

УДК 621.186.3.001.5

ОЦІНКА СТАНУ МЕТАЛУ ЗГИНІВ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИМІРЮВАННЯ ТВЕРДОСТІ

О.І. Балицький, професор, д.т.н., Фізико-механічний інститут імені Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, І.В. Ріпей, к.т.н., Публічне акціонерне товариство «Західенерго», м. Львів, Я. Еліаш, професор, д.т.н., Західнопоморський технологічний університет, м. Щецин, Польща

Анотація. З'ясовано роль твердості в діагностуванні згинів високотемпературних труб та оціненні їх роботоздатності. Проаналізовано кореляційні співвідношення між міцністю та твердістю для теплостійких сталей (12X1MΦ, 15X1M1Φ) і визначено зміни коефіцієнта пропорційності залежно від відношення σ_T/σ_B .

Ключові слова: стан металу, високотемпературні згини, твердість, кореляція.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА СГИБОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ

А.И. Балицкий, профессор, д.т.н., Физико-механический институт имени Г.В. Карпенко НАН Украины, г. Львов, И.В. Рипей, к.т.н., Публичное акционерное общество «Западэнерго», г. Львов, Я. Елиаш, профессор, д.т.н., Западнопоморский технологический университет, г. Щецин, Польша

Аннотация. Выяснена роль твердости в диагностировании сгибов высокотемпературных труб и оценивании их работоспособности. Проанализированы корреляционные соотношения между прочностью и твердостью для теплоустойчивых сталей (12X1MΦ, 15X1M1Φ) и определены изменения коэффициента пропорциональности в зависимости от отношения σ_T/σ_B .

Ключевые слова: состояние металла, высокотемпературные сгибы, твердость, корреляция.

ESTIMATION OF METAL BENDS STATE OF HIGH TEMPERATURE PIPELINES ACCORDING TO HARDNESS MEASURING RESULTS

O. Balytskyi, Doctor of Technical Science, Professor, H. Karpenko Physical-Mechanical Institute, Lviv, I. Ripey, Candidate of Technical Science, Public Joint-Stock Company «Zakhidenergo», Lviv, J. Elias, Doctor of Technical Science, Professor, West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Poland

Abstract. The role of hardness in diagnosticating of the high temperature pipes bends and evaluation of their serviceability is determined. The correlation ratio between the strength and hardness for (12X1MΦ, 15X1M1Φ) heatproof steels are analyzed and the changes of proportion coefficient depending on the σ_{YS}/σ_{TS} relation is determined.

Key words: state of metal, high temperature bends, hardness, correlation.

Вступ

Згини – одні з найменш надійних складових паропроводів. Це спричинено як конструкційними особливостями їх виготовлення (наявність ділянок різної товщини внаслідок

пластичної деформації, відхилення від круглості (овальності) поперечного перерізу тощо), так і динамікою змін структури і властивостей металу під дією експлуатаційних температур і напружень.

Аналіз публікацій

Парковий ресурс згинів паропроводів становить 75–85 % від ресурсу прямих труб [1]. На сьогодні більшість згинів відпрацювали визначений термін (200–250 тис. год), а можливість їх подальшої експлуатації здійснюється за результатами індивідуального експертного обстеження. Під час технічного діагностування важливо оцінити стан металу, зокрема його механічні характеристики, макро- та мікропошкодженість, динаміку структурних змін тощо, застосовуючи неруйнівні методи. З огляду на це з'ясування значення вимірювання твердості у діагностуванні металу згинів високотемпературних труб є актуальним.

У нормативних документах на виготовлення елементів високотемпературних трубопроводів [2, 3] зазначено, що твердість згинів повинна відповідати вимогам технічних умов на труби, проте норми твердості труб із перлітних теплостійких сталей (12X1MФ, 15X1M1Ф) не визначені [4]. Водночас, згідно з вимогами типової інструкції [1], твердість розтягнутої частини згинів високотемпературних труб, які працюють за умов повзучості (>450 °C), повинна становити 1176–1666 НВ (МПа).

