

УДК 621:181

ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЖИМІВ ВІДНОВНОГО ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ТЕПЛОТРИВКОЇ СТАЛІ ГИНУ ПАРОГОНУ ТЕС

*І. О. ЦИБАЙЛО**Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів*

Апробовано режими відновного термічного оброблення для поліпшення мікроструктури експлуатованої теплотривкої сталі розтягнутої зони гину головного парогону ТЕС. Досліджено зміну кількості зерен різних розмірів по товщині стінки труби після тривалої експлуатації та додаткового термічного оброблення. Обґрунтовано режим відновлення структури сталі 12Х1МФ, який полягав у подвійній нормалізації від 1100 та 960°C з подальшим відпуском при 740°C. Встановлено, що після такого оброблення частка дрібних зерен зросла до 55%, а крупних зменшилась до 10% по всій товщині стінки труби.

Ключові слова: *теплотривка сталь, головні парогони ТЕС, відновна термічна обробка.*

Restorative heat treatment modes was tested to improve the microstructure of used heat-resistant steel in the stretched bending zone of the main steam pipeline of a thermal power plant. The change in the number of grains of different sizes along the pipe wall thickness after long-term operation and after additional heat treatment was studied. The mode for restoring the structure of 12Х1МФ steel was substantiated, which consisted in double normalization from 1100 and 960°C followed by tempering at 740°C. It was shown that after restorative heat treatment, the proportion of small grains increased to 55%, and of large grains decreased to 10% throughout the entire thickness of the pipe wall.

Keywords: *head-resisted steel, main steam pipeline TPP, restorative heat treatment.*

Вступ. Тривала експлуатація низьколегованих теплотривких Cr–Mo–V сталей за підвищених температур та навантажень супроводжується повзучістю, яка спричиняє структурні зміни (ріст розмірів субзерен та зерен, виділення та перерозподіл карбідів на їх межах, пороутворення тощо) [1–4]. Відомо, що зі збільшенням розміру субзерен [5, 6], збідненням феритної матриці елементами легування [7, 8], а також передислокацією карбідів на межі зерен з утворенням пор уздовж їх меж поділу з матрицею пришвидшується міжзеренне руйнування внаслідок повзучості [9–12]. Такі структурні зміни впливають на механічні властивості експлуатованих сталей. Зокрема, металографічні дослідження засвідчили, що за підвищеної температури в результаті структурно-фазових перетворень у них збільшується розмір зерен, виділяються карбіди та найвідчутніше погіршуються властивості [13–15].

Відновним термічним обробленням (ВТО) вдається поліпшити структуру та механічні властивості сталей. Зокрема, оптимізуючи режим повторного термічного оброблення сталі 25Х2М1Ф після $21 \cdot 10^4$ h експлуатації, можна відновити її твердість, міцність та пластичність до регламентованих рівнів і, що найважливіше, суттєво підвищити її ударну в'язкість [16]. Водночас після повторного застосування цього режиму (гартування з відпуском), рекомендованого для сталі у вихідному стані, хоч і поліпшилася її структура після експлуатації, проте властивості

повністю не відновилися [17, 18]. Зокрема, з'явилися невеликі ділянки перліту та включення у феритній матриці, які не розчинилися. Відповідно її твердість та міцність підвищилися, але границя втомної витривалості істотно знизилася. Тому важливо обґрунтувати режим ВТО для сталі 12Х1МФ, експлуатованої на парогоні ТЕС, який дав би змогу зменшити розмір зерна, що є необхідною передумовою підвищення її опору повзучості.

Об'єкт та методи випробувань. Досліджували теплотривку сталь 12Х1МФ (mass%: 0,1 С, 0,22 Si, 0,5 Mn, 0,84 Cr, 0,01 S, 0,0005 P, 0,2 Cu, 0,19 Ni, 0,23 V, 0,28 Mo, Fe— решта) гину головного парогону ТЕС після $2,86 \cdot 10^5$ h експлуатації (робоча температура 540°C і тиск 14 МПа). Радіус гину і кут його загинання становили 1370 mm і 90°, відповідно.

