

УДК 539.3

О. Ясній¹, канд. техн. наук; Т. Вухерер², канд. техн. наук; В. Ясній¹;
А. Собчак¹; А. Сорочак¹

¹Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя (Україна)

²Маріборський університет (Словенія)

ОЦІНЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ МАТЕРІАЛУ КОЛЕКТОРА ПАРОПЕРЕГРІВНИКА ТЕС

Резюме. Досліджено вплив температури на ударну в'язкість і мікромеханізми руйнування експлуатованої сталі 12Х1МФ колектора пароперегрівника котла типу ТП-100. Встановлено, що з підвищенням температури від 20 до 200°С ударна в'язкість збільшується і в подальшому виходить на плато. Виявлено основні закономірності зміни мікротвердості сталі по товщині стінки колекторної труби з урахуванням відстані від отвору.

Ключові слова: твердість, мікротвердість, ударна в'язкість, колектор пароперегрівника, сталь 12Х1МФ.

O. Yasniy, T. Vuherer, V. Yasniy, A. Sobchak, A. Sorochak

ASSESSMENT OF OPERATIONAL DEGRADATION OF MATERIAL OF THERMAL POWER PLANT STEAM SUPERHEATER COLLECTOR

The summary. The influence of temperature on impact toughness of operational 12Kh1MF steel of steam superheater collector of TP-100 type boiler was investigated. It was established, that with the increase of temperature from 20 to 200°C the impact toughness increases and in further reaches the plateau. Main dependencies of changes of steel microhardness along the thickness of collector pipe taking into consideration the distance from opening were revealed.

Key words: hardness, microhardness, impact toughness, steam superheater collector, steel 12Kh1MF.

Постановка проблеми. Запобігання раптовому руйнуванню трубопроводів і колекторів парогенераторів теплових електростанцій є важливим завданням в енергетиці. Багато електростанцій вже вичерпали свій проектний ресурс. Тому постає запитання: як довго обладнання електростанцій може експлуатуватись? Для відповіді на це запитання необхідно отримати низку експериментальних даних, характеристики матеріалу, зокрема границю міцності, границю текучості, а також їх зміни в часі, вибрати відповідні критерії руйнування і методологію випробувань. Важливим є обґрунтування параметрів, які чутливі до деградації матеріалу і можуть бути визначені руйнівними чи неруйнівними методами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Колектори пароперегрівників ТЕС експлуатуються за температури 400–500°С, у середовищі води під тиском 15,5 кг/см². Сумісна дія цих чинників, корозійного середовища і сповільненого деформування призводить до зниження пластичності сталі колектора, деградації його механічних властивостей.

Тривала експлуатація колекторів пароперегрівників спричиняє структурно-фазові зміни в сталі 12Х1МФ: розпадаються перлітні колонії, сфероїдизуються карбіди, збільшується кількість карбідів й утворюються пори на границях зерен [1, 2]. Корозія під напругою спричиняє зародження й поширення тріщин на внутрішній поверхні колектора вздовж границь зерен, ослаблених порами та виділеннями карбідів. Істотно

впливає на деградацію сталі 12Х1МФ її внутрішнє знеуглецювання при інтенсивному необоротному водневому окрихчуванні та втраті міжкристалічної міцності.

Мета роботи. Дослідити вплив експлуатаційного напрацювання на твердість, мікротвердість і ударну в'язкість сталі 12Х1МФ.

Методика дослідження. Досліджували матеріал «гарячого колектора», знятого після 37 років експлуатації пароперегрівника котла типу ТП-100 Бурштинської ТЕС. Зразки типу Шарпі вирізували з суцільної ділянки колекторної труби зовнішнім діаметром 325 мм і товщиною стінки 50 мм (рис. 1а). Для вивчення розподілу ударної в'язкості в радіальному напрямку R по товщині, зразки вирізували із зовнішньої, серединної і внутрішньої ділянок стінки колекторної труби. В усіх випадках площина надрізу зразків була перпендикулярна до осі L колекторної труби. Із перфорованого сегмента труби колектора вирізували темплети для дослідження твердості й мікротвердості (рис. 1б). На перфорованому сегменті колектора розміщено три ряди по 27 отворів діаметром 22 мм із привареними штуцерами для кріплення теплообмінних трубок з кроком 80 мм в осьовому напрямку і 57,6 мм – у коловому (розвертка зовнішньої поверхні).

