

*Олександр БАЛИЦЬКИЙ<sup>1</sup>, Ігор РІПЕЙ<sup>2</sup>, Василь ГАРДА<sup>2</sup>, Міхал КАВ'ЯК<sup>3</sup>*

## **НАДІЙНІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ НА ПАРОПЕРЕГРІВНИКАХ ПАРОВИХ КОТЛІВ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**

<sup>1</sup>*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України  
вул. Наукова, 5, м. Львів, 79060. E-mail: balitski@ipm.lviv.ua*

<sup>2</sup>*ГАЛРЕМЕНЕРГО ПАТ "ДТЕК ЗАХІДЕНЕРГО"  
вул. Козельницька, 7, м. Львів, 79026*

<sup>3</sup>*Західнопоморський технологічний університет  
алея Піастів, 19, м. Щецин, 70-310, Польща*

*Alexander BALITSKI<sup>1</sup>, Ihor RIPEY<sup>2</sup>, Vasyl GARDA<sup>2</sup>, Michal KAWIAK<sup>3</sup>*

## **RELIABILITY OF THE SUPERHEATERS STEAM BOILERS WELD JOINTS ON POWER PLANTS**

<sup>1</sup>*Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine  
5, Naukova Str., Lviv, 79060, Ukraine. E-mail: balitski@ipm.lviv.ua*

<sup>2</sup>*HALREMENERGOPJSC "DTEK ZAKHIDENERGO"  
7, Kozelnytska Str., Lviv, 79026, Ukraine*

<sup>3</sup>*West Poterian University of Technology  
19, Piastow av., 70-301, Szczecin, Poland*

### **ABSTRACT**

In has been analyzed the damaged welds of superheater steam boilers on the power plants. It is shown that factory weld joints and welded joints of heterogeneous steels characterized by low reliability. It has been indicated that the main causes of the destruction of welded joints of heterogeneous steels is diffusion of carbon from pearlitic to austenitic grains, which leads to low-strength decarbonization and thermofatigue, caused by cyclic changes (in the process of boilers starting and shut-downs), temperature stresses caused by differences of linear expansion coefficients of welded steels.

**KEY WORDS:** *reliability, steam boiler, superheater, weld joint, crack.*

Пароперегрівники парових котлів високого тиску ТЕС зазнають максимальних термодинамічних напружень і є найуразливішими складовими поверхонь нагрівання. Частка відмов-пошкоджень зварних з'єднань високотемпературних пароперегрівників становить 15–18% від усіх пошкоджень поверхонь нагрівання [1], тому підвищення надійності зварних з'єднань є актуальним завданням.

Для виготовлення змійовиків високотемпературних пароперегрівників парових котлів теплових електростанцій традиційно використовують теплостійку сталь 12Х1МФ з максимальною температурою експлуатації 585°C та жароміцну – 12Х18Н12Т, що може експлуатуватися за температур до 610°C [2, 3]. Колектори пароперегрівників розташовують у необігрівній частині парового котла і виготовляють їх, зазвичай, зі сталі 12Х1МФ або 15Х1М1Ф.

**Мета роботи:** проаналізувати роботоздатність зварних з'єднань високотемпературних пароперегрівників, з'ясувати основні причини виникнення їх пошкоджень залежно від конструкції та технологічних умов виконання.

**Об'єкт дослідження** – зварні з'єднання конвективних пароперегрівників парових котлів ТПП-312 паропроодуктивністю 950 т/год.

### **ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ**

Залежно від виконання усі зварні з'єднання парового котла можна поділити на дві групи: заводські та ремонтні. Заводські стикові з'єднання пароперегрівників найчастіше виго-

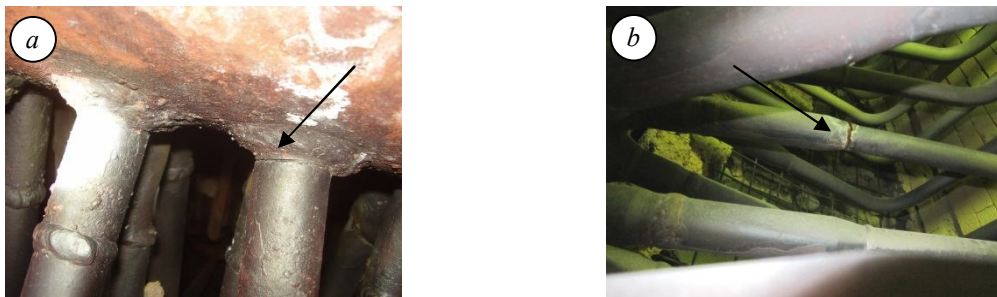
товляють контактним способом, який забезпечує високу продуктивність. Одним з недоліків контактного зварювання труб є неможливість застосування неруйнівної дефектоскопії.