Режими ВТО полягали у подвійній нормалізації сталі з подальшим відпуском (див. таблицю). Вважали, що впродовж першого етапу оброблення розчиняються карбіди, що утворилися під час експлуатації, гомогенізується твердий розчин та зникають відносно невеликі за розміром пори. Тривалість аустенітизації змінювали від 30 до 630 min. На другому етапі зразки нормалізували та відпускали за температур, рекомендованих нормативними документами для сталей у вихідному стані [19].

Атестовані режими відновного термічного оброблення

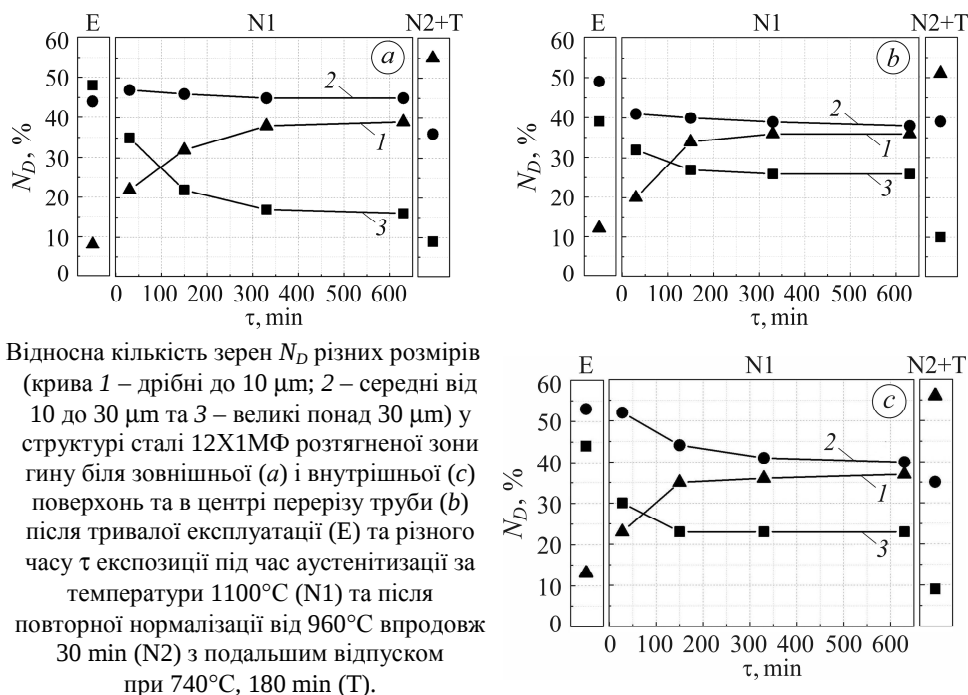
Вид обробки	Нормалізація					Відпуск
Позначення	N1				N2	T
№ режиму	1	2	3	4	5	—
Температура, °C	1100				960	740
Витримка, min	30	150	330	630	30	180
Охолодження	У повітрі					

Термічно обробляли тангенціально орієнтовані темплети завтовшки 12 mm, вирізані з розтягнутої зони гину (РЗГ) труби Ø325×38 mm. Структуру сталі аналізувати після кожного режиму ВТО (див. таблицю) на трьох рівнях по товщині стінки труби (біля зовнішньої і внутрішньої поверхонь та в центрі її перерізу) з РЗГ, де умови для експлуатаційної деградації найсприятливіші [20]. Металографічні дослідження здійснювали на сканівному електронному мікроскопі EVO 40XVP.

Результати випроб. Оцінювали структуру сталі РЗГ після експлуатації та ВТО. За розмірами всі аналізовані зерна умовно розділили на три категорії: дрібні (< 10 μm), середні (від 10 до 30 μm) та великі (> 30 μm), які визначали за результатами аналізу в 20 локаціях, сумарна площа яких 1 mm² (див. рисунок).

