

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Сиренко Тетяна Олександрівна

УДК 621.791.052.+519.6+539.434.376+620

**УДОСКОНАЛЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ РЕМОНТУ
ПОШКОДЖЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПАРОПРОВІДІВ ТЕПЛОВИХ
ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**

Спеціальність 05.03.06
Зварювання та споріднені процеси і технології

АВТОРЕФЕРАТ
на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва» Української інженерно-педагогічної академії Міністерства освіти і науки України (м. Харків).

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Дмитрик Віталій Володимирович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
(м. Харків),
завідувач кафедри «Зварювання».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Савицький Михайло Михайлович,
Інститут електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України (м. Київ),
керівник відділу «Фізико-металургійних
процесів зварювання середньолегованих
високоміцних сталей»;

доктор технічних наук, професор
Кузнецов Валерій Дмитрович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут» (м. Київ),
завідувач кафедри «Інженерія поверхні».

Захист відбудеться "12" жовтня 2015 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.02 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Міністерство освіти і науки України, за адресою: 54025, м. Миколаїв, пр. Героїв Сталінграда, 9, ауд. 360.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Міністерство освіти і науки України, за адресою: 54025, м. Миколаїв, пр. Героїв Сталінграда, 9.

Автореферат розісланий "9" вересня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 38.060.02
доктор технічних наук, професор

Л.І. Коростильов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Виявлення особливостей фізико-хімічних процесів, що призводять до деградації металу зварних з'єднань в умовах довготривалої експлуатації та врахування негативних факторів впливу необхідних для удосконалення зварювальної технології ремонту паропроводів. Використання відремонтованих за удосконаленою технологією зварних з'єднань з відповідною структурою і властивостями дозволить збільшити термін експлуатації паропроводів та отримати значний економічний ефект. Тому тема дисертації є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами

Робота виконувалась відповідно до тематичних планів держбюджетних та госпдоговірних робіт: Державної науково-технічної програми 06.03 «Створення конкурентоздатних засобів імітаційного моделювання складних систем, підвищення їхньої надійності й ефективності» Міністерства України з питань науки і технології; розробкою проекту 4/006 К-95 «Стратегічні напрямки енергозберігаючих і ресурсозберігаючих технологій», а також НДР «Дослідження і оптимізація процесів отримання заготовок на основі маловідходних, безвідходних та екологічно чистих технологій», держреєстрація № 0103U003754, 2008р.

Мета і завдання дослідження

Метою дисертаційної роботи є розробки технології зварювального ремонту пошкоджених елементів паропровідних систем для збільшення терміну їх експлуатації.

Для досягнення цієї мети в роботі були поставлені та вирішені такі задачі:

- виявити механізм деградації металу зварних з'єднань паропроводів із теплостійких Cr-Mo-V перлітних сталей, що довготривало експлуатуються в умовах повзучості та малоциклової втоми;
- встановити особливості фізико-хімічних процесів, які зумовлюють структурні перетворення в металі зварних з'єднань при їх довготривалій експлуатації;
- встановити зв'язок між структурою зварних з'єднань і пошкоджуваністю їх металу в умовах довготривалої експлуатації зварних з'єднань;
- на основі результатів досліджень удосконалити технологію зварювального ремонту пошкоджених елементів паропроводів та забезпечили збільшення ресурсу їх експлуатації.

Об'єкт дослідження

Зварювальна технологія ремонту зношених елементів паропровідних систем теплових електростанцій.

Предмет дослідження

Фізико-хімічні процеси і структурні перетворення, які проходять у відремонтованих елементах паропровідних систем із *Cr-Mo-V* сталей при їх довготривалій експлуатації.

Методи дослідження

При виконанні роботи застосовувалися сучасні методи фізичних досліджень і випробувань. Вирішення поставлених у роботі задач виконувалося на основі положень теорії зварювальних процесів, фізичної хімії, фізики металів, металознавства, кристалографії та методів прикладної математики.

Вивчення мікроструктури проводилося шляхом використання світлового мікроскопа *NEOPHOT* – 22. Рентгеноструктурний аналіз виконувався з допомогою дифрактометра фірми *PHILIPS* в кобальтовому α - випромінюванні при $U = 3$ кВ та $I = 20$ мА. Мікрорентгеноспектральний аналіз проводився на мікроаналізаторі фірми *APL*. Статистична обробка зображень мікроструктур виконувалася з допомогою комп'ютерної програми *Image J*. Весь комплекс досліджень на зразках проводився на підставі відповідної нормативної документації.

Для експериментального визначення температур використовувалися хромельальюмелеві, платино-платинородієві, вольфрамомолібденові термопари, осцилографи та оптичні пірометри.

Наукова новизна роботи полягає у встановлених закономірностях деградації металу зварних з'єднань паропроводів при тривалій експлуатації, впливу хімічного складу і структури металу шва та зони термічного впливу (ЗТВ), які визначають шляхи вдосконалення технології ремонту пошкоджених елементів.

Серед основних розробок, поданих у дисертації новими для науки й практики є такі:

1. Уперше показано, що механізм деградації металу зварних з'єднань паропроводів із *Cr-Mo-V* теплостійких сталей після напрацювання більш 200000 годин включає фізико-хімічні процеси, які проходять у такій послідовності: 1) дифузійне переміщення атомів хрому і молібдену; 2) сегрегація хрому і молібдену в приграничних зонах α -фази; 3) карбідні реакції; 4) коагуляція карбідів; 5) утворення мікропор і мікротріщин, а також перетворення їх на макротріщини. При температурі 545...565°C і напруженнях 20...25 МПа по границях зерен α -фази структури зварних з'єднань коагулюють переважно карбіди $M_{23}C_6$, вміст яких складає 80...85 % в загальній кількості фаз. Інші карбіди VC і Mo_2C є високодисперсними і стабільними. Коагуляції $Cr_{23}C_6$ сприяє сегрегація хрому при експлуатації.

2. Уперше показано, що руйнуванню зварних з'єднань паропроводів, які напрацювали більш 270 000 годин, в умовах повзучості сприяє наявність на ділянках сплавлення і перегріву відманштеттових структур, а також глобуляризованого перліту на ділянці неповної перекристалізації ЗТВ. Установлено, що при експлуатації зварних з'єднань понад 270 000 годин критичний розмір пор, від якого в подальшому залежить

інтенсивність їх розвитку, складає 0,03 – 0,7 мкм. Впровадження нової зварювальної технології забезпечує зменшення інтенсивності утворення пор повзучості в порівнянні з відомими технологіями на 25 – 30 %.

3. Вперше запропоновано з урахуванням даних моделювання термічного циклу новий підхід для зварювання широких (більше 30 мм) та глибоких (більше 30 мм) виробок, який передбачає наплавлення спочатку двошарових облицювальних валиків та наступну послідовність виконання валиків (висотою 5 – 8 мм і шириною 14 – 18 мм) до повної заварки виборки.

4. Удосконалено технологію зварювання, що полягає у розробці режимів виконання ремонтних робіт механізованим зварюванням в середовищі $\text{Ar} + \text{CO}_2$ елементів паропроводів з товщиною стінки більше 50 мм, що відрізняються від відомих, застосуванням зварювання на погонній енергії 1,2 – 1,5 МДж/м, та включають накладання валиків в три шари. Перший шар виконується на силі струму 300 – 320 А, другий – 270 – 300 А і третій – 320 – 350 А, що забезпечує відсутність формування на ділянках сплавлення, перегріву і неповної перекристалізації ЗТВ браковочних структур.

Практичне значення отриманих результатів

Вивчення закономірностей деградації елементів паропровідних систем покладено в основу визначення параметрів режиму зварювального ремонту з отриманням структури з'єднань з більш високою стійкістю проти деградації металу на ділянках перегріву і неповної перекристалізації ЗТВ. На підставі досліджень розроблено зварювальну технологію ремонту пошкоджених елементів паропровідних систем із Cr-Mo-V – теплостійких перлітних сталей з використанням механізованого зварювання в середовищі $\text{Ar} - 25\% \text{CO}_2$.