Мета та постановка задачі

З'ясувати роль твердості в діагностуванні високотемпературних згинів труб та оціненні їх роботоздатності; проаналізувати кореляційні співвідношення між міцністю та твердістю для теплостійких сталей (12X1MФ, 15X1M1Ф) як у вихідному стані, так і під час тривалої експлуатації, визначити їх зміни та умови застосування.

Матеріали, методика та засоби випробувань

Твердість згинів паропроводів та пароперепускних труб зі сталей 12X1MФ, 15X1M1Ф вимірювали переносними твердомірами динамічної дії (типу «ТДМ-1» та «КПИ»). Принцип роботи цифрового твердоміра «ТДМ-1» базується на швидкості ударного відскоку бойка (метод Шора [5]); водночас прилад «КПИ» працює за методом ударного відбитка [6].

На підставі результатів механічних випробувань вирізок трубопроводів визначали зале-

жність між твердістю за Брінеллем та межею міцності (σ_B , МПа). У стаціонарних умовах твердість металу вирізок вимірювали твердоміром ТШ-2М.

Структуру сталей обстежували на металографічному мікроскопі ММО-1600 після травлення шліфів у 4 %-му розчині азотної кислоти.

Обговорення результатів

Згини паропроводів та пароперепускних труб у переважній більшості виготовляють методом холодного гнуття. Внаслідок пластичної деформації (наклепу) збільшується твердість zdeформованих ділянок та змінюється мікроструктура. Залежно від конструкційних особливостей згини із товщиною стінки більше 10 мм відпускають за температури 710–750 °C протягом 1–3 год [2, 3, 7].

Підвищена твердість металу згинів у вихідному стані свідчить про наявність наклепу та неякісно проведеної термообробки, оскільки за високого відпуску знижуються внутрішні напруження, стабілізується структура і відновлюються початкові властивості сталі. В цьому випадку твердість розтягнутої частини згину порівнюють із твердістю прямої ділянки. Якщо твердість деформованої ділянки є більшою за твердість недеформованої частини, є велика ймовірність, що відпуск було здійснено неналежним чином.

Випадки пошкодження згинів високотемпературних пароперепускних труб, унаслідок недотримання технології їх виготовлення та термообробки, траплялися найчастіше на початку експлуатації. В цьому випадку тріщини зазвичай зароджувалися на внутрішній поверхні нейтральних ділянок згинів чи на розтягнутій ділянці зовнішньої поверхні, де зосереджуються максимальні розтягувальні напруження. Як приклад, пошкодження згину пароперепускної труби $\varnothing 133 \times 11$ мм, що експлуатувалась з параметрами: температура – 560 °C, тиск – 13,7 МПа. До утворення наскрізної тріщини, яка зародилась на нейтральній ділянці із внутрішньої поверхні; згин відпрацював менше 20 тис. год. Тріщина є криволінійною, довжиною 450 мм на внутрішній поверхні та 85 мм – на зовнішній (рис. 1). Вимірюванням твердості металу пошкодженого згину виявлено, що в розтягнутій ділянці вона сягала 2450–2845 НВ; вод-

водночас в недеформованій частині згину становила 1660–1812 НВ. Наведене збільшення твердості металу деформованої ділянки свідчить не тільки про наклеп металу унаслідок пластичної деформації, але й про можливе локальне нагрівання ділянок згину з наступним швидким охолодженням під час його підгинання у процесі монтажу, що підтверджують і металографічні дослідження (рис. 2). Мікроструктура металу в зоні пошкодження згину – феритно-бейнітна, простежено окремі ділянки мартенситних формувань. Обстеженням вістря тріщини виявлено, що поширюється вона здебільшого по феритних прошарках.

