

^а Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

^б Науково-дослідний і конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості ім. Я. Ю. Осади, Дніпропетровськ, Україна

^в Національний авіаційний університет, Київ, Україна

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА МЕХАНІЧНІ ТА ТЕПЛОФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛІ 10X12Г14СН4ЮМ

Наведено результати впливу температури на модуль пружності, характеристики статичної міцності, коефіцієнти лінійного розширення та теплопровідності сталі. З підвищенням температур від 20 до 600°C характеристики пружності та міцності зменшуються майже у два рази. У робочому діапазоні температур 500...600°C різкого зменшення характеристик не спостерігається.

Ключові слова: сталь, статичне деформування, лінійне розширення, теплопровідність, температура.

Вступ. Жароміцна малонікелева хромомарганцева сталь підвищеної корозійної стійкості 10X12Г14СН4ЮМ (ЕП838У) призначена для виготовлення труб пароперегрівачів котлоагрегатів до потужних енергоблоків, що працюють на вітчизняному сірчистому вугіллі. Вона має замінити хромонікелеву сталь 12X18Н12Т, яка в продуктах згоряння сірчистого палива потерпає від високотемпературної сульфідної корозії через взаємодію сірки палива з нікелем металу труби. Ця економічно легована нікелем і хромом сталь також може бути альтернативою застосування сталі 08X18Н10Т для басейнів витримки відпрацьованого ядерного палива та контуру багатократної примусової циркуляції РБМК. Можливості використання сталі як конструкційної пов'язано з надійними даними стосовно її механічних та теплофізичних характеристик, у першу чергу характеристик статичної міцності. З цією метою розроблена та створена методика одночасного визначення механічних та теплофізичних характеристик матеріалу в процесі термомеханічного навантаження одного зразка. Зразок послідовно навантажувалася механічними та термічними зусиллями, при цьому безперервно реєструвалася відповідна інформація стосовно його механічного та теплового станів, а саме значення зусиль, переміщень, деформацій, температури. За одну секунду відбувалось близько десяти вимірів.

Методика і результати дослідження. Методика адаптована до технічних можливостей сервогідролічної розривної машини моделі 810 з силовою рамою моделі 318.10В (Material Test Sistem), що виготовлена фірмою MTS (США). Піч електричного опору моделі 653.04 з термоконтролером 409.83 дозволяла випробувати зразки від кімнатної температури до температури 1400°C. Обладнання мало можливість

незалежного керованого силового та термічного навантаження зразка. Середня похибка виміру реєстрованого параметра дорівнювала $\approx 0,5\%$. Формування сигналу навантаження, накопичення результатів вимірювань та моніторинг зворотного зв'язку здійснювались цифровим контролером Test Star Ps. Для точного вимірювання деформацій використовувались високотемпературні екстензометри 632.65 F-03 і 632.53 F-11. Керування випробуваннями, накопичення результатів дослідів здійснювалось з допомогою комп'ютера Pentium 4 з програмним забезпеченням прикладних програмних пакетів Multi Purpose Test Ware (MPT) і Test Work 4.

Дослідження передбачало дві програми випробувань, які забезпечували отримання об'єктивної інформації про властивості матеріалу, що потрібно при розрахунках термонапруженого та граничного стану елементів енергетичного обладнання.

Перша програма. Ізотермічні умови. Зразки (ГОСТ 1497-89) зі швидкістю $v = 0,2$ мм/сек за кімнатної температури послідовно навантажували до рівнів напружень пружного та плинного деформування, а потім повністю розвантажувались (рис. 1). Навантаження – розвантаження здійснювали як на ділянці початку пластичного деформування, так і на кінцевому етапі деформування, при втраті його стійкості. Результати наведено в координатах: умовне напруження – деформація та дійсне напруження – деформація. Умовні напруження визначались з урахуванням початкового розміру поперечного перетину зразка, дійсні напруження – з урахуванням зміни розмірів поперечного перетину при пластичному деформуванні, а саме постійності його об'єму. Залежності напруження (σ) – деформація (ε) статистично оброблялись у вигляді поліномів різного ступеня.