Використання рекомендованої зварювальної технології ремонту пошкоджених елементів паропровідних систем дозволило збільшити ресурс експлуатації зварних з'єднань приблизно на 20 % порівняно з аналогічними зварними з'єднаннями, відремонтованими за штатними технологіями.

Результати виконаних досліджень доповнили навчальні курси «Теорія зварювальних процесів», «Металознавство і термічна обробка зварних з'єднань», «Металографія зварних з'єднань», «Технологія металів», які викладаються студентам у Національному технічному університеті «ХПІ», а також в Українській інженерно-педагогічній академії та Харківському машинобудівному коледжі.

Результати виконання цієї роботи було апробовано і рекомендовано до впровадження на підприємствах ВАТ «Турбоатом», ВАТ «Харківський завод електромонтажних виробів» теплової електростанції № 3 (м. Харків) та приватному підприємстві ФПЛ «Кравець» та ін.

Очікуваний економічний ефект від впровадження результатів роботи становить близько 35 тис.ум.од.

Особистий внесок здобувача Наукові і практичні результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, одержані автором самостійно або в співавторстві. Відповідно у публікаціях автору належать:

- проведення експериментальних досліджень, аналіз структури, трактування зв'язку тепловкладення в основний метал із структурою зварних з'єднань [1,2,3,6,7];
- удосконалення технології дугового механізованого зварювання в суміші газів $\text{CO}_2 + \text{Ar}$ теплостійких перлітних сталей [4];
- робота без співавторів [5].

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися на Міжнародних конференціях та семінарах: «Оборудование и технология термической обработки металлов и сплавов», м. Харків, ННЦ ХФТІ, 2005р.; «Повышение надежности сварных соединений при монтаже и ремонте технологического оборудования в энергетике», м. Київ, ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2005р.; на Міжнародному Конгресі «Оборудование и технология термической обработки металлов и сплавов», м. Харків, ННЦ ХФТІ, 2008р.; Міжнародній науково-технічній конференції «Ресурс, надежность и эффективность использования энергетического оборудования», м. Харків, ІПМАШ НАН України, 2012р.; на II,III,IV,V, VI Всеукраїнських науково-технічних конференціях молодих вчених і спеціалістів «Сварка и родственные технологии», м. Київ, ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011pp.; на I та II Всеукраїнських науково-технічних конференціях студентів, аспірантів і молодих вчених «Сварка, родственные процессы и технологии», м. Миколаїв, Національний університет кораблебудування 2008, 2012pp.; на XX Міжнародних науково-практичних конференціях «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье», м. Харків, НТУ «ХПІ», 2012 - 2014pp.; на науково-технічних конференціях і семінарах професорсько-викладацького складу УПА (2004 - 2010pp.).

У повному обсязі дисертацію було заслухано на розширених семінарах кафедри зварювання Національного технічного університету «ХПІ» та кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва Української інженерно-педагогічної академії де її було схвалено та рекомендовано до захисту.

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 7 роботах, які відповідають вимогам ДАК. Одинадцять робіт опубліковано в збірниках наукових праць в матеріалах Міжнародних, всеукраїнських конференцій та Міжнародного конгресу.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 5-ти розділів основного тексту, загальних висновків, списку літератури із 128 джерел та доповнень. Повний обсяг дисертації становить 195 сторінок, у тому числі 165 сторінок основного тексту, 82 рисунків, 18 таблиць, 7 додатків на 18 сторінках, списку використаних джерел із 128 найменувань на 12 сторінках.

Основний зміст роботи

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі досліджень, визначено наукову новизну і практичну цінність одержаних результатів, вказано на зв'язок дисертації з науковою тематикою, державними та галузевими планами і програмами. Визначено особистий внесок у вирішення науково-технічної задачі – удосконалення зварювальної технології ремонту пошкоджених паропроводів ТЕС із теплостійких перлітних сталей. Також наведено дані про апробацію матеріалу дисертації та кількість публікацій за її тематикою.

У першому розділі виконано аналіз літературних джерел за напрямками досліджень вітчизняних і закордонних вчених з питань технологій дугового зварювання теплостійких $Cr - Mo - V$ перлітних сталей, а також ремонтних зварювальних технологій пошкоджених елементів паропроводів з цих сталей. Розглянуто також особливості пошкоджуваності зварних з'єднань паропроводів у процесі їх довготривалої експлуатації в умовах повзучості і малоциклової втоми.

На підставі аналізу особливостей пошкоджуваності, а також відомих технологій зварювання та зварювальних ремонтних технологій зношених елементів паропровідних систем обґрунтовано доцільність і запропоновано удосконалену зварювальну технологію їх ремонту. Така технологія включала механічне зварювання у суміші захисних газів $CO_2 + Ar$.

У другому розділі наведено загальну методику роботи, методи досліджень та технічні характеристики обладнання, що використовувалося в роботі. Дослідження структури, властивостей та пошкоджуваності зварних з'єднань виконувалося на зразках, виготовлених за удосконаленою зварювальною технологією їх ремонту, і на аналогічних зразках, виконаних за відповідними штатними технологіями.

Для досліджень використовувалися методи: мікроструктурний, електронно-мікроскопічний та мікрорентгеноспектральний. Повзучість та довготривалу міцність визначали на стандартних зразках за допомогою установок АИМА – 5 - 2 та ИП-4М. Вивчення механічних властивостей (мікротвердість, міцність, довговічність та ін.) виконувалося шляхом використання сучасного обладнання та засобів.

Третій розділ присвячений дослідженню фізико-хімічних процесів, які відбуваються в металі зварних з'єднань із $Cr - Mo - V$ теплостійких перлітних сталей у процесі їх довготривалої експлуатації в умовах повзучості та малоциклової втоми. Встановлено, що в металі паропроводів структурні зміни і пошкоджуваність зумовлені фізико-хімічними процесами, які в ньому проходять.

Дифузійну рухливість атомів Cr та Mo в кристалах α -фази в умовах повзучості розглядали на прикладі її зв'язку з вакансійним механізмом. Це дозволило нестійку конфігурацію розглядати як активізований ефект обміну місцями між вакансією та атомом, що найближче до неї знаходиться. Встановили, що енергія активації перескоку вакансії, як відноситься до одного атому, складає близько $\frac{1}{2}$ енергії кристалічної ґратки, а ентропія

активації, що визначається зміною частоти коливань атомів, є також відповідно незначною.

На підставі положень кристалографії та з урахуванням даних про дифузійні процеси і пересування дислокацій вивчали особливості твердо-фазних карбідних реакцій $M_3C \rightarrow M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6 \rightarrow M_6C$.

Встановили, що підвищення концентрації хрому в приграничних зонах α -фази (близько 3 %) сприяє проходженню реакції $M_3C \rightarrow M_7C_3$. У процесі цього перетворення розташування сусідніх (найближчих) атомів повністю порушується. Створюється певний тип ґратки зі зміненою координацією.

Збільшення рівня сегрегації атомів Cr і Mo у приграничних зонах зерен α -фази та на їх границях, рис.1, забезпечує переведення карбідів в активований стан. Відповідно рівень активованого стану карбідів, що знаходяться на тілі зерен α -фази, є значно меншим.

Встановили, що реакції $M_3C \rightarrow M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6 \rightarrow M_6C$ найбільш інтенсивно проходять по границях зерен α -фази, що значною мірою залежить від рівня сегрегації хрому і молібдену, локалізованих в зоні реакції, рис. 2.

