

ПОВЕРНЕННЯ І РЕКРИСТАЛІЗАЦІЯ МЕТАЛУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПАРОПРОВОДІВ У ПРОЦЕСІ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

В.В. Дмитрик, І.В. Касьяненко, Ю.М. Латинін

НТУ «Харківський політехнічний інститут». 61002. м. Харків, вул. Кирпичова, 2. E-mail: igorkasyanen@gmail.com

У метали зварних з'єднань з теплостійких перлітних сталей при їхній тривалій експлуатації за умов повзучості відбуваються процеси повернення і рекристалізації. Проходження цих процесів суттєво відрізняється від аналогічних процесів, які мають місце при штатному відпалі. При рекристалізації, що відбувається в металі зварних з'єднань, ліквідуються окремі границі між зернами, і утворені зерна набувають видовженої форми. В рекристалізованому металі спостерігається зменшення міцності приблизно на 10...15 і ударної в'язкості на 15...18 %. Встановлено, що повернення і рекристалізація як складові загального процесу перетворення вихідної структури металу зварних з'єднань у феритно-карбідну суміш, проходять при його пластичному деформуванні. В процесі рекристалізації змінюється розподіл дислокацій, який суттєво відрізняється на ділянках зони термічного впливу. Найбільший рівень деформації спостерігається на ділянці неповної рекристалізації зони термічного впливу зварних з'єднань. Вивчення особливостей процесів повернення і рекристалізації є доцільним для визначення надійності роботи і залишкового ресурсу зварних з'єднань, а також розробки нових теплостійких сталей, які будуть працювати при підвищених робочих параметрах – температурі й тиску. Бібліогр. 11, рис. 13.

Ключові слова: зварні з'єднання, теплостійкі сталі, повернення, рекристалізація, ресурс, умови повзучості, структурно-фазовий стан, механічні властивості

Вступ. У паросиловому обладнанні енергоблоків ТЕС, потужність яких становить 200...800 МВт, широко застосовують теплостійкі сталі перлітного класу 15X1M1Ф і 12X1MФ [1, 2]. Напрацювання наведеного обладнання переважно становить 280...300 тис. год. У металі обладнання, яке тривало працює за умов повзучості й малоциклової втоми, відбуваються структурно-фазові зміни, пов'язані з проходженням відповідних фізико-хімічних процесів [3–6]. Це і самодифузія легуючих елементів хрому, молібдену і ванадію, яка забезпечує формування сегрегаційних прошарків [6], утворення нових карбідів VC, проходження карбідних реакцій [7], переміщення дислокацій за механізмами ковзання і переповзання [6]. Дослідженню цих процесів присвячено роботи [8–10]. Водночас при збільшенні напрацювання зварних з'єднань понад 250 тис. год процеси, що проходять в металі зварних з'єднань, набувають нової специфіки і їхні особливості змінюються. Наприклад, при напрацюванні за умов повзучості понад 270 тис. год в металі зварних з'єднань відбуваються процеси повернення і рекристалізації, які раніше не досліджувались, однак суттєво впливають на їхню пошкоджуваність. Отже, дослідження цих процесів є винятково актуальним щодо уточнення надійності напрацювання зварних з'єднань і їхнього залишкового ресурсу. Наведені процеси відрізняються від аналогічних процесів штатного відпалу наступними особли-

востями. Процеси повернення і рекристалізації за умов штатного відпалу відбуваються при відповідно різних температурах. Їхнє проходження при штатному відпалі забезпечує усунення наклепу, що утворився в металі під впливом холодної пластичної деформації. Повернення та рекристалізація в металі зварних з'єднань за умов повзучості проходить при температурі 545...585 °С та тиску 20,0...25,5 МПа і сприяють зменшенню фазового наклепу, що утворився в теплостійких сталях за наявності в них легуючих елементів хрому, молібдену і ванадію. Відповідно повернення і рекристалізація в теплостійких сталях зумовлює зниження їхньої міцності й ударної в'язкості, що викликає зменшення як надійності роботи обладнання, так і терміну його експлуатації. У зв'язку з цим дослідження особливостей процесів повернення і рекристалізації, які проходять за умов повзучості в металі теплостійких сталей та більшою мірою в їхніх зварних з'єднаннях, є актуальною задачею. Наявність в металі зварних з'єднань структурної, хімічної й механічної неоднорідності обумовлює прискорене проходження у ньому наведених фізико-хімічних процесів порівняно з основним металом. Відповідно прискорюється і пошкоджуваність металу зварних з'єднань за механізмами утворення пор повзучості й тріщин втоми.

