній; В. Бревус; П. Марущак, докт. техн. наук

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

МЕТОДИКА І ДЕЯКІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ СПОВІЛЬНЕНОГО ДЕФОРМУВАННЯ І РУЙНУВАННЯ ТЕПЛОСТІЙКОЇ СТАЛІ

***Резюме.** Розроблено й апробовано методику дослідження характеристик механічних властивостей і тріщиностійкості теплостійкої сталі за сповільненого деформування одноісним розтягом на базі електромеханічної випробувальної машини типу FP 100 виробництва Fritz Heckert. Для зменшення швидкості деформування до $10^{-8} \dots 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ та переміщення траверси до $1 \text{ }\mu\text{m/hour}$ при випробуванні зразків з тріщиною в кінематичну схему машини вмонтовано додатково два черв'ячних редуктори. Побудовано діаграму руйнування і часову залежність поздовжньої деформації експлуатованої сталі 12Х1МФ за сповільненого деформування.*

***Ключові слова:** сповільнене деформування, колектор пароперегрівника, сталь 12Х1МФ.*

V. Yasniy, V. Brevus, P. Maruschak

METHODOLOGY AND SOME RESULTS OF SLOW STRAIN STUDIES AND FRACTURE OF COLLECTOR HEAT RESISTANT STEEL

***Summary.** Many important structural elements of thermal and nuclear power plants (reactor vessels, steam generator collectors, pipelines etc.) are operating at high temperatures and in aggressive environments under variable stresses caused by changes in the power consumption. In many cases, lifetime decrease and unpredictable failure of these structural elements are due to slow rate deformation, which in combination with hydrogen environment degrade steels mechanical behaviour. So, to evaluate the lifetime of important structural elements such as pipelines and steam collectors one need to know the behaviour of the material under slow strain rate.*

On the base of the electro-mechanical type FP 100 (Fritz Heckert) testing machine the methodology to study the characteristic of mechanical behaviour and crack growth resistance at slow strain rate by tension was developed to extend the cylindrical samples deformation minimum rate range up to $10^{-8} \dots 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ and traverse displacement up to $1 \text{ }\mu\text{m/hour}$ during testing the specimens with the cracks, in particular.

To reduce the specimens rate of deformation in the kinematic schema of testing machine traverse movement between motor and reduction gearbox the V-belt drive and two worm-and-wheel gearboxes with gear ratio of 1: 30 and 1:40 were mounted. It is possible to reduce the minimum traverse velocity from $1200 \text{ }\mu\text{m/hour}$ (0.02 mm/min) to $1.0 \text{ }\mu\text{m/hour}$.

The 12Cr1MoV steel of "hot collector" thermal power plant superheater after 178.5 thousand operation hours was studied.

The stress-strain diagram and time dependencies of operated 12Cr1MoV steel axial strain were obtained.

***Key words:** slow strain, superheater collector, 12Cr1MoV steel.*

Постановка проблеми. Багато важливих елементів конструкцій теплових та атомних електростанцій (корпуси реакторів, колектори парогенераторів, парогони тощо) працюють в умовах підвищених температур і дії агресивних середовищ за змінних напружень, спричинених зміною споживаної потужності електроенергії. У багатьох випадках причиною зменшення ресурсу й передчасного руйнування таких елементів конструкції є сповільнене деформування, яке у поєднанні з водневмісним

середовищем погіршує експлуатаційні характеристики сталей. Отже, для обґрунтування ресурсу таких важливих елементів конструкції як трубопроводи, колектори парогенераторів та колектори пароперегрівників необхідно знати поведінку матеріалу за сповільненого деформування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що швидкість деформування істотно впливає на характеристики механічних властивостей матеріалів. Чим менша швидкість деформування, тим більше зниження пластичності [1, 2, 3]. Зокрема, істотне зниження критичної деформації теплостійкої сталі 10ГН2МФА у водному корозійному середовищі спостерігається уже при швидкості деформації $d\varepsilon / dt = 10^{-5} \dots 10^{-4} s^{-1}$, а при $d\varepsilon / dt = 10^{-7} \dots 10^{-6} s^{-1}$ критична деформація є найменшою [1]. Тут ε – поздовжня деформація.