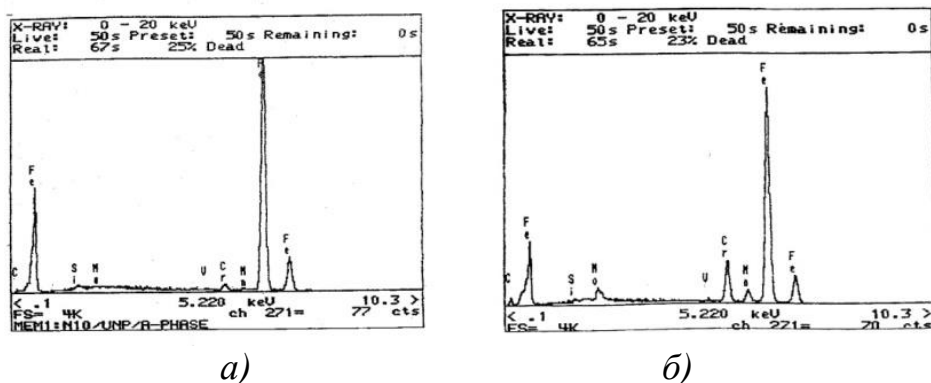


Рис. 1. Спектр зерен α -фази ділянки неповної перекристалізації зони термічного впливу зварних з'єднань із сталі 12X1M1Ф; вихідний стан (а) та після напрацювання 190 000 годин (б)

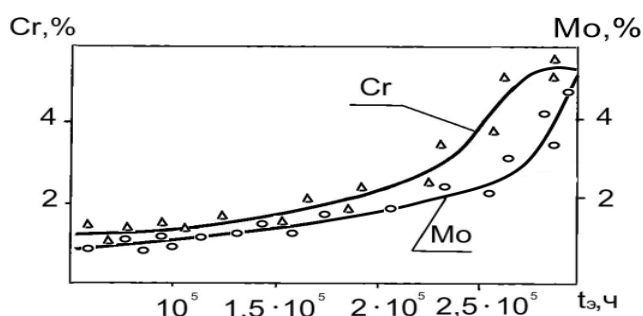


Рис. 2. Залежність складу Cr і Mo в приграничних зонах α -фази від терміну експлуатації

Взявши до уваги зв'язок карбідних реакцій з локальною сегрегацією Cr і Mo, виявили як змінюється кількість фаз у процесі експлуатації, рис. 3. Встановили, що після напрацювання зварних з'єднань більше 270 000 годин основними карбідами в сталях 12X1M1Ф і 15X1M1Ф є карбіди $M_{23}C_6$, VC і Mo_2C . Спостерігали також утворення нових карбідів VC. Виявили, що вміст Mo в карбіді $M_{23}C_6$ становить близько 12%.

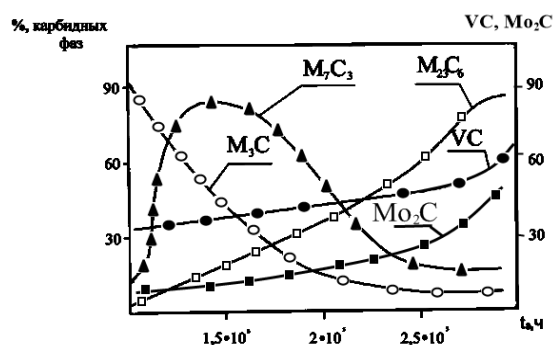


Рис. 3. Зміна розподілу карбідних фаз в структурі ділянки неповної перекристалізації зони термічного впливу зварних з'єднань від тривалості їх нагрівання

Встановили, що при нагріванні зварних з'єднань понад 276 000 годин кількість карбідних фаз $M_{23}C_6$ на границях зерен α -фази складає понад 90 %. Коагуляція таких фаз, в тому числі і шляхом коалесценції, забезпечувала утворення із карбідних фаз ланцюжків, що мали елементи суцільності, рис. 4.



Рис. 4. Карбіди $M_{23}C_6$ по границях зерен α -фази, стрілки; $\times 5000$

Встановили, що швидкість реакцій $M_3C \rightarrow M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6 \rightarrow M_6C$ залежить від частоти обміну атомів місцями, що зумовлено локальною сегрегацією хрому і молібдену в зоні, де відбуваються реакції, і щільності дислокацій, які накопичилися внаслідок пластичного деформування. Перелічені ефекти підсумково приводять до збільшення внутрішньої і міжфазової (поверхневої) енергій. При дослідженні продуктів реакції (нових карбідних фаз), що утворилися, брали до уваги природу границь фаз і швидкість дифузії через фази, яка залежить від коефіцієнтів самодифузії на їх поверхні, рис. 5.

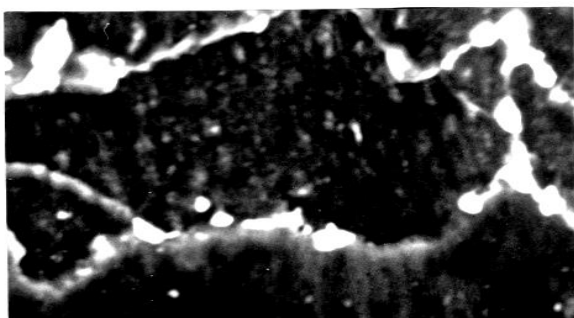


Рис. 5. Світлі виділення карбідів $M_{23}C_6$ по границях зерен α -фази на ділянці перегріву зони термічного впливу зварних з'єднань із сталі 12Х1М1Ф; $\times 4500$

Встановили, що швидкість карбідних реакцій $M_3C \rightarrow M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6 \rightarrow M_6C$ також залежить: 1) від дифузійної рухливості атомів у кристалі, які призводять до утворення зон сегрегацій; 2) від роботи, виконаної для зародження нової фази, що визначається різницею поверхневих енергій контактуючих фаз і зміною вільної об'ємної енергії при структурних перетвореннях.

У четвертому розділі наведено структурні зміни і пошкоджуваність зварних з'єднань паропроводів у процесі їх довготривалої експлуатації в умовах повзучості і малоциклової втоми.

Вивчення особливостей фізико-хімічних процесів, які проходять в зварних з'єднаннях, було доцільним для підвищення стабільності їх структури. Встановили, що швидкість карбідних реакцій залежить від інтенсивності утворення зон сегрегацій, які залежать від дифузійної рухливості атомів хрому і молібдену. Ефект зниження концентрації наведених елементів в таких зонах сприяє зменшенню швидкості карбідних реакцій і їх коагуляції, яка найбільш інтенсивно проходить на границях зерен α -фази.

Пошкоджуваність та руйнування елементів паропровідного тракту відбувається здебільшого за крихким механізмом, де збільшена частка крихкої складової руйнування за границями зерен. Здебільшого там знаходяться коагулюючі карбіди $M_{23}C_6$, які викликають зменшення сил міжатомних зв'язків.

Встановлено, що в умовах напрацювання зварних з'єднань понад 200 000 годин структура їх металу змінюється: 1) вихідна структура ділянок зони термічного впливу, а також наплавленого та основного металу перетворюється у ферито-карбідні суміші, які відповідно відрізняються за своєю будовою; 2) по границях зерен α -фази коагулюють карбіди Fe_3C , здебільшого $M_{23}C_6$; 3) ліквідуються (локально) ділянки границь зерен; 4) відбувається (локально) відходження границь зерен від коагулюючих карбідів. Одночасно збільшується відпускна (теплова) крихкість металу зварних з'єднань, яка характеризується такими ознаками: 1) більшим рівнем травлення границь зерен; 2) збільшенням складової розвитку тріщин за границями зерен в крихкому механізмі руйнування; 3) зменшенням (на 10 – 15 %) короточасних механічних властивостей, в т.ч. ударної в'язкості на 30 – 35 %; 4) збільшенням схильності сталі до крихкого руйнування.

