

**Олексій НАРІВСЬКИЙ¹, Сергій БЄЛІКОВ², Мирослав ХОМА³, Богдан ДАЦКО³,
Максим ЖУРАВСЬКИЙ⁴, Степан ШТАЮРА³**

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ УЩІЛЬНЕННЯ ТЕПЛОПЕРЕДАВАЛЬНИХ ТРУБОК В ТРУБНИХ РЕШІТКАХ ТЕПЛООБМІННИКІВ

¹Машинобудівне підприємство ТОВ «Укрспецмаш»
вул. Мурзи, 16, смт. Мангуш, Донецька обл., 87400, Україна. E-mail: amz309@ukr.net

²Національний університет «Запорізька політехніка»
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна

³Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
вул. Наукова, 5, 79060, м. Львів, Україна

⁴ВП «Запорізька АЕС»
вул. Промислова, 133, м. Енергодар, Запорізька обл., 71504, Україна

**Oleksiy NARIVSKYY¹, Sergiy BELIKOV², Myroslav KHOMA³, Bohdan DATSKO³,
Maksym ZHURAVSKYY⁴, Stepan SHTAJURA³**

PROVIDING THE RELIABILITY OF THE SEALS OF HEAT TRANSMISSION TUBES IN THE TUBE LATTICES OF THE HEAT EXCHANGERS

¹Engineering Company Ukrspetsmash
16, Murzi St., 16, Mangush, Donetsk region, 87400, Ukraine. E-mail: amz309@ukr.net

²Zaporizhzhya Polytechnic National University
64, Zhukovsky St., Zaporizhzhya, 69063, Ukraine.

³Karpenko Physico-Mechanical Institute of National Academy of Sciences of Ukraine
5, Naukova St., Lviv, 79060, Ukraine.

⁴Zaporizhzhia NPP
133, Promyslova Sr., Enerгодар, Zaporizhzhya region, 71504, Ukraine.

ABSTRACT

The strength of the bonding of the copper coated layer with the steel tube grid of the gas coolers of the turbogenerator or oil coolers was investigated. In order to increase the reliability of the sealing of copper heat transfer tubes in the tube grilles of gas coolers and oil coolers, it is suggested that they be welded with a coated copper layer and subsequently floured. It is established that during tensile test, the specimens must collapse on the plate layer with a tensile strength of not less than 415 MPa, and after testing for bending through the prism $R = 3$ mm by an angle of 150° , cracks and delamination of metals are inadmissible. Recommendations for reliability and improvement of the operational properties of sealing of heat transfer tubes in tubular lattices with a coated copper layer have been developed. Such recommendations are presented to the Zaporizhzhya NPP. According to these recommendations, Ukrspetsmash LLC has made eight NGOs for Zaporizhzhya NPP, four of which have been operating on the turbine generator since 2019.

KEY WORDS: heat exchanger tube lattice, cladding, sealing of heat transfer tubes in heat exchanger tubes, local corrosion.

ВСТУП

Газоохолоджувачі (ГО) турбогенераторів та холодильники масла (ХМ) трансформаторів, які працюють на атомних, теплових та гідроелектростанціях, контактують з пожежо- та вибухонебезпечними середовищами [1-3]. Адже газоохолоджувачі через воду відводять тепло від водню, яким охолоджують турбогенератори, а холодильники – від мастила, яке охолоджує високовольні трансформатори. Для забезпечення щільності міжтрубного простору теплообмінників, які працюють з небезпечними середовищами, теплообмінні трубки з'єднують електродуговим зварюванням з трубними решітками [4] та розвальцьовують [5]. При цьому