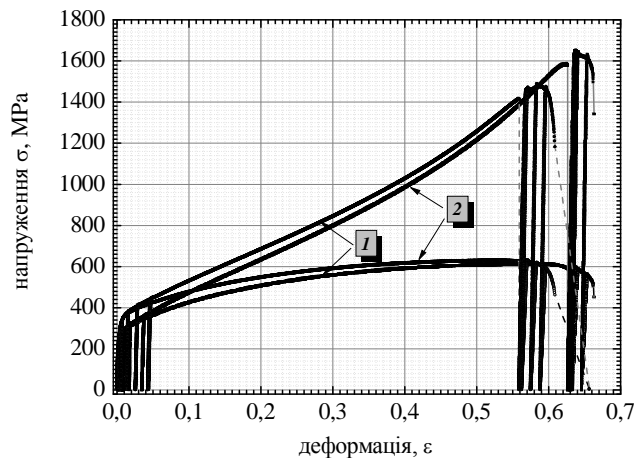


Рис. 1. Діаграми статичного деформування зразків при кімнатній температурі: темні лінії – умовні напруження, світлі лінії – дійсні.

Після пружного деформування здійснювали послідовне пластичне деформування зразків до значень деформації $\varepsilon_{\text{пласт}} = 0,005$, $\varepsilon_{\text{пласт}} = 0,01$, $\varepsilon_{\text{пласт}} = 0,02$ і у кожному випадку з подальшим повним розвантаженням зразка. Визначалась межа текучості, $\sigma_{0,2} = 225$ МПа. Після навантаження до $\varepsilon_{\text{пласт}} =$

0,035 зразок доводили до повної його руйнації, при цьому на ділянці втрати стійкості деформування здійснювали декілька навантажень – розвантажень (рис. 1 і 2). Визначалась умовна межа міцності, $\sigma_b = 610$ МПа.

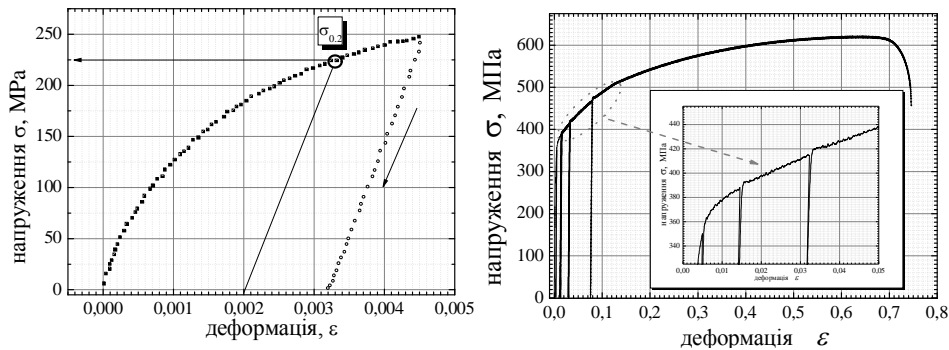


Рис. 2. Діаграми деформування зразка до різних рівнів пружно-пластичної деформації.

Аналіз результатів дозволив встановити дві особливості деформування сталі. Перша – суттєва залежність межі пропорційності від рівня попереднього пластичного деформування, друга – наявність стрибків напружень, що можна пояснити неоднорідністю та нестабільністю структури матеріалу. Сталь пластична, відносне подовження при розриві $\delta = 0,75$. Для забезпечення високої середньоквадратичної достовірності R^2 опису експериментальних результатів використовувались поліноми більше п'ятого ступеня. Так отримано відповідне регресійне рівняння

$$\sigma = -321096\varepsilon^6 + 473415\varepsilon^5 - 276163\varepsilon^4 + 82826\varepsilon^3 - 14758\varepsilon^2 + 2079,1\varepsilon + 6,0903, \text{ МПа}; R^2 = 0,9997;$$

при зміні деформації $0 < \varepsilon < 0,004$.

Друга програма. Неізотермічні умови. Зразок зі швидкістю $v_T = 1$ град / сек нагрівався до відповідних фіксованих температур 200, 500, 550, 575 і 600°C при яких витримка складала одну хвилину. Далі випробування виконувались згідно першої програми. На рис. 3 наведено ділянки термомеханічного навантаження зразка при його нагріві від кімнатної до температури 200°C і подальшого пружного і пружно-пластичного деформування. Обробка цих результатів дозволила при виконанні одного дослідження визначити одночасно модуль пружності сталі, її коефіцієнт лінійного розширення, межі текучості та міцності. Модуль пружності визначався як похідна $E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ залежності $\sigma = f(\varepsilon)$, коефіцієнт лінійного розширення як похідна $\alpha = \frac{d\varepsilon_{терм}}{dT}$ залежності $\varepsilon_{терм} = f(T)$, де $\varepsilon_{терм}$ – термічна складова деформації зразка.