Оскільки більшість випробувального обладнання не забезпечує таких низьких швидкостей деформування, необхідно було модернізувати існуючу електромеханічну випробувальну машину.

Метою даної роботи було розробити й апробувати методику дослідження характеристик механічних властивостей і тріщиностійкості теплостійкої сталі за сповільненого деформування одновісним розтягом на базі електромеханічної випробувальної машини типу FP 100 виробництва Fritz Heckert.

Методика дослідження. Електромеханічна машина FP 100 забезпечує проведення статичних і повторно статичних випробувань за одновісного розтягу та стиску й різної форми циклу навантаження (гармонійна, трикутна і трапецієподібна).

Для вивчення впливу сповільненого деформування на характеристики механічних властивостей і тріщиностійкість конструкційних матеріалів необхідно було розробити методику дослідження, зокрема розширити діапазон мінімальної швидкості деформування циліндричних зразків розтягом до $10^{-8} \dots 10^{-6} s^{-1}$ та переміщення траверси до 1 $\mu m/hour$ при випробуванні зразків з тріщиною, а також автоматизувати збір даних вимірювань під час експерименту та їх опрацювання.

Для зменшення швидкості деформування зразка до $d\varepsilon / dt = 10^{-7} \dots 10^{-6} s^{-1}$ у кінематичну схему (рис. 1) привода для переміщення траверси 1 випробувальної машини між електродвигуном 2 і штатним редуктором 3 було вмонтовано послідовно пасову передачу 4 і два черв'ячних редуктори 5, 6 з передаточним відношенням 1: 30 та 1:40 відповідно. Це дозволило зменшити мінімальну швидкість переміщення траверси з 1200 $\mu m/hour$ (0,02 mm/min) до 1,0 $\mu m/hour$ і забезпечити мінімальну швидкість поздовжньої деформації за одновісного розтягу гладкого зразка до $2,2 \times 10^{-8} s^{-1}$ за бази вимірювання 12,5 mm.

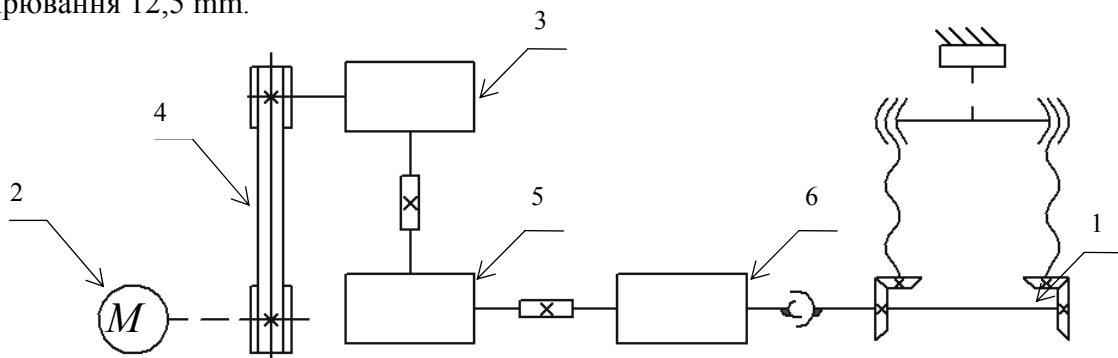


Рисунок 1. Кінематична схема установки FP 100 після модернізації

Figure 1. Kinematic diagram of testing machine FP 100 after upgrade

За квазістатичного та циклічного навантаження забезпечується можливість ручного або автоматизованого керування за заданими навантаженням або переміщенням траверси. Для всіх режимів випробувань точність підтримування заданої величини сигналу за вибраним параметром і точність вимірювання контрольованих величин є не нижче 1% від максимального значення встановленого масштабного діапазону [5].

