

УДК 620.171.2; 620.187.22

Л. Свірська; О. Студент, докт. техн. наук; П. Сидор, канд. техн. наук

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України

ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ МЕТАЛУ В РІЗНИХ ЗОНАХ ГИНУ НА ЙОГО ВЛАСТИВОСТІ ПІСЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА ГОЛОВНОМУ ПАРОГОНІ ТЕС

Резюме. Гини головних парогонів ТЕС характеризуються неоднаковою деформацією металу різних зон (розтягнутої, нейтральної, стисненої). Як результат – різні механічні властивості цих зон унаслідок деградації. Дослідили сталь 12Х1МФ з гину головного парогону ТЕС після $\sim 13 \times 10^4$ год експлуатації. Показано, що механічні характеристики, визначені за одновісного розтягу зразків на повітрі, є чутливішими аніж відповідні характеристики, визначені на тангенціально орієнтованих зразках. Виявили значне зниження ударної в'язкості металу біля зовнішньої поверхні гину у розтягненій та стисненій зонах. Фрактографічно підтверджено, що у цих зонах це було спричинено дефектами і тріщинами, які полегшують руйнування зразків.

Ключові слова: теплозвільна сталь, деградація, характеристики міцності та пластичності.

L. Svirska, O. Student, P. Sydor

INFLUENCE OF METAL PLASTIC DEFORMATION OF DIFFERENT ZONES OF PIPE BEND ON ITS PROPERTIES AFTER SERVICE ON MAIN STEAM PIPELINE OF POWER PLANT

The summary. The bends of main steam pipelines of the power plants are characterized by irregularity of metal deformation on different zones (stretched, neutral and compressed). As a result of difference between these zones the degradation its mechanical properties are different too. The 12Kh1M1F steel from the bend of main steam pipelines after $\sim 13 \times 10^4$ h operation was investigated. It was shown that mechanical properties determined under the tension on air using axis specimens were more sensitive to degradation of bend metal then corresponding properties for the tangential specimens. The significant reduction of impact toughness of the metal near outer surface of bend in the stretched and compressed zones was revealed. It was fractography confirmed that it was caused by the defects and cracks in these zones which facilitate the fracture of specimens.

Key words: heat-resistant steel, degradation, strength and plasticity properties.

Вступ. Досвід експлуатації парогонів свідчить, що їх пошкодження найчастіше трапляються у місцях інтенсифікації впливу експлуатаційних чинників. Гини парогонів ТЕС досить часто потрапляють у перелік таких місць [1-5]. Адже неоднорідність властивостей металу з різних зон гинів існує ще на етапі їх виготовлення і пов'язують її з нерівномірністю деформування по периметру труби в місці гину. Водночас, під час монтування головних парогонів ТЕС не вдається уникнути використання гинів труб та їх зварних з'єднань. Жорсткі температурно-силові умови експлуатації парогонів (тиск до 24 МПа, температура до 570 °С) та тривалий вплив на напружений метал агресивного наводнювального середовища, яким є пара високих параметрів, сприяють деградації його структури [6, 7] і втраті механічних властивостей, які гарантували його роботоздатність на початку експлуатації [8, 9]. Окрім того, у парогоні виникають додаткові термічні напруження, спричинені перепадом температури в стінці труб, власною вагою труб та ізоляції, вібрацією через пульсування потоку пари та обертання неврівноважених роторів насосів [10]. За таких умов саме гини і зварні з'єднання є найвразливішими елементами системи парогонів [3, 11], по яких перегріта пара потрапляє від котла до турбіни. Тому до гинів висувають особливі вимоги й

оцінювання їх роботоздатності продовжує залишатися одним з найактуальніших завдань для теплоенергетики України з критично зношеним устаткуванням [11]. Вищесказане визначило **мету роботи**, якою є дослідження металу з різних зон (стисненої, нейтральної та розтягнутої) гину головного парогону після його експлуатації на парогоні ТЕС з оцінюванням градієнта зміни властивостей по товщині стінки труби.

