

УДК 621.791.72:621.791.052:620.17

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.94.0.73

ОСОБЛИВОСТІ ПОШКОДЖУВАНOSTI ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПАРОПРОВОДІВ ЗІ СТАЛІ 12Х1М1Ф І 15Х1М1Ф

Сиренко Т.О., Іванченко М.Ю.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Наведені особливості пошкоджуваності зварних з'єднань паропроводів зі сталі 12Х1М1Ф і 15Х1М1Ф, що є тріщинами холодноламкості, тріщинами провалу тривалої пластичності, тріщинами по знеміцнених ділянках, тріщинами втоми. Вивчення процесу утворення цих тріщин дозволить зменшити інтенсивність їхнього утворення та подовжити термін експлуатації конструкцій.

Ключові слова: зварне з'єднання, структура, трубопровід, зона термічного впливу, пошкоджуваність, тріщини, пори, металографічні ознаки, хромомолібденванадієві сталі.

Вступ

Ресурс експлуатації зварних з'єднань з теплостійких перлітних сталей 12Х1М1Ф та 15Х1М1Ф, що працюють в умовах повзучості, становить 0,6–0,7 від ресурсу основного металу трубопроводів. Ураховуючи необхідність збільшення тривалості експлуатації трубопроводів у модернізованих ТЕС, актуальним є досконале вивчення їхньої пошкоджуваності.

Аналіз публікацій

Основна проблема, що виникає під час експлуатації робочих теплових електростанцій, – проблема надійності. Ця проблема особливо гостро постає сьогодні з двох причин. По-перше, паропроводи багатьох ТЕС підійшли до розрахункового часу служби – 100 000 год. Виникло питання про можливість їхньої експлуатації більшу за розрахунковий строк. По-друге, відбувається перехід енергетичного обладнання на більш економічний режим роботи, у зв'язку з чим збільшується температура та тиск пари в паропроводах. Виникає питання про можливість експлуатації старого обладнання в нових умовах роботи. У зв'язку з цим виникає необхідність вивчення особливостей пошкоджуваності зварних елементів.

Мета і постановка завдання

Метою роботи є вивчення особливостей пошкоджуваності зварних елементів паропроводів. Для досягнення мети були поставлені такі завдання: 1) вивчення зразків із діючих паропроводів методом структурного аналізу для дослідження особливостей деградації зварних з'єднань із теплостійких перлітних сталей 12Х1М1Ф та 15Х1М1Ф, що

працюють в умовах повзучості, 2) визначення остаточного ресурсу зварних з'єднань.

Оцінка працездатності зварних з'єднань

Працездатність зварних з'єднань паропроводів зі сталі 12Х1М1Ф та 15Х1М1Ф суттєво залежить від структури, яка визначається режимом зварювання та термічною обробкою. З поєднання міцнісних та пластичних властивостей оптимальною для зварних з'єднань є структура металу шва з товщиною феритної оторочки на ділянках стовпчастої структури в межах 15–50 мкм. Така структура забезпечується режимами зварювання, що встановлюються нормативними документами. За відсутності феритної оторочки, що відповідає заниженому підігріву, метал шва характеризується низькою тривалою пластичністю за умови робочих температур. Метал шва з феритною оторочкою, ширина якої перевищує 50 мкм, характеризується пониженою тривалою пластичністю та схильністю до крихких руйнувань у разі низьких та помірних температур (під час ремонтів та гідравлічних випробувань). Сприятливий фактор, що підвищує стійкість проти крихкого руйнування в умовах повзучості – наявність у металі шва ділянок дрібнозернистої розорієнтованої структури, яка утворюється під дією тепла наступних шарів (рис. 1, а). Оптимальне поєднання міцнісних та пластичних властивостей зварних з'єднань паропроводів із хромомолібденванадієвих сталей досягається за умови середніх значень твердості металу шва в межах 170–200 НВ та максимальних – не більше ніж 230 НВ [1].

У разі більш високих значень твердості знижується величина ударної в'язкості та

підвищується схильність до крихких руйнувань під дією робочих, а також низьких і помірних температур.