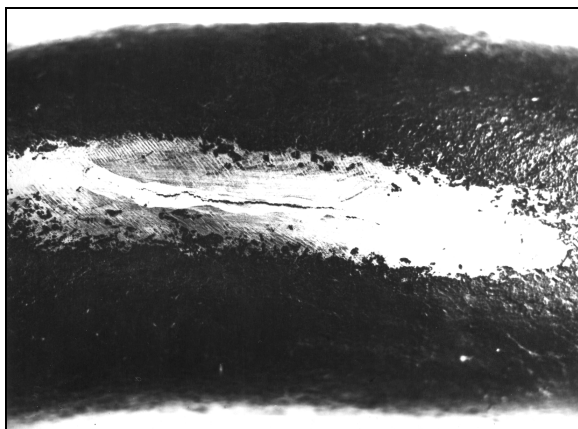


Рис. 1. Макротріщина на зовнішній поверхні нейтральної ділянки згину

Відомо, що для визначення міцнісних характеристик сталей неруйнівним способом використовують кореляційну залежність міцності з твердістю

$$\sigma_B = \alpha \cdot \text{НВ}, \quad (1)$$

де α – коефіцієнт пропорційності. Для оцінки міцності металу реальних об'єктів, у тому числі згинів високотемпературних труб, значення коефіцієнта α є надзвичайно важливими, насамперед, коли твердість близька до граничних значень – максимально чи мінімально допустимих. Автори [7] зазначають, що для котельних сталей (12Х1МФ і 15Х1М1Ф) коефіцієнт α в досліджуваних інтервалах значень твердості становить 0,35 і 0,36, відповідно.

Під час тривалої експлуатації паропроводів та пароперепускних труб значення α змінюється, що зумовлено змінами структури та властивостей металу, насамперед старінням.

Зокрема для теплостійких сталей α може перебувати у межах 0,33–0,37 [8].

Згідно з Г. Фінке [9], кореляційний коефіцієнт між твердістю та межею міцності залежить від відношення межі текучості σ_T до межі міцності σ_B (рис. 3). Для низьколегованих сталей σ_T/σ_B не повинно перевищувати 0,7 [10]. Зазвичай у вихідному стані для теплостійких сталей (12Х1МФ, 15Х1М1Ф) $\sigma_T/\sigma_B \leq 0,7$. Під час експлуатації паропроводів та пароперепускних труб це відношення найчастіше збільшується і може сягати 0,80–0,85. У цьому випадку для оцінення міцності металу, що тривало експлуатується, доцільно застосовувати інший кореляційний коефіцієнт. Зокрема для сталей 12Х1МФ, 15Х1М1Ф із відношенням $\sigma_T/\sigma_B \sim 0,7$ –0,8 міцність із твердістю корелює згідно з коефіцієнтом 0,33–0,34 [8].

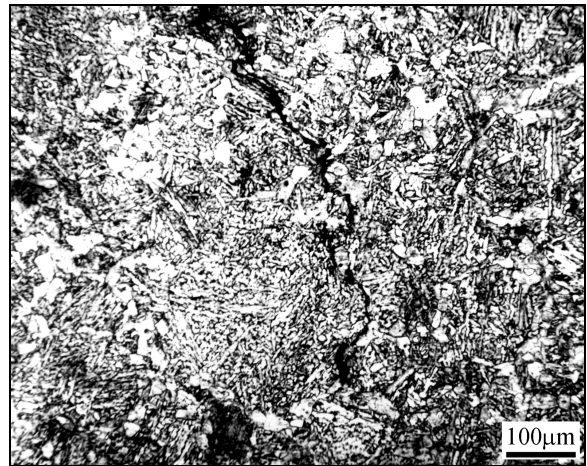


Рис. 2. Структура металу та характер поширення тріщини

Важливе значення для оцінки твердості металу згинів має точність визначення та похибка вимірювання. У зв'язку з тим, що індентор переносних твердомірів, які працюють за методом пружного відскоку (метод Шора), досить малі і працюють у динамічних режимах, на точність вимірювання значною мірою впливають умови, за яких їх проводять. Достовірність результатів знижується під час виконання замірів в умовах теплових цехів із природною вібрацією працюючого обладнання. У цьому випадку більшу похибку вимірювання простежено під час виконання контролю тонкостінних труб із товщиною $s \leq 10$ мм. Водночас аналіз, виконаний приладом динамічної дії («КП»), свідчить про вищу точність результатів, оскільки похибка

визначення твердості зазвичай не перевищує 5–7 % [11]. Здебільшого чим ближчими є значення твердості еталона і досліджуваного виробу, тим точніші заміри, виконані приладом «КП».