матеріали трубних решіток і теплопередавальних труб повинні добре зварюватися. Решітки газоохолоджувачів і холодильників мастила виробляють переважно із сталі 09Г2С. При використанні теплообмінних трубок з міді або мельхіору використання електродугового зварювання проблематично, оскільки не можна отримати якісні зварні з'єднання. Для цього запропоновано трубні решітки таких теплообмінників плакувати міддю. При зварюванні мідних теплопередавальних трубок теплообмінників з плакованим шаром з міді виникають залишкові напруження в біляшовній зоні, які важко і економічно недоцільно усувати термообробкою. Після розвальцьовування теплообмінних трубок у трубних решітках також утворюються залишкові напруження. Разом ці напруження можуть призвести до розшарування плакованого шару з міді від трубних решіток ГО і ХМ. Це може бути причиною розгерметизації теплопередавальних трубок в трубних решітках та перетоку середовищ, що неприпустимо при експлуатації турбогенераторів і високовольтних трансформаторів на атомних, теплових та гідроелектростанціях. Наприклад, в 2010 році така розгерметизація в охолоджувачі масла типа ОДЦ призвела до серйозної пожежі на високовольтному трансформаторі Бурштинської ТЕС. Тому метою роботи є оцінювання роботоздатності з'єднань плакованого шару з міді зі сталлю 09Г2С, з якої виготовляють трубні решітки ГО і ХМ, та розробка рекомендацій щодо вимог до плакованого шару.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Досліджували зразки зі сталі 09Г2С ГОСТ 5520 плакованої міддю М2 ГОСТ 859. Товщина основного металу 40 mm, а плакованого шару 8 mm. Зразки зроблено за технологією ТОВ «Укрспецмаш» пічним способом. Мідь наплавляли на розвинуту поверхню сталі 09Г2С, яку отримували спеціальною механічною обробкою її поверхні. Механічні випробування на відрив проводили на зразках з товщиною основного металу 40 mm та плакованого – 8 mm за одноосного розтягу. Міцність перехідної зони між основним металом зі сталі 09Г2С і плакованим шаром з міді визначали випробуванням на розрив на зразках двох типів, які відтворювали контакт основного металу з плакованим шаром з боку торцевої поверхні трубних решіток та в місці розвальцьовування теплопередавальних трубок (рис. 1, Б (2:1)). Випробування проводили на машині EU-20. Фрактографічний аналіз зруйнованої поверхні зразків проводили згідно [6]. Металографічні дослідження проводили на скануючому електронному мікроскопі EVO 40XVP із системою мікроаналізу на енергетично-дисперсійному рентгенівському спектрометрі INCA ENERGY 350. Мікротвердість наплавлених зразків визначали на мікротвердомірі ТММ-12. Міцність з'єднання основного металу з плакованим шаром з міді оцінювали за результатами їх згину через призму з R=3 mm на кут 150° (ГОСТ 14080). Випробування проводили на зразках двох типів – уздовж плакованого шару з основним металом та поперек і оцінювали можливість розшарування.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

ХМ призначені для охолодження масла, яке циркулює в масляній системі трансформатора, і конструктивно виконані: однокорпусним, чотирьохходовим по воді, прямотрубним, горизонтального типу (рис. 1). Згідно з проектом у системі охолодження трансформатора ОРЦ-41700/750 встановлено по три ХМ на кожен фазу, а в ТНЦ-1250000/330 – по сім.

Турбогенератор ТВВ-1000-4У3 – це трифазна неявно полюсна електрична машина, що складається з статора і ротора. Для охолодження статора і ротора в турбогенераторі циркулює водень. Тепло від водню відводиться водою, яка циркулює в трубних порожнечах чотирьох ГО (ГО-1000/5453-У3), встановлених вертикально у середині кінцевих частин корпусу турбогенератора (рис. 2).

ГО складається з теплопередавальних трубок із міді з оребренням із алюмінієвого сплаву АД1, які закріплюють у трубних решітках (рис. 3). Після збирання трубних решіток ГО з теплопередавальними трубками та боковими стінками кінці трубок електродуговим зварюванням з'єднують з плакованим мідним шаром трубних решіток (рис. 4).