Метою даної роботи є дослідження особливостей процесів повернення і рекристалізації, які відбуваються в металі зварних з'єднань з тепло-

Дмитрик В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-1085-3811>, Касьяненко І.В. – <https://orcid.org/0000-0003-1375-3522>,

Латинін Ю.М. – <https://orcid.org/0000-0003-4160-6001>

© В.В. Дмитрик, І.В. Касьяненко, Ю.М. Латинін, 2022

стійких сталей і тривалий час (понад 270 тис. год) працюють за умов повзучості.

Матеріали і методики. Структурно-фазовий стан, хімічний склад, наявність деформації, а також утворення пор повзучості й тріщин втоми в металі зварних з'єднань з теплостійких сталей досліджували з урахуванням нормативних положень [1, 2]. При вивченні використовували оптичну і електронну мікроскопію, рентгенографію, а також штатне обладнання для визначення хімічного складу і механічних властивостей. Дослідження виконували на зразках зварних з'єднань, вирізаних з діючих паропроводів, деформація яких становила 0,3...0,5 %, а також на зразках, виготовлених згідно з технічними положеннями нормативної документації. Використовували оптичну і електронну мікроскопію. Щільність дислокацій оцінювали з урахуванням усереднених даних загальної довжини проекції дислокаційних ліній, віднесених до одиниці площі мікрофотографії фольги.

Експериментальна частина і її обговорення. Зварні з'єднання з теплостійких сталей характеризуються наявністю певної вихідної структурної, хімічної й механічної неоднорідності, утворення якої забезпечується зварювальним нагріванням. Структура металу шва, ділянок зони термічного впливу (ЗТВ) та основного металу, який не підлягав зварювальному нагріванню, має певні відмінності. Відповідно структурні зміни в металі шва, в металі ділянок ЗТВ та в основному металі зварних з'єднань, які тривало працюють за умов повзучості, проходять з різною швидкістю. Вихідна структура, що відповідає вимогам нормативної документації, перетворюється в феритно-карбідну суміш. Структурно-фазові зміни сприяють збільшенню пошкоджуваності металу енергетичного обладнання (особливо паропроводів) [8] і більшою мірою їхніх зварних з'єднань. Відповідно зменшується ресурс їхнього напрацювання [4, 6–9].

Прояв процесів повернення і рекристалізації помітно активізується при напрацюванні зварних з'єднань понад 270 тис. год і підсилюється при їхньому подальшому напрацюванні. Повернення за умов повзучості як ефект, що передуює рекристалізації, характеризується зменшенням щільності дислокацій. Потім в процесі рекристалізації поступово ліквідуються окремі границі між зернами. Збільшення самих зерен відбувається шляхом ліквідації певних границь зерен, що їх розділяють. Форма зерен з відносно рівноосьовою набуває форми, близької до видовженої (рис. 1). Переважно ліквідуються границі між розташованими поруч зернами фериту, а також між контактуючими зернами трооститу.

Одночасно з ліквідацією границь зерен відбувається процес утворення їхньої однакової

кристаліграфічної орієнтації. Зменшується щільність дислокацій, яка значною мірою залежить від структурно-фазового стану металу зварних з'єднань і помітно відрізняється на ділянках ЗТВ, а також в металі шва і основному металі [10]. В бейніті й трооститі відпуску щільність дислокацій є більшою, ніж у фериті. Проте особливості знаходження дислокацій у наведених фазах потребують додаткового вивчення. Майже на 10...15 % знижується міцність і приблизно на 15...18 % зменшується ударна в'язкість [6] (рис. 2, 3).

Показники мікротвердості співставляли зі значеннями міцності для їхнього уточнення. При визначенні ударної в'язкості (рис. 3) V-образний надріз робили по ділянці сплавлення ЗТВ, розмір якої становив 0,10...0,15 мм, а також по ділянці

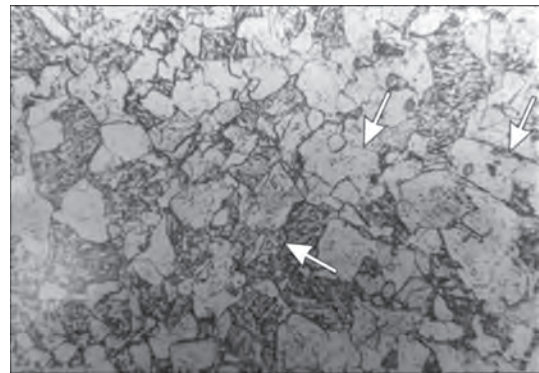


Рис. 1. Мікроструктура ($\times 260$) ділянки перегріву ЗТВ зварного з'єднання зі сталі 12X1MF. Стрілки вказують на границі зерен, які знаходяться в стадії усунення. Ресурс 290 тис. год

