

УДК 539.4

**О. Гопкало, канд. техн. наук**

*Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України*

## **ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ МАЛОЦИКЛОВОМУ НАВАНТАЖЕННЮ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ**

**Резюме.** Наведено оригінальні методики випробувань на малоциклову втому циліндричних лабораторних зразків зі сталі 10ГН2МФА за контролю амплітуди деформації ( $R_\varepsilon=0$ ) при температурах 20°C та 270°C. Показано, що при кімнатній температурі метал проявляє властивості, які характерні для циклічно знеміцнених сталей. При температурі випробувань 270°C метал проявляє властивості, які характерні для циклічно зміцнених сталей. Зміна циклічних властивостей металу (від циклічно знеміцнених до циклічно зміцнених) призводить до збільшення у понад 2 рази циклічної довговічності внаслідок підвищення до 47% значень умовної границі текучості при циклічному зміцненні.

**Ключові слова:** малоциклова втома, циклічна довговічність, температура, напруження, деформація.

**O. Gopkalo**

## **DETERMINATION OF STRUCTURAL STEEL RESISTANCE TO LOW-CYCLE LOADING**

**Summary.** This paper presents the special procedures for low-cycle fatigue testing of cylindrical laboratory specimens of steel 10GN2MFA under strain amplitude control ( $R_\varepsilon=0$ ) at temperatures of 20°C and 270°C. It is shown that at room temperature the metal demonstrates the properties characteristic of cyclically hardened steels (an increase in the width of the elastic-plastic hysteresis loop and a decrease in the cyclic stress amplitudes). High values of the strain amplitude correspond to higher values of the cyclic stress amplitude and lower values of the cyclic yield stress. With an increase in the values of the strain amplitude, the intensity of the decrease in the cyclic stress amplitudes is lowered, followed by their further stabilization approximately within the yield stress limits. In this case, with decreasing values of the strain amplitude, an increase occurs in the cyclic yield stress values, which become stable after a certain number of loading cycles. At the test temperature of 270°C, the metal demonstrates the properties characteristic of cyclically hardened steels (a decrease in the width of the elastic-plastic hysteresis loop and an increase in the amplitudes of cyclic stresses). Lower values of the cyclic yield stress correspond to higher values of the strain amplitude, and the metal is cyclically hardened approximately up to the ultimate strength limits. As the strain amplitude values increase, a decrease in the hardening intensity occurs, and after a certain number of loading cycles, the values of the cyclic stress amplitude become stable. With decreasing values of the strain amplitude, the increase in the cyclic yield stress values occurs, together with a simultaneous reduction in the width of the elasto-plastic hysteresis loop (the amount of plastic deformation per cycle), and after a certain number of loading cycles, the amount of plastic deformation per cycle is less than 0,2%, which, later on, will make it impossible to determine the cyclic yield stress values. An increase in the test temperature from 20°C to 270°C gives rise to a change in the cyclic properties of the metal, which results in the increase in the cyclic life by more than twice due to the 4% increase in the yield stress values determined in static tension, and due to the cyclic hardening which causes the increase by up to 47% in the values of the cyclic yield stress determined from low-cycle tests. In this case, the cyclic hardening of the steel at a temperature of 270°C gives rise to the approximate 30% increase in the amplitude of cyclic stresses relative to similar values obtained at room temperature.

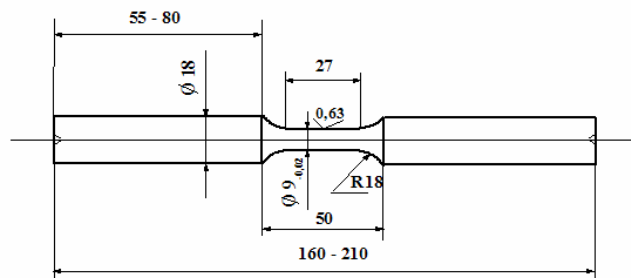
**Key words:** low-cycle fatigue, cyclic life, temperature, stress, strain.

**Вступ.** Експертне оцінювання технічного стану відповідальних елементів конструкцій енергетичного обладнання після тривалої експлуатації проводять за певними методиками, які містять визначення характеристик циклічної міцності

матеріалу. Так жорсткі температурно-силові стаціонарні (за базових режимів експлуатації) та змінні (пуски та зупинки обладнання) умови експлуатації гарячого колектора парогенератора (тиск до 24 МПа, температура до 570°C) та тривалий вплив на напружений метал агресивного наводнювального середовища, яким є пара високих параметрів, сприяють деградації його структури [1,2] і втраті механічних властивостей, які гарантували його роботоздатність на початку експлуатації [3,4].

**Мета роботи** полягає в експериментальному визначенні характеристик опору малоцикловому навантаженню зразків зі сталі 10ГН2МФА (вирізаних з ділянки гарячого колектора парогенератора з експлуатаційним напрацюванням) в атмосферних умовах лабораторії при температурах 20° та 270°C. Розроблення відповідних методик експериментальних досліджень дозволить визначити особливості впливу температури на закономірності циклічного пружно-пластичного деформування матеріалу гарячого колектора парогенератора з експлуатаційним напрацюванням при тривалому циклічному навантаженні. Отримані експериментальні дані можуть бути корисними для удосконалення методик прогнозування залишкового ресурсу відповідальних елементів конструкцій з тривалим терміном експлуатації, які працюють у складних умовах термомеханічного навантаження.