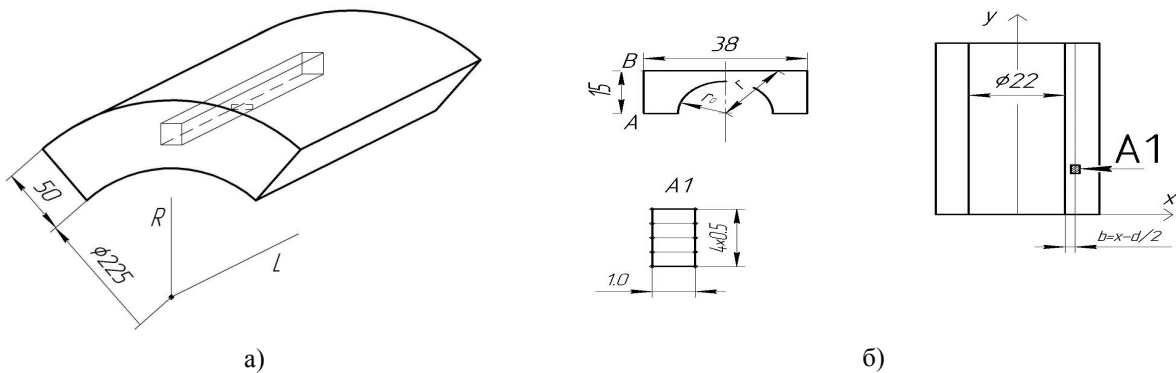


Рисунок 1. Схема вирізки зразків із суцільної ділянки колекторної труби для випробування на ударну в'язкість – а) та із перфорованої для вимірювання твердості і мікротвердості – б)

Ударну в'язкість визначали випробуванням зразків типу Шарпі розмірами 10x10x55 мм із V-подібним надрізом радіусом $0,25 \pm 0,025$ мм на копрі РКР-300 з енергією удару 300 кДж відповідно до ГОСТу 9454-78. Проводили три серії випробувань по 6 зразків при температурі 20°C, 200°C та 300 °C із реєстрацією діаграми „зусилля – час”. На основі даних діаграм визначали енергію зародження E_z , енергію поширення тріщини E_n , повну енергію руйнування E , а також ударну в'язкість KCV .

Ударну в'язкість визначали за формулою

$$KCV = A / F, \quad (1)$$

де A – повна робота руйнування зразка; F – площа поперечного перерізу зразка в місці надрізу.

Програма керування випробувальною установкою РКР-300 та запису інформації випробувань «VUNI-CHARPY» дозволяє визначати величину складових енергій руйнування зразка з допомогою перетворення залежності “зусилля–час” ($P-t$) у залежність “зусилля–переміщення” ($P-s$). Для цього за відомою масою ударника m , початковою швидкістю удару v_0 та залежністю $P(t)$ за допомогою подвійного послідовного інтегрування обчислювали швидкість ударника $v(t)$ при навантаженні зразка Шарпі [3, 4]

$$v(t) = v_0 - \frac{1}{m} \int_{t_0}^t P(t) dt, \quad (2)$$

після чого залежність переміщення ударника s від часу t

$$s(t) = \int_{t_0}^t v(t) dt. \quad (3)$$

За отриманими залежностями визначали $P = f(s)$ та складові енергетичних витрат на руйнування зразка.

За результатами випробувань визначали також відносне звуження зразка після руйнування

$$\psi = ((b_1 - b_0) / b_0) \cdot 100\%, \quad (4)$$

де b_0 і b_1 – відповідно ширина зразка до і після випробувань.

Поверхні руйнування випробуваних зразків типу Шарпі досліджували на скануючому електронному мікроскопі типу РЕМ-106И у режимі вторинних електронів.

Результати досліджень. Колектор пароперегрівника котла типу ТП-100 ТЕС виготовлено зі сталі 12Х1МФ (ГОСТ 5520-79). Характеристики механічних властивостей сталі у вихідному стані: поріг пластичності $\sigma_{0,2} = 320$ МПа, межа міцності $\sigma_B = 480$ МПа [1]. Хімічний склад сталі 12Х1МФ: 0,12%С; 0,54%Mn; 0,26%Si; <0,015%P; <0,019%S; <1,0%Cr; <1,0%Ni.

Діаграми руйнування зразків у координатах „витрати енергії на руйнування – час” зображено на рис. 2. З підвищенням температури випробувань від 20 до 200...300°C істотно збільшуються витрати енергії, за якої крива загинається і виходить на плато.

Вплив температури на ударну в'язкість KCV для кожного із досліджених зразків, повну енергію руйнування E , енергію зародження E_z та енергію поширення тріщини E_n зображено на рис. 3. Підвищення температури від 20 до 200...300°C більш ніж у 2 рази збільшує ударну в'язкість, енергію руйнування та енергію поширення тріщини і майже не впливає на енергію зародження тріщини. Треба зазначити, що у дослідженому температурному діапазоні найбільший розкид ударної в'язкості сталі 12Х1МФ спостерігається при 20°C.