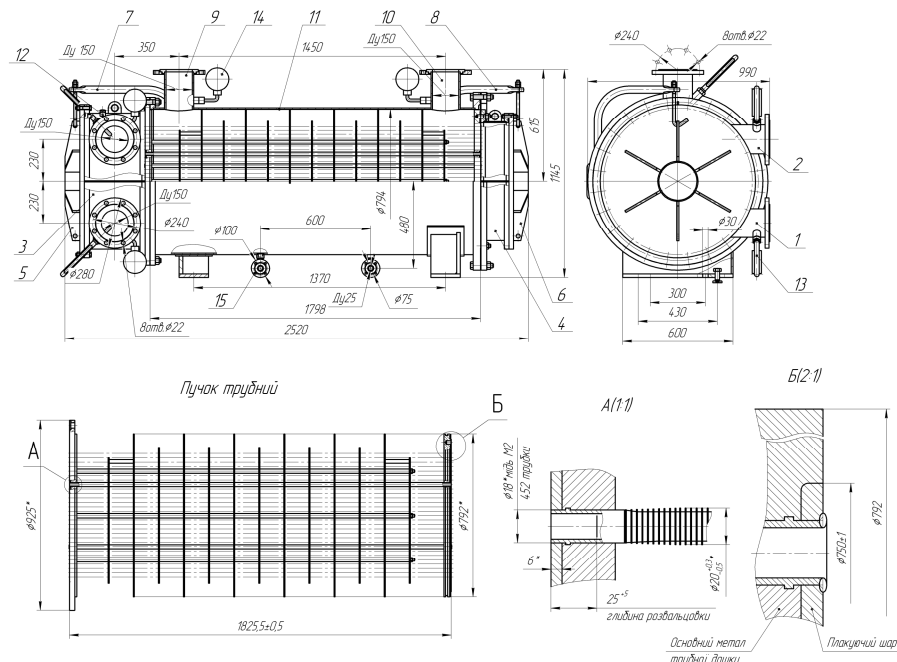


Рис. 1. Зовнішній вигляд і складові частини холодильника масла [3].
Fig. 1. Appearance and components of the oil cooler [3].



Рис. 2. Газоохолоджувач.
Fig. 2. Gas cooler.

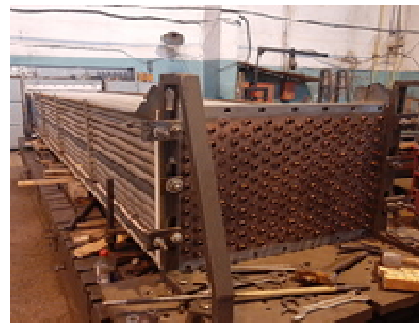


Рис. 3. Трубна решітка газоохолоджувача з трубним пучком на стенді для збирання.
Fig. 3. Tube grill of gas cooler with tube bundle on the stand for cleaning.

При виготовленні теплообмінників якість зварних з'єднань контролювали візуально-оптичним методом та кольоровою дефектоскопією. При цьому поверхневі дефекти у вигляді пор, тріщин тощо, неприпустимі. Посилення зварних швів не регламентується, а глибина провару повинна бути не менша товщини стінки теплообмінних трубок – ≥ 1 mm.

Після обварювання теплообмінних трубок ГО з плакованим шаром міді на трубних решітках (рис. 4) кінці теплообмінних трубок розвальцюються в отворах трубних решіток згідно ГСТУ 3-071 [5]. Якість розвальцювання кінців теплообмінних трубок теплообмінників контролюють каліброваними пробками та мікронутромірами. Після цього трубні пучки ГО збирають з кришкою і нижньою камерою (рис. 2) та проводять гідравлічні випробування для підтвердження міцності та герметичності елементів ГО.

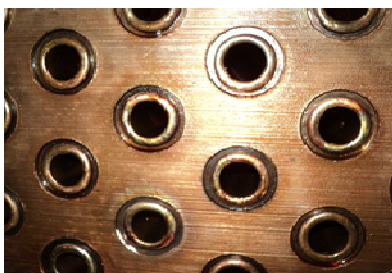


Рис. 4. Обварені електродуговим зварюванням кінці теплопередавальних трубок з плакованою міддю трубною решіткою.
Fig. 4. Arc welded ends of heat transfer tubes with copper clad tube.

Обварювання кінців теплообмінних трубок у трубних решітках теплообмінників з наступним розвальцьовуванням підвищує надійність і довговічність ГО під час їх експлуатації. Загалом надійність зварно-розвальцьованих з'єднань теплопередавальних трубок в отворах трубних решіток ГО буде також залежати від якості плакування сталі 09Г2С міддю. Металографічний аналіз показав, що в плакованому шару відсутні внутрішні дефекти, зокрема пори або порожнини, а сама структура металу щільна з рівномірною (рис. 5 *a*). Взагалі зварно-розвальцьовані з'єднання теплопередавальних трубок в отворах трубних решіток ГО можуть бути якісними, якщо плакований шар міді буде міцно з'єднаний з основним металом. Металографічний аналіз показав, що структура плакованого шару рівномірна і без внутрішніх дефектів, зокрема пор чи порожнин.