Опис об'єкта досліджень. Досліджували теплостійку сталь 12Х1МФ (0,1 % С; 0,019 % S; 0,015 % P; 0,26 % Si; 0,54 % Mn; 1,1 % Cr; 0,17 % V; 0,26 % Mo) вертикального гину головного парогону ТЕС після $\sim 13 \times 10^4$ год експлуатації та 817 зупинок технологічного процесу. Температура пари у трубі під час експлуатації становила 540 °С, тиск – 14 МПа. Зовнішній діаметр прямої ділянки труби становив 273 мм, товщина стінки – 36 мм. Радіус кривизни гину, виготовленого в заводських умовах, становив 1 м, а кут загинання – 90 °С. При цьому діаметральний переріз гину за формою стає деформованим еліпсом з великою і малою віссю D_1 і D_2 , та товщиною стінки труби в стисненій і розтягненій зоні гину t_1 і t_2 , відповідно. Згідно з нормативним документом на виріб [12] максимальна овальність гину (характеризується співвідношенням D_2 / D_1), що є одним із критеріїв оцінювання його придатності до експлуатації, не повинна перевищувати 6 %. Перед експлуатацією регламентована документом вимога була дотримана. Після експлуатації максимальна овальність гину зросла до 6,4 % і вийшла за допустимі межі. Внаслідок цього виникла суттєва різниця між товщиною стінки гину в зонах стиску t_1 і розтягу t_2 (39,5 та 33 мм відповідно). Це могло відбутися внаслідок повзучості металу в розтягненій зоні гину під впливом робочих напружень упродовж тривалої високотемпературної експлуатації. При цьому стінка труби у зоні розтягу тоншає, що призводить до концентрації деформації у цьому місці [3, 13] і сприяє зародженню тут тріщин повзучості, ріст яких може завершитися руйнуванням гину. З досвіду експлуатації парогонів тріщини повзучості найчастіше виявляють саме в розтягненій зоні гину [2, 14]. Відзначають також сприятливі умови для зародження і поширення тріщин термічної втоми в околі нейтральної лінії гину, який переніс велику кількість пусків-зупинок технологічного процесу [3, 10, 15, 16]. Та попри цей досвід дослідження властивостей гинів продовжуються, оскільки вони залишаються однією зі слабких ланок парогонів [17].

Методики досліджень. Міру деградації металу гину оцінювали за характеристиками міцності та пластичності, ударною в'язкістю та фрактографічними ознаками руйнування випробуваних зразків. Оскільки гину властива неоднорідність деформованого стану металу в перерізі труби, то рівень деградації оцінювали на зразках, вирізаних з розтягнутої, стисненої та нейтральної зон гину, орієнтуючи їх у тангенціальному і осьовому напрямі. Для з'ясування можливих відмінностей за механічними властивостями металу по товщині стінки труби тангенціально орієнтовані зразки вирізали в кожній із зон гину біля зовнішньої та внутрішньої поверхонь труби, а осьові зразки вирізували ще й з центральної частини стінки труби.

Механічні характеристики металу за одновісного розтягу визначали з використанням гладких циліндричних зразків діаметром 5 мм з п'ятикратною довжиною робочої частини згідно з ГОСТом 1497-84 [18]. Щоб усунути сліди шліфування на робочій частині зразків, які під час випроб могли спричинити концентрацію напружень, перед випробами їх поверхню полірували із застосуванням паст різної зернистості. Зразки випробовували на повітрі на розривній машині УМЕ-

10Т за швидкості деформації зразків $3 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

Ударну в'язкість металу гину визначали на зразках з U-подібним концентратором згідно з ГОСТом 9454-78 [19, 20]. Концентратори на зразках, вирізаних біля зовнішньої поверхні гину труби, нарізували на грані зразка, поверненій до зовнішньої поверхні труби, а на зразках, вирізаних біля внутрішньої поверхні гину труби – до внутрішньої. На зразках, вирізаних з центральної частини стінки труби, концентратори нарізували на гранях зразків, повернених і до зовнішньої, і до внутрішньої поверхонь, а після випроб обчислювали середнє значення отриманих даних.

Фрактографічні особливості руйнування зразків після механічних випроб дослідили на електронних мікроскопах НІТАСНІ S-2600N та Carl Zeiss EVO 4XVP.

Отримані результати та їх аналіз. Нормативний документ ТУ 14–3–460–2003 регламентує механічні властивості теплостійких сталей парогонів ТЕС [21]. Зокрема, границя текучості $\sigma_{0,2}$ сталі 12Х1МФ повинна бути не нижчою 274 МПа, а границя міцності σ_B повинна входити в межі 441...637 МПа. Відносні видовження δ і звуження ψ повинні бути не нижчими за 19 і 50 % для зразків, вирізаних у тангенціальному напрямі, та 21 і 55 % для зразків осьової орієнтації відповідно. Значення KCU для тангенціально орієнтованих зразків повинно бути не нижчим за 0,5, а для зразків осьової орієнтації – 0,6 МДж/м².