Теплове окрихчування, яке викликає у зварних з'єднаннях відпускну крихкість, зумовлено довготривалістю теплової дії та навантаженням на зварні з'єднання. Встановили, що така крихкість металу зварних з'єднань при їх напрацюванні понад 270 000 годин не буде зворотною, тобто не усувається термічною обробкою. Крихкість зумовлена наявністю зон сегрегацій, а також наявністю коагулюючих карбідів на границях зерен α -фази, рис. 6.

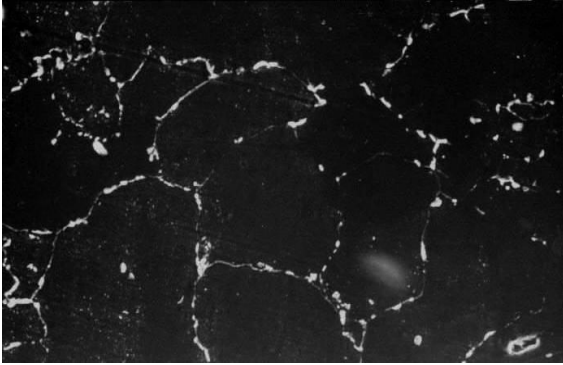


Рис. 6. Розподіл карбідів $M_{23}C_6$ по границях зерен α -фази в зварному з'єднанні паропровода гострої пари із сталі 12X1M1Ф після напрацювання 276637 годин; x2000

В умовах довготривалої експлуатації зварних з'єднань зерногранична сегрегація легуючих та примісних елементів утворюється внаслідок спрямованого їх дифузійного руху, який зумовлено градієнтами хімічних потенціалів елементів. Встановили, що з найбільшою інтенсивністю фізико-хімічні процеси проходять на ділянці неповної перекристалізації зони термічного впливу зварних з'єднань, що забезпечується відповідно найбільшою структурною неоднорідністю цієї ділянки.

Встановили, що інтенсивність фізико-хімічних процесів значною мірою залежить від вихідної структури зварних з'єднань. Наприклад, після напрацювання зварних з'єднань понад 270 000 годин їх пошкоджуваність за механізмами втоми та повзучості на ділянках сплавлення та перегріву зони термічного впливу значно підвищується, рис. 7.



Рис. 7. Тріщина втоми, що розвивається по відманштеттовій структурі ділянки перегріву зони термічного впливу сталі 15X1M1Ф; x100.

Встановили, що на ділянці перегріву зони термічного впливу зварних з'єднань (сталь 15X1M1Ф) можуть локально утворюватися як великі зерна (3 - 5 бал, ГОСТ 5639-82), так і відманштеттовий ферит. Виявили, що карбідні фази VC і Mo_2C являються стійкими і не коагулюють при напрацюванні зварних з'єднань понад 270 000 годин. Досягнення рівномірного розподілення карбідів VC і Mo_2C по тілу та по границях зерен α -фази є доцільним для ефективного загальмування дислокацій, які пересуваються шляхом ковзання. Саме таке рівномірне розподілення карбідів значно зменшує ефект полігонізації зерен α -фази, що сприяє зниженню рівня пошкоджуваності зварних з'єднань. Для збільшення стабільності структури ділянки перегріву доцільно мати його троститну або сорбітну структуру без відманштеттових складових, з рівномірно розподіленими по тілу їх зерен

карбідами VC і Mo₂C. Отримання такої структури можливо шляхом використання оптимізованого зварювального нагрівання при виготовленні з'єднань, що дозволить відповідно зменшити їх пошкоджуваність, рис. 8.

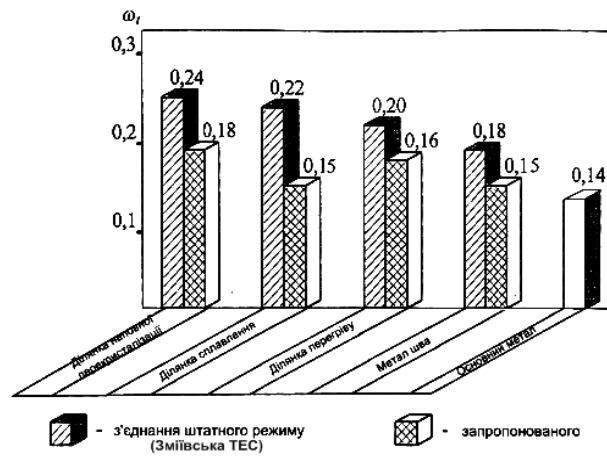


Рис. 8. Діаграма пошкоджуваності структур зварних з'єднань паропроводів із сталі 12Х1МФ зміївської теплоелектростанції. ω_t – ступінь пошкоджуваності до моменту напрацювання 276637 годин

Встановили, що пори повзучості як основний ефект пошкоджуваності зварних з'єднань, що довготривало експлуатуються, зароджуються і розвиваються нерівномірно. Їх щільність у структурі зварних з'єднань, ділянки зони термічного впливу, метал шва й основний метал, суттєво відрізняється, рис. 9.

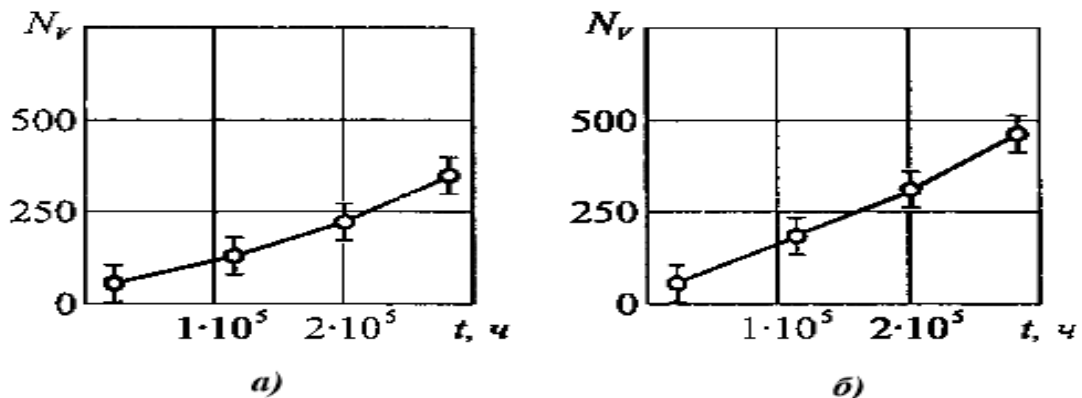


Рис. 9. Залежність числа пор N_v на 1 мм² від тривалості напрацювання зварних з'єднань зі сталі 12Х1М1Ф при $T_p = 545^\circ\text{C}$; $\sigma_p = 25,5\text{МПа}$: метал шва (а); ділянка сплавлення (б)

Визначали залежність швидкості утворення пор, які активуються від температури і напруження процесу

$$V_3 = \frac{\partial N_v}{\partial t} = A_3 \sigma^n \exp\left[-\frac{E_A}{RT}\right],$$

де N_v – кількість пор, які зародилися в процесі повзучості протягом визначеного часу t ; A_3 – коефіцієнт активації; σ – робоче напруження; E_A – енергія активації; n – коефіцієнт, що визначається залежністю швидкості зародження пор від умов експлуатації елементів паропроводів; R – універсальна газова складова; T – температура.

Сферична й еліптична форми зароджуваних пор, є типовими для зварних з'єднань паропроводів, які довготривало експлуатуються в умовах повзучості та малоциклової втоми. Встановили, що об'єм критичного зародка пори $V_{кр}$ залежить від кута змочування виділенням (карбідам) границі зерна

$$V_{кр} = 8\gamma_{1B} \frac{F_v}{\sigma_n^3},$$

де F_v – 0,645 – коефіцієнт форми пори, який визначається експериментально; $\gamma_{1B} = 1,1$ Дж/м³ – поверхнева енергія на границі розділу зерна з виділенням; σ_n – напруження, що забезпечує утворення пори.