При керуванні модернізованою випробувальною машиною FP 100 від ПК використовували спеціально розроблений комплекс прикладних програм [5]. Для запису вимірювальних величин (зусилля, деформація) на ПК під час випробувань використовували цифровий сервоконтролер марки ViSS 2370SS з програмним забезпеченням MTL32. На рис. 2 представлено інтерфейс програми для записування вимірювальних величин – зусилля і поздовжньої деформації зразка. Вимірювальні величини записували з частотою 0,1 Гц.

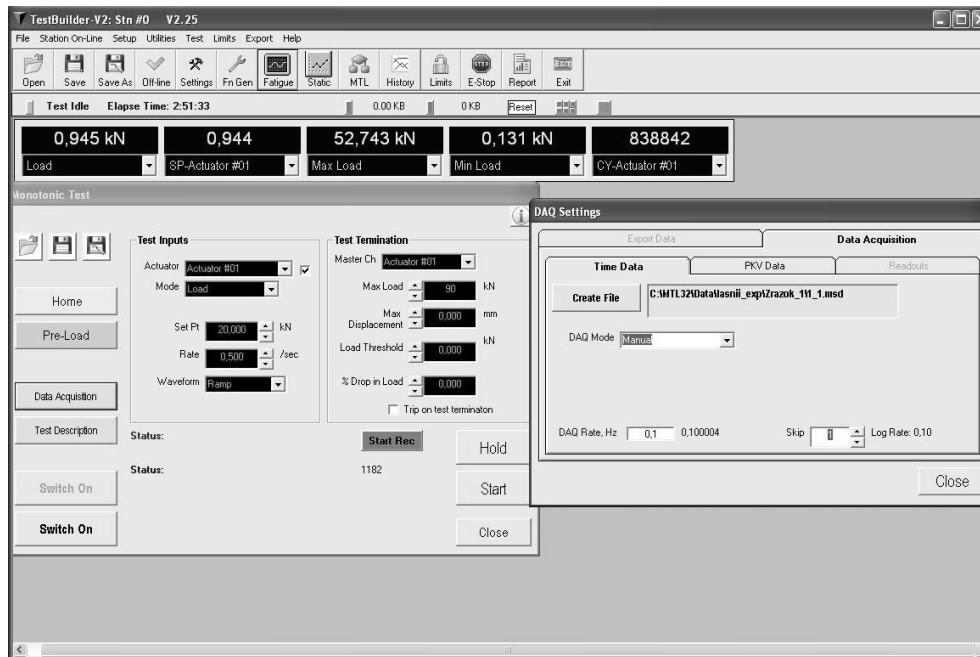


Рисунок 2. Інтерфейс програми записування вимірювальних даних на ПК

Figure 2. Program interface of data measurement recording on a PC

Для апробації методики випробувань досліджували сповільнене деформування за розтягу циліндричних зразків діаметром 4,0 мм і позацентрового розтягу компактних зразків товщиною 12 мм (рис. 3).

Досліджували матеріал «гарячого колектора», знятого після 178,5 тис. год. експлуатації пароперегрівника котла типу ТП-100. Колектор виготовлений зі сталі 12Х1МФ, хімічний склад якої подано у праці [6].

Зразки для випробування сповільненим деформуванням розтягом виготовляли із перфорованої ділянки колектора пароперегрівника [7].

В усіх випадках площина надрізу компактних зразків перпендикулярна до осі колекторної труби, що відповідає орієнтації L-R [8]. Попередньо на зразках

вирощували первинні втомні тріщини при коефіцієнті асиметрії циклу навантажування $R = K_{\min} / K_{\max} = 0,1$ та частоті навантажування 40 Гц згідно з рекомендаціями [8] (тут K_{\min}, K_{\max} – найменший і найбільший коефіцієнти інтенсивності напружень). Відносна довжина первинної тріщини становила $(0,45 \dots 0,55)b$.

Коефіцієнт інтенсивності напружень визначали за формулою [8]

$$K = \frac{P}{B\sqrt{W}} \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2} \left(0,886 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4 \right), \quad (1)$$

де P – зусилля; B – товщина зразка; W – ширина зразка; a – довжина тріщини; $\alpha = a/W$ – відносна довжина тріщини.