Результати випроб за одновісного розтягу тангенціально орієнтованих зразків свідчать про те, що внаслідок експлуатації характеристики міцності та пластичності не вийшли за регламентовані значення (рис. 1). Причому цей висновок стосується металу усіх зон гину труби. Тому можна зробити висновок, що досліджуваний метал придатний до подальшої експлуатації.

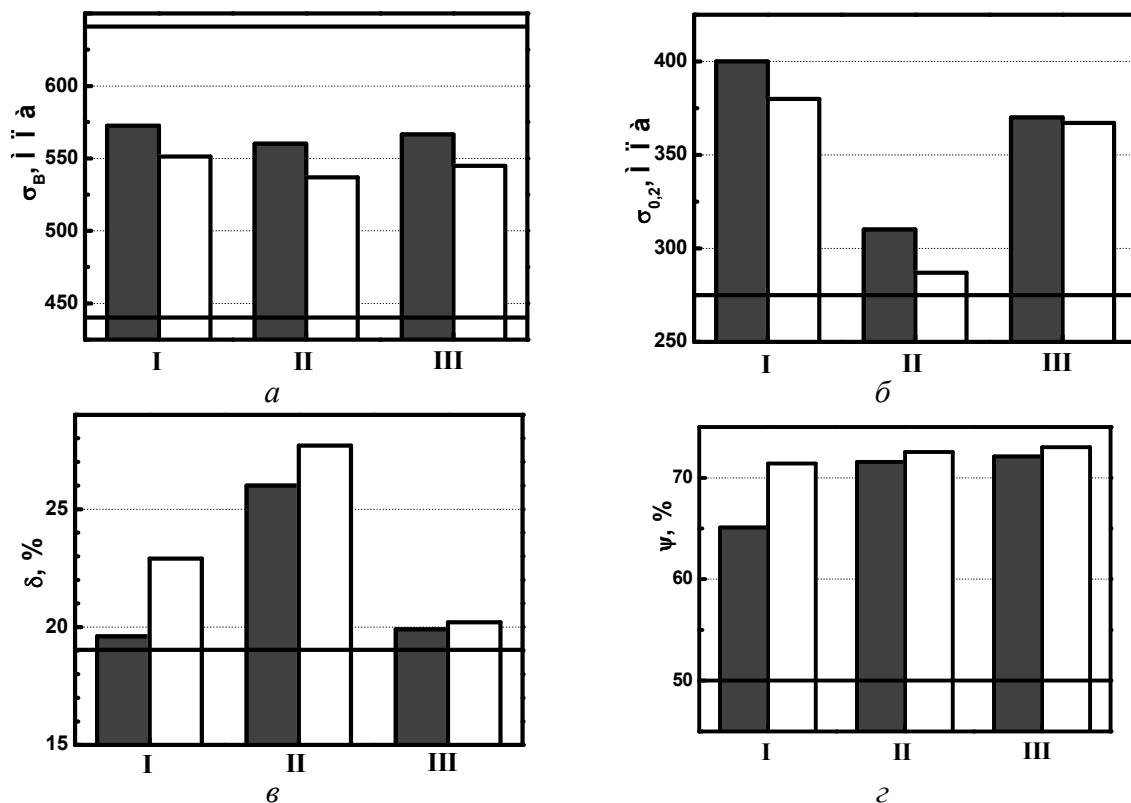


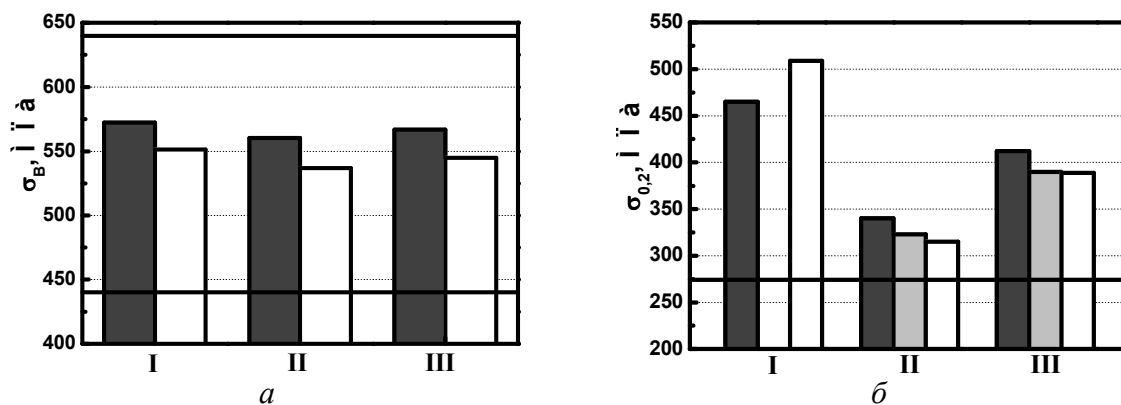
Рисунок 1. Механічні характеристики σ_B (а), $\sigma_{0,2}$ (б), δ (в), ψ (г), визначені на тангенціально орієнтованих зразках, вирізаних біля зовнішньої (чорні) та внутрішньої (білі стовпчики) поверхонь з розтягнутої (I), нейтральної (II) та стисненої (III) зон гину. Чорні горизонтальні лінії обмежують