Рис. 1. Структура твердого металу шва; $\times 200$

У процесі експлуатації зварних з'єднань паропроводів спостерігаються різні види пошкоджень у вигляді тріщин.

Перша група тріщин обумовлена здебільшого технологічними факторами – це крихкі тріщини, інші тріщини – конструктивними факторами та умовами експлуатації, – це тріщини в знеміцнених ділянках і тріщини втоми.

Крихкі тріщини за умови помірних та робочих температур зазвичай спостерігаються у зварних з'єднаннях паропроводів зі сталей 12Х1МФ та 15Х1М1Ф. Треба мати на увазі, що існують випадки, коли від тріщин одного типу можуть розвиватися тріщини іншого типу [2].

Тріщини холодноламкості зазвичай починаються в металі шва (рис. 2) або в пришовній зоні від концентраторів напружень (підрізів, непроварів, технологічних тріщин тощо), і можуть розвиватися далі по всіх ділянках зварного з'єднання, та переходити в окремих випадках в основний метал. Відносно осі шва вони орієнтовані довільно. Відмінні металографічні риси тріщин холодноламкості – це внутрішньозернистий характер та їхня гіллястість (рис. 3).



Рис. 2. Макрошліф зварного з'єднання з тріщиною холодноламкості; $\times 20$

Причина появи зазначених вище тріщин – зсув порогу холодноламкості в бік позитив-

них температур унаслідок порушення встановленого технологічного режиму зварювання й термічної обробки. Імовірність руйнувань за механізмом холодноламкості особливо велика за умови дії ударних навантажень. Схильність зварних з'єднань до холодноламкості викликається насамперед відсутністю відпуску після зварювання або порушенням режиму відпуску (зниження температури, зменшення часу витримки). У цих випадках значення твердості металу шва зазвичай перевищують нормативні й у структурі ділянки неповної перекристалізації зони термічного впливу чітко видно характерні ділянки, які розташовано по межах зерен.

Схильність до утворення тріщин холодноламкості може з'являтися у зварних з'єднаннях, які виконано із завищенням температури підігріву до $450\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$ або з товщиною шарів понад 5–6 мм. У цих випадках у структурі металу шва спостерігається значна кількість надлишкового фериту, що виділяється по межах кристалів. Для металу швів типу Е-09Х1МФ ця структура належить до балу 3 відповідно до державного стандарту. Твердість таких зварних з'єднань зазвичай відповідає нормативним значенням.

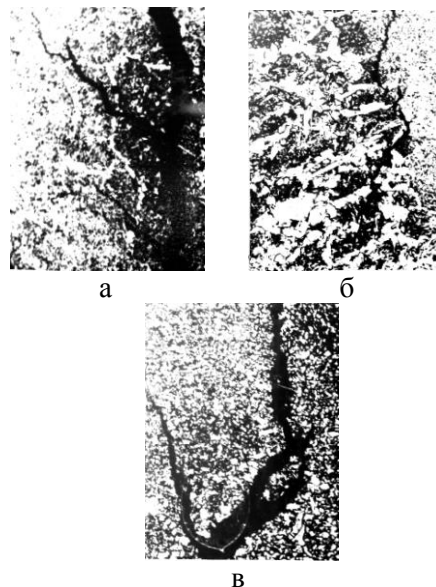


Рис. 3. Тріщини холодноламкості: а – метал шва; б – у шві та пришовній зоні; в – основний метал; $\times 250$

Утворенню тріщин холодноламкості сприяє також допустимий в окремих випадках перегрів зварного з'єднання за умови відпуску до температур, що лежать у районі критичної точки A_{c3} . У цьому випадку твердість металу шва також може залишатися на

рівні або нижче за нормативні значення. Металографічна ознака таких зварних з'єднань – відсутність характерних ділянок, що складають зону термічного впливу. Метал шва в деяких випадках не має орієнтування за структурою затвердіння і відрізняється різнозернистістю (рис. 4).