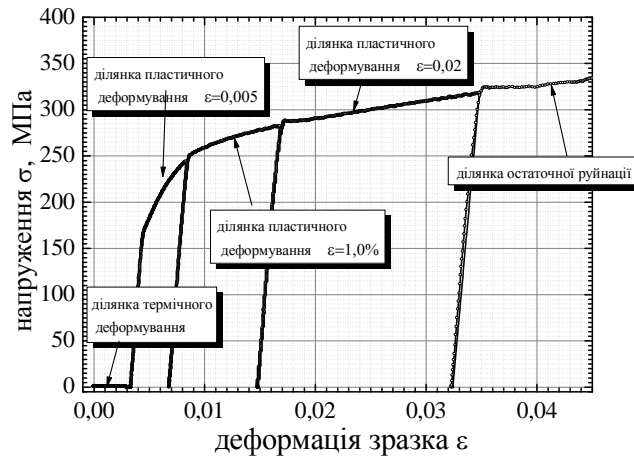


Рис. 3. Діаграма термомеханічного деформування зразка при температурі 200°C.

Криві деформування сталі при робочих температурах наведено на рис. 4. Аналіз кривих свідчить, що з підвищенням температури характеристики як міцності, так і пластичності зменшуються. В порівнянні з аналогічними характеристиками при кімнатній температурі це зменшення складає 70...50%. Збільшується амплітуда стрибків напружень, особливо при температурі 500°C.

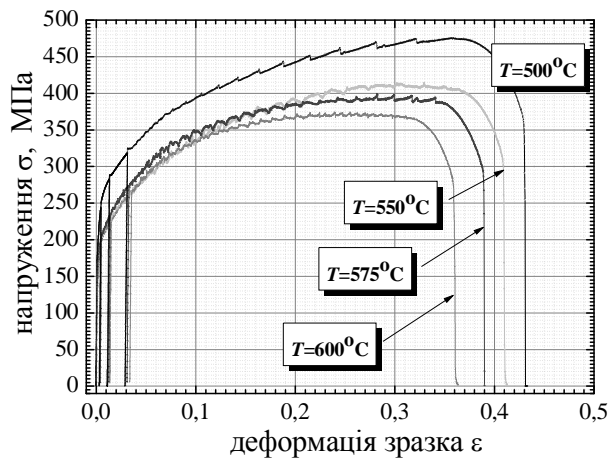


Рис. 4. Діаграми деформування зразків в робочому інтервалі температур 500...600°C.

Визначення коефіцієнта лінійного розширення базувалось на експериментальних результатах термічного деформування зразків вільних від механічного навантаження.

При цьому апроксимація результатів у вигляді поліномів не здійснювалась, а виконувалось безпосереднє їх чисельне диференціювання, щоби виключити додаткову похибку і забезпечити отримання об'єктивної та достовірної інформації щодо залежності коефіцієнта лінійного розширення

від температури (рис. 5). Аналіз результатів дозволив встановити кореляційний зв'язок між коливаннями коефіцієнта лінійного розширення та амплітудою стрибків напружень кривих деформування.

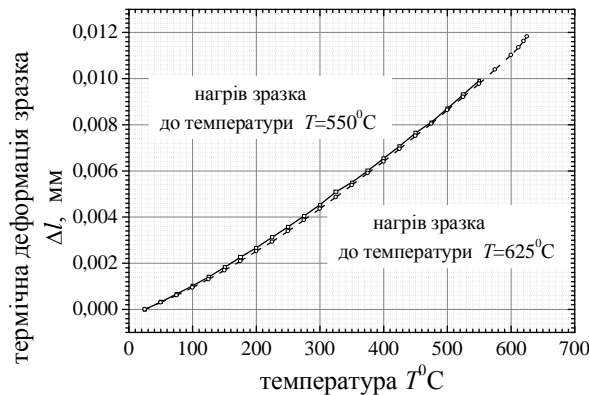


Рис. 5. Залежність термічної деформації зразка від температури.