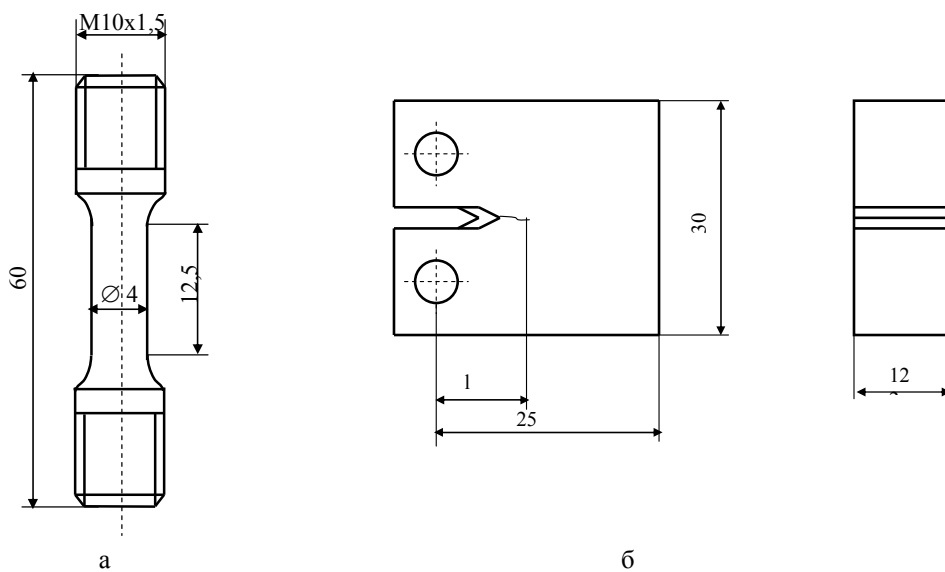


Рисунок 3. Зразки для визначення характеристик механічних властивостей: а) та корозійного розтріскування; б) за сповільненого деформування розтягом

Figure 3. Specimens for study of mechanical behavior: a) and stress corrosion cracking; b) at slow strain rate

Циліндричні зразки закріплювали в спеціальних затискачах, які шарнірно з'єднувалися відповідно із верхньою (нерухомою) і нижньою (рухомою) траверсами випробувальної машини, що запобігало виникненню напружень згину (рис. 4).

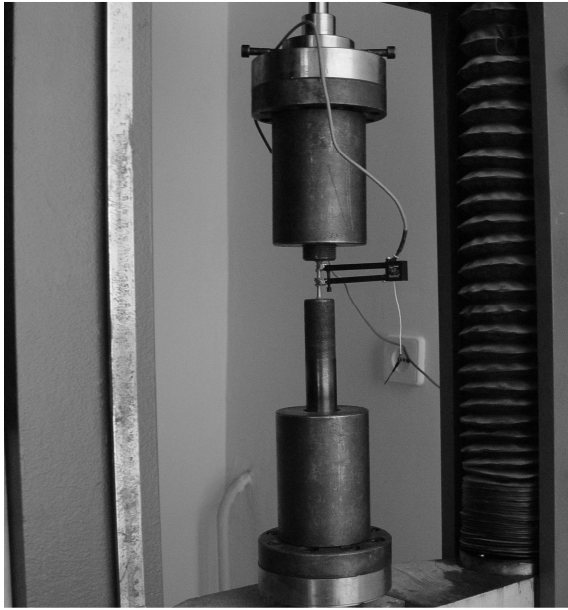


Рисунок 4. Фото кріплення циліндричного зразка із тензометром у затискачах випробувальної машини

Figure 4. Photo of cylindrical specimen fixing with strain gauge in test machine clips

спричинено вибиранням зазорів у кінематичній схемі навантажування, на правій ділянці ($t \geq 135000 \text{ s}^{-1}$) – появою пластичної деформації зразка.

Результати досліджень.

На рис. 5 представлено часові залежності пружно-пластичної деформації сталі 12Х1МФ за сповільненого одновісного розтягу при 20°C .