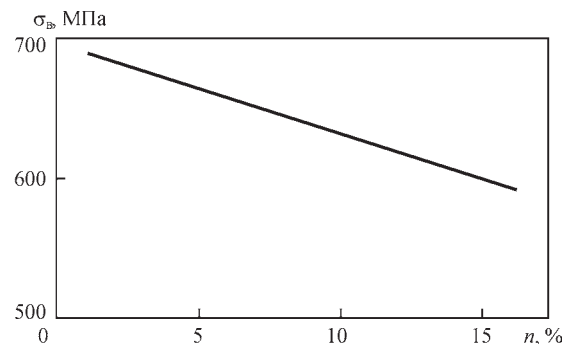


Рис. 2. Залежність границі міцності від вмісту феритно-карбідної суміші n в структурі ділянки перегріву ЗТВ зварного з'єднання зі сталі 12X1MF. Ресурс 280 тис. год

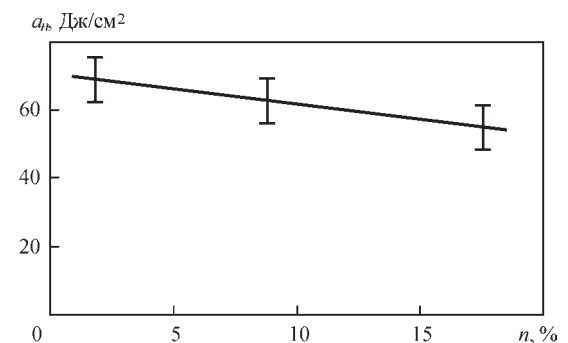


Рис. 3. Залежність ударної в'язкості a_n зварного з'єднання зі сталі 12X1MF від вмісту феритно-карбідної суміші n в структурах ділянок сплавлення і перегріву ЗТВ

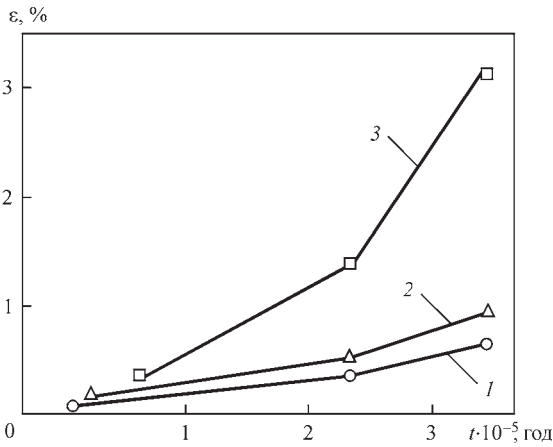


Рис. 4. Залежність деформації ϵ від терміну напрацювання t зварного з'єднання зі сталі 12Х1МФ: 1 – основний метал; 2 – метал шва; 3 – метал ділянки неповної перекристалізації ЗТВ перегріву. Саме на ділянці сплавлення найбільш інтенсивно за умов повзучості в металі зварних з'єднань проходять фізико-хімічні процеси і відбувається їхня пошкоджуваність.

Збільшення зерен як ефект рекристалізації за умов повзучості на відміну від зростання зерен при штатному відпалі відбувається за наявності їхньої пластичної деформації (рис. 4).

Деформацію на дослідних зразках визначали з урахуванням зміни форми зерен. Визначення деформації ділянок ЗТВ зварних з'єднань при загальній деформації паропроводів менше 1 % потребує окремого розгляду, оскільки включає як проковзування по границях зерен, так і відповідну зміну форми зерен.

Реалізація механізму повернення забезпечується дислокаційними процесами. Має місце релаксація невеликих груп дислокацій, а саме з 4...7 дислокацій одного знаку, розділених відстанню близько 15...20 нм (рис. 5).