**Методики випробувань зразків на малоциклову втому.** Для випробувань на малоциклову втому використовували суцільні циліндричні зразки (рис.1). Заготовки для зразків вирізували із матеріалу ділянки гарячого колектора парогенератора.



**Рисунок 1.** Креслення зразка для випробувань на малоциклову втому

**Figure 1.** Drawing of the low-cycle fatigue test specimen

Випробування на малоциклову втому проводили на модернізованій стандартній універсальній електрогідравлічній машині 3201УЕ-20 виробництва Армавірського заводу випробувальних машин (Росія).

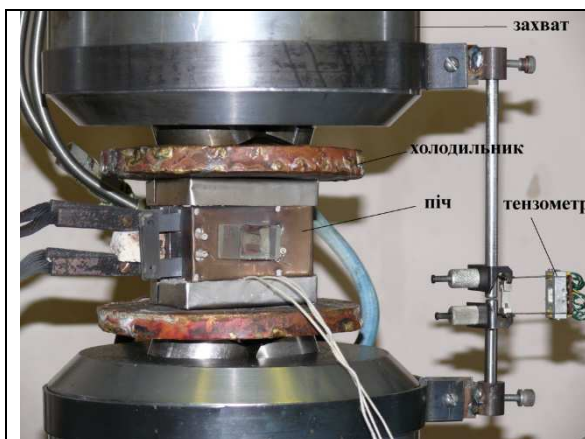
Модернізація випробувальної машини 3201УЭ-20 полягала у заміні цифроаналогових блоків керування навантаженням і відображення даних (2 шафи з електронікою) та сервоклапана виробництва Армавірського заводу випробувальних машин (Росія) на сучасний контролер фірми *BISS* з комп'ютером, відповідним програмним забезпеченням та заміні сервоклапана виробництва Армавірського заводу на сервоклапан фірми *BOSCH*.

Машина 3201УЕ-20 входить до складу обладнання Центру механічних випробувань та сертифікації матеріалів і елементів конструкцій Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. Центр акредитований у системі сертифікації УкрСЕПРО відповідно до вимог ДСТУ ISO/IEC 17025:2006.

Випробування на малоциклову втому проводили за жорсткого режиму навантаження (за контролювання амплітуди повної деформації) при кімнатній та 270°C температурах на повітрі.

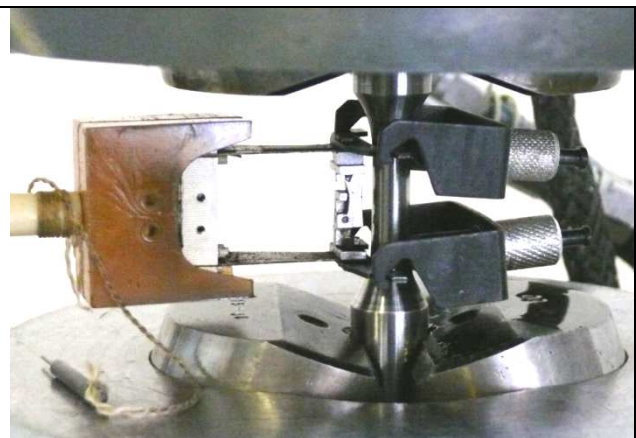
Захватні частини лабораторних зразків закріплювали гідравлічними затискувачами. В момент закріплення вільного кінця зразка гідрозатискувачами осьові зусилля не перевищували 1кН. Співвісність прикладених деформацій забезпечена конструктивно при монтажі на заводі силової рами. Додаткові напруження від згинних моментів у момент затискування зразка не перевищували 1% від максимальних осьових.

При випробуваннях на малоциклову втому при температурі 270°C нагрівання зразків здійснювали за допомогою малогабаритної печі електроопору (рис.2), на стрічкові нагрівачі якої подавали електричний струм напругою до 10 В від трансформатора. Для візуального спостереження за поверхнею робочої частини зразка піч має віконце з кварцового скла. Керування нагрівом здійснювали за допомогою спеціального блока нагріву [5], в якому порівнюються задані та виміряні за допомогою термопари, привареної до зразка, значення температури. В результаті такого порівняння виробляється сигнал керування електричним струмом первинної обмотки трансформатора для зменшення розбіжності між ними. Для запобігання нагріву затискувачів зразків випробувальної машини на верхню та нижню кришку печі установлені мідні холодильники з водяним охолодженням. Різниця в максимальних значеннях температури посередині робочої частини зразка та його галтелях складає приблизно 20°C. У процесі випробувань відхилення температури не перевищували  $\pm 3^\circ\text{C}$ .