Руйнування зразків при кімнатній температурі має значний розкид (рис. 2). Можна виділити групу зразків (3, 5, 6) з низькою ударною в'язкістю $KCV = 219...277$ кДж/м² і групу зразків (1, 2, 4), які мають високу ударну в'язкість $KCV = 1100...1410$ кДж/м². Детальніший аналіз свідчить, що при кімнатній температурі ударна в'язкість експлуатованого матеріалу колектора змінюється по товщині колектора. Зі збільшенням відстані у від внутрішньої поверхні колектора ударна в'язкість зменшується від 1370...1410 кДж/м² до 219...222 кДж/м².

На відміну від ударної в'язкості, твердість сталі 15Х1МФ залишається сталою по товщині стінки колектора. Істотно менша (майже у 4 рази) ударна в'язкість периферійних ділянок колектора, порівняно із внутрішніми, спричинена інтенсивнішим водневим окрихченням металу у високотемпературному газовому потоці, проти окрихчення у високотемпературній насиченій парі.

На рис. 5 наведено температурну залежність частки волокна в зламі зразків після ударних випробувань зразків типу Шарпі, з аналізу якої випливає, що 50%-ий вміст волокна досягається при 51°C.

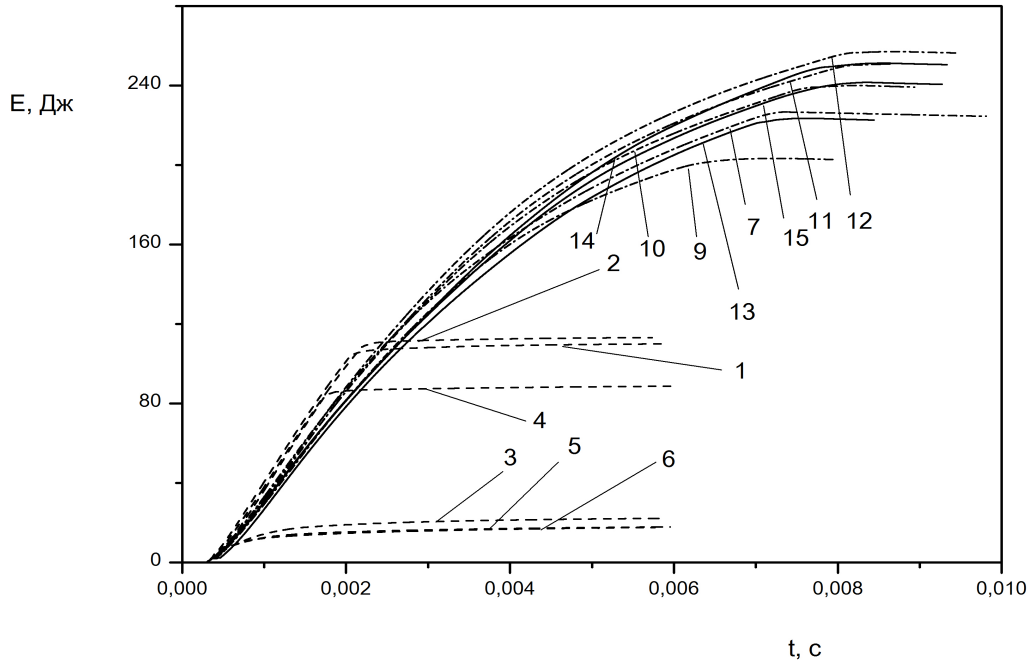


Рисунок 2. Залежність повної енергії деформування E від часу деформування за температури $+20^{\circ}\text{C}$ (1–6), $+200^{\circ}\text{C}$ (7, 9–12), $+300^{\circ}\text{C}$ (13–15)

При кімнатній температурі, залежно від зразка, частка волокна у зламі змінюється від 20 до 45%.

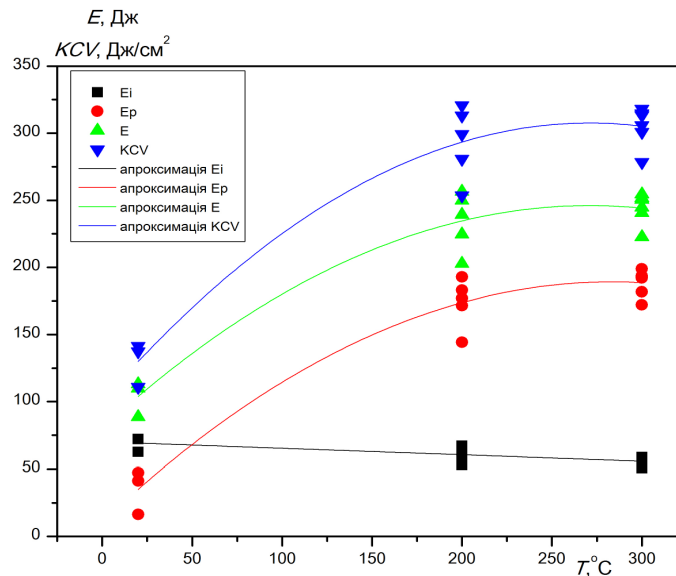


Рисунок 3. Температурні залежності ударної в'язкості, енергії зародження і поширення тріщини

Загалом, більша частка волокна у зламі відповідає більшому значенню ударної в'язкості. З підвищенням температури від 20 до 200°C збільшується відносне звуження зразка ψ після руйнування.