У зернах α -фази (бейніт відпуску, ферит) виявили ділянки з різною щільністю дислокацій. Зміна орієнтування дислокацій становила близько 3...7°. Враховуючи положення в роботі [3] щодо перегрупування дислокацій, яке має помітну відмінність у структурі металу зварних з'єднань, можна виявити особливості їхнього перегрупування. Так, рух дислокацій та їхнє перегрупування активуються при поверненні та підсилюється при ре-



Рис. 5. Розподіл дислокацій в металі ділянки неповної рекристалізації ЗТВ зварного з'єднання зі сталі 12Х1МФ. $\epsilon = 4\%$, напрацювання 280 тис. год [6]

кристалізації. У процесі повернення через самодифузію хрому, молібдену і ванадію відбувається деформація окремих зерен α -фази, частково знімаються внутрішні напруження, що не супроводжується помітною пластичною деформацією самих зерен. Наведений процес немає суттєвого впливу на механічні властивості. Встановлено, що при проходженні процесу повернення мікротвердість металу зварних з'єднань помітно не змінюється. При поверненні збільшується ефект утворення, переміщення, злиття вакансій та спостерігається поява зародкових пор. Тому повернення слід розглядати як процес, що передує процесу рекристалізації. Дані процеси проходять при однакових робочих параметрах: температурі 545...585 °С і тиску 20,0...25,5 МПа. Однак їхнє проходження залежить від напрацювання зварних з'єднань. Так, при напрацюванні зварних з'єднань близько 250...260 тис. год в їхньому металі переважно проходять процеси повернення, а при подальшому напрацюванні – процеси рекристалізації, які характеризуються ліквідацією окремих границь між контактуючими зернами α -фази (див. рис. 1).

Процеси повернення і рекристалізації в структурі зварних з'єднань паропроводів мають свої відмінні особливості, які залежать від структурно-фазового стану з'єднань. Структура кожної ділянки ЗТВ, а також металу шва та основного металу суттєво відрізняється. Відповідно відрізняється і прояв проходження процесів повернення і рекристалізації, а також рівень пластичної деформації ділянок ЗТВ, металу шва та основного металу.

Розміри ділянок ЗТВ, структура кожної з яких є однотипною, відносно малі. Загальна ширина ділянок становить приблизно 6...8 мм. Наявність малих розмірів ділянок ускладнює виявлення на кожній з них виділення вихідної енергії при поверненні та рекристалізації. У зв'язку з цим доцільно особливості процесів повернення і рекристалізації металу зварних з'єднань розглядати металографічними методами, як структурно-фазові ефекти, з відповідним урахуванням деформації. Крім того, слід розглядати окремо кожну ділянку ЗТВ, металу шва і основного металу зварних з'єднань, за допомогою рівняння

$$X_n = 1 - \exp(-B_n T^k),$$

де X_n – зменшення щільності дислокацій в обсязі зерен α -фази (X_1 – ферит, X_2 – бейніт відпуску); T – температура, 545...585 °С; B_n – константа, що враховує структурні зміни фериту B_1 (0,8), бейніту B_2 (0,9); k_n – постійна, що враховує роботу зварних з'єднань в маневровому режимі та вплив температурної дії на структурні зміни фериту k_1 (0,15), бейніту k_2 (0,21).

При визначенні щільності дислокацій, що утворилася після напрацювання, враховували її

вихідну щільність. Константу, пов'язану зі структурними змінами, визначали за наявності у структурі феритно-карбідної суміші як бракувальної складової. Постійну, що враховує вплив температурної дії на структурно-фазовий стан при маневровому режимі, визначали з урахуванням терміну роботи при температурі 545...585 °С, а також при наявності перегрівів (аварійний викид пари).

Структурні зміни в металі зварних з'єднань паропроводів, при їхній тривалій роботі за умов повзучості призводять до перетворення їхньої вихідної структури в феритно-карбідну суміш (рис. 6, 7). Процеси повернення і рекристалізації сприяють перетворенню вихідної структури у феритно-карбідну суміш, тому доцільно визначити відсотковий вміст у структурі зварних з'єднань утвореної феритно-карбідної суміші, яку можна вважати бракувальною. Наявність такої суміші сприяє прискоренню пошкоджуваності зварних з'єднань та зниженню ресурсу їхнього напрацювання.

За умов маневреної роботи енергоблоків напруження p і температура T змінюються. Саме ці параметри, а також збільшення терміну напрацювання зварних з'єднань зумовлюють утворення в структурі їхнього металу бракувальної феритно-

карбідної суміші. Утворена суміш n є функцією напруження p , температури T і часу t

$$n = f(p, T, t).$$

Кількість утвореної феритно-карбідної суміші при відповідній зміні напруження p до $p \pm dp$, температури $T \pm dT$ і часу напрацювання зварних з'єднань $t + dt$ складе

$$dn = \left(\frac{\partial n}{\partial p}\right) dp + \left(\frac{\partial n}{\partial T}\right) dT + \left(\frac{\partial n}{\partial t}\right) dt.$$

Наведене рівняння показує послідовність збільшення кількості феритно-карбідної суміші в структурі зварних з'єднань, що наводиться як повний диференціал dn , який дорівнює сумі трьох змінних параметрів.