При вимірюванні твердості металу елемента, що має високу чутливість до наклепу чи поверхня якого є наклепаною, наприклад, унаслідок неналежної підготовки-зачистки, результати твердості, одержані приладами, які працюють за різними принципами визначення, відрізнятимуться. У цьому випадку застосування динамічних твердомірів, які працюють за методом Шора, є не зовсім коректним.

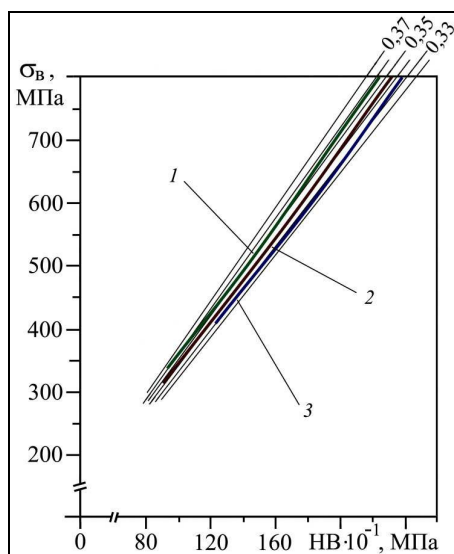
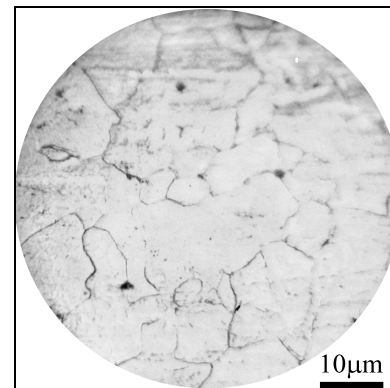


Рис. 3. Кореляція межі міцності σ_B із твердістю НВ (за Г.Фінке) залежно від відношення σ_T/σ_B : 1 – $\sigma_T/\sigma_B < 0,65$; 2 – $0,65 \leq \sigma_T/\sigma_B \leq 0,8$; 3 – $\sigma_T/\sigma_B > 0,8$

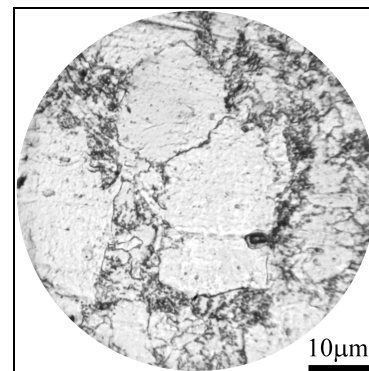
Іншим чинником, на який слід зважати під час діагностування згинів високотемпературних труб за результатами твердості, є наявність знеміцненого шару на зовнішній поверхні згинів (рис. 4).

Поверхнєве знеуглецювання (глибиною від 0,05 до ~0,45 мм) металу простежено як у вихідному стані, так і під час тривалої експлуатації. Тому для оцінки міцності згинів за твердістю доцільно знімати механічним способом зовнішній шар (знеуглецьований, наклепаний тощо). Інакше величина твердості відповідатиме значенню твердості поверхневого шару або деякому середньому значенню, але не фактичній твердості (і, відповідно, міцності) металу згину високотемпературного трубопроводу.

На думку авторів [12], оптимальна величина зачистки ділянок паропроводів для визначення твердості повинна становити ~5 % товщини стінки. З іншого боку, внаслідок кількарізного періодичного знімання поверхневого шару можливе отримання локальних ділянок металу згинів із товщиною, меншою за допустиму, насамперед у випадку труб із малими коефіцієнтами запасу за товщиною.