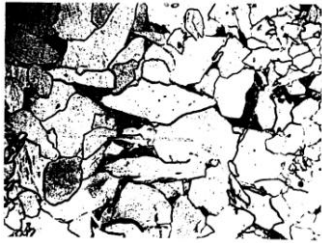


Рис. 4. Структура металу шва після перегріву вище за температуру A_{c3} у процесі відпуску; $\times 100$

Заходом попередження тріщин холодноламкості є коригування режимів зварювання й термічної обробки з метою усунення допущених порушень, а також видалення або попередження утворення неприпустимих зварювальних дефектів, які є концентраторами напружень.

Тріщини провалу тривалої пластичності утворюються найчастіше в пришовній зоні (на ділянці перегріву зони термічного впливу). Іноді вони спостерігаються і в металі шва на ділянках з великостовпчастою структурою. Зазвичай пошкодження розвиваються із зовнішньої поверхні, починаючи від підрізів і інших дефектів, проте вони можуть поширюватися і від технологічних дефектів у перетині шва. Тріщини провалу тривалої пластичності, розташовані в пришовній зоні, зазвичай орієнтовані вздовж межі сплаву й віддалені від неї не більше ніж на 1мм (рис. 5). У металі шва тріщини такого типу орієнтовані довільно.



Рис. 5. Тріщина провалу тривалої пластичності, розташована в пришовній зоні («локальне» руйнування); $\times 300$

За металографічними ознаками тріщини провалу тривалої пластичності, що утворюються в процесі експлуатації, важко відрізнити від тріщин, які утворюються під час термообробки. Вони теж мають чітке орієнтування по межах зерен і гладкі краї. Їм супроводжують пори і клиноподібні тріщини (рис. 6).



Рис. 6. Пори та клиноподібні тріщини; $\times 500$

Провал тривалої пластичності металу шва і пришовної зони обумовлений особливостями будови цих ділянок, що зазнають у процесі зварювання значного перегріву. Результатом перегріву є утворення на цих ділянках грубозернистої структури, сегрегації на межах шкідливих домішок, поява крихких фаз, зародження в процесі термодформаційного циклу зварювання субмікроскопічних або мікроскопічних несучільностей на межах зерен. Утворюється або бейнітна, або мартенситна структура з низькою тривалою пластичністю. Багаторазовий тепловий вплив наступних шарів на попередні у процесі багатшарового зварювання, а також високий відпуск зварного з'єднання підвищують тривалу пластичність цих структур. Однак збережені крупнозернисті ділянки, особливо якщо вони розташовуються в зонах концентраторів напружень (підрізів, шлакових включень, непроварів), є вогнищами появи крихких тріщин.

Для підвищення стійкості проти цих тріщин необхідно насамперед забезпечувати необхідну температуру підігріву ($300\text{--}350^{\circ}\text{C}$). Підвищенню пластичності сприяє також застосування режимів зварювання, що забезпечують максимально можливу перекристалізацію крупнозернистих ділянок у металі шва та пришовній зоні.

У разі неякісної термообробки (відсутність відпуску або заниження його температур) провал пластичності у зварних з'єднаннях хромомолібденванадієвих сталей різко посилюється, а небезпека утворення крихких тріщин істотно зростає. Тріщини, утворення яких пов'язане з неякісною термообробкою після зварювання, відомі в літературі під умовною назвою «локальних». Ознакою неякісної термообробки є високі (понад 250 НВ) значення твердості металу шва й навколишньої зони.

Час утворення «локальних» руйнувань істотно залежить від температури експлуатації зварних з'єднань.

За умови температури 560 °С утворення таких пошкоджень відбувається в перші 10–20 тис. год експлуатації, а в разі температури 510–540 °С – через 80–120 тис. год. Попередження «локальних» руйнувань забезпечується дотриманням встановлених режимів термічної обробки.

Стійкість проти руйнувань, пов'язаних із провалом пластичності, підвищується у випадку використання основного металу, який має міцнісні властивості ($\sigma_{в}^{20}$, $\sigma_{0,2}^{20}$), що відповідають нижньому або середньому рівню значень за технічними умовами.

