

УДК 620.171.2; 620.187.22

ВПЛИВ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СТАЛІ 12Х1М1Ф З РІЗНИХ ЗОН ГИНУ ПАРОГОНУ ТЕС НА ЇЇ МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

О. З. СТУДЕНТ¹, Л. М. СВІРСЬКА¹, І. Р. ДЗІОБА²

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Технологічний університет, Кельце, Польща

Оцінено характеристики міцності і пластичності та статичну тріщиностійкість сталі 12Х1М1Ф з розтягнутої, нейтральної, стисненої зон вертикального гину головного парогону ТЕС та його прямої ділянки після $\sim 1,3 \cdot 10^5$ h експлуатації. Виявлено анізотропію механічних характеристик за руйнування в діаметральному і осьовому перерізах труби та їх градієнт поперек стінки труби.

Ключові слова: *теплотривка сталь, експлуатаційна деградація, механічні характеристики, статична тріщиностійкість, анізотропія.*

Гини головних парогонів ТЕС – одні з найнебезпечніших елементів у системі трубопроводів [1–5]. Останнім часом відчутно зросла кількість пошкоджень, які виявляють на гинах необігріваних труб котлів і головних парогонів після їх тривалого використання. Ці елементи експлуатуються за жорстких температурно-силових умов (температура 540°C, тиск пари до 24 МПа), а через зміну геометрії перерізу труб під час виготовлення гинів та пов'язаними з цим особливостями (зміна напружено-деформованого стану, структури та властивостей металу гинів порівняно з прямими ділянками труб) експлуатаційні умови для них стають ще жорсткішими. Зокрема, це циклічна зміна напружень у діаметральних перерізах труб під час їх експлуатації, яка спричиняє малоциклову втому металу, і тому гнуті ділянки пошкоджуються найчастіше [6].

Серед причин пошкоджень гинів труб виділяють такі: дефекти металургійного походження або бракована структура через порушення технології виготовлення; дефекти, що виникли на етапі виготовлення гинів на котлобудівних заводах, які спричиняють небезпечну локалізацію напружень від дії внутрішнього тиску пари та термічних напружень під час їх використання; порушення регламенту експлуатації і пов'язані з цим перевантаження [2, 3].

Залежно від умов використання і характеру руйнування в окрему групу виділяють гини пароперепускних труб з ошаднолегованих теплотривких сталей 12Х1М1Ф і 15Х1М1Ф, які експлуатуються за температури понад 500°C і тиску пари 10...14 МПа [3, 6]. Імовірність руйнування в тій чи іншій зоні гину в основному пов'язують з рівнем напружень. Досвід експлуатації парогонів свідчить, що осьові тріщини повзучості найчастіше виникають саме в розтягнених зонах гинів [2, 7]. При цьому ланцюжки міжзеренних мікротріщин зливаються, утворюючи магістральну тріщину. Завершальна стадія руйнування гину з наскрізним пошкодженням у макромасштабі відбувається, як правило, без відчутного тоншення стінки труби, але за значного розкриття берегів тріщини біля зовнішньої поверхні. Часто попри наскрізні тріщини від зовнішньої поверхні труби у розтягненій зоні гину спостерігають глибокі тріщини від внутрішньої поверхні у нейтральній зоні, виникнення яких пов'язують з впливом технологічного середовища. Крім того, в око-

лі нейтральної лінії гину після великої кількості пусків-зупинок технологічного процесу виникають сприятливі умови для зародження і поширення тріщин термічної втоми [4, 8–10].

Разом з тим, попри певний досвід, накопичений за результатами обстежень пошкоджених гинів парогонів та аналізу їх причин, дослідження механічних властивостей експлуатованих теплозв'язаних сталей не систематизовані і суперечливі, а тому актуальні. Відомо, що локальні параметри механіки руйнування характеризуються високою чутливістю до деградації теплозв'язаних сталей [11] та їх зварних з'єднань [12]. Тому для обґрунтування можливості продовження ресурсу гину парогону важливо оцінити технічний стан металу з різних його зон, використавши для цього інтегральні характеристики – міцність та пластичність, і локальну, зокрема таку, як статична тріщиностійкість.

Мета роботи – провести порівняльну оцінку експлуатаційної деградації сталі 12Х1МФ з різних зон гину та прямої ділянки головного парогону ТЕС за механічними характеристиками міцності і пластичності та статичною тріщиностійкістю.