Найбільш інтенсивно структурно-фазові перетворення при напрацюванні зварних з'єднань паропроводів понад 280 тис. год проходять: на ділянці сплавлення ЗТВ, яка при зварюванні нагрівається в інтервалі температур $T_L - T_S$; на ділянці перегріву, де зварювальне нагрівання становить $T_S = 1150$ °С (приблизно); на ділянці неповної рекристалізації, що нагрівається при зварюванні в інтервалі температур $A_{c1} - A_{c3}$. Встановлено, що структурно-фазові зміни, які забезпечують наявність 30...40 % феритно-карбідної суміші як бракувальної структури металу зварних з'єднань [1, 2], характеризуються зниженням мікротвердості (рис. 8), що узгоджується зі зменшенням ударної в'язкості й міцності.

Усунення окремих границь між зернами відбувається при одночасному переміщенні дислокацій за механізмами ковзання і переповзання. При усуненні границь в утвореному зерні спостерігається поступове набуття однакової кристалографічної будови. При деформації металу зварних з'єднань 3...5 % (ділянки перегріву та неповної рекристалізації ЗТВ) спостерігали в зернах α -фази збільшення нерівномірного розподілу дислокацій (рис. 9).

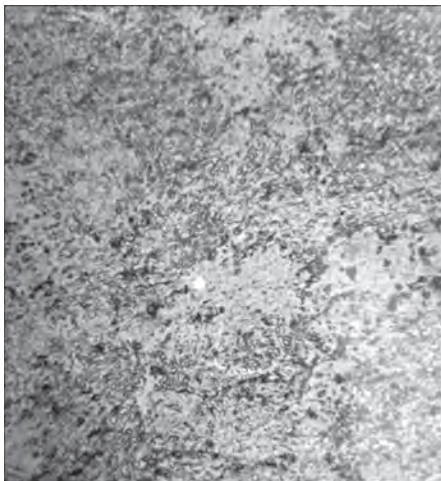


Рис. 6. Мікроструктура ($\times 360$) ділянки неповної рекристалізації зварного з'єднання зі сталі 12X1MФ. Ресурс 280 тис. год

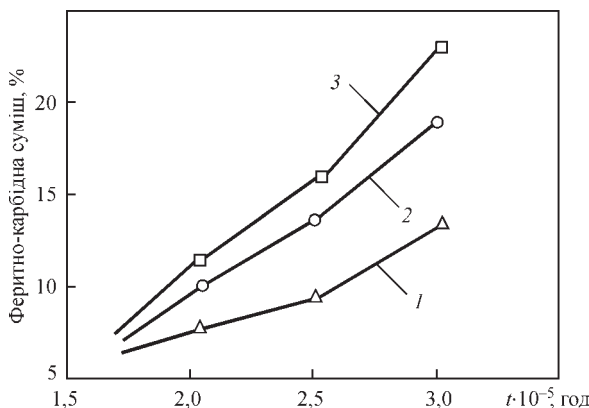


Рис. 7. Перетворення вихідної структури зварного з'єднання зі сталі 15X1M1Ф у феритно-карбідну суміш від терміну напрацювання t : 1 – метал шва; 2 – ділянка перегріву ЗТВ; 3 – ділянка неповної рекристалізації. Ресурс 270 тис. год

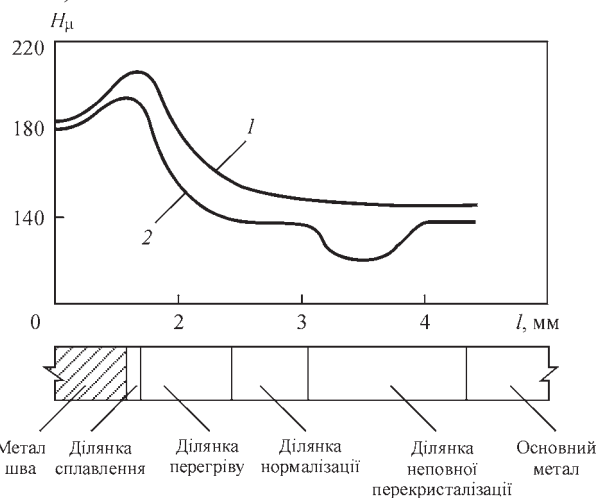


Рис. 8. Мікротвердість зварного з'єднання зі сталі 15X1M1Ф: 1 – вихідна мікротвердість, дослідний зразок; 2 – мікротвердість зварного з'єднання паропроводу (ТЕС м. Зміїв, напрацювання 280 тис. год)