**Рисунок 2.** Загальний вигляд печі для нагрівання зразка та пристроїв для вимірювання відносних переміщень захватів при підвищених температурах за допомогою тензометра

**Figure 2.** General view of the specimen heating furnace and devices for the strain gage measurements of relative grip displacements at elevated temperatures



**Рисунок 3.** Загальний вигляд зразка з тензометром у захватах випробувальної машини

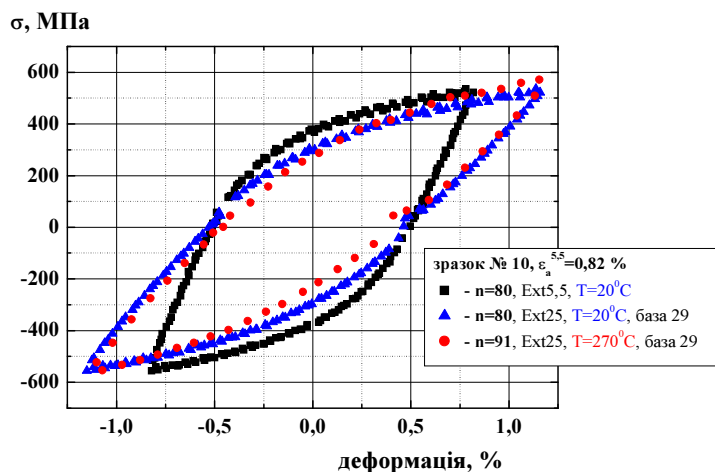
**Figure 3.** General view of the specimen with a strain gage in the testing machine grips

Вимірювання деформацій зразка при випробуваннях при кімнатній температурі здійснювали за допомогою тензометра з базою вимірювання 25 мм, який встановлювали на робочу частину зразка (рис.3).

Для визначення деформацій робочої частини зразка при підвищених температурах була проведена спеціальна доробка методики, яка полягає у тому, що до монтажу печі для нагрівання зразка на спеціальні виносні елементи встановлювали тензометр з базою вимірювання 25 мм, а на робочу частину зразка – додатковий тензометр з базою вимірювання 5,5 мм. Визначення заданих деформацій робочої частини зразка при циклічному деформуванні здійснювали шляхом підбору при

кімнатній температурі відносного переміщення захватів за допомогою тензометра з базою вимірювання 25 мм, встановленого на спеціальні виноси елементи, які відповідали заданим деформаціям робочої частини зразка, виміряних тензометром з базою вимірювання 5,5 мм на робочій частині зразка. При цьому закріплення зразка в захватах випробувальної машини здійснювали на відстані 52,5 мм від середини робочої частини зразка, що відповідає габаритам для встановлення печі разом з холодильниками. Далі додатковий тензометр з базою вимірювання 5,5 мм знімали з робочої частини зразка, прикріплювали хромель-алюмелеву термопару і монтували піч для нагріву зразка. Потім протягом 40–45 хв проводили поступове підвищення температури зразка до температури 270°C. При нагріванні зразка в печі сигнали від термопар надходили у блок керування нагрівом зразка та на цифровий вольтметр В7–27/1, де відображались значення температури посередині робочої частини зразка.

При циклічному деформуванні при температурі 270°C за допомогою тензометра з базою вимірювання 25 мм, встановленого на спеціальні виноси, підтримували загальну амплітуду деформації, визначену при кімнатній температурі за допомогою тензометра з базою вимірювання 5,5 мм. На рис.4 наведені діаграми циклічного деформування зразка при температурі 20°C, де деформації вимірювали за допомогою тензометра з базою вимірювання 5,5 мм, встановленого на робочій частині зразка. Там же наведена діаграма циклічного деформування зразка при температурі 270°C, де деформації вимірювали за допомогою тензометра з базою вимірювання 25 мм, встановленого на спеціальних виносках. Виходячи з того, що при кімнатній температурі пластична деформація за цикл (ширина петлі пружно-пластичного гістерезису) визначена за допомогою тензометра з базою вимірювання 5,5 мм, встановленого на робочій частині зразка, повинна відповідати деформації, визначеній за допомогою тензометра з базою вимірювання 25 мм, встановленого на спеціальні виноси, було проведено визначення віртуальної довжини робочої частини зразка, яка у даному випадку складала 29 мм.



**Рисунок 4.** Діаграми циклічного деформування зразка №10 при температурах 20°C та 270°C

**Figure 4.** Cyclic stress-strain diagrams for specimen №10 at temperatures of 20°C and 270°C

Випробування на малоциклову втому проводили за симетричного циклу деформації ( $R_\epsilon = -1$ ) осьового розтягу-стиску при трикутному режимі деформування з контролем амплітуди загальної деформації (жорсткий режим циклічного навантаження). Циклічне навантаження зразків здійснювали згідно з вимогами стандартів ISO 12106 – 2003, ASTM E 606 – 80, ГОСТ 25-502-79 і ГОСТ 25.505-85 та

можливостями випробувальної машини 3201UE20 з постійною швидкістю деформування 0,1%/с. (6%/хв.).

Обґрунтування вибору вищезазначеного режиму навантаження пов'язано зі впливом швидкості деформування на характер діаграм циклічного деформування [6] та циклічну довговічність при високих значеннях амплітуд циклічної деформації (діапазон малоциклової втоми) й технічних можливостей випробувальної машини.

В даній роботі за число циклів до руйнування зразків прийнято число циклів до появи макротріщини втоми, яке відповідає падінню напружень розтягу в циклі на 50% відносно до їх усталених значень згідно з ГОСТом 25.505-85.