регламентовані рівні механічних показників чи діапазон їх зміни

Відзначили, що характеристики міцності металу з різних зон гину труби якісно змінюються подібно біля зовнішньої і внутрішньої поверхонь труби (рис. 1а, б). Зокрема, в усіх зонах характеристики міцності металу біля зовнішньої поверхні труби вищі, ніж біля внутрішньої (залежно від зони гину характеристики відрізняються на 1...7%), а в розтягненій зоні – вищі, ніж у стисненій (залежно від місця вирізування зразків в перерізі стінки труби вони відрізняються на 1...7%). Щодо характеристик пластичності, то в усіх зонах гину біля зовнішньої поверхні вони нижчі, ніж біля внутрішньої (відносне видовження на 11...14%, а звуження – на 1...9%). Те, що характеристики міцності металу усіх зон гину біля внутрішньої поверхні є нижчими, а характеристики пластичності – вищими, може бути наслідком контактування внутрішньої поверхні труби з воденьвмісним середовищем. Водночас слід зазначити, що отримані на тангенціально орієнтованих зразках дані свідчать лише про незначні тенденції зміни механічних властивостей сталі 12Х1МФ як поперек стінки труби, так і в різних зонах її гину. Цей висновок не є несподіваним і узгоджується зі зробленим раніше на основі випроб прямих ділянок труб з теплостійких сталей щодо низької чутливості інтегральних механічних характеристик до деградації [22].

Особливістю отриманих результатів є те, що і біля зовнішньої, і біля внутрішньої поверхонь труби границя міцності металу з нейтральної зони є найнижчою, а відносне видовження, відповідно, найвищим, що можна вважати доказом максимальної зміни властивостей металу в найбільш деформованих зонах гину, причому вплив деформування розтягом сильніший, ніж деформування стиском. При порівнянні розтягнутої і нейтральної зон гину ефект за міцністю сягає 24, а за пластичністю – 38%.

Результати випроб зразків, вирізаних в осьовому напрямі, підтвердили висновок, зроблений за результатами випроб тангенціально орієнтованих зразків щодо придатності металу гину до подальшої експлуатації, оскільки практично всі отримані механічні властивості задовольнили вимоги регламентуючого документа [21] (рис. 2). Винятком стало лише відносне видовження металу із розтягнутої зони гину, яке не досягло регламентованого рівня (рис. 2в). Як і у випадку тангенціально орієнтованих зразків зафіксували найнижче значення границі текучості $\sigma_{0,2}$ у нейтральній зоні гину. Нижче її значення у стисненій зоні порівняно з властивим для розтягнутої та тенденцією до зниження рівнів $\sigma_{0,2}$ та σ_B металу всіх зон гину від зовнішньої до внутрішньої поверхні труби, за винятком аномального зміцнення в околі внутрішньої поверхні труби (рис. 2а, б). Отже, якщо судити за характеристиками міцності металу, визначеними на осьових зразках, можна теж зробити однозначний висновок, що підстав для демонтажу та припинення експлуатації гину немає.