Для виконання ремонтних зварних з'єднань сьогодні застосовують аргонодугове зварювання, дугове зварювання та їх комбінування: корінь шва – аргонодугове, перекриття – плавким електродом. Фахівці лабораторій металів (служб) виконують ретельний контроль (візуально-оптичний, ультразвуковий, радіографічний тощо) зварних з'єднань задля оцінювання їх якості [4, 5]. Роботоздатність будь-якого зварного з'єднання залежить від конструкторсько-технологічного процесу його виконання, якості основних і зварювальних матеріалів, кваліфікації зварників та фахівців з неруйнівного контролю, а також температурно-силових умов експлуатації.

Пошкодження кутових зварних з'єднань «штуцер-колектор» і стикових «штуцер-змійовик» є найчастішою причиною аварійності пароперегрівників парових котлів. Зазвичай, у цьому випадку виявляють кільцеві тріщини по зоні термічного впливу чи лінії сплавлення зварного з'єднання (рис. 1). Тріщини виникають унаслідок змінних напружень, спричинених і поздовжніми, і поперечними переміщеннями колектора та змійовиків поверхонь нагрівання під час експлуатації. Головною причиною таких пошкоджень автори [6] вважають значні компенсаційні напруження, що виникають унаслідок температурних розширень елементів системи колектор-змійовики. Відхилення температури окремих змійовиків пароперегрівників від номінального значення та градієнт температур по довжині змійовика призводять до додаткових знакомісних напружень у ділянках приварювання труб до колекторів.

Згідно з [6] у початковий період розпалювання котла (до подачі теплоносія в пароперегрівник) градієнт температури по довжині труб не перевищує  $1000^{\circ}\text{C}/\text{м}$ . Це спричинено тим, що теплопровідність змінюється по довжині змійовиків від гарячих ділянок, розташованих у газопроводі, до необігріваних. Після підведення пари градієнт температури збільшується втричі, оскільки швидкість прогрівання колектора є меншою, ніж змійовиків. З часом градієнт температури знижується, і за досягнення стаціонарного режиму він практично відсутній.

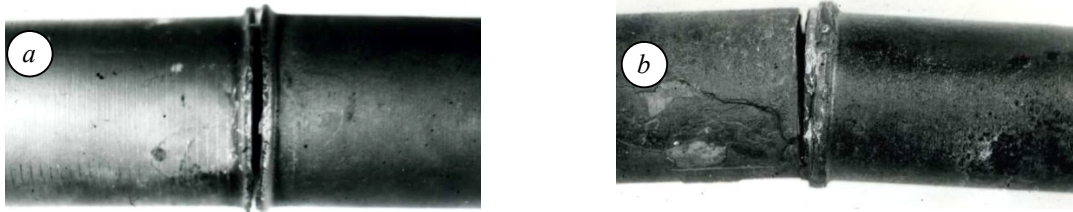
Під час пусків котлів за високих швидкостей прогрівання у вузлах приварювання змійовиків до колекторів виникають напруження, що можуть перевищувати гранично допустимі, які призводять до виникнення пошкоджень. Такі пошкодження, зазвичай, розвиваються за умов малоциклової втоми [6, 7].