Знеміцненими у зварних з'єднаннях хромомолібденованадієвих сталей є ділянки дрібного зерна і неповної перекристалізації ЗТВ. Знеміцненою ділянкою в таких зварних з'єднаннях може бути і метал шва, коли він менш легований, ніж основний метал, або через неправильний вибір режиму зварювання і термообробки, має структуру, що характеризується низьким опором повзучості. У літературі знеміцнення ділянки зварних з'єднань називають іноді «м'якими прошаруваннями».

Тріщини по знеміцнених ділянках утворюються переважно в зварних з'єднаннях із конструктивними концентраторами напружень (штуцерні та трійникові з'єднання, стикові з'єднання труб різної товщини, з'єднання типу «труба-лиття»). Особливістю цих пошкоджень, є те, що вони можуть виникати у зварних з'єднаннях, виконаних без порушень установлених режимів зварювання і термообробки. Твердість таких зварних з'єднань перебуває в межах норми. Пошкодження по «м'якому прошаруванню» починаються зазвичай із зовнішньої поверхні та йдуть уздовж зварного шва, до того ж розкриття тріщин із поверхні значне.

У зоні термічного впливу тріщини розташовуються на відстані 2–4 мм від межі сплавлення. Вони йдуть найчастіше на ділянках дрібного зерна й неповної перекристалізації, у деяких випадках відхиляючись в основний метал. Тріщини йдуть по межах зерен, що особливо добре видно по чисельних надривах, які сприяють появі магістральних тріщин (рис.7, а).

В окремих випадках тріщини в знеміцнених ділянках ЗТВ поширюються від тріщин типу «локальних», що знаходяться в пришовній зоні.

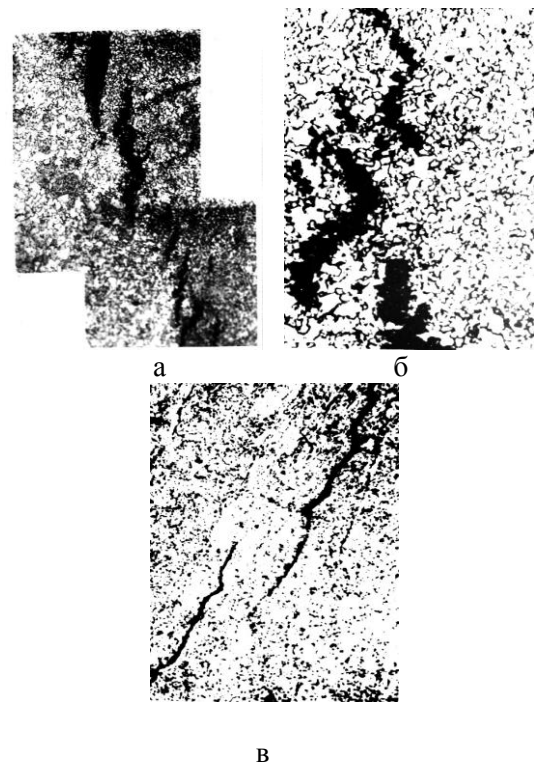


Рис. 7. Тріщини в знеміцнених ділянках зварного з'єднання зі сталі 12X1МФ; $\times 112$: а, б – у зоні термічного впливу; в – тріщина в металі шва; $\times 200$

Якщо знеміцненою ділянкою є шов, то тріщини в ньому розташовуються зазвичай поблизу межі сплаву й можуть мати ступінчастий («пилкоподібний») характер [3].

Це пов'язано з чергуванням в металі шва крупнозернистих і дрібнозернистих (перекристалізованих) ділянок. Під час руху на ділянках із різною величиною зерна тріщина змінює напрям.

На ділянках великого зерна тріщини йдуть за межами зерен, нагадуючи за видом тріщини провалу пластичності (рис. 7, б).

На ділянках перекристалізації металу шва тріщини за характером поширення, аналогіч-

ні тим, які можна спостерігати на ділянках дрібного зерна і неповної перекристалізації зони термічного впливу, і йдуть уздовж меж між дрібним і великим зерном.