Числові значення зусиль та деформацій від відповідних датчиків в режимі *On Line* відтворювались у вікнах монітора та у вигляді діаграм деформування. Паралельно дані випробувань по кожному циклу навантаження автоматично заносилися в базу даних комп'ютера у вигляді таблиць *Excel*.

Дані з таблиць *Excel* вводили у графічний редактор *Origin*, де будували діаграми циклічного деформування (див. рис.4), за параметрами яких встановлювали основні закономірності зміни значень максимальних та мінімальних напружень, номінальні значення циклічної умовної границі текучості у півциклах розтягу, стиску та пластичних деформацій у кожному циклі й протягом усього терміну випробувань.

Результати випробувань лабораторних зразків на малоциклову втому. В таблиці наведено дані випробувань лабораторних зразків зі сталі 10ГН2МФА на малоциклову втому при температурах випробувань 20°C та 270°C, а на рис.5 – типовий загальний вигляд зруйнованого при температурі випробувань 270°C зразка (№9). У таблицях  $\varepsilon_a$  – амплітуда деформації за цикл;  $\varepsilon_m$  – пластична деформація за цикл (ширина петлі пружно-пластичного гістерезису);  $\sigma_a$  – амплітуда напружень;  $N_p$  – число циклів навантаження до руйнування за критерієм падіння на 50% напружень розтягу відносно усталених значень згідно з ГОСТом 25.505-85 та поділом зразка на дві частини.

Таблиця

Дані випробувань лабораторних зразків на малоциклову втому

№ зразка	$\varepsilon_a$ , %	$\varepsilon_m$ , %	$\sigma_a$ , МПа	$N_p$ , цикл (при 50% $\sigma_{max}$ )	$N_p$ , цикл (руйнування зразка на 2 частини)
$T=20^{\circ}C$					
1	0,57	0,61	493	1930	1958
2	0,39	0,37	443	5670	5777
3	0,5	0,52	451	3550	3608
4	0,7	0,89	501	1568	1591
5	0,35	0,28	431	11940	12055
$T=270^{\circ}C$					
6	6	0,37	607		602 випадково зруйновано
7	0,6	0,36	611	3697	3708
8	0,7	0,53	630	2104	2111

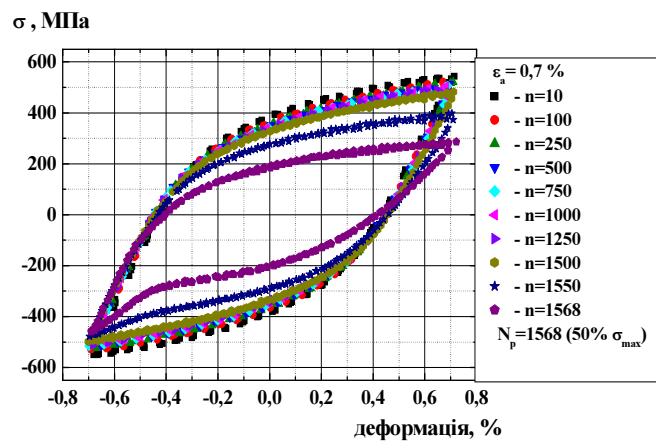
9	0,5	0,18	600	9910	9916
10	0,82	0,74	660	1778	1783



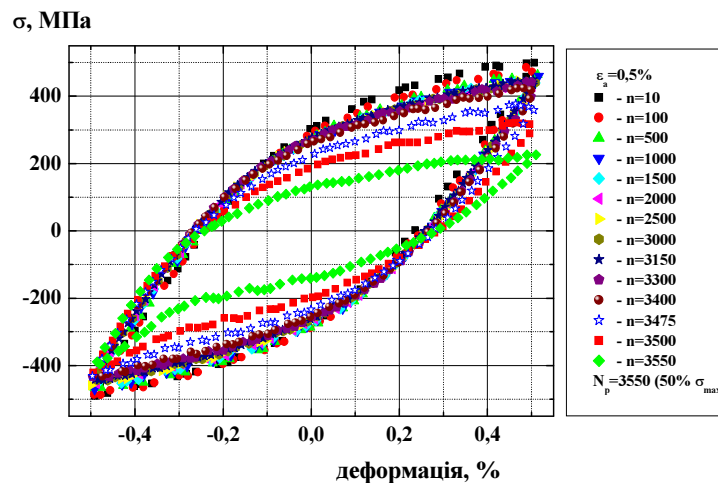
Рисунок 5. Типовий загальний вигляд зруйнованого зразка (№9) після випробувань на малоциклову втому при  $T=270^{\circ}\text{C}$