**Рис. 1.** Тріщини у кутовому зварному з'єднанні «штуцер-колектор» (а) та у зварному з'єднанні «штуцер-змійовик» (b).

**Fig. 1.** Crack in the angular weld joint «nozzle-collector» (a) and weld join «fitting-coil» (b).

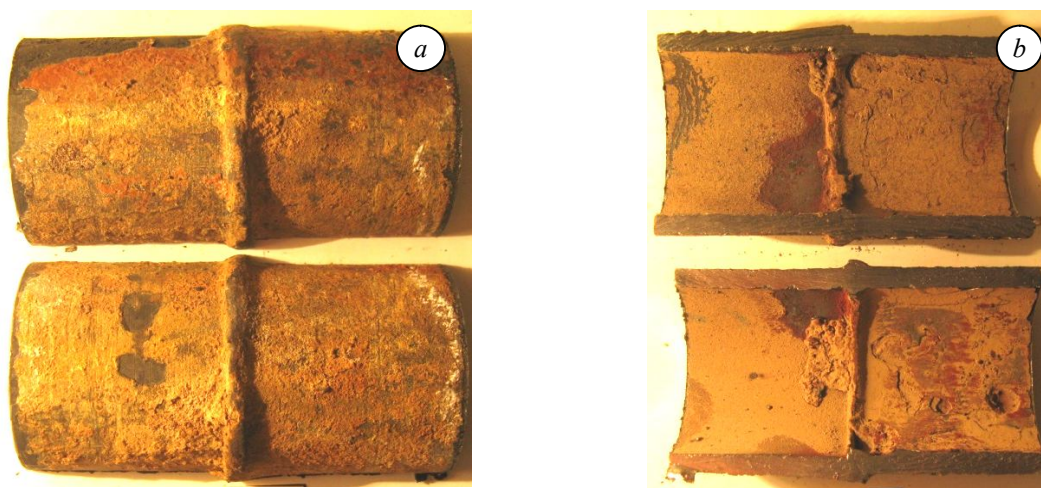
Низька надійність зварних з'єднань змійовиків пароперегрівників, виконаних контактним способом, підтверджується досвідом експлуатації. Незважаючи на задовільні в цілому характеристики міцності таких зварних з'єднань за розтягу, внаслідок наявності концентраторів напружень вони характеризуються заниженою роботоздатністю за дії згинальних навантажень. Пошкодження контактних зварних з'єднань труб зі сталі 12Х1МФ здебільшого фіксують у зоні сплавлення (рис. 2 а), що спричинено, насамперед, знеуглецюванням сталі. Водночас зварні з'єднання з різнорідних сталей (композитні стики) (12Х1МФ+12Х18Н12Т) руйнуються з боку перлітної ділянки (рис. 2 б). Пошкодження мають вигляд поперечних тріщин і локалізуються у місцях із заниженим опором до зародження та поширення тріщини. Внаслідок неоднорідності фізико-механічних властивостей та мікроструктури різних зон зварного з'єднання з різнорідних сталей можливий перерозподіл деформації за циклічного навантаження із локалізацією їх на вузькій ділянці, що призводить до значного зниження довговічності [8, 9].



**Рис. 2.** Тріщини у контактних зварних з'єднаннях: *a* – однорідних сталей (12X1MΦ);  
*b* – різнорідних сталей (12X1MΦ та 12X18H12T).

**Fig. 2.** Cracks in the angular weld joint: *a* – homogeneous steels (12Cr1MoV);  
*b* – heterogeneous steels (12Cr1MoV and 12Cr18Ni12Ti).

Дослідження вирізок ділянок пароперегрівників під час тривалої експлуатації виявили, що зовнішня поверхня труб та композитних контактних зварних з'єднань покрита шаром окалини і відкладень чорно-коричневого кольору, внутрішня – темно сірого і жовто-бурого кольору (рис. 3а), які є наслідком високотемпературного окиснення. На зовнішній поверхні зварних з'єднань дефектів не виявлено. Водночас на внутрішній поверхні простежено відклади у вигляді шару шлаку, що пов'язано з неповним його видаленням під час продувки газом чи прошивки дорном. У процесі експлуатації у цих місцях утворюються налипання, що призводить до погіршення тепловідведення та локального перегрівання металу. Окрім цього, на внутрішній поверхні труб зварних з'єднань виявлено виразки стоянкової корозії, які простежено з боку труби з перлітної сталі 12X1MΦ (рис. 3 б). Діаметр окремих виразок сягає 8 мм, глибина – до 1,7 мм.



**Рис. 3.** Зовнішня (*a*) та внутрішня (*b*) поверхня труби зі зварним з'єднанням сталей 12X1MΦ та 12X18H12T.

**Fig. 3.** External (*a*) and internal (*b*) surface of tube with weld joint 12Cr1MoV and 12Cr18Ni12Ti steels.

Поява таких ділянок зумовлена протіканням електрохімічної корозії, як, в свою чергу, зумовлена виникненням гальванічної пари та підсилюється дією залишкових напружень в околі зварного шва. Гальванічна пара виникає внаслідок контакту різних за електрохімічними характеристиками матеріалами [10]. Структурна неоднорідність зварних з'єднань трубних сталей повною мірою відбивається на електрохімічній гетерогенності поверхні в воденьвмісних середовищах, що, в свою чергу, зумовлює розвиток локальних корозійних процесів і джерел наводнювання [8, 10].