Причиною утворення тріщин по знемічених ділянках (по «м'якому прошаруванню») є дія напружень, що перевищує допустимі. Факторами, що сприяють виникненню таких пошкоджень, є конструктивні недоліки або порушення умов експлуатації (защемлення, порушення трасування, неправильна робота опор і підвісок тощо).

Особливістю пошкоджень по «м'якому прошаруванню» є можливість багаторазового повторення пошкоджень на одній і тій самій ділянці в разі, якщо після першого пошкодження джерело підвищених напружень не було усунуто.

Заходами попередження пошкоджень є: зменшення зовнішніх навантажень за рахунок накладки або зміни конструкції паропроводу, змінення конструкції вузла шляхом винесення зварного з'єднання із зони концентрації напружень, а також зниження концентрації напружень шляхом зачищення і створення плавних переходів у місцях з'єднання деталей різних товщин.

Тріщини втоми утворюються в тих випадках, коли фактична амплітуда змінних напружень вища за допустиму за ГОСТ 108.031.02-74 та РТМ 108.031. 105-77. У паропроводах така ситуація часто виникає внаслідок багаторазової дії високих термічних напружень за умови закидів конденсату або недопустимо високих швидкостей прогріву й охолодження. У цьому випадку утворюються тріщини, обумовлені термічною втомою.

Тріщини термічної втоми розвиваються з внутрішньої поверхні труби. Прискорений розвиток тріщин спостерігається в зонах конструктивних і технологічних концентраторів (у місцях приварювання до труб штуцерів, у місцях приварювання підкладних кілець, у місцях переходу від проточеної ділянки до необробленої поверхні труби (рис. 8).

Тріщини термічної втоми утворюються в місцях приєднання відводів до запобіжних клапанів, дренажних та імпульсних ліній, байпасів і т. п., а також у стикових зварних з'єднаннях, розташованих поблизу цих місць. У куткових зварних швах тріщини, спричинені термічними напруженнями, розташовуються, як правило, упоперек шва.



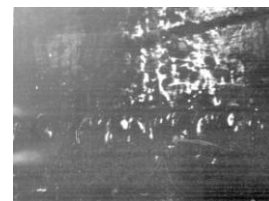
а



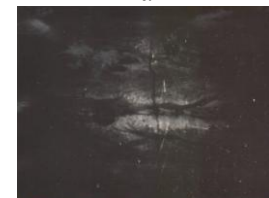
б

Рис. 8. Тріщини втоми: а – втомна тріщина на зовнішній поверхні труби, яка йде від отвору під штуцером; б – тріщина, що йде від проточки під підкладне кільце; $\times 50$

У стикових швах втомні тріщини можуть йти як уздовж шва, так і впоперек нього, виходячи іноді в основний метал (рис. 9).



а



б

Рис. 9. Тріщина втоми в стикових зварних з'єднаннях: а – уздовж шва; б – упоперек шва; $\times 30$

На внутрішній поверхні грубе розтріскування часто має вигляд сітки (рис. 10).

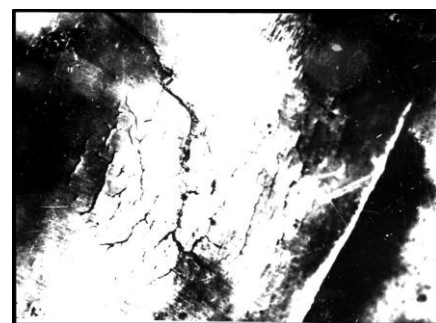


Рис. 10. Сітка тріщин термічного розтріскування на внутрішній поверхні труби; $\times 200$

За видом зламу можна визначати втомний характер руйнувань, за якими виявляються дві зони: одна – з власне втомними кільцевими лініями, інша – зона статичного зламу (рис. 11).

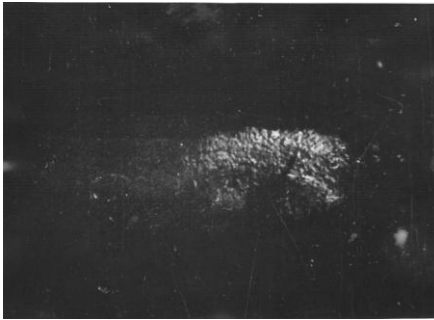


Рис. 11. Зона втомного зламу паропроводу; $\times 40$

Під час аналізу зламів необхідно звертати увагу на ступінь їхнього окиснення, маючи на увазі, що в початкових ділянках тріщин окиснення більш сильне.