Швидкість переміщення траверси складала $8,58 \cdot 10^{-4} \text{ mm/min}$. Залежність швидкості деформації від часу (рис. 5а) отримали, апроксимуючи поліномом експериментальні дані. Швидкість деформації на пружній ділянці зразка складала

$d\varepsilon / dt = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. Відхилення від пропорційної залежності $\varepsilon - f(t)$ на початковому етапі деформування ($t \leq 20000 \text{ s}^{-1}$)

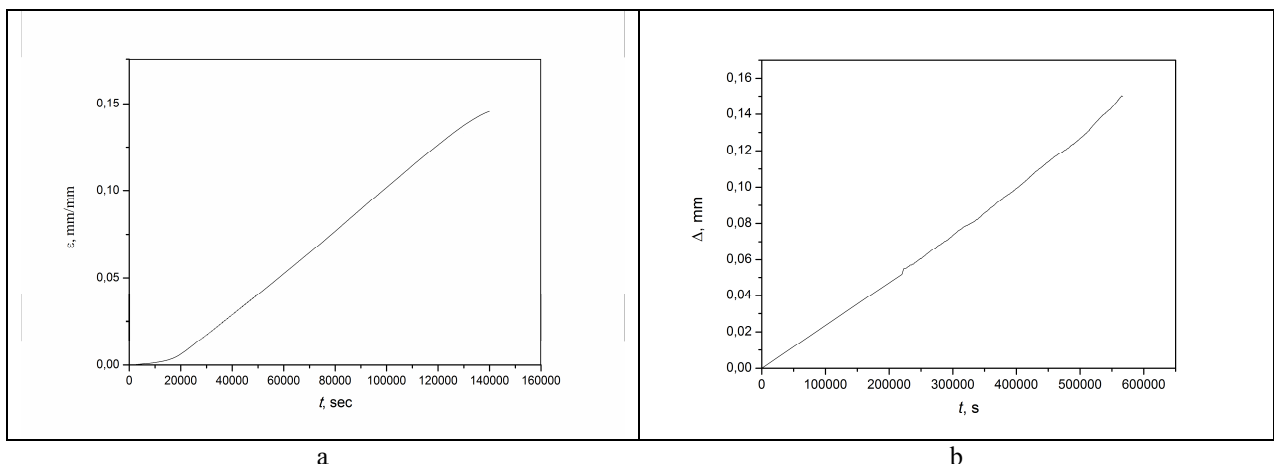


Рисунок 5. Залежності поздовжньої пружно-пластичної деформації циліндричного зразка: а) та переміщення берегів надрізу компактного зразка; б) зі сталі 12Х1МФ від часу

Figure 5. Dependences longitudinal elasto-plastic strain of cylindrical specimen: a) and opening compact specimen threshold notch displacement; b) on time from 12Cr1MoV steel

Зменшення швидкості пружно-пластичної деформації на правій ділянці залежності пов'язане з локалізацією пластичної деформації зразка – утворенням шийки.

Діаграму деформування й характеристики механічних властивостей сталі 12Х1МФ при 20°C за швидкості деформування $d\varepsilon / dt = 1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ представлено на рис. 6 і в таблиці.

Механічні властивості сталі 12Х1МФ за сповільненого деформування
 Mechanical behavior of 12Cr1MoV steel at slow strain rate

| Сталь | $d\varepsilon/dt$ | $\sigma_{0,2}$ | σ_B | ψ |
|--------|-------------------|----------------|------------|--------|
| | s^{-1} | МПа | | % |
| 12Х1МФ | 10^{-6} | 311 | 458 | 72,8 |

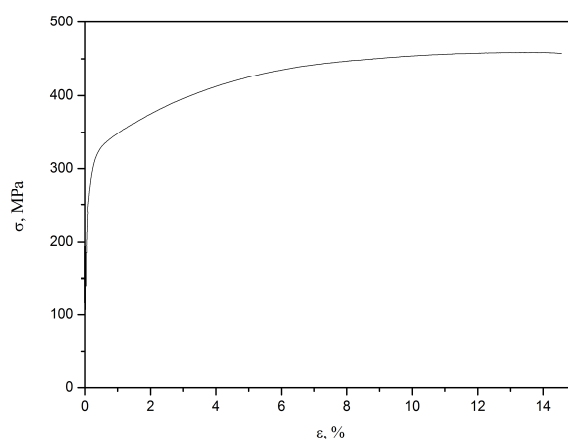


Рисунок 6. Діаграма деформування сталі 12Х1МФ за одновісного розтягу
 ($d\varepsilon/dt = 1 \cdot 10^{-6} s^{-1}$)

