

ВПЛИВ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР НА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛЕЙ 26H2MF ТА St12T

В. ДУДДА

Вармінсько-Мазурський університет в Ольштині, Польща

Побудовано діаграми деформування турбогенераторних сталей 26H2MF та St12T під час розтягу за високих температур. Для вимірювання видовження зразків використано безконтактну оптико-цифрову систему. Встановлено вплив температури на характеристики міцності, пластичності та модуль Юнга дослідних сталей. Показано, що за температур до 400°C характеристики міцності сталі 26H2MF нижчі порівняно зі сталлю St12T, водночас за вищих температур вони майже однакові для обох сталей.

Ключові слова: *сталь 26H2MF, сталь St12T, температура, діаграма розтягу, механічні характеристики, міцність, пластичність, модуль пружності.*

Турбогенератори – це напряму приєднані до теплової електростанції генератори синхронного типу. Їхні турбіни працюють на органічному паливі і тому економічно вигідні. Це обладнання забезпечує майже 80% сумарного світового об'єму електричної енергії. Основним завданням турбогенератора є трансформація механічної енергії парової турбіни в електричну за допомогою великої швидкості обертання ротора. Оскільки конструкційні елементи для турбогенераторів працюють в умовах високих температур, це суттєво впливає на їхні фізико-механічні характеристики, а відтак визначає подальшу якість роботи. Необхідно враховувати, що за умов впливу високих температур та напружень у турбогенераторних сталях з часом відбуваються зміни на рівні структури, які погіршують механічні властивості деталей загалом і знижують ресурс турбогенераторів. Мета роботи – встановити вплив високих температур на механічні характеристики турбогенераторних сталей 26H2MF та St12T.

Матеріали, обладнання та методика досліджень. Досліджували сталь 26H2MF для енергетичного обладнання турбін і котлів, які експлуатують за температур до 540°C, та сталь St12T для деталей роторів та лопаток парових турбін за температур до 600°C. Ці сталі подібні за вмістом більшості легувальних елементів (табл. 1), однак відрізняються за кількістю хрому, яка в сталі St12T вказує на належність її до групи нержавяких жароміцних сталей мартенситного класу (мають кращу тривкість до корозії в середовищі водяної пари, зберігаючи опірність повзучості на рівні зі сталями з меншим вмістом хрому [1, 2]).

З досліджуваних сталей, згідно зі стандартом [3], виготовляли циліндричні зразки (рис. 1b, c) для випробувань розтягом. Випробовували на універсальній гідравлічній машині Neckert EUS-20 за навантаження 4000 ± 10 kg. Під час випробувань за підвищених температур важко уникнути нагріву тензومترчних приладів для вимірювання видовження зразків. Це може вносити суттєві похибки, що призведе до некоректності результатів випробувань. Тому доцільно використовувати безконтактну оптико-цифрову систему вимірювання переміщення на основі методу кореляції цифрових зображень (КЦЗ), що є альтернативою тен-

зометричним приладам. Метод КЦЗ показав свою ефективність під час встановлення полів переміщень та деформацій зразків гладких та з концентраторами напружень [4–7]. Система складалася з промислової цифрової камери Tourcam UC-MOS 10000KPA та комп'ютера з програмним забезпеченням для обробки зображень. Похибка вимірювання видовження системи для використаного масштабу зображень $\pm 0,05$ mm. Для реєстрації аналогових сигналів з динамометра машини використовували систему на базі аналого-цифрового перетворювача L-Card E-440 та інструментальних підсилювачів. Для збору та попередньої обробки даних використано програмне забезпечення Power Graph 3.3.8. Система нагрівання зразків та контролю температури складалася з електричного нагрівача з керамічною ізоляцією, який живиться через автотрансформатор, та цифрового регулятора температури РТ-0102. Похибка вимірювання температури $\pm 1^\circ\text{C}$. Відхилення реальної температури від заданої не перевищувало $\pm 5^\circ\text{C}$. За результатами вимірювань зміни видовження зразків та навантаження будували діаграми деформування досліджуваних сталей у вигляді залежностей умовних напружень σ від деформацій зразка ϵ . На основі цих діаграм визначали механічні характеристики сталей згідно зі стандартом [3].