Досліджені матеріали та методичні аспекти випроб. Дослідили теплозв'язану оцаленолеговану 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) з вертикального гину головного парогону ТЕС після $\sim 1,3 \cdot 10^5$ h експлуатації та 817 зупинок технологічного процесу, з яких 89 вимушені. Температура пари у трубі під час експлуатації становила 540°C, тиск робочого середовища – 14 МПа. Зовнішній діаметр прямої ділянки труби 273 mm, а товщина її стінки – 36 mm. Радіус кривизни гину, виготовленого в заводських умовах, становив 1 m, а кут загинання – 90°C. Пряма ділянка труби розташована на віддалі ~ 2 m від максимально розтягнутої зони гину. Отже, гин і пряму ділянку труби вирізали з однієї частини парогону. Тому вважали, що технологічні умови їх деградації під час експлуатації ідентичні.

Деградацію металу гину оцінювали за характеристиками міцності, пластичності та статичною тріщиностійкістю. Оскільки гину властива неоднорідність деформованого стану металу в перерізі труби, то про деградацію судили за результатами випроб зразків, вирізаних з розтягнутої, стисненої, нейтральної зон гину та його прямої ділянки, орієнтуючи їх у тангенціальному і осьовому напрямках. Щоб з'ясувати можливі відмінності за механічними характеристиками металу по товщині стінки труби, тангенціально орієнтовані зразки вирізали в кожній зі зон гину біля зовнішньої та внутрішньої поверхонь труби, а осьові – ще й з центральної частини стінки труби.

Механічні характеристики металу за одновісного розтягу на повітрі визначали, використовуючи гладкі циліндричні зразки діаметром 5 mm з п'ятикратною довжиною робочої частини, згідно з ГОСТ 1497-84 [13]. Щоб усунути сліди шліфування на робочій частині зразків, які під час випроб могли спричинити концентрацію напружень, їх поверхню перед випробами полірували зі застосуванням паст різної зернистості. Зразки випробовували на повітрі на розривній машині УМЕ-10Т за швидкості деформації $3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

Статичну тріщиностійкість сталі визначали за кімнатної температури на повітрі з використанням методу J -інтеграла, оцінюючи його критичне значення J_{Ic} , чутливе до деградації теплозв'язаних сталей [14]. Випробовували балкові зразки (10×15×75 mm) тангенціальної та осьової орієнтацій з наперед наведеними внутрішніми тріщинами довжиною $a_0 = 6 \dots 7$ mm. На завершальному етапі наведення (останніх 0,5 mm) швидкість росту тріщини становила $5 \cdot 10^{-9}$ m/cycle. Зразки вирізали з різних зон гину і прямої ділянки біля зовнішньої і внутрішньої поверхонь труб, а вершину концентраторів у них розташовували на глибині ~ 8 mm від зовнішньої і ~ 4 mm від внутрішньої поверхонь труби. Зразки навантажували за схемою триточкового згину. Під час навантаження одночасно фіксували силу P та

зміну податливості зразка і розкриття берегів тріщини внаслідок її підростання на Δa . Щоб визначити критичне значення J -інтеграла, що відповідає старту тріщини, будували J_R -криві (залежності поточного значення J -інтеграла J_k від підростання тріщини Δa_k) [15]. Для цього використали відому методику багаторазового часткового розвантаження зразків [16]. Під час кожного розвантаження визначали приріст тріщини Δa впродовж попереднього етапу навантаження зразка і відповідне йому значення J_k . Швидкість навантаження і розвантаження зразків становила $3,3 \cdot 10^{-5}$ m/s. За отриманими результатами будували J_R -криві, апроксимували які на $\Delta a = 0$, знаходили значення J_i , що характеризують енергозатрати на старт статичного підростання тріщини. Ці значення прийняли за статичну тріщиностійкість J_{Ic} .

Результати випроб за одновісного розтягу. Зазвичай діаметральний переріз гину має форму деформованого еліпса. Максимальна овальність гину m , яку визначали за співвідношенням $m = 2(D_{\max} - D_{\min}) / (D_{\max} + D_{\min}) \cdot 100\%$, один з критеріїв оцінювання його придатності до експлуатації. Згідно з вимогами нормативного документа, вона не повинна перевищувати 6% [17]. Перед запуском парогону ця вимога виконувалася, але після $\sim 1,3 \cdot 10^5$ h експлуатації його максимальна овальність зросла до 6,4% і вийшла за допустимі межі. Внаслідок цього виникла суттєва різниця за товщиною стінки труби в зонах стиску і розтягу (39,5 mm та 33 mm, відповідно). Її могла спричинити повзучість металу в розтягненій зоні гину, адже відомо, що впродовж тривалої високотемпературної експлуатації парогонів під впливом робочих напружень стінка труби у цій зоні тоншає. Це призводить до концентрації деформації у цьому місці і сприяє зародженню тріщин повзучості, ріст яких завершується руйнуванням гину [3, 4].