Визначили критичний розмір пор, які зародилися, що склав 0,03 - 0,07 мкм. Отримані дані відрізняються від даних Ф.А. Хромченко і Т.Г. Березіної, де розмір аналогічних пор складав 0,05 - 0,1 мкм.

Встановили, що напрацювання зварних з'єднань до 170 000 годин відповідає початковій стадії утворення пор повзучості. При напрацюванні понад 170 000 годин розміри пор збільшуються до 2 - 5 мкм. Їх щільність зростає до 1000 пор/мм². При напрацюванні зварних з'єднань понад 270 000 годин їх розміри збільшуються до 7 мкм, а форма стає видовженою. Відбувається злиття пор й утворення ланцюжків пор по границях зерен, а також поява мікротріщин, що перетворюються в макротріщини.

Зародження пор повзучості відбувається переважно біля карбідних фаз, що коагулюють на границях двох, а частіше трьох зерен.

Виявлення пор у металі зварних з'єднань дозволило з більшою точністю виконувати вибирання пошкодженого металу для наступного його заварювання.

П'ятий розділ присвячено удосконаленню зварювальної технології ремонту елементів паропроводів із Cr – Mo – V теплостійких перлітних сталей.

Встановили, що тріщини після напрацювання понад 270 000 годин розвиваються переважно на ділянках сплавлення, неповної перекристалізації, рідше на ділянці перегріву зони термічного впливу зварних з'єднань. Тріщини, що зародилися на ділянці неповної перекристалізації, переважно і

розвиваються на цій ділянці. Рідше переходять на ділянку нормалізації і старіння. На відміну тріщини, що зародилися на ділянці сплавлення, можуть переходити на ділянку перегріву або у метал шва.

Наявність значної структурної, хімічної та механічної неоднорідності металу ділянок сплавлення, перегріву та неповної перекристалізації зони термічного впливу зварних з'єднань сприяє розвитку тріщин повзучості. На ділянці сплавлення можна показати наявність локально згрупованих збільшених зерен структурно вільного фериту (2 - 3 бали, ГОСТ 5639-82), а на ділянці перегріву може утворюватися структура відманштеттового фериту, див. рис. 7.

На ділянці неповної перекристалізації нові продукти розпаду аустеніту можуть являти, собою перліт або мартенсит. Знеміцнення металу цієї ділянки при напрацюванні зварних з'єднань понад 270 000 годин може складати від 5 до 30%.

Встановили, що при довготривалій експлуатації зварних з'єднань в умовах повзучості фізико-хімічні процеси найбільш інтенсивно відбуваються на ділянках неповної перекристалізації, сплавлення і перегріву зони термічного впливу. Ефектом таких процесів є деградація структури і властивостей металу, яку спричиняють такі фактори: 1) утворення приграничних зон у зернах α -фази зі збільшеною концентрацією хрому і молібдену; 2) коагуляція карбідних фаз по довжині (здебільшого $M_{23}C_6$), див. рис. 4, та утворення із таких зерен ланцюжків, що мають елементи суцільності; 3) відхід границь зерен від коагулюючих карбідів $M_{23}C_6$; 4) локальна ліквідація границь зерен α -фази.

Запропонували пошкоджуваність металу зварних з'єднань паропроводів класифікувати за чотиристадійною системою. На 1-й стадії відбуваються фізико-хімічні процеси: дифузія хрому і молібдену із глибини зерен α -фази до їх границь; рух дислокацій шляхом ковзання і переповзання. Саме такі процеси зумовлюють структурні перетворення, які проходять на 2-й стадії: коагуляція карбідних фаз переважно на границях α -фази; відхід границь зерен від коагулюючих карбідних фаз; ліквідація границь зерен; утворення субзеренної структури (полігонізації) зерен α -фази. На 3-й стадії відбувається процес зародження і розвинення мікропор повзучості розміром приблизно від 0,03 до 0,7 - 1,0 мкм. На 4-й стадії шляхом злиття утворюються розгалуженні мікропори розміром 1 - 4 мкм, як одиничні, так і згруповані. Мікропори розвиваються в мікротріщини розміром близько 2 - 7 мкм, а потім в макротріщини.

Встановили, що пошкоджуваність металу зварних з'єднань паропроводів, які довготривало експлуатуються, переважно має крихкий характер і розвивається по границях зерен. Водночас тіло зерен α -фази пошкоджується одиничними і локально згрупованими порами повзучості. Тріщини, що утворилися, можуть мати прискорений або загальмований розвиток. Процес їх розвитку значною мірою визначається рівнем деградації структури, яка безпосередньо контактує з вершиною тріщини, а також рівнем накопиченої при повзучості деформації, що може мати локальний характер.

Тріщини повзучості переважно, на початковій, стадії розвиваються за міжзеренним механізмом, який при їх подальшому розвитку доповнюється інтеркристалітним, тобто є змішаним з присутністю крихких складових, рис. 10.

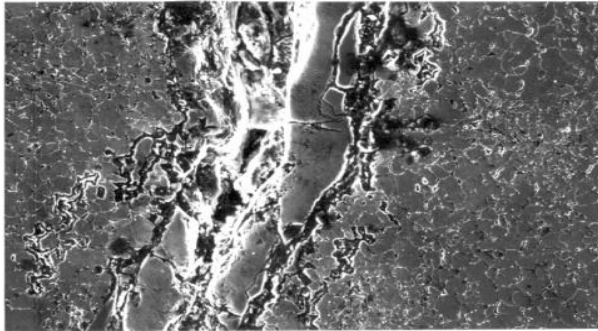


Рис. 10. Магістральна тріщина повзучості на ділянці неповної перекристалізації зони термічного впливу; x2500

Обстеження паропроводів, які напрацювали понад 270 000 годин, показало, що зародження і розвиток втомних тріщин у зварних з'єднаннях, які зумовлені дією змінних (циклічних) напружень, відбувається: у місцях конструкційних і технологічних концентраторів напружень; біля підкладних кілець стикових зварних з'єднань; у місцях непроварів, кристалізаційних тріщин, неметалевих включень та інших концентраторів напружень; у районі кутових швів штуцерних і трійникових зварних з'єднань; у зонах контакту трубних елементів різної товщини.

Зародження і розвиток втомних тріщин реалізується за механізмом термічної та механічної циклової втоми, а також за корозійно-втомним механізмом. Тріщини термічної втоми мають вигляд сіткового розтріскування, а також видовжених і радіальних тріщин, рис. 11.

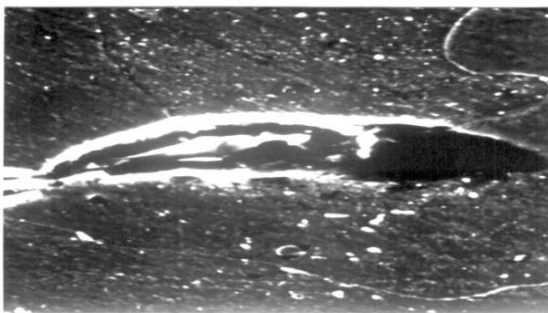


Рис. 11. Видовжена тріщина у стиковому зварному з'єднанні паропроводу гострої пари; x2500

Встановили, що для зменшення інтенсивності утворення тріщин втоми і збільшення ресурсу їх експлуатації доцільно знизити рівень вихідної дефектності зварних з'єднань.

Для оптимізації технології зварювального ремонту виконували контроль пошкоджених елементів з визначенням фактичних розмірів товщини стінки, зовнішнього діаметра, переходу в місцях контакту елементів різних товщин, хімічного складу, а також механічних властивостей металу з оцінкою залишкової жаростійкості, критичної температури крихкості та ін.

Використання удосконаленої технології механізованого зварювання в середовищі $CO_2 + Ar$ пошкоджених елементів паропроводів виконували з урахуванням вимог нормативної документації. Вибирання пошкодженого металу робили з допомогою спеціального абразивного інструмента механічним способом.