Таблиця 1. Хімічний склад досліджуваних сталей

Елемент Сталь	C	Si	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Mo
	mass%							
26H2MF	0,23	0,52	0,25	1,54	0,30	0,12	0,17	0,60
St12T	0,16	0,37	0,24	11,10	0,44	0,42	0,13	0,96

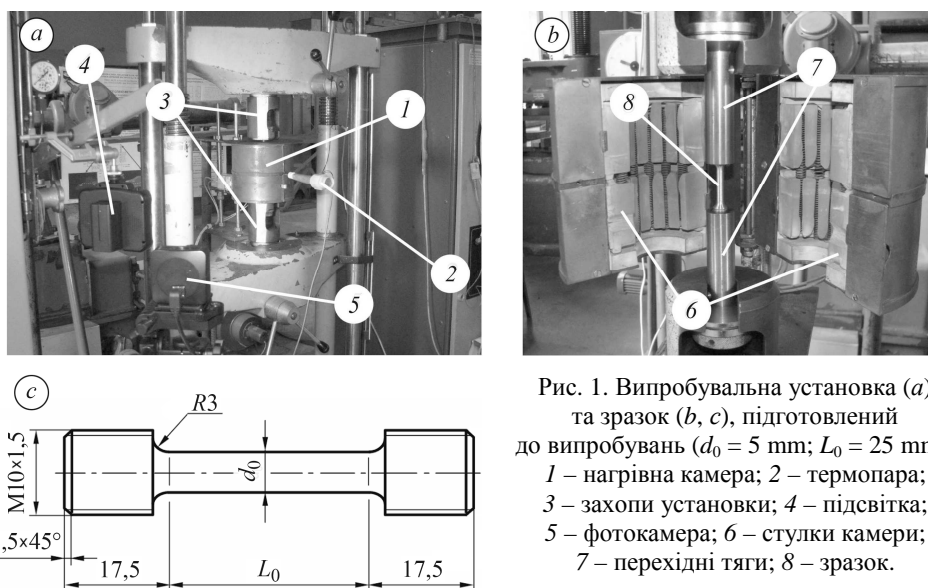


Рис. 1. Випробувальна установка (а) та зразок (b, c), підготовлений до випробувань ($d_0 = 5$ mm; $L_0 = 25$ mm): 1 – нагрівна камера; 2 – термопара; 3 – захопи установки; 4 – підсвітка; 5 – фотокамера; 6 – стулки камери; 7 – перехідні тяги; 8 – зразок.

Fig. 1. Testing setup (a) and specimen (b, c) prepared for tensile tests ($d_0 = 5$ mm; $L_0 = 25$ mm): 1 – chamber; 2 – thermocouple; 3 – setup grips; 4 – lighter; 5 – camera; 6 – chamber parts; 7 – transition traction; 8 – specimen.

Результати досліджень та їх аналіз. З діаграм деформування розтягом (рис. 2) видно, що для температур випробувань $T_{\text{exp}} = 20 \dots 400^\circ\text{C}$ графічні залежності σ – ϵ для сталі St12T лежать дещо вище аналогічних залежностей для сталі 26H2MF. Необхідно зазначити, що для сталі 26H2MF при $T_{\text{exp}} = 20^\circ\text{C}$ та 200°C

спостерігаємо ділянку та “зуб” текучості, який відсутній для сталі St12T. Для обох сталей характерно, що з підвищенням температури T_{exp} від 20 до 400°C протяжність по осі абсцис зменшується, що свідчить про деяке зниження пластичності матеріалу. З підвищенням температури випробувань $T_{\text{exp}} \geq 550^\circ\text{C}$ вона збільшується, що вказує на пластифікацію матеріалу обох сталей.