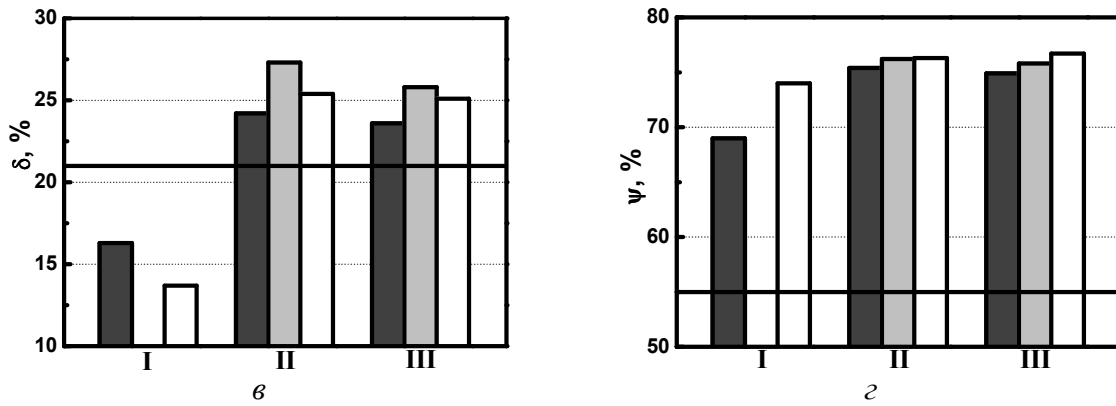


Рисунок 2. Механічні характеристики σ_B (а), $\sigma_{0,2}$ (б), δ (в), ψ (г), отримані на осьових зразках, вирізаних з центральної частини стінки гину (сірі), біля зовнішньої (чорні) і внутрішньої (білі стовпчики) поверхонь з розтягнутої (I), нейтральної (II) та стисненої (III) зон гину. Чорні горизонтальні лінії обмежують регламентовані рівні механічних показників чи діапазон їх зміни

Попри те, що в усіх зонах гину (як і у випадку тангенціально орієнтованих зразків) відносно звуження ψ вище за регламентоване значення, цей показник біля внутрішньої поверхні труби є дещо вищим аніж біля зовнішньої поверхні (рис. 2г). Відносно видовження δ у нейтральній та стисненій зонах гину перевищує регламентований рівень, а в розтягненій – значно нижче за нього. Лише зміна δ дає підстави для вилучення гину з експлуатації.

На основі отриманих результатів можна стверджувати, що механічні характеристики металу гину, визначені на осьових зразках, є чутливішими до зміни технічного стану металу внаслідок експлуатації, аніж визначені на тангенціальних зразках. Але цього не досить, щоб переконливо судити про стан металу, деградованого в експлуатаційних умовах.

Випробування на ударну в'язкість тангенціальних та осьових зразків, виготовлених з гину парогону, виявили дещо неочікуваний результат (рис. 3). Значення KCU металу нейтральної зони гину, визначені на зразках обох орієнтацій, задовольняють вимоги регламенту [15, 21]. Крім того, значення KCU у стисненій зоні гину, визначені на тангенціально орієнтованих зразках, та в розтягненій зоні гину, визначені на осьових зразках, теж перевищують регламентовані значення. Проте рівні ударної в'язкості металу в околі зовнішньої поверхні розтягнутої зони гину, визначені на тангенціально орієнтованих зразках і в околі внутрішньої поверхні труби у стисненій зоні гину, визначені на осьових зразках, виявилися нижчими за регламентовані значення. Такі низькі значення KCU розтягнутої і стисненої зон гину в околі зовнішньої поверхні труби однозначно свідчать про дуже низький опір руйнуванню та про неможливість подальшої експлуатації гину.

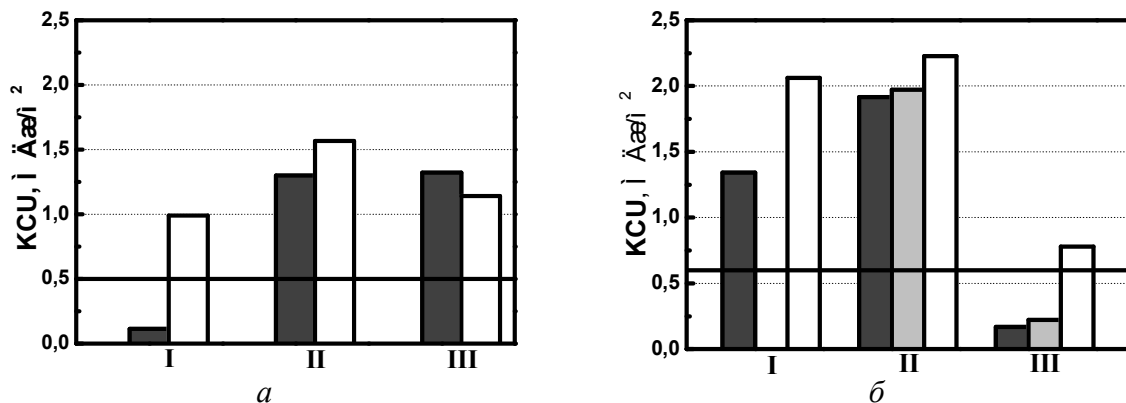


Рисунок 3. Ударна в'язкість KCU , визначена на тангенціальних (а) та осьових (б) зразках, вирізаних з