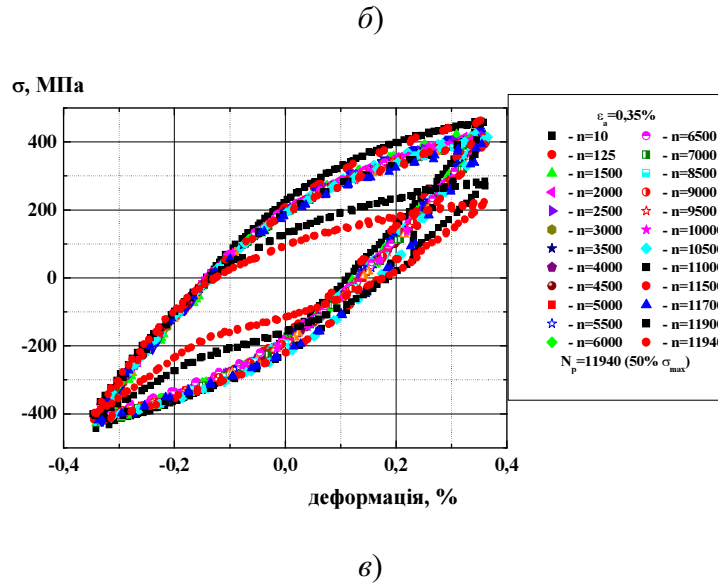
Figure 5. Typical general view of fractured specimen (№9) after low-cycle fatigue testing at  $T=270^{\circ}\text{C}$

На рис.6 зображено побудовані (за даними таблиць *Excel*) характерні діаграми циклічного пружно-пластичного деформування зразків.



a)





**Рисунок 6.** Діаграми циклічного деформування зразків:

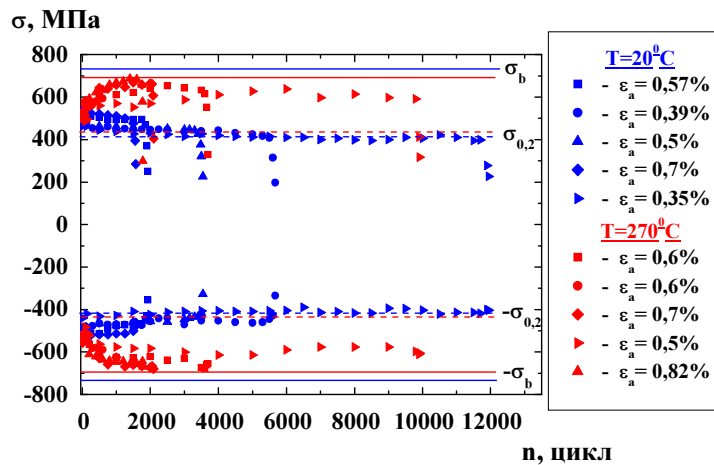
а)  $\epsilon_a = 0,7\%$ ; б)  $\epsilon_a = 0,5\%$ ; в)  $\epsilon_a = 0,35\%$

**Figure 6.** Cyclic stress-strain diagrams for specimens:

а)  $\epsilon_a = 0,7\%$ ; б)  $\epsilon_a = 0,5\%$ ; в)  $\epsilon_a = 0,35\%$

Зменшення амплітуди напружень розтягу після напрацювання певного числа циклів навантаження пов'язано з появою та розвитком тріщини втоми.

На рис.7 наведено порівняння кінетики максимальних та мінімальних значень напружень  $\sigma$  при температурах випробувань  $20^\circ\text{C}$  та  $270^\circ\text{C}$ .



**Рисунок 7.** Кінетика максимальних та мінімальних напружень при циклічному деформуванні зразків при температурах  $20^\circ\text{C}$  та  $270^\circ\text{C}$

**Figure 7.** Kinetics of the maximum and minimum stress values under cyclic deformation of specimens at temperatures of  $20^\circ\text{C}$  and  $270^\circ\text{C}$

Згідно з наведеними на рис.7 даними, при кімнатній температурі метал проявляє властивості, характерні для циклічно знеміцнених сталей: зниження амплітуд циклічних напружень та збільшення ширини петлі пружно-пластичного гістерезису (рис.8). Ступінь знеміцнення пропорційний амплітуді деформації. Більшим значенням амплітуди деформації відповідають вищі значення амплітуди циклічних напружень.

При зменшенні значень амплітуди деформації інтенсивність зменшення амплітуд циклічних напружень знижується з подальшою їх стабілізацією приблизно в межах умовної границі текучості.

При температурі випробувань 270°C метал проявляє властивості, характерні для циклічно зміцнених сталей (підвищення амплітуд циклічних напружень та зменшення ширини петлі пружно-пластичного гістерезису). Інтенсивність зміцнення пропорційна амплітуді деформації. Більшим амплітудам деформації відповідають вищі значення амплітуди циклічних напружень і метал циклічно зміцнюється приблизно до меж границі міцності. При зниженні амплітуди деформації відбувається зниження інтенсивності зміцнення і значення амплітуди циклічних напружень після певного числа циклів навантаження стабілізуються.

На рис.8 наведено порівняння кінетики пластичної деформації за цикл  $\varepsilon_{in}$  при температурах випробувань 20°C та 270°C, яке підтверджує зміну циклічних властивостей металу від циклічно знеміцненого при T=20°C (підвищення ширини петлі пружно-пластичного гістерезису  $\varepsilon_{in}$ ) до циклічно зміцненого при T=270°C (зменшення ширини петлі пружно-пластичного гістерезису  $\varepsilon_{in}$ ).