Якість металу поверхні вибирання, що утворилася після вилучення пошкодженого металу, і контактуючої з нею зони основного металу оцінювали за допомогою неруйнівних методів контролю (ЗК з вимірюванням, МПД, УЗК), а також шляхом металографічного аналізу з реплік, що регламентувалося вимогами РД 153-34.1-003-01(РТМ-1с) і СО153-34.17.470-2003.

Ремонтні зварювання виконувались за запропонованою послідовністю, рис. 12, яка відрізняється від послідовності Ф.А. Хромченко (ручне дугове зварювання).

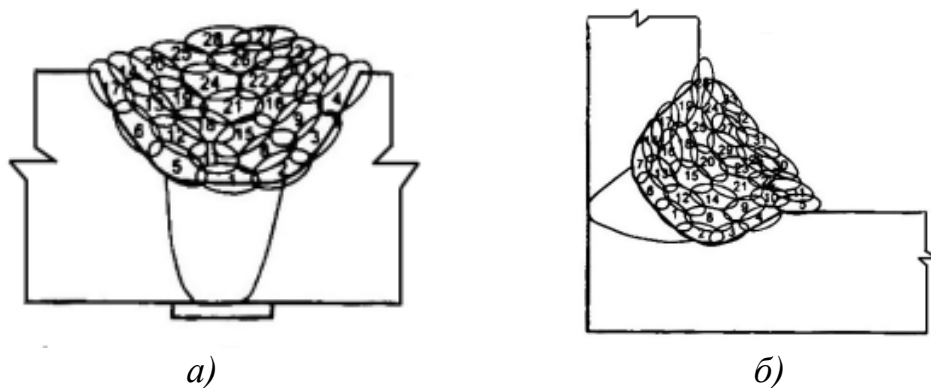


Рис. 12. Схема послідовності, що рекомендується для укладки валиків для зварювання вибраного металу (поперечний переріз) при ремонті стикових а) і кутових б) зварних з'єднань

Вибраний метал заповнювали напівавтоматичним багатошаровим зварюванням валиками висотою 5 - 8 мм і шириною 14 - 18 мм, з використанням електродного дроту типу Св-08ХМФАв суміші $CO_2 + Ar$ на режимах, табл. 1.

Таблиця 1

Параметри режиму напівавтоматичного ремонтного зварювання елементів паропроводів I-ї категорії

№з/п	Параметри режиму	Значення
1	Сила струму, А	210 - 280
2	Напруга на дузі, В	24 - 28
3	Швидкість подачі електродного дроту, м/год	200 - 250
4	Діаметр електродного дроту, мм	1,6 - 2
5	Склад суміші захисних газів, %	75 CO_2 + 25 Ar
6	Витрати суміші захисних газів, л/хв	13 - 17
7	Попередній та супутній підігрів, °С	300 - 350

Рекомендується заварювання виборок, рис. 12, виконувати з підігріванням, а також з визначеною швидкістю охолодження і подальшим високим відпуском, що дозволяє отримати метал шва з ферито-бейнітною структурою. Ремонтне зварювання фасонних литих елементів рекомендується виконувати на постійному струмі зворотної полярності.

Наплавлений метал зварних з'єднань паропроводів, виготовлених напівавтоматичним зварюванням у середовищі $\text{CO}_2 + \text{Ar}$, являє собою бейнітно-феритну суміш (70 – 90 % бейніту, ферит залишковий), що відповідає вимогам нормативної документації.

Приклад. Виготовлення зварних з'єднань з V-подібним розділенням кромки, рис. 13, виконували шляхом використання напівавтоматичного зварювання в суміші $\text{CO}_2 + \text{Ar}$. Укладку валиків першого шару виконували на значеннях струму 300 - 320 А, другого на значеннях струму 270 - 300 А, третього на 320 - 350 А.

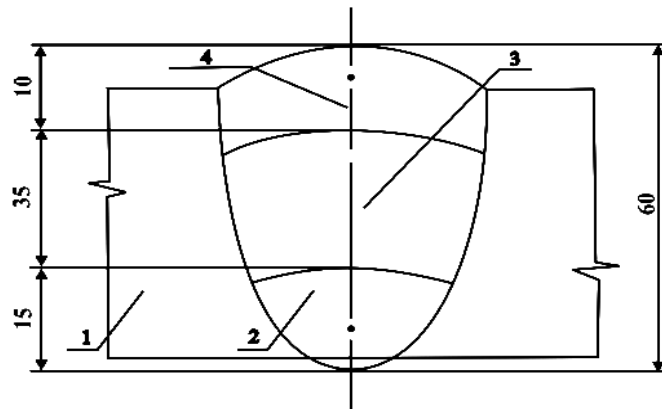


Рис. 13. Схема зварного з'єднання, розбитого на ділянки: 1 – основний метал; 2 – коренева ділянка метал шва; 3 – середня ділянка; 4 – верхня ділянка

Зміна теплового вкладення в основний метал створює умови для формування структури зварних з'єднань з покращеними якісними характеристиками. В металі шва (сплав 08ХМФ) відсутні видовжені феритні зерна, які є в аналогічній структурі з'єднань штатного режиму, рис. 14. В з'єднаннях запропонованої технології наявний плавний перехід між структурами метал шва і ділянками сплавлення та перегріву зони термічного впливу.

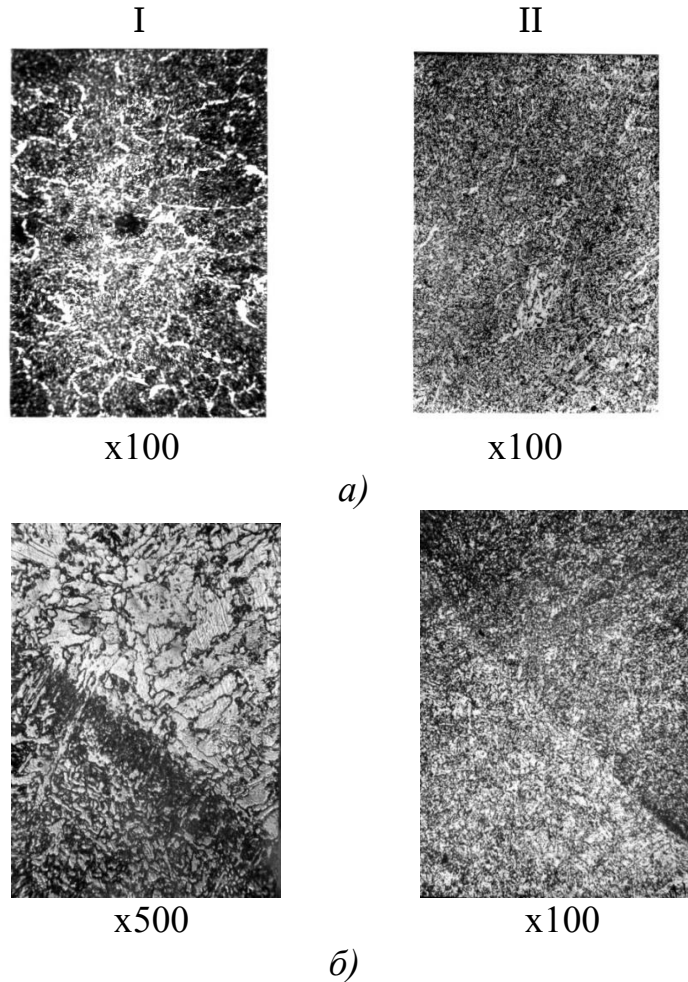


Рис. 14. Мікроструктура зварних з'єднань із сталі 15X1M1Φ: а) метал шва: І – штатна технологія, ІІ – запропонована; б) ділянка сплавлення зони термічного впливу: І – штатна технологія, ІІ – запропонована

Встановили, що продовжена міцність зварних з'єднань, відремонтованих за штатною технологією при температурі 600 °С після напрацювання 100 000 годин складала 75 - 80 МПа, а аналогічних з'єднань, відремонтованих за запропонованою технологією, 82 - 87. В цілому пошкоджуваність відремонтованих за запропонованою зварювальною технологією елементів паропроводів є значно зменшеною, ніж пошкоджуваність аналогічних елементів, які було відремонтовано за штатною технологією, рис. 15.