Нерівномірність розподілу дислокацій переважно більш характерна для зерен бейніту відпуску, ніж для зерен фериту. Ділянки з малою щільністю дислокацій в зернах фериту розташовані поруч з ділянками, де щільність накопичення дислокацій

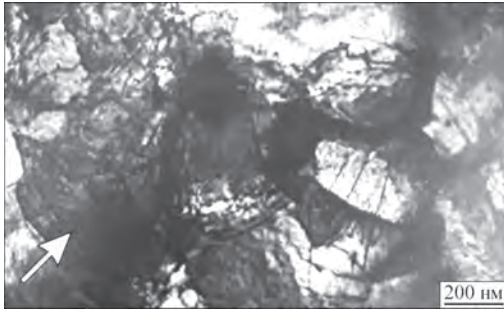


Рис. 9. Тонка структура ділянки неповної рекристалізації ЗТВ зварного з'єднання зі сталі 12X1МФ. Зерно бейніту відпуску позначене стрілкою. Ресурс 280 тис. год

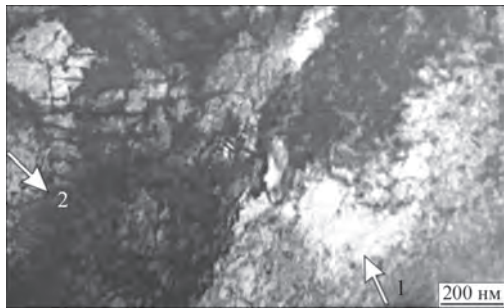


Рис. 10. Розподіл дислокацій у зернах фериту (стрілка 1) та бейніту відпуску (стрілка 2). Ділянка перегріву ЗТВ зварного з'єднання зі сталі 12X1МФ. Ресурс 280 тис. год



Рис. 11. Мікроструктура металу шва зварного з'єднання зі сталі 12X1МФ. Ділянка зерна α -фази із зменшеною щільністю дислокацій відзначена стрілкою. Ресурс 280 тис. год

є значно більшою (рис. 9). На межах зерен відзначається наявність дислокаційних петель.

Оцінку щільності дислокацій проводили шляхом вимірювання загальної довжини проекції дислокаційних ліній на одиницю площі мікрофотографії фольги. Враховували вплив систематичних помилок, які зумовлені наявністю незакріплених дислокацій, фрагментів дислокаційних петель та дислокацій з невизначеною орієнтацією. Стосовно структури досліджуваних зварних з'єднань, то похибка не перевищувала 17...20 %. Виявлено, що щільність дислокацій у зернах бейніту відпуску і фериту є різною (рис. 10). Окремі ділянки зерен α -фази характеризуються суттєво зменшеною щільністю дислокацій (рис. 11) [10]. Зі збільшенням напрацювання зварних з'єднань понад 280 тис. год щільність дислокацій помітно зменшується (рис. 12).

Повернення і рекристалізація в структурі металу зварних з'єднань зумовлює усунення фазового наклепу. Зменшується внутрішня енергія зерен, що підтверджується видаленням дислокаційних петель (рис. 13). Зняття наклепу сприяє самодифузії елементів хрому, молібдену і ванадію, що призводить до утворення сегрегацій та нових карбідів [6] і сприяє підвищенню деформаційної здатності металу зварних з'єднань.

Ф.А. Хромченко встановив [5], що деформація металу ЗТВ зварних з'єднань, що тривало працюють за умов повзучості, може сягати 5...7 %. Виявлено [6], що деформація окремих ділянок ЗТВ є різною. Наприклад, ділянки неповної перекристалізації – 3, перегріву – 2, металу шва – 0,6, а основного металу – 0,3 %. Відповідно і рівень рекристалізації металу шва, основного металу та металу ділянок ЗТВ є різним і залежить від його деформації (див. рис. 4). Проте деформація ділянок ЗТВ має свої особливості, що потребує окремого розгляду.