Значна частина контактних зварних з'єднань не відпрацювала визначеного терміну, а технічними рішеннями на ТЕС було з'ясовано необхідність проведення ремонту (переварювання) таких з'єднань чи зміцнення їх дуговим обварюванням плавким електродом.

Головною причиною пошкоджень різнорідних зварних з'єднань автори [8, 9–12] вважають дифузію вуглецю з перлітної сталі в аустенітну, що призводить до виникнення маломіцних

зневуглецьованих прошарків, а також термовтому, спричинену циклічними змінами (у процесі пусків-зупинок котлів) теплових напружень, зумовлених відмінностями коефіцієнтів лінійного розширення зварюваних сталей. У зварних з'єднаннях труб з різнорідних сталей пароперегрівників термічні напруження можуть бути досить значними: на рівні границі текучості і навіть вище. Особливо негативний вплив змінних термодинамічних і механічних напружень на роботоздатність різнорідних зварних з'єднань конвективних пароперегрівників високого тиску (параметри експлуатації:  $p = 25,5$  МПа,  $T = 545^\circ\text{C}$ ). Вихідні колектори з привареними штуцерами виготовляють зі сталі 12Х1МФ, а основну частину поверхонь нагрівання, що омивається вихідними газами, з аустенітної сталі 12Х18Н12Т. Заводські зварні з'єднання різнорідних сталей (12Х1МФ+12Х18Н12Т) виконували контактним способом (рис. 4 а). Внаслідок високих згинальних теплових компенсаційних напружень у цьому вузлі виникали тріщини на відстані  $\sim 1...2$  мм від підсилення зварного шва з боку перлітної труби. Згодом завод удосконалив конструкцію (рис. 4 б), що дало змогу підвищити надійність цього вузла [12].

Для контактних зварних з'єднань з різнорідних сталей, що перебувають в експлуатації, рекомендовано здійснювати ремонтну наплавку ослабленої частини стику. Наплавку здійснюють з попереднім і супутнім підігрівом до температур  $300...350^\circ\text{C}$ . Стоншену і конусну частину труби наплавляють електродами ЦЛ-39 діаметром 2,5 мм, не доходячи до контактної стику. Згодом здійснюють наплавку в два шари електродами ЦЛ-25 діаметром 3 мм, перекриваючи лінію контактної стику в бік труби 12Х18Н12Т. Наплавку також можна виконувати і електродами на нікелевій основі (АНЖР-1) без попереднього та супутнього підігріву [12].

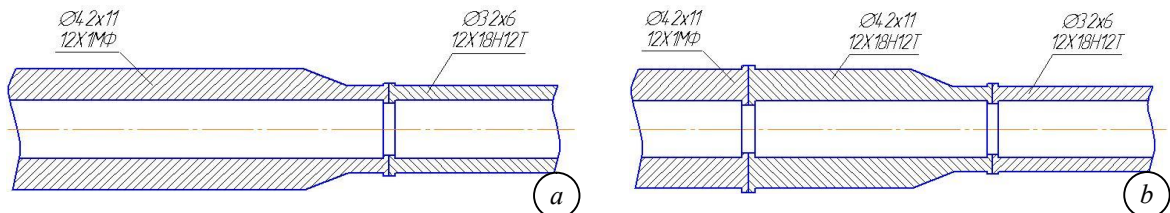


Рис. 4. Зварне з'єднання різнорідних сталей: а – початкова конструкція; б – оновлена конструкція.

Fig. 4. Weld joint heterogeneous steels: a – initial construction; b – new construction.

У цілому пошкодження комбінованих зварних з'єднань труб зі сталей 12Х1МФ і 12Х18Н12Т по зоні термічного впливу в перлітній сталі найчастіше спричинені такими чинниками: високим рівнем розтягувальних післязварювальних напружень, збільшенням зернистості і виділенням вторинних фаз на міжзерних границях, зростанням товщини зневуглецьованого прошарку в результаті дифузії вуглецю з перлітної сталі в аустенітну, підвищеною концентрацією водню [8, 9, 12, 13]. Оскільки перелічені фактори у повній мірі залежать від температури, постійний її контроль є однією зі складових методики прогнозування залишкового ресурсу пароперегрівників. Поряд з прямими методами вимірювання температури металу поверхонь нагрівання котлів суттєвого значення набувають додаткові методи непрямого визначення експлуатаційної температури металу елементів. Зокрема, досліджуючи дифузійний зневуглецьований прошарок зварних з'єднань з різнорідних сталей, оцінюють фактичну інтегральну температуру (з урахуванням відхилень від розрахункової) металу пароперегрівників. Зв'язок між температурою  $T$  та часом  $\tau$ , необхідним для утворення зневуглецьованого прошарку визначеної ширини  $l$ , описується параметричною залежністю

$$p = -\frac{K}{T} + \lg \tau$$

$K$  – стала, що встановлюється експериментально.