Для зразків з високою ударною в'язкістю характерне в'язко-крихке руйнування (рис. 6а, в). Старту тріщини передують значна пластична деформація зразка, тріщина на початковій ділянці поширюється за в'язким ямковим механізмом (рис. 6а). В подальшому тріщина поширюється міжзеренно, без видимих слідів пластичної деформації (рис. 6в). На зламі зразка добре видно фасетки сколювання. При низькоенергетичному руйнуванні зразків при 20°C тріщина із самого початку

поширюється за механізмом квазісколювання (рис. 6б).

За високої температури (+200°C) зразки Шарпі зі сталі 12Х1МФ руйнуються в'язко за ямковим механізмом, що забезпечує високу ударну в'язкість.

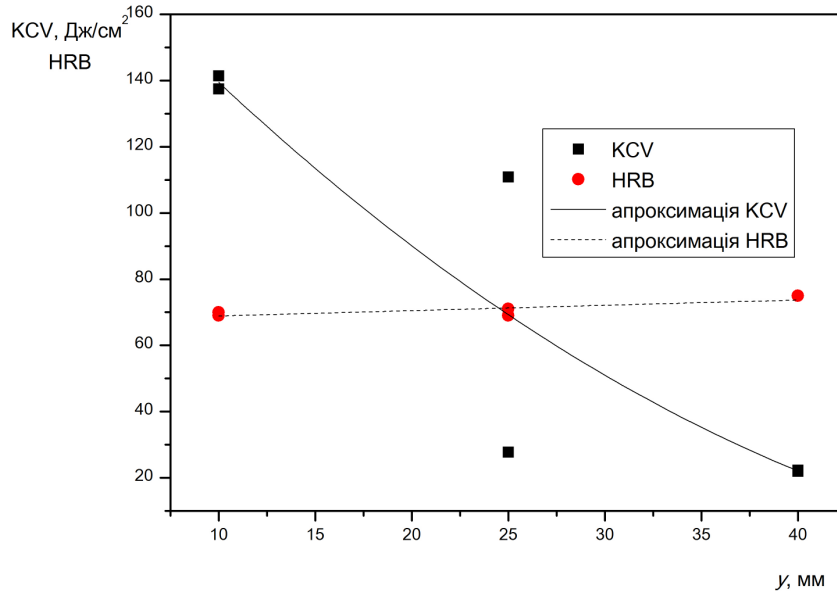


Рисунок 4. Розподіл ударної в'язкості і твердості сталі 12Х1МФ по товщині стінки колектора при 20°C

Виявлено, що мікротвердість зменшується зі збільшенням відстані b до поверхні отвору приварки патрубків $d = 22$ мм (рис. 7).

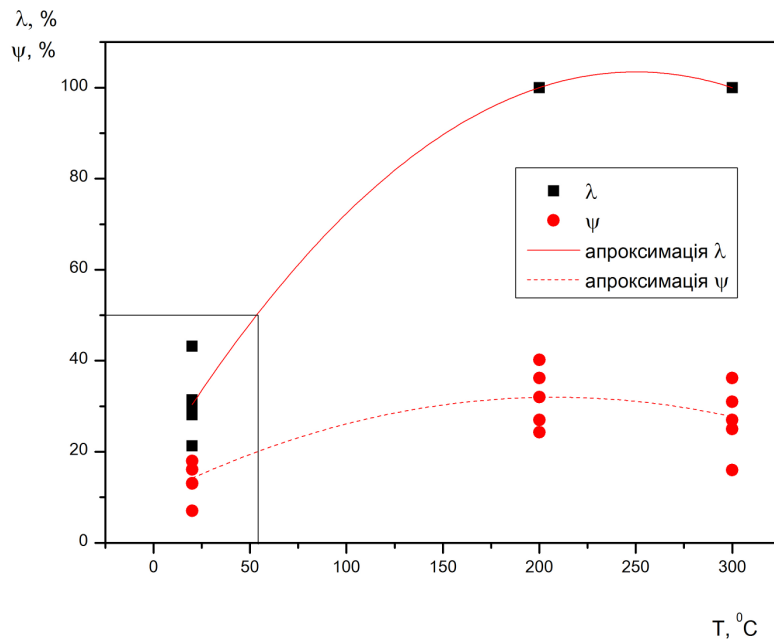


Рисунок 5. Температурна залежність відсотка волокна в зламі λ і відносного звуження зразка ψ після руйнування зразків, випробуваних ударом

Треба зазначити, що градієнт мікротвердості вздовж осі колекторної труби залежить від відстані y від внутрішньої поверхні стінки колектора (рис. 1б). Зі збільшенням b від 1,0 до 7,0 мм найбільша різниця мікротвердості (28%) спостерігається біля зовнішньої поверхні колекторної труби ($y = 45$ мм), у серединній частині стінки труби ця різниця складає 10% і біля внутрішньої поверхні ($y = 5$ мм) мікротвердість не залежить від b . Такий ефект пояснюється істотнішим впливом

середовища на деградацію металу поблизу внутрішньої поверхні труби колектора й отворів кріплення патрубків порівняно із шарами металу, віддаленішими від поверхонь контакту з теплоносієм.