Виявили, що відсоток різних за розміром зерен у структурі експлуатованої сталі змінювався неоднаково по товщині стінки труби. Зокрема, частка дрібних і середніх поступово збільшувалася від зовнішньої до внутрішньої поверхні труби. При цьому середніх за розміром зерен було менше біля зовнішньої поверхні (44%), а найбільше – біля внутрішньої (53%). В центрі перерізу труби кількість зерен розміром від 10 до 30 μm досягала 49%. Кількість крупних зерен поперек її стінки змінювалась неоднозначно. Їх відсоток виявився найбільшим (48%) біля зовнішньої поверхні труби, порівняно з центром (39%) та внутрішньою поверхнею (44%). Така їх зміна по товщині стінки труби свідчить про вирішальну роль розміру зерен у процесах повзучості в околі зовнішньої поверхні труби. Адже, що більший розмір зерна, то швидше рухаються дислокації, а утворені з них скупчення легше долають межі і переходять у сусідні зерна.

На першому етапі ВТО оптимізували тривалість витримки за температури нормалізації 1100°C (див. таблицю). Після нагрівання та витримання зразків вище критичної точки A_{c3} в сталі інтенсивно відбувалися дифузійні процеси, необхідні для перерозподілу елементів у її структурі. Адже, що вища температура аустенізації, то легше розпадаються карбіди в її структурі, а елементи легування (хром, молібден) розчиняються в твердому розчині γ -заліза. Оскільки для гомогенізації твердого розчину, яка відбувається дифузійним шляхом, потрібний час, то тривалість аустенізації однозначно впливає на рівномірність розподілу елементів у матриці.



Relative number N_D of grains of different sizes (curve 1 – small up to 10 μm ; 2 – medium from 10 to 30 μm and 3 – large over 30 μm) in the structure of 12X1MF steel in the stretched bending zone at the outer (a) and internal (c) surfaces and in the center of the pipe section (b) after long-term operation (E) and different exposure time τ during austenitization at a temperature of 1100°C (N1) and after repeated normalization at 960°C for 30 min (N2) followed by tempering at 740°C, 180 min (T).

Аналізували частку зерен різних розмірів у структурі сталі гину головного парогону по товщині перерізу труби після різних витримок за температури аустенізації (див. рисунок). Виявили, що після 30 min кількість крупних зерен сягала 35 та 30% біля зовнішньої та внутрішньої поверхонь, відповідно, та 32% – у центрі перерізу труби. Частка середніх практично не змінилася біля обох поверхонь і дещо зменшилася в центрі перерізу труби. Частка дрібних зросла до 20...23%. За витримки до 150 min кількість крупних зерен знизилася суттєво і досягла 22...25% у всьому перерізі. Частка дрібних зерен складала 33...35%, тоді як кількість середніх (від 10 до 30 μm) досягала 40...45%. Кількість зерен різних розмірів впродовж витримки 330...630 min не змінювалася. Тому час витримки 150 min вважали оптимальним для гомогенізації сталі (див. рисунок).

Другий етап ВТО полягав у повторній нормалізації від 960°C з подальшим високим відпуском при 740°C [17]. Встановили, що за такого режиму частка дріб-

них ($< 10 \mu\text{m}$) зерен у сталі досягла 50...55%, середніх (від 10 до $30 \mu\text{m}$) – 35%, а великих ($> 30 \mu\text{m}$) – не більше 10% по всій товщині стінки труби.

Розмір зерен добре корелює з міцністю сталі, а отже, і з її твердістю [21]. Частку дрібних зерен вважали визначальним показником стану сталі після ВТО. Окрім того, зауважили також суттєве поліпшення твердості. Зокрема, після експлуатації у центрі перерізу труби вона не перевищувала 130 НВ, а біля обох поверхонь виявилася навіть ще нижчою (120 НВ). Тоді як після ВТО зросла до 170 НВ, що відповідало вимозі регламенту.