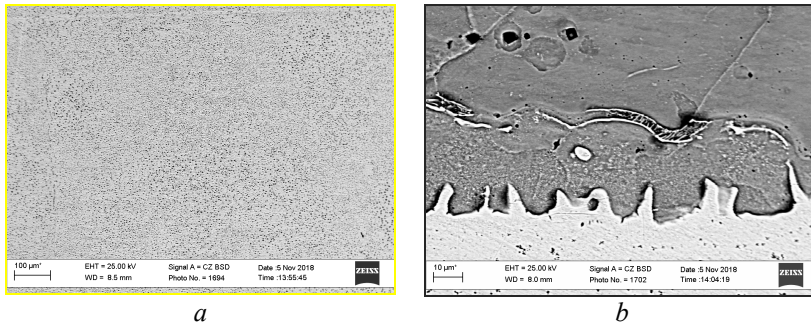


Рис. 5. Мікроструктура плакованого шару з міді (*a*) та перехідної зони між цим шаром і сталлю (*b*) трубної решітки газоохолоджувача.

Fig. 5. Microstructure of the cladding layer of copper (*a*) and the transition zone between the copper and steel (*b*) tube tube gas cooler.

Аналіз перехідної зони між основним металом зі сталі 09Г2С та плакованим шаром міді показав, що розплавлена мідь рівномірно заповнила спеціально створений механічною обробкою рельєф поверхні сталі, утворивши деревовидну структуру (рис. 7 *b*). Механічні випробування зразків зі сталі 09Г2С з мідною наплавкою показали, що руйнування відбувається по шару з міді за напружень 425...450 МПа. Фрактографічний аналіз поверхні зламу [6], показав, що він складається з рівномірно розташованих ямок розміром від 5 до 20 µm (рис. 6), що характерно для руйнування в'язкого матеріалу за пластичної деформації. На поверхні зламу також не прослідковується наявність внутрішніх дефектів міді, які б сприяли руйнуванню металу.

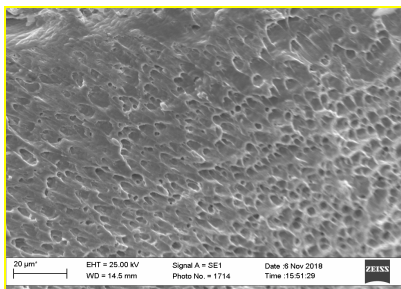


Рис. 6. Поверхня зламу зразка по плакованому шару міді.

Fig. 6. The surface of the fracture of the sample along the clad copper layer.

Руйнування зразків після їх випробувань протікає по шару міді на відстані 200...250 µm від лінії з'єднання основного металу з міддю. Заміри мікротвердості основного металу та наплавленого шару показали, що на віддалі більшій за 260 µm від лінії з'єднання мікротвердість міді змінювалася від 82 до 93 kg/mm² (рис. 7). Однак в районі ділянки, на якій пройшло механічне руйнування, мікротвердість шару міді дорівнює 73 kg/mm². Отже, воно розвивалося в місцях його найменшої мікротвердості. Мікротвердість сталі 09Г2С дорівнювала 115...160 kg/mm². Мінімальна різниця між мікротвердістю сталі та наплавкою міді спостерігається біля лінії сплавлення, що може бути пов'язаним з технологією наплавлення, яка включає попереднє

створення підвищеної рельєфності поверхні сталі і режимом охолодження трубної решітки вагою 90 kg з піччю від 1250 до 350 °C впродовж 24 h.

Про високу міцність з'єднання плакованого шару міді з основним металом із сталі 09Г2С також свідчать результати випробувань зразків на згин: візуальний аналіз максимально деформованих ділянок зразка показав, що на їх поверхні не має ознак тріщин і розшарувань (рис. 8). Їх не виявлено за згину як уздовж, так і впоперек плакованого шару з міді.