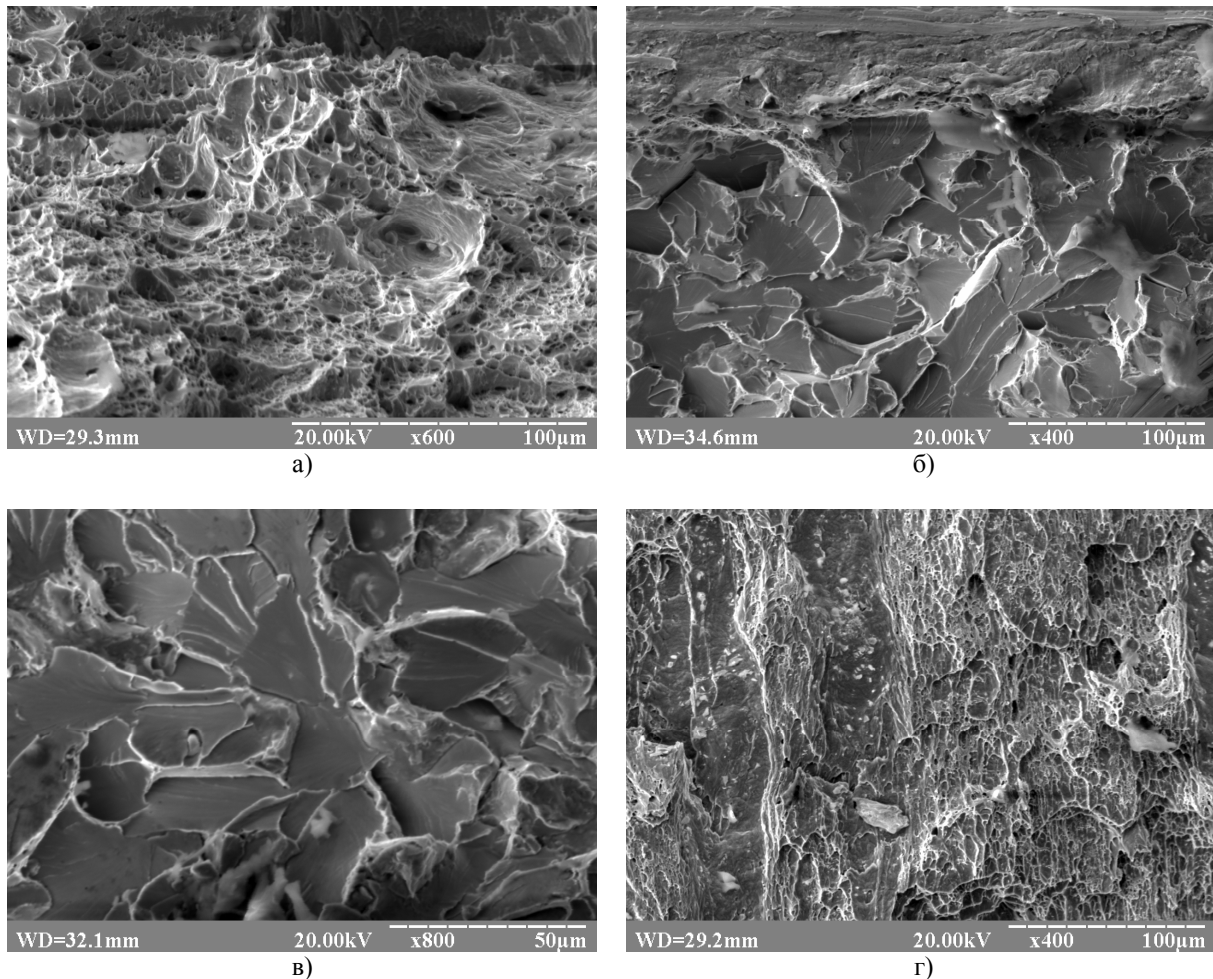


Рисунок 6. Поверхня руйнування зразків типу Шарпі зі сталі 12Х1МФ за температури 20°C (а,в) і 200°C (б,г). Зразок № 2 (а, в), №6 (б), №8 (г)

З іншого боку, досліджено, що найбільша мікротвердість $H_{\mu} = 1700\text{--}2000$ МПа спостерігається для серединної ділянки по товщині колектора труби ($y = 45$ мм), проти ділянок, розміщених ближче до внутрішньої ($y = 25$ мм) і зовнішньої ($y = 45$ мм) труби колектора (рис. 8). Ця закономірність не залежить від відстані до поверхні отвору кріплення патрубка ($b = 1\text{--}7$ мм). Подібні закономірності отримано за результатами вимірювання твердості на поверхні B темплета, вирізаного із експлуатованого колектора (рис. 1б). Зі збільшенням відстані від отвору кріплення патрубка від 4 до 8 мм твердість зменшується приблизно на 8–9% (рис. 9).