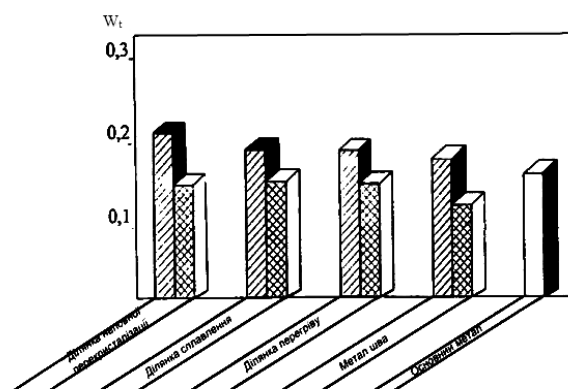


Рис. 15. Діаграма пошкоджуваності елементів паропровідних систем відремонтованих за штатною і за запропонованою технологіями: w_t – ступінь пошкоджуваності зварних з'єднань при їх напрацюванні 70 000 годин

Загальні висновки

1. Установлено, що при напрацюванні зварних з'єднань паропроводів з теплостійких перлітних сталей (15X1M1Ф, 12X1MФ) понад 270 000 годин в умовах повзучості і малоциклової втоми деградація металу обумовлена утворенням сегрегаційних зон з концентрації хрому 4,5 - 6,3 %. Найбільш інтенсивно сегрегаційні зони протікають на ділянці неповної перекристалізації ЗТВ, де нові продукти розпаду аустеніту представляють глобуляризований перліт.

2. Виявлено, що при концентрації хрому від 3,5 до 5,5 % в сегрегаційній зоні, проходять карбідні реакції $M_3C \rightarrow M_7C_3$, а реакція $M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6$ відбувається в умовах, коли концентрація хрому стає більше 5,5 %. Найбільша швидкість карбідних реакцій $M_3C \rightarrow M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6$ характерна для металу ділянки неповної перекристалізації ЗТВ зварних з'єднань.

3. Установлено, що при напрацюванні зварних з'єднань понад 270 000 ч по границях зерен α -фази коагулюють переважно карбіди $M_{23}C_6$ подовженої форми, які утворюють по границях зерен α -фази переривчасті, з елементами суцільності, ланцюжки. При таких же умовах роботи зварних з'єднань паропроводів карбіди MC і MoC є дрібнодисперсними і характеризуються високою стабільністю і їх коагуляція практично не відбувається.

4. Показано, що при напрацюванні зварних з'єднань понад 270 000 годин, близько 80 % пор повзучості утворюються на межі α -фази, в місцях коагуляції карбідів *1gr*. Критичний розмір пор, від якого надалі помітно збільшується інтенсивність їх розвитку, складає 0,03 - 0,07 мкм.

5. Обґрунтовано зв'язок пошкоджуваності зварних з'єднань в умовах тривалої експлуатації (понад 270 000 годин). Доведено, що інтенсивність утворення пор повзучості і тріщин втоми збільшується на 30 - 40 % при наявності на ділянках сплавлення і перегріву ЗТВ і відманшттетових структур, а також при наявності на ділянці неповної перекристалізації нових продуктів розпаду аустеніту у вигляді перліту.

6. Установлено, що для зниження рівня пошкоджуваності зварних з'єднань необхідно забезпечити, отримання вихідної структури зварних з'єднань у вигляді троститу або бейніту на ділянках сплавлення і перегріву зони термічного впливу, а також нових продуктів розпаду аустеніту у вигляді сорбіту або троститу на ділянці неповної перекристалізації.

7. Доведено, що для запобігання утворенню на ділянках сплавлення і перегріву та неповної перекристалізації структур, які сприяють деградації металу, заварювання горизонтальних вибірок завширшки 50 - 70 мм, глибиною (1,3 - 1,4) h, (h – глибина тріщини) слід виконувати при силах струму 260 - 280 А. При більших значеннях сили струму формуються продукти розпаду аустеніту у вигляді глобуляризованого перліту, що знижує ресурс роботи зварних з'єднань.

8. З урахуванням закономірностей деградації металу стикових зварних з'єднань паропроводів при експлуатації понад 270 000 годин розроблено технології їх ремонту з використанням механізованого зварювання газів $Ag + 25\% CO_2$ на погонній енергії, значення якої залежать від товщини зварних з'єднань і лежить в межах 1,2 - 1,5 МДж/м. При товщині зварних з'єднань 50 мм корневу ділянку слід зварювати на значенням струму 300 - 320 А; середню на 270 - 300 А і верхню на 320 - 350 А.

9. Запровадження розробленої технології ремонту пошкоджених елементів паропровідного тракту, забезпечує отримання зварних з'єднань зі зменшеною на 20 - 25 % їх пошкоджуваністю порівняно з аналогічними зварними з'єднаннями, відремонтованими за штатною технологією. Ресурс відремонтованих за рекомендованою технологією паропроводів відповідно збільшується на 20 - 25 %.

Список опублікованих праць:

1. **Сыренко Т.А.** Структура участка перегрева ЗТВ сварных соединений из теплоустойчивых перлитных сталей / Сыренко Т.А., Дмитрик В.В., Гринченко Е.Д., // Сварочное производство. – 2010. - № 6. – С. 3-6.

2. **Сыренко Т.А.** Особенности отпускной хрупкости сварных соединений паропроводов / Сыренко Т.А., Дмитрик В.В. // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2010. - №4. – С 29 - 35.

3. **Сыренко Т.А.** Особенности зарождения пор в металле сварных соединений из теплоустойчивых сталей, работающих в условиях ползучести / Сыренко Т.А., Дмитрик В.В. // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов: 8-й междунар. конгресс., 2008г. : – X: – С. 194-196.

4. **Сыренко Т.А.** К развитию способов изготовления сварных соединений из теплоустойчивых перлитных сталей / Сыренко Т.А., Дмитрик В.В. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2004. - №2(8). – С. 7-9.

5. **Сыренко Т.А.** Особенности повреждаемости сварных соединений из теплоустойчивой стали перлитного класса 12Х1МФ / Сыренко Т.А. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2006. - №3(21). – С. 28-30.

6. **Сыренко Т.А.** К деградации металла сварных соединений паропроводов / Сыренко Т.А., Дмитрик В.В. // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. - №11. – С 69-75.

7. **Сыренко Т.А.** К механизму диффузии хрома и молибдена в металле сварных соединений паропроводов / Сыренко Т.А., Дмитрик В.В. // Автоматическая сварка. – 2012. - №10. – С. 22-26.

Апробація результатів дисертації

1. **Сыренко Т.А.** Уточнение повреждаемости элементов паропроводов по механизму усталости / Т.А. Сыренко, В.В. Дмитрик // Информационные технологии, наука, техника, образование, здоровье: междунар. науч.-практ. конф., 2012г. тезисы докл. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – С. 48.

2. **Сыренко Т.О.** Особенности кинетики карбидных реакций, протекающих в металле теплоустойчивых перлитных сталей / Сыренко Т.О./ Сварка и родственные процессы и технологии: I всеукраин. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых., 3-7 сен. 2008г.: тезисы докл. – Николаев., 2008. – С 32.

3. **Сыренко Т.О.** Механизм старения сварных соединений из теплоустойчивых перлитных сталей 12X1МФ и 15X1М1Ф / Сыренко Т.О., Дмитрик В.В. // Сварка и родственные процессы и технологии: II всеукраин. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых., 4-8 сентября 2012г.: тезисы докл. – Николаев., 2012. – С 162-164.