Розмір зерен та твердість можна визначати безпосередньо на зовнішній поверхні труби, а отже, реалізувати неруйнівний метод контролю поточного технічного стану тривало експлуатованих теплотривких сталей парогонів ТЕС. А за оптимізованим режимом ВТО, відновлювати їх властивості під час планових обстежень з використанням індукторів для нагрівання труб струмами промислової частоти (200 Hz).

ВИСНОВКИ

Проаналізовано частку дрібних, середній та великих за розміром зерен у структурі теплотривкої сталі 12Х1МФ після тривалої експлуатації ($\sim 28,6 \cdot 10^4$ h) на ділянці розтягнутої зони гину парогону ТЕС, а також після відновного термічного оброблення. Встановлено, що частка великих зерен найбільша біля зовнішньої поверхні труби, оскільки в розтягнутій зоні гину повзучість відбувалась легше порівняно з іншими його зонами. Обґрунтовано тривалість експозиції під час аустенітизації сталі при 1100°C перед її нормалізацією та оцінено вплив повторної нормалізації від 960°C з подальшим відпуском при 740°C на розмір зерен та їх розподіл у поперечному перерізі труби. Зокрема, після термічного оброблення по всій товщині стінки труби частка великих зерен у структурі сталі знизилася до 10%, а дрібних збільшилася до 55%, що підвищуватиме її витривалість за повзучості після запропонованого режиму відновлення.

1. Dzioba I., Gajewski M., and Neimitz A. Studies of fracture processes in Cr–Mo–V ferritic steel with various types of microstructure // *Int. J. Pressure Vessel and Piping*. – 2010. – **87**, № 10. – P. 575–586. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2010.07.012
2. Dzioba I. R. Properties of 13KhMF steel after operation and degradation under the laboratory conditions // *Materials Science*. – 2010. – **46**, № 3. – P. 357–364. DOI: 10.1007/s11003-010-9297-x
3. Analysis of mechanical properties of welded joint metal from TPP steam piping after its operational degradation and hydrogenation / V. Hutsaylyuk, O. Student, P. Maruschak, H. Krechkovska, O. Zvirko, L. Svirska, and I. Tsybailo // *Materials*. – 2023. – **16**, № 24. – Article number: 7520. DOI: 10.3390/ma16247520
4. Krechkov's'ka G. V. Structural changes in exploitation of steam power plant pipeline 15Kh1M1F-type steel concerning with shut downs of power units // *Metallfizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2008. – **30** (spec. iss.). – P. 701–711.
5. Microstructural degradation of Gr.91 steel during creep under low stress / K. Sawada, H. Kushima, M. Tabuchi, and K. Kimura // *Mat. Sci. and Eng. A*. – 2011. – **528**, № 16. – P. 5511–5518. DOI: 10.1016/j.msea.2011.03.073
6. Microstructural degradation mechanisms during creep in strength enhanced high Cr ferritic steels and their evaluation by hardness measurement / H. G. Armaki, R. Chen, S. Kano, K. Maruyama, Y. Hasegawa, and M. Igarashi // *J. Nuclear Mater.* – 2011. – **416**, № 3. – P. 273–279. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2011.06.007
7. Long-term microstructural degradation and creep strength in Gr.91 steel / R. P. Chen, H. Ghassemi-Armaki, K. Maruyama, and M. Igarashi // *Mater. Sci. and Eng. A*. – 2011. – **528**, № 13. – P. 4390–4394. DOI: 10.1016/j.msea.2011.02.060
8. A simulation of softening during creep exposure of grade 91 steel in a time range over 100,000 h around 600°C / K. Maruyama, R. P. Chen, M. Yaguchi, and K. Yoshimi // *Int. J. Press. Vessels and Piping*. – 2023. – **202**. – Article number: 104923.