Структурну неоднорідність матеріалу за достатнього масиву даних розкиду його властивостей оцінювали із застосуванням методів математичної статистики з використання функції розподілу Вейбулла [5]

$$P(\sigma) = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma}{k}\right)^m}, \quad (5)$$

де m і k – параметри розподілу. Параметр m називають коефіцієнтом однорідності, який відображає міру розкиду характеристик властивості. Цей коефіцієнт можна визначити за формулою Гумбеля [6, 7]. У випадку випробувань на мікротвердість, ця формула набуває вигляду [6]

$$m = \frac{d(n)}{2,30259S(\log H)} \quad (6)$$

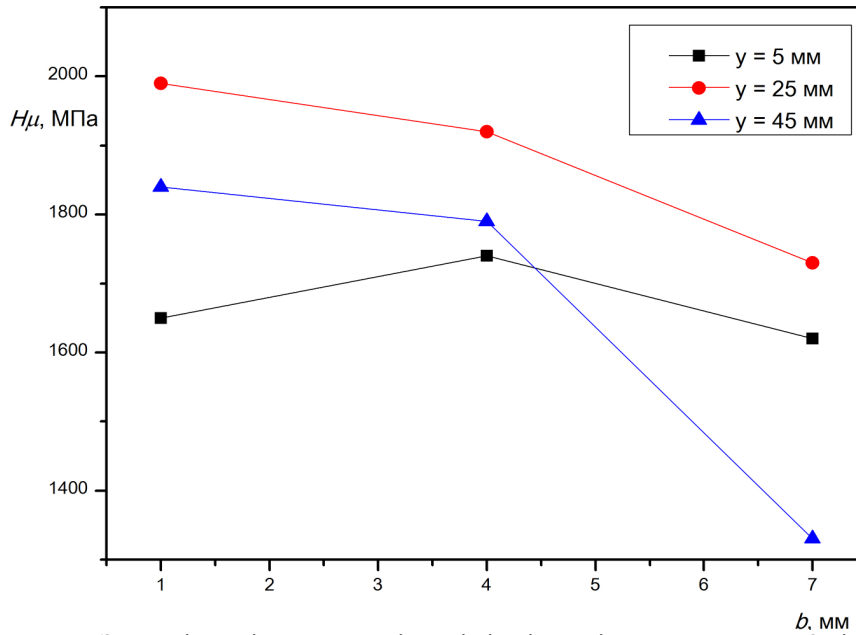


Рисунок 7. Залежність мікротвердості сталі від відстані до отвору: $y = 5, 25$ і 45 мм

Тут величину $d(n)$ визначаємо як функцію кількості вимірювань n , яких має бути щонайменше 15 і значення $S(\log H)$ знаходимо за результатами n вимірювань

$$S(\log H) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\log H_i - \overline{\log H})^2}, \quad (7)$$

де $\overline{\log H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log H_i$ – середнє значення логарифму мікротвердості.

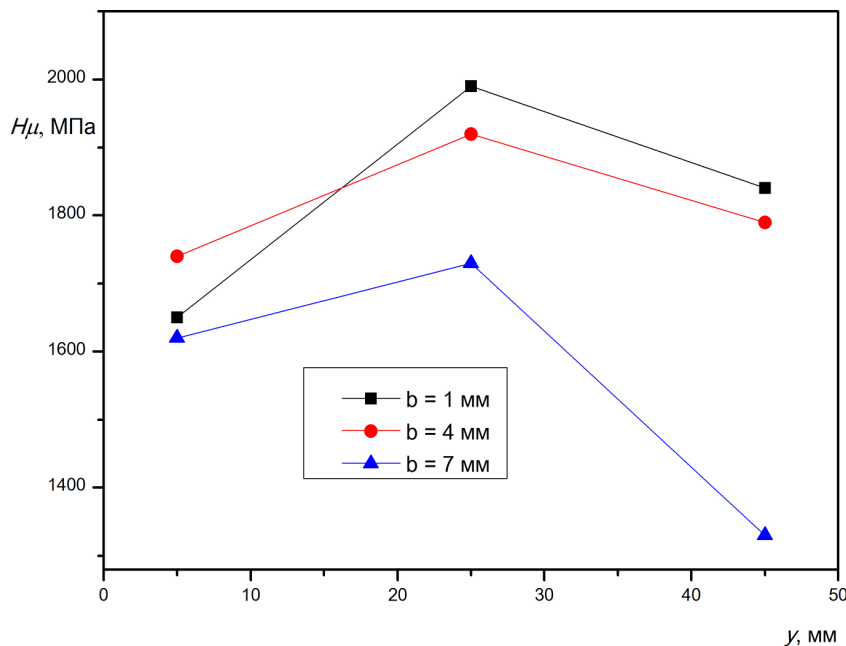


Рисунок 8. Розподіл мікротвердості по товщині стінки колектора на відстані від отвору: $b = 1, 4$ і 7 мм