Використання плакованого шару міді на поверхні трубних решіток зі сталі 09Г2С запропоновано не лише з метою забезпечення якісних зварних з'єднань з мідними теплопередавальними трубками, але й для забезпечення стійкості трубних решіток в місцях контакту до контактної, щілинної та пітінгової корозії [7, 8]. Внаслідок їх розвитку та

довготривалої вібрації при експлуатації ГО і ХМ можуть зароджуватися і підростати тріщини, що приводитиме до розгерметизації теплообмінних трубок в отворах трубних решіток.

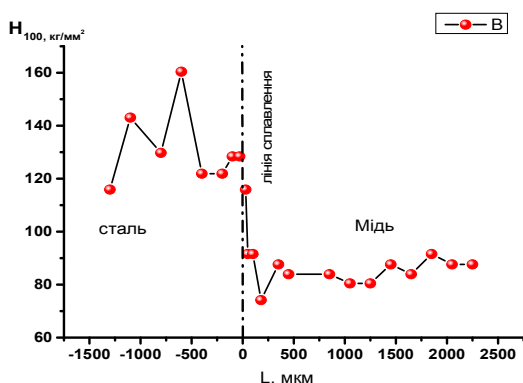


Рис. 7. Мікротвердість сталі з мідним плакованим шаром та перехідної зони між ними.

Fig. 7. Microhardness of steel with copper clad layer and transition zone between them.



Рис. 8. Згин зразка через призму R = 3 mm на кут 150°.

Fig. 8. Bending of the sample through the prism R = 3 mm at an angle of 150°.

ВИСНОВКИ

Запропоновано нове технічне рішення у виготовленні газоохолоджувачів та холодильників масла, яке передбачає підвищення їх надійності та довговічності внаслідок зниження небезпеки розгерметизації з'єднань трубна решітка – теплопередавальні трубки. Воно полягає в наплавлюванні трубних решіток шаром міді та наступному зварюванні його з мідними теплопередавальними трубками та розвальцьовуванням. Для забезпечення якості зварних з'єднань теплообмінних трубок з плакованим шаром з міді на поверхні трубних решіток необхідно забезпечити такі вимоги: при випробуванні на розрив наплавлених зразків руйнування повинно відбуватися по плакованому шару з напруженням відриву не менше 415 МПа; після випробувань на згин через призму R = 3 mm на кут 150° тріщини і розшарування металів неприпустимі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Технічні вимоги та умови постачання «Газоохолоджувачі турбогенератора ТВВ-1000-4У3» 123456.ЭЦ.ГТ.ТТ.68-67 / Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Державне підприємство «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» ВП «Запорізька АЕС». Енергодар, 2017. – С. 22.
2. Технічні умови «Газоохолоджувач ГО-1800/5453-У3 турбогенератора ТВВ-1000-4У3» ТУ У 29.2-31424275-11-2018 / Дата введення з 01.10.018 р. Термін дії без обмежень. – С. 20.
3. Технічні вимоги та умови постачання «Холодильники масляні для трансформаторів ОРЦ-417000/750, та ТНЦ 1250000/330». 151-29-ТВ та УП-УЦ / Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Державне підприємство «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» ВП «Запорізька АЕС». Енергодар, 2020. – 24 с.
4. СОУ МПП 71.120-217:2009 «Посудини та апарати сталеві зварні. Загальні технічні умови». Міністерство промислової політики України, Київ, 2009. – С. 327.
5. ГСТУ 3-071-2004 «Апарати кожухотрубчасті теплообмінні та повітряного охолодження» Кріплення труб у трубних решітках. Міністерство промислової політики України. Київ. – 2004. – С. 45.
6. Справочник. Фрактография и справочник фрактограмм / Перевод с англ. Е.А. Шура под редакцией М.Л. Берштейна. – М.: Металлургия, 1982. – 488 с.
7. Нарівський О.Е. Кінетика корозійних процесів та швидкість пітингування сплаву 06ХН28МДТ у слабкоокислих хлоридовмісних середовищах // Наукові нотатки. – 2011. – Вип. 31. – С. 214-220.
8. Закономірності і механізми локальної корозії корозійнотривких сталей і сплаву аустенітного класу для ємнісної та теплообмінної апаратури: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук: спеціальність 05.17.14 Хімічний опір матеріалів та захист від корозії / О.Е. Нарівський, Львів, 2015. – 42 с.