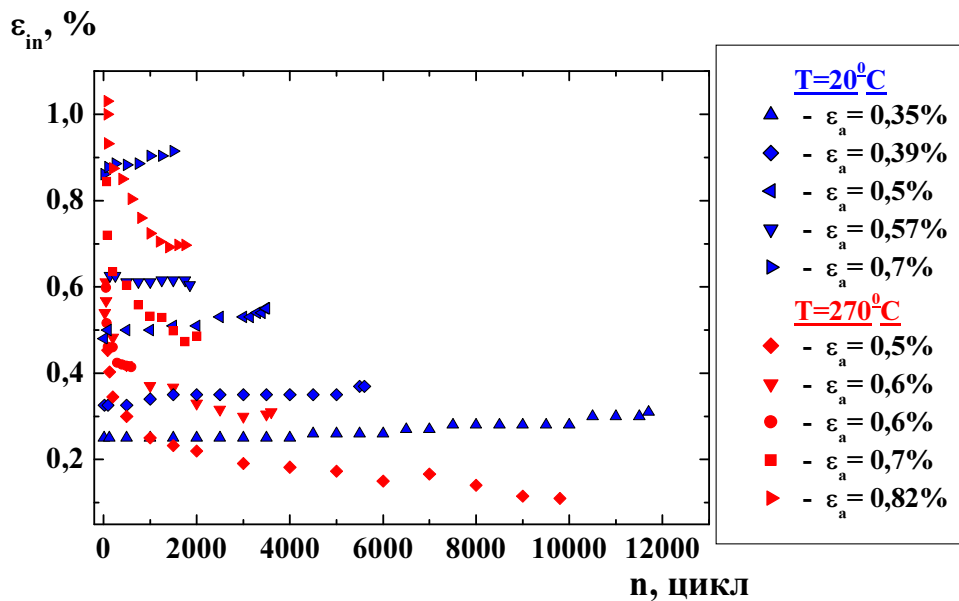


Рисунок 8. Кінетика пластичної деформації  $\varepsilon_{in}$  (ширини петлі пружно-пластичного гістерезису) за цикл при температурах 20°C та 270°C

Figure 8. Kinetics of the plastic deformation  $\varepsilon_{in}$  (the width of the elastic-plastic hysteresis loop) per cycle at temperatures of 20°C and 270°C

На рис.9 наведено порівняння кінетики циклічної умовної границі текучості  $\sigma_{0,2}$  при температурах випробувань 20°C та 270°C.



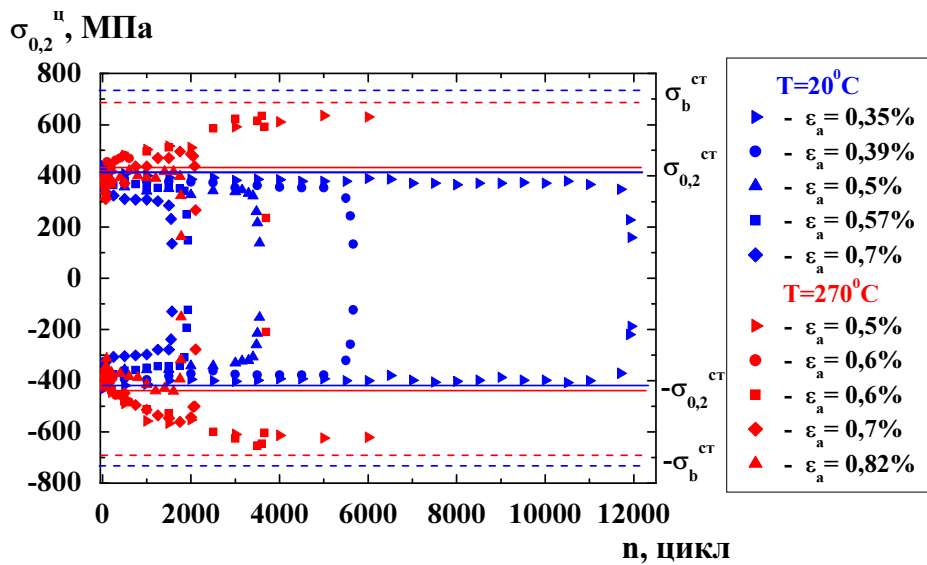


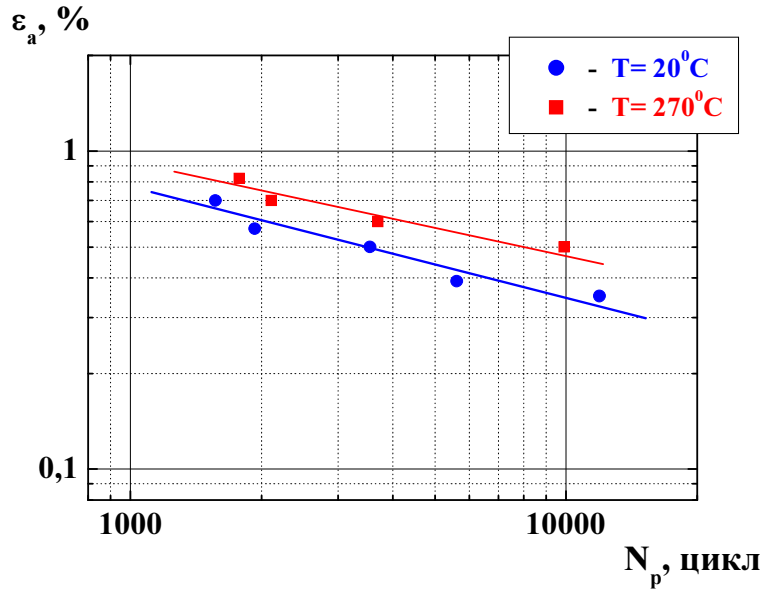
Рисунок 9. Кінетика циклічної умовної границі текучості  $\sigma_{0,2}$  при циклічному деформуванні зразків при температурах 20°C та 270°C