Вищим значенням m відповідає нижчий рівень розкиду характеристик мікротвердості, краще упорядкування структури і, таким чином, нижчий рівень пошкоджуваності [8]. На противагу, нижчі значення m відображають вищий рівень пошкоджуваності.

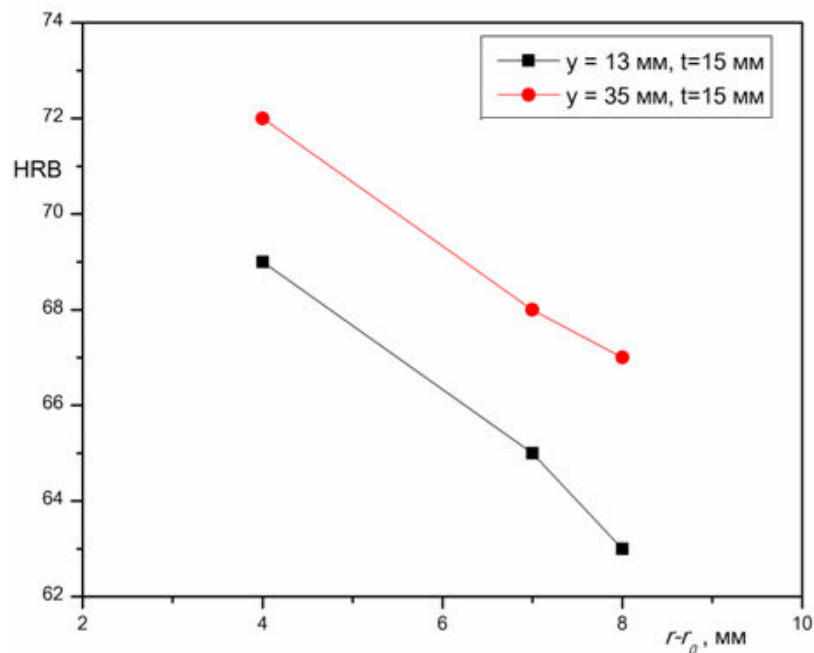


Рисунок 9 - Залежність твердості сталі від віддалі $r-r_0$

Результати визначення параметрів m за даними вимірювання мікротвердості представлені на рис. 10 і 11.

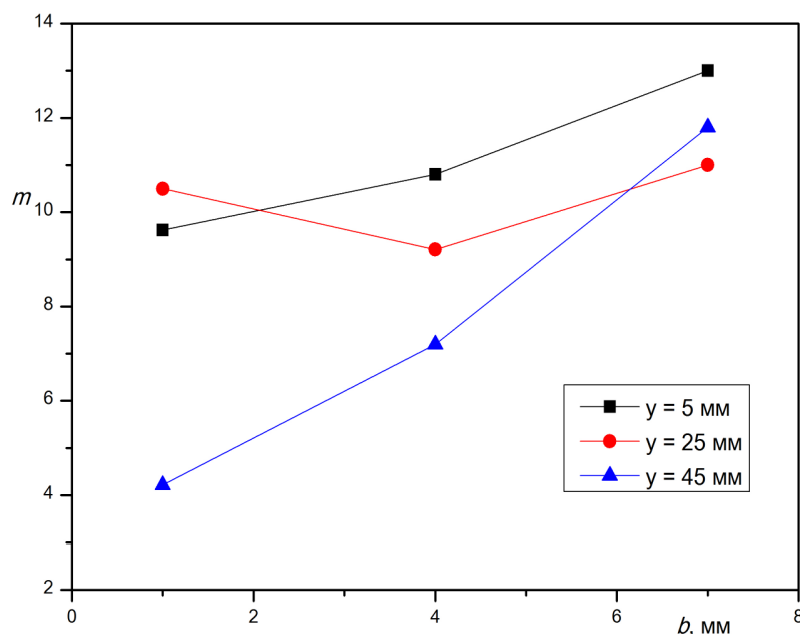


Рисунок 10. Залежність показника m сталі від відстані до отвору: $y = 5, 25$ і 45 мм

Загальною закономірністю є збільшення показника степеня Вейбулла m , який є мірою розкиду мікротвердості із віддаленням від поверхні отвору $d = 22$ мм (рис. 10). Найбільша деградація властивостей (найменше значення m) спостерігається на ділянці,

близькій до зовнішньої поверхні колектора ($y = 45$ мм) при $b = 1,0$ мм порівняно із $b = 7,0$ мм.