Швидкому поширенню тріщин термічної втоми сприяє корозійний вплив водного середовища, тому здебільшого виявляються тріщини, які можна класифікувати як корозійно-втомні.

Поряд із тріщинами термічної втоми, у зварних з'єднаннях можуть спостерігатися втомні тріщини, обумовлені змінами внутрішнього тиску й зовнішніх навантажень (наприклад, у процесі вібрації паропроводу). Вони зазвичай починаються на зовнішній поверхні концентраторів, у вершинах кутових швів, у місцях приварювання допоміжних елементів або штуцерів. Утворенню таких тріщин та їхньому прискореному розвитку сприяють зародкові тріщини, що виникли під час зварювання.

Розвиток втомних тріщин відбувається, як правило, всередині зерна, корозійно-втомні руйнування поширюються як по межах зерен, так і всередині них (рис. 11).

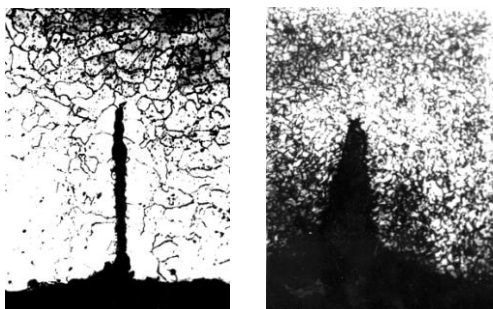


Рис. 11. Характер втомних тріщин; $\times 50$

Заходи попередження таких тріщин пов'язані з усуненням причин, що викликають високі амплітуди змінних напружень, або зі зниженням концентрації напружень шляхом створення більш плавних переходів у зоні поєднання зварюваних елементів.

Висновки

Умовами роботи паропровідних труб є висока температура експлуатації, велика тривалість прикладення навантажень, через що в металі виникають різного виду пошкодження. Під час експлуатації зварних з'єднань паропроводів спостерігаються такі основні типи пошкоджень:

1) крихкі тріщини за умови помірних (до 100–150 °С) температур під час гідравлічних випробувань і пусків-зупинок (тріщини холодноламкості);

2) крихкі тріщини, обумовлені провалом тривалої пластичності температур повзучості й номінальних напружень нижчих за допустимі (тріщини провалу тривалої пластичності);

3) тріщини внаслідок експлуатації в ділянці температур повзучості й номінальних напружень вищих за допустимі (тріщини по знеміцнених ділянках);

4) тріщини, обумовлені дією змінних напружень з амплітудою, більшою за допустимі значення (тріщини втоми).

Досконале вивчення перелічених вище тріщин дозволить розробляти заходи щодо їхнього усунення та підвищення строку експлуатації зварних з'єднань.

Література

1. Дмитрик В.В., Соболев О.В., Погребной М.А., Сыренко Т.А. Особенности деградации металла сварных соединений паропроводов. *Автоматическая сварка*. 2015. № 7. С. 12–17.
2. Дмитрик В.В. Моделирование структуры сварных соединений теплоустойчивых перлитных сталей. *Автоматическая сварка*. 2000. № 4. С. 27–30.
3. Дмитрик В.В., Сыренко Т.А. К механизму диффузии хрома и молибдена в металле сварных соединений паропроводов. *Автоматическая сварка*. № 10. С. 22–26.
4. Розенберг В.М. Основы жаропрочности металлических материалов. Москва: Металлургия, 1973. 367 с.
5. Дмитрик В.В., Глушко А.В., Сыренко Т.А. Структурні зміни в металі зварних з'єднань паропроводів після тривалої експлуатації. *Автоматическая сварка*. 2017. № 7. С. 19–23.