Методика визначення коефіцієнта теплопровідності λ передбачала порівняння несталих температурних полів Q еталона та зразка під час їх нагріву, $Q = \lambda \frac{dT}{dx} Ft$, де Q – кількість теплоти, що подається до зразка, F – площа зразка, t – час. Досліди виконувались на установці «ИТ- λ -400». Тепловий потік $Q(t)$ від нагрівача розповсюджувався через еталонні пластини, для яких відомо значення теплопровідності. На основі порівняння різниці температур на площинах еталонної пластини і зразка визначались складові потоки, а далі коефіцієнт теплопровідності та його залежність від температури. В інтервалі температур $50 < T < 350^\circ\text{C}$ установка мала похибку вимірювання 1,5%. Враховуючи цю обставину, експериментальне визначення коефіцієнта теплопровідності передбачалось саме за таких умов з подальшою розробкою відповідних апроксимуючих рівнянь інтер- та екстраполяції результатів.

На рис. 6 наведено результати визначення коефіцієнта теплопровідності сталі за декількох серій дослідів. Залежності теплопровідності від температури мають монотонний лінійний характер

$$\lambda = 8,56266 + 0,02042T, \text{ вт / м град,}$$

$$\lambda = 8,54507 + 0,01776T, \text{ вт / м град,}$$

$$50 < T < 350^\circ\text{C}.$$

Параметри рівнянь відрізняються не суттєво. Значення теплопровідності знаходиться в діапазоні значень теплопровідності для цього класу сталей. Як і для коефіцієнта лінійного розширення спостерігається деяке коливання цієї характеристики в залежності від температури. Це дозволяє у перспективі на основі аналізу цих характеристик прогнозувати температуру експлуатації за якої амплітуда стрибків напружень буде певного значення, максимальна або мінімальна.

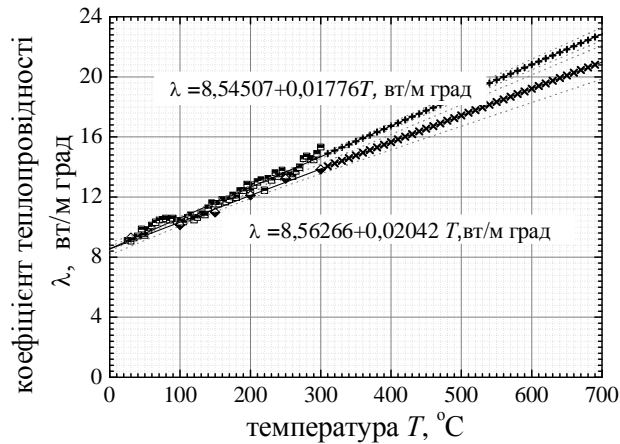


Рис. 6. Залежності коефіцієнта теплопровідності сталі від температури.

Наведені результати експериментального дослідження механічних та теплофізичних характеристик сталі ЕП 838У свідчать про їх зв'язок та потребу комплексного підходу визначення технологічних та експлуатаційних можливостей сталі.

Висновок. Отримані результати дають можливість зробити попередній позитивний висновок щодо перспективності використання сталі ЕП 838У у тепловій та атомній енергетиці. Значення її механічних та теплофізичних характеристик мало відрізняються від відповідних характеристик сталі 12Х18Н12Т. При цьому слід також відзначити деякі особливості деформування цієї сталі, що визначає у подальшому виконання додаткових механічних та матеріалознавчих досліджень.

Summary

Results of influence of temperature on the module of elasticity, the characteristic of static durability, factors of linear expansion and heat conductivity of steel are resulted. With rise in temperature from 20 to 600°C elasticity and durability characteristics decrease almost twice. In a working range of temperatures 500...600°C sharp falling of characteristics is not marked.

Keywords: steel, static deformation, linear expansion, heat conductivity, temperature.

Резюме

Приведены результаты влияния температуры на модуль упругости, характеристики статической прочности, коэффициенты линейного расширения и теплопроводности стали. С повышением температур от 20 до 600°C характеристики упругости и прочности уменьшаются почти в два раза.

В рабочем диапазоне температур 500...600°С резкого уменьшения характеристик не наблюдается.

Ключевые слова: сталь, статическое деформирование, линейное расширение, теплопроводность, температура.

Поступила 21.07.2009