центральної частини стінки гину (сірі), біля зовнішньої (чорні) і внутрішньої (білі стовпчики) поверхонь з розтягнутої (I), нейтральної (II) та стисненої (III) зон гину. Чорною горизонтальною лінією позначено найнижчий з допустимих рівень *KCU* у вихідному стані

Виникає питання, чим спричинені такі низькі значення *KCU* в околі зовнішньої поверхні труби розтягнутої і стисненої зон гину, визначені на зразках різної орієнтації? Це можна пояснити наявністю дефектів у металі та їх орієнтацією стосовно осі труби. Біля зовнішньої поверхні труби в розтягненій зоні гину руйнування тангенціальних зразків поширюється в радіальному напрямі осьового перерізу труби, що співпадає з напрямом поширення тріщин повзучості. Тому найнижчий рівень *KCU* у цій зоні може бути зумовлений наявністю тріщиноподібних дефектів макроосьової орієнтації від повзучості в околі зовнішньої поверхні труби. Біля зовнішньої поверхні труби в стисненій зоні гину руйнування осьових зразків від зовнішньої поверхні труби теж поширюється в радіальному напрямі, але в діаметральному перерізі труби, що співпадає з напрямом поширення колових тріщин від термічних напружень. Отже низький рівень *KCU* у стисненій зоні на осьових зразках може бути зумовлений наявністю тріщиноподібних дефектів від термічної втоми внаслідок великої кількості зупинок технологічного процесу, які мали місце в процесі експлуатації гину.

Для з'ясування правомірності такого пояснення дослідили механізми руйнування зразків після випроб ударом. В усіх випробуваних зразках виявили три характерні зони руйнування: в'язке руйнування за механізмом зсуву (в околі концентратора) і за механізмом відриву, яке продовжується аж до зони доламу за крихким механізмом крізьзеренного відколу. Протяжність кожної з цих зон залежить від величини *KCU*. Зокрема, в зразках, вирізаних біля зовнішньої поверхні труби розтягнутої і стисненої зон гину, спостерігали лише острівки підростання за в'язким механізмом в околі дна надрізу зразків (рис. 4а). Тоді як в зразках з інших зон в'язке підростання простягається по всій товщині зразка і на глибину до 2...3 мм. Таким чином, практично крихкий механізм руйнування аналізованих варіантів зразків узгоджується з найнижчими рівнями *KCU* для них.

Разом з тим детальніший фрактографічний аналіз зламів зразків, вирізаних біля зовнішньої поверхні труби в розтягненій зоні, виявив, що навіть в межах в'язкого руйнування в околі концентратора часто трапляються тріщиноподібні дефекти, орієнтовані практично паралельно концентратору, з характерним зубчастим рельєфом берегів (рис. 4б). Їх легше вдалося розгледіти на фоні крізьзеренного відколу (рис. 4в). Поверхня руйнування немов пересікає їх. Стає очевидним, що зубчастий рельєф створюють окиси на берегах внутрішнього дефекту, які розтріскуються під час руйнування. Залежно від орієнтації дефекту стосовно макроплощини руйнування поверхня зламу перетинає його під більшим (рис. 4б) чи меншим (рис. 4в) кутами, а за їх близької орієнтації просто поглинає цей дефект (рис. 4г). В останньому випадку окисна плівка не розтріскується і можна спостерігати типовий рельєф міжзеренної фасетки, вкритий щільним шаром окису. Зрозуміло, що саме такі дефекти в околі зовнішньої поверхні розтягнутої зони гину найбільше впливатимуть на енергоємність руйнування металу в цій зоні.