У цілому процеси повернення і рекристалізації в металі зварних з'єднань з теплостійких сталей, тривало працюючих за умов повзучості й малоциклової втоми, слід розглядати як складові фізико-хімічних процесів, що відбуваються в металі. Доцільно при розробці нових теплостійких сталей [11]

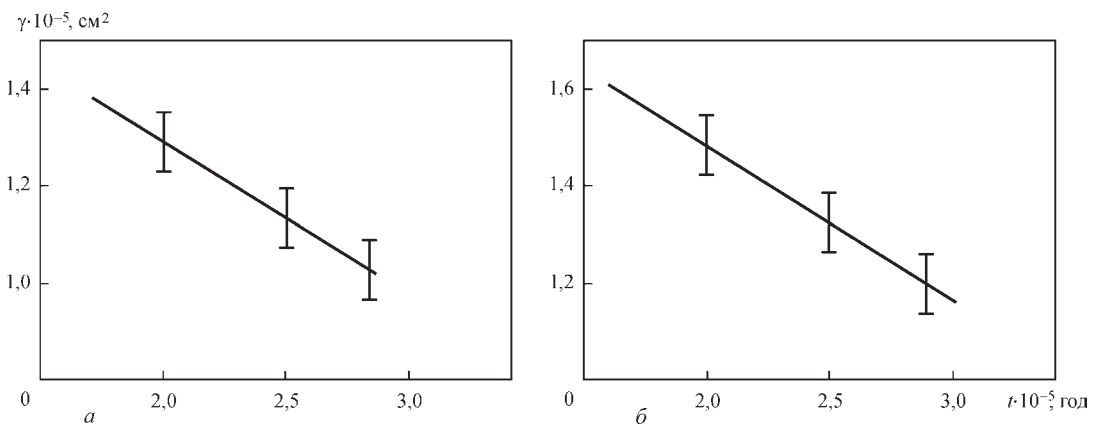


Рис. 12. Зміна щільності дислокацій γ від терміну напрацювання t в зернах фериту (а) і бейніту (б) ділянки неповної перекристалізації ЗТВ зварного з'єднання зі сталі 15X1M1Ф

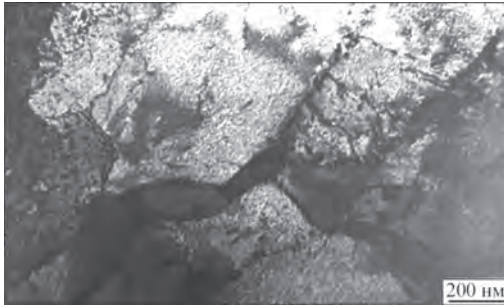


Рис. 13. Мікроструктура основного металу зварного з'єднання зі сталі 12Х1МФ. Ресурс 280 тис. год

враховувати особливості проходження таких процесів і, зокрема, процесів повернення і рекристалізації.

Висновки

1. Досліджено особливості процесів повернення і рекристалізації в металі зварних з'єднань паропроводів, які тривало працюють за умов повзучості. Виявлено зв'язок наведених процесів з перетворенням вихідної структури зварних з'єднань у феритно-карбідну суміш, а також із пластичною деформацією їхнього металу.

2. Встановлено, що швидкість проходження процесів повернення і рекристалізації залежить від вихідної структури зварних з'єднань і пов'язана з утворенням феритно-карбідної суміші.

3. В процесі рекристалізації в структурі зварних з'єднань усуваються окремі границі між зернами, утворюються видовжені зерна, збільшені за розмірами, а самі зерна набувають однакової кристаліграфічної орієнтації.

Список літератури

1. ГКД 34.17.401–95. *Контроль та продовження строку служби металу устаткування теплових електростанцій. Типова інструкція. Ч. 1. Котли, турбіни та трубопроводи з тиском 9 МПа і вище.*
2. ДНАОП 0.00–1.11–98. *Правила будови і безпечної експлуатації трубопроводів пари та гарячої води.*
3. Инденбаум Г.В., Розенберг В.Ю. (1986) *Возврат и рекристаллизация металлов.* Пер. с англ. Москва, Металлургия.
4. Дмитрик В.В., Касьяненко І.В., Латинін Ю.М. (2021) Структурний стан і пошкоджуваність металу зварних з'єднань паропроводів. *Автоматичне зварювання*, **9**, 1–5.