а



б

Рис. 4. Структура металу згину зі сталі 12Х1МФ: зовнішня знеуглецьована поверхня (1155 НВ) (а) та після усунення шару глибиною до 1 мм (1560 НВ) (б)

Твердість згину не може цілком характеризувати його роботоздатність, оскільки не є однозначною характеристикою стану металу. Відомо [8, 13], що навіть у випадку пошкоджених згинів паропроводів твердість металу може перебувати у допустимих межах. Однак за умови завищених значень твердості деформаційна здатність металу та опірність крихкому руйнуванню є заниженими. В цьому випадку можливе руйнування без помітних ознак пластичної деформації. У протилежному випадку (за низьких значень твердості) міцнісні характеристики перебуватимуть на нижній межі допустимих

значень або будуть меншими за них, що може призвести до інтенсивного протікання деформації повзучості за високих температурно-силових умов експлуатації.

Висновки

1. Вимірювання твердості згинів та оцінення мікроструктури, з метою перевірки дотримання технологічних операцій виготовлення, а також відповідності їх вимогам галузевої інструкції, є відповідальним етапом вхідного контролю, що може запобігти виникненню складних ситуацій (занижена чи завищена твердість металу розтягнутої ділянки згинів, передчасне вичерпання працездатності внаслідок повзучості тощо) під час експлуатації.
2. Твердість – важлива характеристика експрес-оцінки міцності сталей та якості виконаної термообробки. Проте вона не є однозначним критерієм працездатності згинів труб, оскільки є малочутливою до деградаційних змін металу.
3. Для оцінки міцності металу елементів паропроводів та пароперепускних труб на підставі неруйнівних випробувань надзвичайно важливим є не лише належна підготовка поверхні, точність визначення твердості, але й застосування коректного коефіцієнта пропорційності.

Література

1. СОУ МПЕ 40.1.17.401:2004. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. Типова інструкція. – К.: Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики», 2005. – 76 с.
2. ОСТ 1082.030.40-79. Элементы трубные поверхностей нагрева, трубы соединительные в пределах котла, коллекторы стационарных паровых котлов. Общие технические условия. – Л.: НПО ЦКТИ, 1990. – 56 с.
3. ОСТ 24.125.60-89. Детали и сборочные единицы трубопроводов пара и горячей воды тепловых электростанций. Общие технические условия. – Л.: НПО ЦКТИ, 1991. – 162 с.
4. ТУ 14-3-460-2009. Труби сталеві безшовні для парових котлів та трубопроводів:

Замість ТУ 14-3-460-2003. – Дніпропетровськ: ДП «Науково-дослідний і конструкторсько-технологічний інститут трубої промисловості імені Я.Ю. Осади», 2009. – 41 с.

5. ГОСТ 23273-78. Металлы и сплавы. Измерения твердости методом упругого отскока бойка (по Шору). – Введен впервые 01.01.80. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 4 с.
6. ГОСТ 18661-73. Сталь. Измерение твердости методом ударного отпечатка. – Введен впервые 1.01.74. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 22 с.
7. Бугай Н.В. Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования / Н.В. Бугай, Т.Г. Березина, И.И. Трунин. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 272 с.
8. Балицький О. Параметри технічного діагностування парогонів ТЕС: чутливість до деградації / О. Балицький, І. Ріпей // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій. – Львів: Фізико-механічний інститут імені Г.В. Карпенка НАН України, 2009. – С. 889–894.
9. Справочник по сталям и методам их испытаний / пер. с нем. Ароновича М.С. – М.: Металлургиздат, 1958. – 920 с.
10. ДНАОП 0.00-1.11-98. Правила будови і безпечної експлуатації трубопроводів пари та гарячої води. – К., 1998. – 234 с.
11. Векслер Е.Я. Опыт неразрушающего контроля механических свойств металла энергооборудования по твердости / Е.Я. Векслер, И.В. Замекула, В.Ю. Толстов, Е.В. Семешко та інші // Энергетика та електрифікація. – 2008. – № 3. – С. 18–21.
12. Неразрушающие методы контроля металлов на тепловых электростанциях / С.В. Савкив, П.Н. Цюпка, М.П. Дармиц, А.И. Лямичев. – М.: Энергия, 1974. – 128 с.
13. Балицький О. Надійність парогонів ТЕС під час тривалої експлуатації / О. Балицький, І. Ріпей, Х. Процах // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – № 4. – С. 36–39.

Рецензент: Л.А. Тимофєєва, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 22 серпня 2011 р.