Figure 6. Stress strain diagram 12Cr1MoV steel at uniaxial tension
 ($d\varepsilon/dt = 1 \cdot 10^{-6} s^{-1}$)

На рис. 5b представлено залежність переміщення берегів надрізу компактного зразка Δ зі сталі 12Х1МФ від часу за сповільненого деформування. Швидкість розкриття берегів надрізу на пружній ділянці складала $d\Delta/dt \approx 0.9 \cdot \mu m/s$.

Висновки. На базі електромеханічної випробувальної машини типу FP 100 (Fritz Heckert) розроблено методику дослідження характеристик механічних властивостей і тріщиностійкості матеріалів за сповільненого деформування одновісним розтягом. Для записування вимірювальних величин (зусилля, деформація) на ПК під час випробувань використовували цифровий сервоконтролер марки BiSS 2370SS з програмним забезпеченням MTL32.

Методику апробовано за сповільненого деформування розтягом циліндричних зразків діаметром 4 мм та позацентровим розтягом компактних зразків із теплостійкої сталі 12Х1МФ. Побудовано діаграми деформування та часові залежності поздовжньої деформації гладких зразків і переміщення берегів надрізу компактних зразків із експлуатованої сталі.

Conclusions. On the base of the electro-mechanical type FP 100 (Fritz Heckert) testing machine the methodology to study the characteristic of mechanical behavior and crack resistance at slow strain rate by uniaxial tension was proposed. For the measured values (force, deformation) recording on PC during testing the digital type BiSS 2370SS servo controller and software MTL32 was used.

The methodology has been tested by slow strain rate of cylindrical tensile specimens with a diameter of 4 mm made of heat resistant steel 12Cr1MoV. The diagrams of deformation and time dependencies of strain and strain rate of operated steel were obtained.

Список використаної літератури

1. Карзов, Г.П. Физико-механическое моделирование процессов разрушения [Текст] / Г.П. Карзов, Б.З. Марголин, В.А. Швецова. – СПб.: Политехника, 1993. – 391 с.
2. Ford, F.P. The effects of oxygen-temperature combinations on the stress corrosion susceptibility of sensitized type 304 stainless steel in high purity water. / F.P. Ford, M.J. Povich // Corrosion. – 1979. – Vol. 35. – P. 569 – 574.
3. Agrawal, A.K. Stress Corrosion of Sensitized and Quench Annealed Type 304 Stainless Steels in High Purity Water. / A.K. Agrawal, G.A. Begley, R.W. Staehle // Corrosion. – 1978. – Vol. 78. – Paper No. 187.
4. Андрейків, О.Є. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах [Текст] / О.Є. Андрейків, О.В. Гембара. – Київ: Наукова думка, 2008. – 345 с.
5. Ясній, П. Автоматизований електромеханічний стенд для випробувань матеріалів в умовах втоми та втоми-повзучості [Текст] / П.В. Ясній, П.О. Марущак // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2003. – Т. 8, № 3. – С. 5 – 10.
6. Сталь теплоустойчивая. Технические условия: ГОСТ 20072–74. – Москва: Стандартинформ. – 1987. – 19 с.
7. Ясній, О. Вплив температури на циклічну тріщиностійкість сталі колектора пароперегрівника [Текст] / О. Ясній, В. Бревус, В. Немченко // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2012. – Т. 68, № 4. – С. 35 – 41.
8. Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials: ASTM E 399–90. In: Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia. – V. 03.01.
9. Матеріали металеві. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (EN 10002-1:2001, IDT): ДСТУ EN 10002-1:2006. – [Чинний від 01.07.2007]. – К.: Держспоживстандарт України, 2006. – II, 41 с. – (Національний стандарт України).

Отримано 16.01.2013