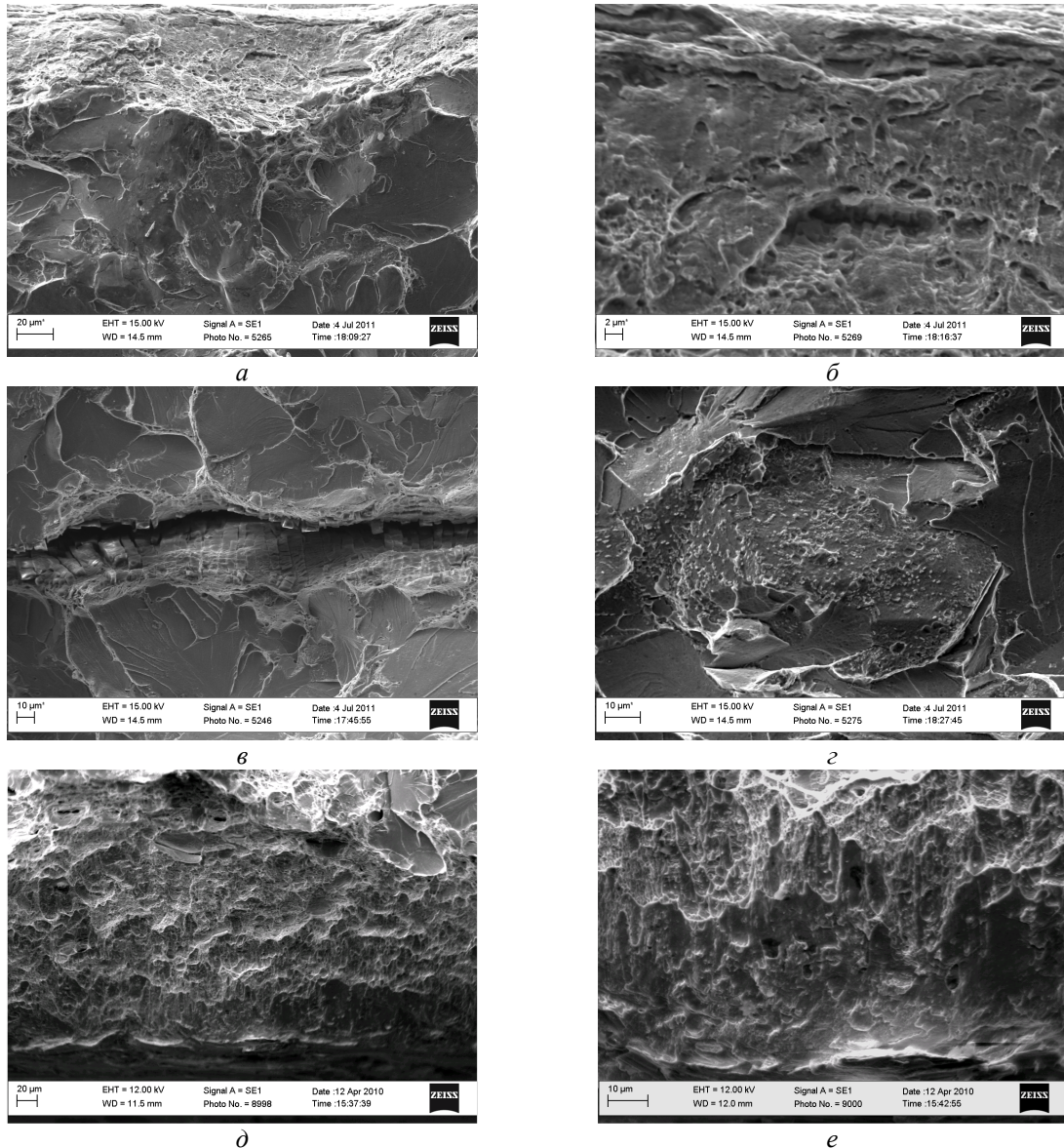


Рисунок 4. Фрактограми сталі 12X1МФ після випроб на ударну в'язкість зразків, вирізаних біля зовнішніх поверхонь розтягнутої (а-г) та стисненої (д, е) зон гину

Щодо зовнішньої поверхні труби у стисненій зоні гину, то на зламах виявили дещо більші за розмірами серпики в'язкого руйнування вздовж надрізу (рис. 4д), що узгоджується з вищим, ніж для зразків біля зовнішньої поверхні у розтягненій зоні гину значенням ударної в'язкості. В межах в'язкого руйнування теж виявили дефекти, які пов'язали з деградацією під час експлуатації. Вони є неправильної, сильно витягнутої в макронапрямі руйнування форми зі слідами окиснення на поверхні (рис. 4е). На їх дні часто спостерігали глибокі виразки, які свідчать про розгалуженість цих пошкоджень у перерізі зразків. Поглинання цих готових дефектів, які розташовані на шляху фронту макроруйнування зразків, спричиняє такий низький рівень ударної в'язкості.