- DOI: 10.1016/j.ijpvp.2023.104923
9. *Substantiation of the critical structural and mechanical state of low-alloy heat-resistant steel from steam pipelines of thermal power plant* / H. Krechkovska, O. Student, O. Zvirko, M. Hredil, L. Svirska, I. Tsybailo, and P. Solovei // *Eng. Failure Analysis*. – 2023. – **50**. – Article number: 107359. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107359
 10. *Structural microdamageability of steels of the steam pipelines of thermal power plants* / O. P. Ostash, A. I. Kondyr, O. V. Vol'demarov, P. V. Hladysh, and M. V. Kurechko // *Materials Science*. – 2009. – **45**, № 3. – P. 340–349. DOI:10.1007/s11003-009-9189-0
 11. *Krechkovska H. V. Structural-fractographic features of structural steels after long-term operation* // *Materials Science*. – 2021. – **57**, № 2. – P. 228–233. DOI: 10.1007/s11003-021-00536-z
 12. *Visualization of fractographic signs of operational degradation of heat-resistant steel for estimating its actual structure-mechanical state* / H. Krechkovska, O. Student, M. Hredil, I. Tsybailo, M. Holovchuk, and I. Shtoyko // *Proc. Struct. Integrity*. – 2022. – **42**. – P. 1398–1405. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.12.178
 13. *Dobrzanski J., Zielinski A., and Krtzon H. Mechanical properties and structure of the Cr–Mo–V low-alloyed steel after long-term service in creep condition* // *J. of Achievements in Mater. and Manufact. Eng.* – 2007. – **23**, № 1. – P. 39–42.
 14. *Ranking of the mechanical characteristics of steels of steam pipelines of thermal power plants by their sensitivity to in-service degradation* / O. Z. Student, H. V. Krechkovska, L. M. Svirska, B. I. Kindratskyi, and V. V. Shyrokov // *Materials Science*. – 2021. – **57**, № 3. – P. 404–412. DOI: 10.1007/s11003-021-00554-x
 15. *Influence of the long-term operation of 12Kh1MF steel of the bends of main steam pipelines of thermal power plants on its mechanical properties* / O. Z. Student, H. V. Krechkovska, T. E. Palashchuk, and Y. M. Hladkyi // *Materials Science*. – 2018. – **53**, № 4. – P. 460–467. DOI: 10.1007/s11003-018-0095-1
 16. *Restoration of the properties of heat-resistant steel after long-term operation in a steam turbine* / O. Z. Student, H. V. Krechkovska, L. M. Svirska, and P. R. Solovei // *Materials Science*. – 2021. – **57**, № 1. – P. 71–79. DOI: 10.1007/s11003-021-00516-3
 17. *Hodžić D., Hajro I., and Tasić P. Regenerative heat treatment of heat resistant steel 14MoV6–3* // *Proc. of 18th Int. research/expert conference on trends in the development of machinery and associated technology: TMT 2014*, Budapest, Hungary, 2014. – P. 95–98.
 18. *Hodžić I., Hajro P., and Tasić D. Impact toughness of regenerative heat treated steel 14MoV6–3* / *20th Int. Research/Expert Conf. Trends in the development of machinery and associated technology* TMT 2016, Mediterranean Sea Cruising, 24th September – 1st October. – 2016. – P. 77–80.
 19. *ТУ 14-3-460-2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009 Труби сталеві безшовні для парових котлів та трубопроводів. Введення 01. 10. 2009р. Держ. підпр. “Дніпропетровський регіон. Держ.наук.-техн. центр станд. та сертифікації”.* – Д.: 2009. – С. 49.
 20. *Tsybailo I. O. and Krechkovska H. V. The structural-mechanical state of 12Kh1MF steel of TPP pipeline bend after long-term operation* // *Materials Science*. – 2023. – **59**, № 3. – P. 320–327. DOI:10.1007/s11003-024-00780-z
 21. *Krechkovska H. V., Student O. Z., and Nykyforchyn H. M. Diagnostics of the engineering state of steam pipeline of thermal power plants by the hardness and crack resistance of steel* // *Materials Science*. – 2019. – **54**, № 10. – P. 627–637. DOI:10.1007/s11003-019-00227-w

Одержано 02.02.2024