Отримавши за високих температур і короткочасних витримок залежність ширини прошарку  $l$  від параметра  $p$ , за фактичною шириною зварного з'єднання, яке реально експлуатувалося, визначають інтегральну температуру. Використовуючи залежність ширини прошарку від параметра  $p$ , за номограмою слід визначити експлуатаційну температуру металу, виходячи із фактичного напрацювання (терміну експлуатації за робочих параметрів) [8].

## ВИСНОВКИ

1. Пошкодження контактних зварних з'єднань зі сталі 12Х1МФ локалізуються по зоні сплавлення, водночас з різнорідних сталей (12Х1МФ + 12Х18Н12Т) – на вузькій біляшовній ділянці металу труби з перлітної сталі. Неповне усунення шлаку призводить до налипання відкладень, звуження внутрішнього перерізу і часткового перегрівання металу труби під час експлуатації, а гетерогенність зварного з'єднання за наявного корозійного середовища – до виразкової корозії.

2. Дифузія вуглецю з металу перлітної труби, а також змінні термомеханічні напруження під час пусків–зупинок парового котла призводять до утворення знеміцнених прошарків та розвитку тріщин у зварних з'єднаннях з різнорідних сталей.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Вайнман А.Б., Жабров А.В., Болтенкова Е.Л. и др. Анализ повреждаемости труб пароперегревателей котлов энергоблоков сверхкритического давления // Энергетика та електрифікація. – 2009 – № 10. – С. 9–25.
2. ТУ 14-3-460-2009 Труби сталеві безшовні для парових котлів та трубопроводів: Замість ТУ 14-3-460-2003. – Дніпропетровськ: ДП "Наук.-дослідний та конструктор.-технол. ін-тут трубної промисловості ім. Я.Ю. Осади", 2009. – 41 с.
3. ДНАОП 0.00-1.08-94 Правила будови і безпечної експлуатації парових і водогрійних котлів. – К.: Основа, 1998. – 592 с.
4. РТМ-1с-89Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте оборудования электростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
5. 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 енерг. підприємств "Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики", 2005. – 76 с.
6. Склярів В.Ф., Гуляев В.А. Диагностическое обеспечение энергетического производства. – К.: Техніка, 1985. – 184 с.
7. Мелехов Р.К., Похмурський В.І. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. – К.: Наукова думка, 2003. – 384 с.
8. Похмурський В.І., Мелехов Р.К., Круцан Г.М., Здановський В.Г. Корозійно-механічне руйнування зварних конструкцій. – К.: Наукова думка, 1995. – 262 с.
9. Viswanathan R., Stringer J. Failure mechanisms of high temperature components in power plants // Journal of Engineering Materials and Technology. – July 2000. – Vol. 122. – N 3. – P. 246–255.
10. Онищак Я.Д., Ріпей І.В., Стащук М.Г., Малик О.М. Визначення розподілу струмів корозії в околі комбінованого зварного з'єднання за умови контакту з середовищем // Энергетика та електрифікація. – 2008. – № 3 (295). – С. 13–17.
11. Гецфрид Э.И., Малыгина А.А. Влияние термоусталости на долговечность разнородных сварных соединений труб пароперегревателей // Эксплуатационная надежность сварных соединений трубопроводов и корпусного оборудования энергетических установок. Под ред. Хромченко Ф.А. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – С. 43–46.
12. Антикайн П.А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.
13. Балицький О., Гарда В., Ріпей І., Хмель Я. Пошкоджувальність колекторів пароперегрівників ТЕС: діагностика та причини їх виникнення // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. – Спец. випуск № 8. – С. 685–689. (Balitskii A., Garda V., Ripey I., Chmiel Ja. The damages HPS superheater collectors: diagnostic and causes their initiations // Physicochemical mechanics of materials. –2010. – Special Issue No 8. – P. 685–689.)