Висновки. Механічні властивості за розтягу на повітрі осьових зразків чутливіше відображають зміни в металі гину внаслідок деградації порівняно з характеристиками, визначеними на тангенціальних зразках.

Виявлено стрімке зниження ударної в'язкості металу біля зовнішніх поверхонь труби в розтягненій і стисненій зонах гину. Фактографічно підтверджено, що це пов'язано з наявністю дефектів та тріщин у цих зонах, які полегшують руйнування.

Література

1. Соломаха, М. А. О надежности гибов паропроводов из стали 12X1MФ [Текст] / М.А. Соломаха, С.И. Макобоцкий // Электрические станции. – 1988 – № 4. С. 15–19.
2. Крутасова, Е.И. Надежность металла энергетического оборудования [Текст] / Е.И. Крутасова – М.: Энергоиздат, 1981. – 240 с.
3. Нахалов, В.А. Надежность гибов труб теплоэнергетических установок [Текст] / В.А. Нахалов – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 184 с.
4. <http://thewildside.biz/poverhnosti-nagreva/primery-povrezhdeniya-gibov-neobogrevaemyh-trub-kotlov-i-paroprovodov.html>
5. Беляев С.А. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС [Текст] / С.А. Беляев, В.В. Литвак, С.С. Солод – Томск: Изд-во НТЛ, 2008. – 218 с.
6. Кречковська, Г.В. Структурні зміни в експлуатованій на головному парогоні ТЕС сталі 15X1M1Ф, пов'язані з зупинками технологічного процесу [Текст] / Г.В. Кречковська // Металлофізика и новейшие технологии. – 2008 – Т. 30, Спецвип. – К.: Інститут металофізики НАН України. – С. 701–711.
7. Журавель, І.М. Вимірювання усередненого діаметру зерен металу з використання фрактальної розмірності [Текст] / І.М. Свірська // Фіз-хім механіка матеріалів. – 2010. – №3 – С. 126–128.
8. Кількісний аналіз структурних змін у сталі внаслідок високотемпературної витримки у водні [Текст] / О.З. Студент, Б.П. Русин, Б.В. Кисіль, М.І. Кобасяр, Т.П. Стахів, А.Д. Марков // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2003. – №1. – С. 22–28.
9. Оцінювання впливу зупинок технологічного процесу на зміну технічного стану металу головних парогонів ТЕС [Текст] / Г.М. Никифорчин, О.З. Студент, Г.В. Кречковська, А.Д. Марков // Фіз-хім механіка матеріалів. – 2010. – №2 – С. 42–54.
10. Антикайн, П.А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов [Текст] / П.А. Антикайн – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.
11. <http://www.obriy.pib.com.ua>
12. СТО ЦКТИ 10.003-2007. Трубопроводы пара и горячей воды тепловых станций. Общие технические требования к изготовлению. – Санкт-Петербург: 2007.
13. Бугай, Н.В. Повышение надежности котлов электростанций [Текст] / Н.В. Бугай, Г.В. Мухопад, А.Я. Красовский. – К.: Техника, 1986. – 176 с.
14. Станюкович, А.В. Пути повышения ресурса и надежности гибов паропроводов ТЭС [Текст] / А.В. Станюкович – Тр. ЦКТИ, 1988. – 246 с.
15. Мелехов, Р.К. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання [Текст] / Р.К. Мелехов, В.І. Похмурський – К.: Наукова думка, 2003.– 382 с.
16. Слободчикова, Н.И. Анализ и обобщение случаев разрушения гибов необогреваемых труб котлов и паропроводов [Текст] / Н.И. Слободчикова // Тр. ВТИ, 29, 1981. – С. 18-23.
17. http://energodiagnostics.ru/ru/application_mmm/app_mmm_bend.aspx
18. ГОСТ 1497–84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Москва: Стандартинформ. – 2006. – 22 с.
19. ГОСТ 9454-78 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – Москва: Издательство стандартов. – 2008. – 12 с.
20. ISO/DIS 12135. Unified Method of Test for the Determination of Quasistatic Fracture Toughness. Draft International Standard. – Geneva: – 2002. – 100 p.
21. ТУ. 14–3–460–2003 Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. – 41 с.
22. Застосування підходів механіки руйнування до оцінки водневої деградації сталей нафто- та паропроводів [Текст] / В.В. Панасюк, Г.М. Никифорчин, О.З.Студент, З.В. Слободян // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій; за заг. ред. Андрейківа О.Є., Лучка Й.Й., Божидарника В.В. – Львів: Каменяр, 2002. – С. 537–546.