4. **Сыренко Т.А.** Особенности механизма старения сварных соединений из теплоустойчивых перлитных сталей / Сыренко Т.О, Дмитрик В.В. // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов: IX междунар. науч.-техн. конгресс термистов и металлосведов., 2008г.: тезисы докл. – Х: 2008. – С. 62-64.

5. **Сыренко Т.А.** Образование структуры металла сварных соединений в условиях ползучести / Сыренко Т.А., Дмитрик В.В.// Сварка родственные технологии – в третье тысячелетие: междунар. конф., 24-26 нояб. 2008г.: тезисы докл. – К., 2008. – С.136.

6. **Сыренко Т.А.** (Курочка Т.А.) Изучение разрушаемости в условиях ползучести сварных соединений из перлитных сталей / Сыренко Т.А. // Сварка и родственные технологии: II всеукраин. научн. – техн. конф. молодых ученых и специалистов., 25-27 июн. 2003г.: тезисы докл. – К., 2003., – С.103.

7. **Сыренко Т.А.** Повреждаемость металла сварных соединений из стали 15X1М1Ф в условиях ползучести и термической усталости / Сыренко Т.А. // Сварка и родственные технологии: III всеукраин. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов., 25-27 мая 2005г.: тезисы докл. – К., 2008. – С. 38.

8. **Сыренко Т.А.** К повреждаемости сварных соединений из теплоустойчивых перлитных сталей в условиях ползучести / Сыренко Т.А. // Сварка и родственные технологии: IV всеукраин. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов., 23-25 мая 2007г.: тезисы докл. – К., 2007. – С. 60.

9. **Сыренко Т.А.** К оценке надежности металла сварных соединений паропроводов / Сыренко Т.А. // Сварка и родственные технологии: V всеукраин. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов., 27-29 мая 2009г.: – К., 2009. – С. 70.

10. **Сыренко Т.А.** Отпускная хрупкость сварных соединений паропроводов ТЕС / Сыренко Т.А. // Сварка и родственные технологии: VI всеукраин. научн.-техн. конф. молодых ученых и специалистов: 25-27 мая 2011г.: тезисы докл. – К., 2011. – С. 193.

11. **Сыренко Т.А.** Структурные изменения в сварных соединениях из стали 10X9K3B1M1ФБР в условиях старения /Сыренко Т.А., Дмитрик В.В. // Информационные технологии, наука, техника, образование, здоровье: междун. науч.-практ. конф., 22-24 сент. 2014г.: тезисы докл. – Х., 2014. – С.13.

АНОТАЦІЯ

Сиренко Т.О. Удосконалення зварювальної технології ремонту пошкоджених елементів паропроводів теплових електростанцій. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології». – Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова МОН України, м. Миколаїв, 2015.

Дисертація присвячена удосконаленню зварювальної технології ремонту пошкоджених елементів паропроводів теплових електростанцій із теплостійких перлітних сталей 15X1M1Ф і 12X1МФ. Проведено теоретичне і практичне дослідження фізико-хімічних процесів, які відбуваються в металі паропроводів, що довготривало експлуатуються в умовах повзучості і малоциклової втоми. Обґрунтовано зв'язок таких процесів зі структурними перетвореннями та пошкоджуваністю металу паропроводів. На підставі цих таких досліджень запропоновано удосконалену зварювальну технологію їх ремонту. Така технологія включає використання процесу напіваавтоматичного зварювання в суміші захисних газів $\text{CO}_2 + \text{Ar}$, що дозволило покращити якісні характеристики відремонтованих елементів паропроводів. Розглянуто особливості пошкоджуваності металу паропроводів, що довготривало експлуатуються, які було відремонтовано за запропонованою та штатною технологіями. Встановлено, що відремонтовані за запропонованою удосконаленою технологією елементи паропроводів значно менше пошкоджуються, ніж аналогічні паропроводи, відремонтовані за штатними технологіями, а ресурс їх напрацювання є відповідно збільшеним на 20-25%.

Ключові слова: технологія зварювання, зварні з'єднання паропроводів, теплотривкі перлітні сталі, пори, повзучість, малоциклова втома, тріщини втоми, ресурс.

АННОТАЦИЯ

Сыренко Т.А. Усовершенствование сварочной технологии ремонта поврежденных элементов паропроводов тепловых электростанций. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.06 «Сварка, родственные процессы и технологии». –

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова МОН Украины, г. Николаев, 2015.

Диссертация посвящена усовершенствованию сварочной технологии ремонта поврежденных элементов паропроводов тепловых электростанций из теплоустойчивых перлитных сталей 15X1M1Ф и 12X1MФ, что позволило получить сварные соединения с улучшенными качественными характеристиками.

Проведено теоретическое и практическое исследование физико-химических процессов, проходящих в металле паропроводов, длительно эксплуатируемых в условиях ползучести и малоциклового усталости. Рассмотрены особенности повреждаемости металла. Определена связь между исходной структурой сварных соединений и ее структурными превращениями, а также со степенью повреждаемости. На основании данных исследований физико-технических процессов, структурных изменений и повреждаемости предложена усовершенствованная сварочная технология ремонта изношенных элементов паропроводов. Данная технология включает использование процесса полуавтоматической сварки в смеси защитных газов $\text{CO}_2 + \text{Ar}$, что позволило получить сварные соединения без наличия исходных браковочных структур или структур, близких к браковочным. Процесс сварки производили при помощи усовершенствованного полуавтомата ПДГ-20УЗ с источником питания ВДУ – 420УЗ. Сравнили особенности повреждаемости металла сварных соединений паропроводов, отремонтированных путем использования предлагаемой усовершенствованной и штатной технологий. Установили, что паропроводы, отремонтированные путем использования предлагаемой сварочной, технологии значительно меньше повреждаются, чем аналогичные паропроводы, отремонтированные по штатным технологиям. Снижение повреждаемости обусловлено уменьшенной степенью исходной структурной неоднородности, которая обеспечивает улучшение механических свойств, сварных соединений в условиях ползучести и малоциклового усталости позволяет увеличить ресурс их наработки на 20 – 25 %.

Ключевые слова: технология сварки, сварные соединения паропроводов, теплоустойчивые перлитные стали, поры, ползучесть, малоцикловая усталость, трещины усталости, ресурс.

ABSTRACT

Syrenko T.A. Improvement of welding technology of repairing of damaged components of steam lines of thermal power station. – Manuscript.

Thesis for a Candidate's Degree in Technical Sciences in speciality 05.03.06 «Welding, related processes and technologies». – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ministry of Education and Science of Ukraine, Nikolayev, 2015.

The thesis focuses on improvement of welding technology of repairing of damaged components of steam lines of thermal power station made of thermoresistant pearlitic steel 15X1M1Ф and 12X1MФ. A theoretical and practical

research of physico-chemical processes that occur in the metal of steam lines used durably in conditions of creeping and low-cycle fatigue has been carried out.

The connection between such processes and structural changes and damageability of metal of steam lines has been established. The results of these studies gave the opportunity to elaborate an improved welding technology of their repair. This technology includes the use of the process of manual welding in the mixture of shielding gases CO₂+Ar that has made it possible to improve the qualitative characteristics of repaired components of steam lines.

Besides, the peculiarities of damageability of metal of steam lines used durably that have been repaired with the help of application of the elaborated improved and standard technologies have been examined. The research proves that steam lines that have been repaired with the help of application of the elaborated welding technology are damaged less than analogous steam lines repaired by using standard technologies, and their resource of operating time is increased in 20-25 %.

Key words: welding technology, welded joints of steam lines, thermoresistant pearlitic steel, voids, creeping, low-cycle fatigue, fraction fatigue, resource.