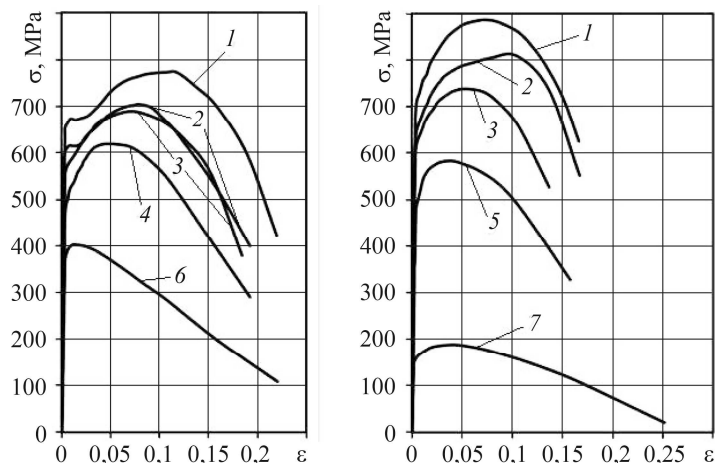


Рис. 2. Діаграми деформування сталей 26H2MF (a) та St12T (b) розтягом за температур 20°C (1), 200 (2), 400 (3), 550 (4), 600 (5), 700 (6), 800°C (7).

Fig. 2. Diagrams of 26H2MF (a) and St12T (b) steels deformation under tension at temperatures 20°C (1), 200 (2), 400 (3), 550 (4), 600 (5), 700 (6), 800°C (7).

Таблиця 2. Механічні характеристики сталей за підвищених температур

Температура випробування, °C	Границя плинності $\sigma_{0,2}$	Границя міцності σ_B	Відносне видовження δ_5	Відносне звуження ψ	Модуль Юнга E , GPa
	MPa		%		
20	650	770	22	73	210
	710	870	17	57	215
200	600	700	19	76	205
	640	800	16	60	205
400	560	690	18	74	185
	600	730	14	58	190
550	490	600	19	76	140
	—	—	—	—	—
600	—	—	—	—	—
	480	570	16	65	140
700	380	400	22	88	120
	—	—	—	—	—
800	—	—	—	—	—
	160	190	25	97	80

Примітка: в чисельнику вказані значення для сталі 26H2MF, а в знаменнику – для сталі St12T.

Як бачимо (табл. 2), характеристики міцності дослідних сталей визначені на основі діаграм деформування, знижуються з підвищенням температури випробувань. Для сталі 26H2MF умовна границя плинності $\sigma_{0,2}$ зі збільшенням T_{exp} від 20 до 400°C знижується на 14%, а для сталі St12T – на 15%. Можна вважати цей вплив несуттєвим. Границя міцності σ_B знижується на 10 та 16%, відповідно. Якщо порівнювати міцність сталей у згаданому діапазоні температур, то сталь St12T має трохи кращі характеристики за кімнатної температури (σ_B вища на 13%), але з підвищенням до $T_{\text{exp}} = 400^\circ\text{C}$ вони стають близькими. За $T_{\text{exp}} \geq 550^\circ\text{C}$ міцність обох сталей суттєво зменшується. Так, умовна границя плинності $\sigma_{0,2}$ сталі St12T за $T_{\text{exp}} = 600^\circ\text{C}$ знижується аж на 32%, що є гіршим показником порівняно зі сталлю 3Cr–3WV [8], яка легована вольфрамом.

За характеристиками пластичності сталь 26H2MF є кращою за сталь St12T у діапазоні температур $20 \leq T_{\text{exp}} \leq 700^\circ\text{C}$. Необхідно зазначити, що з підвищенням температури від кімнатної до $T_{\text{exp}} = 400^\circ\text{C}$ відносне видовження δ сталей знижується, а далі відбувається інверсія – відносне видовження зростає. Модуль Юнга обох сталей з підвищенням температури випробувань монотонно знижується за традиційними тенденціями [9], причому для сталі 26H2MF інтенсивніше.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що за температур $< 400^\circ\text{C}$ сталь 26H2MF має нижчі характеристики міцності порівняно зі сталлю St12T, тоді як для температур $> 400^\circ\text{C}$ ці сталі мають майже однакову міцність. З огляду на меншу чутливість характеристик пружності до високих температур сталь St12T порівняно зі сталлю 26H2MF є придатнішою для виготовлення відповідальних деталей турбогенераторів, які працюють за умов термомеханічного навантаження.