Figure 9. Kinetics of the cyclic yield stress  $\sigma_{0,2}$  under cyclic deformation of specimens at temperatures of 20°C and 270°C

При циклічному деформуванні за кімнатної температури відбувається зниження значень циклічної умовної границі текучості, яке залежить від амплітуди деформації. Більшим амплітудам деформації відповідає вища інтенсивність зменшення і нижчі значення циклічної умовної границі текучості. Зі зменшенням амплітуди деформації відбувається підвищення значень циклічної умовної границі текучості, які після певного числа циклів навантаження стабілізуються приблизно на рівні значень умовної границі текучості, визначеної при статичному розтягуванні.

При циклічному деформуванні за температури випробувань 270°C відбувається підвищення значень циклічної умовної границі текучості, яка залежить від амплітуди деформації. Більшим амплітудам деформації відповідають нижчі значення циклічної умовної границі текучості. При зниженні амплітуди деформації відбувається підвищення значень циклічної умовної границі текучості при одночасному зменшенні величини пластичної деформації за цикл  $\varepsilon_m$  (див. рис.9), яка після певного числа циклів навантаження має значення, менші 0,2%, що унеможливує визначення циклічної умовної границі текучості. У даному випадку для зразка №9 після напрацювання 6000 циклів величина пластичної деформації за цикл має значення, менші від 0,2%, тобто матеріал став деформуватись у пружній області.

На рис.10 наведено порівняння кривих малоциклової втоми при температурах випробувань 20°C та 270°C у термінах  $\varepsilon_a - N_p$ .

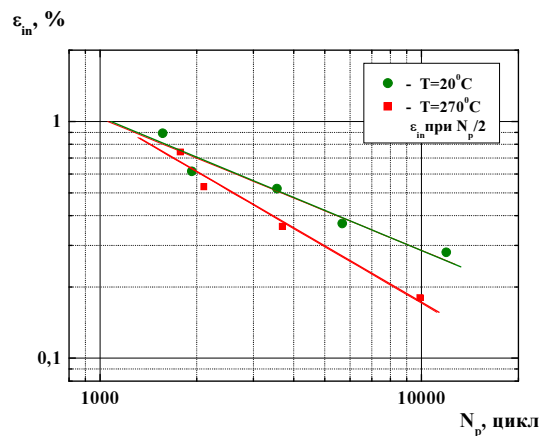


**Рисунок 10.** Залежність циклічної довговічності зразків від амплітуди пружно-пластичної деформації за цикл при температурах випробувань 20°C та 270°C

**Figure 10.** Dependence of the cyclic life of specimens on the amplitude of the elastoplastic deformation per cycle at test temperatures of 20°C and 270°C

При випробуваннях на малоциклову втому за температури 270°C підвищення значень циклічної умовної границі текучості на 47% та умовної границі текучості, визначеної при статичному розтягуванні, на 4% призводить до збільшення у понад 2 рази циклічної довговічності відносно кімнатної температури.

На рис.11 наведено порівняння кривих малоциклової втоми при температурах випробувань 20°C та 270°C у термінах  $\epsilon_{in} - N_p$ .

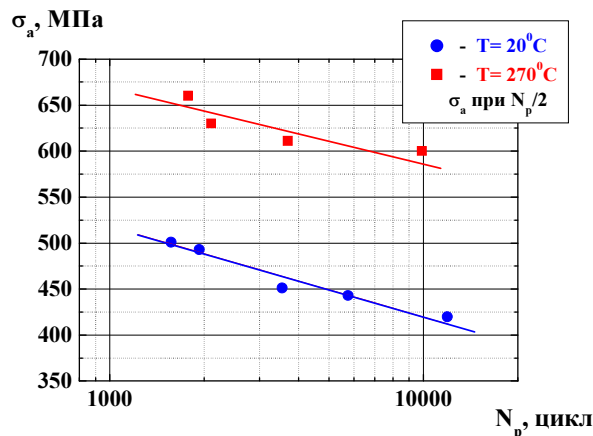


**Рисунок 11.** Залежність циклічної довговічності зразків від величини пластичної деформації за цикл при температурах 20°C та 270°C, де значення пружно-пластичної пластичної деформації за цикл  $\epsilon_{in}$  визначали при  $N_p/2$

**Figure 11.** Dependence of the specimen cyclic life on the amount of the plastic deformation per cycle at the temperatures of 20°C and 270°C, with the values of the elastoplastic/plastic deformation per cycle  $\epsilon_{in}$  being determined at  $N_p/2$

Згідно з даними, наведеними на рис.11, у діапазоні малих довговічностей підвищення температури випробувань з 20°C до 270°C практично мало впливає на значення пластичної деформації за цикл. У діапазоні великих довговічностей, завдяки циклічному зміцненню, при температурі випробувань 270°C руйнування відбувається при нижчих значеннях пластичної деформації за цикл, ніж при кімнатній температурі.