6. Дмитрик В.В., Глушко А.В., Григоренко С.Г. Особенности порообразования в сварных соединениях паропроводов в условиях длительной эксплуатации. *Автоматическая сварка*. 2016. № 9. С. 56–60.
7. Хромченко Ф.А. Ресурс сварных соединений паропроводов. Москва: Машиностроение, 2003. 456 с.

References

1. Dmitrik V.V., Sobol O.V., Pogrebnoy M.A., Syrenko T.A. Peculiarities of metal degradation of welded joints of steam pipelines. *Automatic welding*, 2015, No. 7, pp. 12–17.
2. Dmitrik V.V. Modeling of the structure of welded joints of heat-resistant pearlitic steels. *Automatic welding*, 2000, No. 4, pp. 27–30.
3. Dmitrik V.V., Syrenko T.A. To the mechanism of diffusion of chromium and molybdenum in the metal of welded joints of steam pipelines. *Automatic welding*, No. 10, pp. 22–26.
4. Rosenberg V.M. Fundamentals of heat resistance of metallic materials. Moscow: Metallurgy, 1973. 367 p.
5. Dmitrik V.V., Glushko A.V., Sirenko T.A. Structural changes in metal barnyard steam pipelines for trivial exploitation. *Automatic welding*, 2017, No. 7, pp. 19–23.
6. Dmitrik V.V., Glushko A.V., Grigorenko S.G. Features of pore formation in welded joints of steam pipelines in conditions of long-term operation. *Automatic welding*, 2016, No. 9, pp. 56–60.
7. Khromchenko F.A. Resource welded connections of steam lines. Moscow: Mechanical engineering, 2003. 456 p.

Сиренко Тетяна Олександрівна, к.т.н., доцент кафедри технології металів та матеріалознавства, тел.: +38 068-511-92-30, e-mail:syrenko2020@gmail.com,

Іванченко Микола Юрійович, студент, тел.: +38 050-785-02-94, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 25, вул. Ярослава Мудрого, м. Харків, 61002, Україна.

Features of damage to welded joints of steam pipes made of steel 12X1M1F and 15X1MF

Abstract. Problem. A significant number of heat and power equipment, including welded connections of steam pipelines made of 15x1m1f and 12x1mf Steels, have now reached the design service life. Their practical experience is about 200,000 hours at an estimated temperature of 545 °C, and the park resource

according to regulatory documentation is 250,000 hours. Note that aging welded joints are operated in conditions of start-ups and stops, which have become more frequent, which contributes to an increase in the intensity of their damage. In this connection, the question arose about the possibility of their operation longer than the estimated period in the new conditions. Goal. The goal is study of the features of damage to welded elements of steam pipelines operating in conditions of creep and low cycle fatigue. Methodology. The study of samples from existing damaged steam pipelines was carried out by the method of structural analysis, based on the consideration of the processes of structural and phase changes occurring in the areas of welded joints and conclusions were drawn regarding their resistance to destruction during operation. Results. The mechanisms of crack formation, their causes and the main provisions of metallographic analysis on the study of damaged welded joints operating under creep conditions and representing a certain number of types of cracks are presented. Such cracks are cold-breaking cracks, which are brittle cracks at moderate temperatures (up to 100–150 °C) during hydraulic tests and start-ups; long-term ductility failure cracks, which are brittle cracks caused by the failure of long-term ductility creep temperatures and rated stresses below permissible; cracks on exhausted areas, which are cracks when operating in the range of creep temperatures and rated stresses above permissible and fatigue cracks, which are cracks caused by the action of variable stresses with an amplitude greater than permissible values. Scientific novelty and practical significance. It is established that the mechanism of aging of long-term operated welded joints of steam pipelines is associated with structural transformations that cause the appearance of cracks in the welded joints.

Key words: welded joint, structure, pipeline, thermal impact zone, damage resistance, cracks, pores, metallographic features, chromium-diamond vanadium steels.

Syrenko Tatyana, candidate of technical sciences, associate professor., Department of metal technology and materials science, tel. +38 068-511-92-30, e-mail:syrenko2020@gmail.com,

Ivanchenko Mykola, student, tel. +38 050-785-02-94, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.