5. Хромченко Ф.А. (2002). *Ресурс сварных соединений паропроводов.* Москва, Машиностроение.
6. Глушко А.В., Дмитрик В.В., Сыренко Т.А. (2018) Ползучесть сварных соединений паропроводов. *Металлофизика. Новейшие технологии*, **40**, **5**, 683–700.
7. Дмитрик В.В., Царюк А.К., Конык А.И. (2008) Карбидные фазы и повреждаемость сварных соединений паропроводов в условиях ползучести. *Автоматическая сварка*, **3**, 39–43.
8. Израилев Ю.Л., Хромченко Ф.А. (ред.) (2002) *Живучесть паропроводов стареющих тепловых электростанций.* Москва, ТОРУС-ПРЕСС.
9. Кречковська Г.В., Студент О.З., Свірська Л.М. (2017) Нерівномірність розподілу карбідів в структурі експлуатованої сталі 12Х1МФ з різних зон пароперепускного гину головного парогону ТЕС. *Наукові нотатки*, **59**, 154–158.
10. Дмитрик В.В., Глушко А.В., Сиренко Т.О. (2017) Структурні зміни в металі зварних з'єднань паропроводів після тривалої експлуатації. *Автоматичне зварювання*, **7**, 19–23.
11. Скульский В.Ю., Царюк А.К. (2004). Новые теплоустойчивые стали для изготовления сварных узлов тепловых энергоблоков (обзор). *Автоматическая сварка*, **4**, 35–40.

References

1. GKD 34.17.401–95. *Inspection and extension of service life of metal of thermal power plant equipment. Standard instruction. Pt. 1. Boilers, turbines and pipelines with pressure of 9 MPa and higher* [in Ukrainian].
2. DNAOP 0.00–1.11–98. *Rules of construction and safe operation of steam and hot water lines* [in Ukrainian].
3. Indenbaum, G.V., Rozenberg, V.Yu. (1986) *Recovery and recrystallization of metals.* Moscow, Metallurgiya
4. Dmytryk, V.V., Kasyanenko, I.V., Latynin, Yu.M. (2021) Structural state and damageability of welded joint metal of steam pipelines. *The Paton Welding J.*, **9**, 1–5 (немає в цьому році і в цьому номері)
5. Khromchenko, F.A. (2002) *Life of welded joints of steam pipelines.* Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
6. Glushko, A.V., Dmitrik, V.V., Syrenko, T.A. (2018) Creep of welded joints of steam pipelines. *Metallfizika. Novejshie Tekhnologii*, **40**(5), 683–700 [in Russian].
7. Dmitrik, V.V., Tsaryuk, A.K., Konyk, A.I. (2008) Carbide phases and damageability of welded joints of steam pipelines under creep conditions. *The Paton Welding J.*, **3**, 28–32.
8. (2002) *Viability of steam pipelines of aging thermal power plants.* Eds by Yu.L. Izrailev, F.A. Khromchenko, Moscow, TORUS-PRESS [in Russian].
9. Krechkovska, G.V., Student, O.Z., Svirskaya, L.M. (2017) Heterogeneous distribution of carbides in structure of used steel 12Kh1MF from different zones of steam bypass line of main TPP pipelines. *Naukovi Notatky*, **59**, 154–158 [in Ukrainian].
10. Dmitrik, V.V., Glushko, A.V., Sirenko, T.O. (2017) Structural changes in metal of welded joints of steam pipelines. *The Paton Welding J.*, **7**, 15–18.
11. Skulsky V.Yu., Tsaryuk, A.K. (2004) New heat-resistant steels for manufacture of weldments on heat power units (Review). *The Paton Welding J.*, **4**, 32–37.

RECOVERY AND RECRYSTALLIZATION OF METAL OF STEAM LINE WELDED JOINTS DURING LONG-TERM SERVICE

V.V. Dmytryk, I.V. Kasyanenko, Yu.M. Latynin

NTU «Kharkiv Polytechnic Institute». 2 Kyrpychova Str., 61002, Kharkiv, Ukraine. E-mail: igorkasyanenko@gmail.com

The processes of recovery and recrystallization occur in the metal of welded joints of heat-resistant pearlitic steels at their long-term operation. The running of these processes is very different from similar processes taking place at normal annealing. At recrystallization proceeding in the welded joint metal, some intergranular boundaries disappear, and the formed grains take an elongated shape. A decrease of strength by approximately 10...15 and of impact toughness by 15...18 % is observed in the recrystallized metal. It is found that recovery and recrystallization as components of the overall process of transformation of the initial structure of welded joint metal into a ferrite-carbide mixture proceed at its plastic deformation. The distribution of vacancies changes during recrystallization, differing essentially in the HAZ subzones. The highest deformation level is observed in the incomplete recrystallization subzone of the HAZ. Studying the features of recovery and recrystallization processes is relevant for determination of the reliability of operation and life of welded joints, as well as development of new heat-resistant steels, which will operate at higher working parameters – temperature and time. 11 Ref., 13 Fig.

Keywords: welded joints, heat-resistant steels, recovery, recrystallization, life, creep conditions, structural phase state, mechanical properties

Надійшла до редакції 24.06.2022