Розглядаючи залежність циклічної довговічності зразків від амплітуди циклічних напружень  $\sigma_a - N_p$  (рис.12), слід зазначити, що в силу циклічного зміцнення сталі за температури випробувань 270°C при однакових амплітудах деформації за температури 20°C та 270°C (див. табл.) підвищення температури випробувань викликає підвищення амплітуди циклічних напружень приблизно на 30% .



**Рисунок 12.** Залежність циклічної довговічності зразків від амплітуди напружень при температурах 20°C та 270°C, де значення амплітуди циклічних напружень  $\sigma_a$  визначали при  $N_p/2$

**Figure 12.** Dependence of the cyclic life of specimens on the stress amplitude at temperatures of 20°C and 270°C, with the values of the amplitude of cyclic stresses  $\sigma_a$  being determined at  $N_p/2$

Таким чином, отримані експериментальні дані випробувань зразків зі сталі 10ГН2МФА в атмосферних умовах лабораторії при температурах 20° та 270°C показують, що зміна циклічних властивостей та циклічне зміцнення при температурі 270°C призводить до підвищення циклічної довговічності, що знижує ризики руйнування. Експлуатацію відповідальних елементів конструкцій зі сталей з подібними механічними властивостями, які працюють в складних умовах термомеханічного навантаження бажано в міру можливості починати з температурного навантаження, а потім – механічного.

**Висновки.** Розроблено оригінальні методики випробувань на малоцилову втому лабораторних зразків при температурах 20°C та 270°C. Підвищення температури випробувань призводить до зміни циклічних властивостей матеріалу від циклічно знеміцненого (при T=20°C) до циклічно зміцненого (при T=270°C). При циклічному деформуванні при однакових амплітудах деформації за температур 20°C та 270°C підвищення температури випробувань викликає підвищення амплітуди циклічних напружень приблизно на 30% в силу циклічного зміцнення сталі при температурі 270°C та вищим значенням умовної границі текучості при цій температурі. Підвищення температури випробувань з 20°C до 270°C призводить до збільшення у понад 2 рази циклічної довговічності внаслідок циклічного зміцнення сталі при T=270°C, яке призводить до підвищення до 47% значень циклічної умовної границі текучості. Експериментально встановлено закономірності суттєво змінювати циклічні властивості сталі при підвищенні температури, які впливають на опір малоциклового навантаженню та відповідно на розвиток тріщин втоми, дозволять удосконалити

методики прогнозування залишкового ресурсу відповідальних елементів конструкцій, які працюють у складних умовах термомеханічного навантаження.

**Conclusions.** The special procedures have been developed for low-cycle testing of laboratory specimens at temperatures of 20°C and 270°C. The increase in the test temperature results in the change in the cyclic properties of the material from cyclic softening (at T=20°C) to cyclic hardening (at T=270°C). Under cyclic deformation, an increase in the test temperature gives rise to the increase in the amplitude of the cyclic stress by approximately 30% (due to the cyclic hardening of the steel at the test temperature of 270°C) and higher values of the yield stress at this temperature. An increase in the test temperature from 20°C to 270°C results in the increase in the cyclic life by more than twice due to the cyclic hardening of the steel at T=270°, which leads to the increase in the cyclic yield stress values by up to 47%. The obtained experimental data on the change in the ability of the steel to resist the low-cycle loading with increasing temperature can be useful for the improvement of the procedures for predicting the residual life of the critical elements of structures operating under complex conditions of thermomechanical loading.

#### **Список використаної літератури**

1. Кречковська, Г.В. Структурні зміни в експлуатованій на головному парогоні ТЕС сталі 15X1M1Ф, пов'язані з зупинками технологічного процесу [Текст] / Г.В. Кречковська // *Металлофізика и новейшие технологии.* – Т. 30. – 2008. – С.701–711.
2. Журавель, І.М. Вимірювання усередненого діаметру зерен металу з використання фрактальної розмірності [Текст] / І.М. Журавель, Л.М. Свірська // *Фіз(хім механіка матеріалів.* – 2010. – №3. – С. 126–128.
3. Кількісний аналіз структурних змін у сталі внаслідок високотемпературної витримки у водні [Текст] / О.З. Студент, Б.П. Русин, Б.В. Кисіль, М.І. Кобаляр, Т.П. Стахів, А.Д. Марков // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2003. – №1. – С.22–28.
4. Оцінювання впливу зупинок технологічного процесу на зміну технічного стану металу головних парогонів ТЕС [Текст] / Г.М. Никифорчин, О.З. Студент, Г.В. Кречковська, А.Д. Марков // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2010. – №2. – С.42–54.
5. Гопкало, А.П. Устройство для обеспечения испытаний материалов при совместном действии механических нагрузок и циклического нагрева на стандартной малоцикловой испытательной машине [Текст] / А.П. Гопкало, Н.Н. Теслюк // *Пробл. прочности.* – 2001. – №3. – С.123–127.
6. Fischmeister, H.F. Life time prediction models [Text] / H.F. Fischmeister, R. Danzer, B. Buchmayr // *Fat. Fract. Eng. Mat. Struct.* 8 (1986), 495–549.

*Отримано 01.04.2014*