РЕЗЮМЕ. Построены диаграммы деформирования турбогенераторных сталей 26H2MF и St12T при растяжении при высоких температурах. Для измерения удлинения образцов использовано бесконтактную оптико-цифровую систему. Установлено влияние температуры на характеристики прочности, пластичности и модуль Юнга исследованных сталей. Показано, что при температурах до 400°C характеристики прочности стали 26H2MF более низкие по сравнению со сталью St12T, тогда как при высоких температурах они почти одинаковые для обеих сталей.

SUMMARY. Diagrams of deformation of turbogenerator 26H2MF and St12T steels under tension at high temperatures are constructed. Non-contact optical-digital system is used to measure the elongation of the samples. The influence of temperature on the strength, ductility and Young's modulus of the tested steels is established. It is shown that at the temperatures up to 400°C 26H2MF steel has lower strength characteristics compared to St12T, whereas at higher temperatures the strength of both steels is almost the same.

1. Ennis P. J. and Czyrska-Filemonowicz A. Recent advances in creep-resistant steels for power plant applications // Sadhana. – 2003. – **28**, № 3–4. – P. 709–730.
2. Klotz U. E., Solenthaler C., and Uggowitzer P. J. Martensitic-austenitic 9–12% Cr steels – alloy design, microstructural stability and mechanical properties // Mater. Sci. and Engng A. – 2008. – **476**, № 1. – P. 186–194.
3. ASTM E21-17 Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
4. Визначення локальної деформації біля концентраторів напружень методом цифрової кореляції зображень / Я. Л. Іваницький, Ю. В. Мольков, П. С. Кунь, Т. М. Ленковський, М. Войтович // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – **50**, № 4. – С. 8–24.
(Determination of the local strains near stress concentrators by the digital image correlation technique / Ya. L. Ivanyts'kyi, Yu. V. Mol'kov, P. S. Kun, T. M. Lenkovs'kyi, M. Wójtcwicz // Materials Science. – 2015. – **50**, № 4. – P. 488–495.)

5. *Вплив водню на опірність руйнуванню листової сталі 65Г / Я. Л. Іваницький, С. Т. Штаюра, Ю. В. Мольков, Т. М. Ленковський // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – 47, № 4. – С. 36–40.*
(*Influence of hydrogen on the fracture resistance of 65G sheet steel / Ya. L. Ivanyts'kyi, S. T. Shtayura, Yu. V. Mol'kov, T. M. Lenkovs'kyi // Materials Science. – 2012. – 47, № 4. – P. 457–461.*)
6. *Визначення характеристик тріщиностійкості сталі 17Г1С за поперечного зсуву / Я. Л. Іваницький, С. Т. Штаюра, Т. М. Ленковський, Ю. В. Мольков // Фіз.-хім. механіка матеріалів – 2013. – 49, № 5. – С. 73–78.*
(*Determination of the parameters of crack resistance for 17G1S steel under transverse shear / Ya. L. Ivanyts'kyi, S. T. Shtayura, T. M. Lenkovs'kyi, Yu. V. Mol'kov // Materials Science. – 2014. – 49, № 5. – P. 637–643.*)
7. *Аналіз напружено-деформованого стану зони передруйнування за двовісного навантаження пластини з центральною тріщиною / Yuanli Du, Ю. В. Мольков, Т. М. Ленковський, Р. А. Ковальчук // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – 53, № 1. – С. 78–83.*
(*Analysis of the stress-strain state of the process zone of a plate with central crack under biaxial loading / Yu. Du, Yu. V. Mol'kov, T. M. Lenkovs'kyi, R. A. Koval'chuk // Materials Science. – 2017. – 53, № 1. – P. 86–92.*)
8. *Klueh R. L. and Nelson A. T. Ferritic/martensitic steels for next-generation reactors // J. of Nuclear Materials. – 2007. – 371, № 1. – P. 37–52.*
9. *Hopkinson B., Rogers F., and Ewing J. A. The elastic properties of steel at high temperatures // Proc. of the Royal Society of London, Series A. – 1905. – 76, № 512. – P. 419–425.*

Одержано 12.06.2018