Найменше значення показника m спостерігається (рис. 11) для зовнішньої ділянки колекторної труби ($y = 45$ мм).

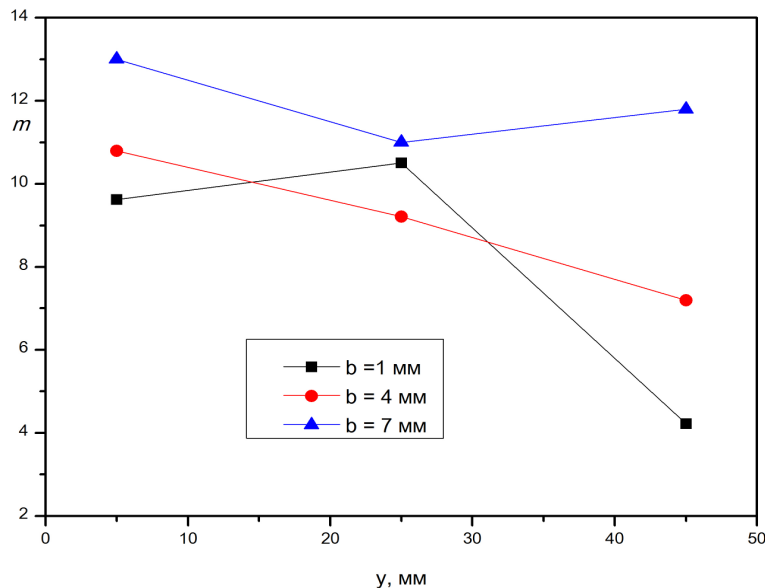


Рисунок 11. Розподіл показника m по товщині стінки колектора на відстані від отвору: $b = 1, 4$ і 7 мм

Висновки. Досліджено вплив температури ($+20\dots+300^\circ\text{C}$) на ударну в'язкість експлуатованої сталі колектора пароперегрівника котла типу ТП-100. Встановлено, що з підвищенням температури від 20 до 200°C ударна в'язкість збільшується і в подальшому виходить на плато. Виявлено, що при переході від внутрішніх ділянок до периферії по товщині стінки колекторної труби ударна в'язкість при кімнатній температурі зменшується майже у 7 разів до $219\dots222$ кДж/м², а механізм руйнування від в'язко-крихкого до квазісколу.

Виявлено основні закономірності зміни мікротвердості сталі по товщині стінки колекторної труби з урахуванням відстані від отвору. Мікротвердість зменшується зі збільшенням відстані до поверхні отвору приварки патрубків $d = 22$ мм.

Загальною закономірністю є збільшення показника степеня Вейбулла m , який є мірою розкиду мікротвердості з віддаленням від поверхні отвору $d = 22$ мм. Найбільша деградація властивостей (найменше значення m) спостерігається на ділянці, близькій до зовнішньої поверхні колектора при відстані до поверхні отвору $b = 1,0$ мм порівняно із $b = 7,0$ мм.

Література

1. Dzioba I. Failure assessment analysis of pipelines for heat and power generating plants according to the SINTAP procedures / I. Dzioba // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2005. – Vol. 82. – P. 787–796.
2. Гладь В.Б. Пошкоджувальність структури сталі колектора пароперегрівача за експлуатаційних умов / В.Б. Гладь, А.Р. Собчак // Вісник ТДТУ. – 2010. – Том 15. – № 1. – С. 27–31.
3. ISO 14556. Steel Charpy V- Notch Pendulum Impact Test – Instrumented Test Method. – 05.01.2005.
4. Влияние температуры и скорости нагружения на энергию зарождения и распространения трещин в образцах Шарпи из углеродистых сталей / В.В. Харченко, Е.А. Кондряков, В.Н. Жмака и др. // Проблемы прочности, 2006. – №5. – С. 120–127.
5. Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability/ W. Weibull //J. Appl. Mech. – 1951. – Vol. 18. – No. 3, P. 293–297.

6. Gumbel E.J. Statistical Theory of Extreme Values and Some Practical Applications / E.J. Gumbel // National Bureau of Standards. – 1954. – 51p.
7. Махутов Н.А. Статистические закономерности малоциклового разрушения. / Н.А. Махутов, В.В. Зацаринный, Ж.Л. Базарас и др. – М.: Наука, 1989. – 252 с.
8. Lebedev A.A. Determination of Damage Accumulated in Structural Materials by the Parameters of Scatter of their Hardness Characteristics / A.A. Lebedev, N.R. Muzyka, N.L. Volchek // Strength of Materials. – 2002. – Vol. 34. – № 4. – P. 317–321.

Отримано 01.02.2011