Результати випроб одновісним розтягом тангенціальних і осьових зразків, вирізаних з прямої ділянки труби та розтягнутої, нейтральної і стисненої зон гину свідчать про те, що після експлуатації характеристики міцності та пластичності в основному не виходять за межі регламентованих значень (рис. 1).

Разом з тим відзначили, що характеристики міцності металу з різних зон гину та його прямої ділянки тангенціально орієнтованих зразків змінюються якісно подібно біля зовнішньої і внутрішньої поверхонь труби (рис. 1а, с). Зокрема, в усіх зонах характеристики міцності металу біля зовнішньої поверхні труби вищі, аніж біля внутрішньої (залежно від зони гину властивості відрізняються на 1...7%), а в розтягненій зоні – вищі, ніж у стисненій. Щодо характеристик пластичності (рис. 1е, г), то в усіх зонах гину біля зовнішньої поверхні вони нижчі, ніж біля внутрішньої (відносно видовження на 11...14%, а звуження – на 1...9%). Отже, отримані на тангенціальних зразках результати свідчать лише про незначні тенденції до погіршення механічних властивостей сталі 12Х1МФ як поперек стінки труби, так і в різних зонах її гину. Цей висновок узгоджується зі зробленим раніше на основі випроб прямих ділянок труб з теплозв'язаних сталей щодо низької чутливості інтегральних механічних характеристик до деградації [11]. Особливість отриманих результатів – втрата пластичності металу розтягнутої і стисненої зон гину за показником δ (рис. 1е). Оскільки цей ефект проявляється чіткіше у цих зонах, ніж у нейтральній і на прямій ділянці гину, то це може бути наслідком впливу деформування металу цих зон розтягом та стиском під час виготовлення гину. Причому біля внутрішньої поверхні труби негативний вплив деформування стиском на величину δ є навіть дещо сильніший, аніж деформування розтягом, а біля зовнішньої, де максимальний вплив деформації розтягом, різниця за значеннями δ між цими зонами нівелюється. Отже, за результатами випроб тангенціальних зразків можна зробити висновок, що сталь 12Х1МФ після $\sim 1,3 \cdot 10^5$ h експлуатації все ще придатна до подальшого використання. Причому це стосується металу усіх зон гину та його прямої ділянки.

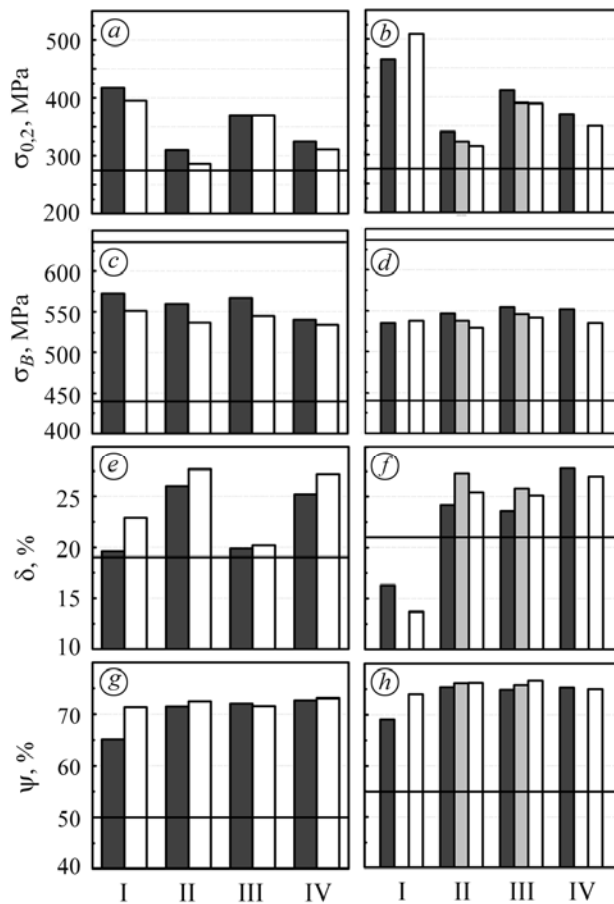


Рис. 1. Границі текучості $\sigma_{0,2}$ (a, b), міцності σ_B (c, d) і відносні видовження δ (e, f) та звуження ψ (g, h) сталі 12X1МФ після експлуатації на головному парогоні ТЕС, отримані на тангенціальних (a, c, e, g) і осьових (b, d, f, h) зразках, вирізаних з розтягнутої (I), нейтральної (II) та стисненої (III) зон гину та його прямої ділянки (IV) біля зовнішньої (чорні стовпчики) і внутрішньої (білі) поверхні труби та всередині її стінки (сірі). Горизонтальними лініями позначено регламентовані рівні (a, b, e-h) і допустимий діапазон зміни (c, d) відповідних характеристик.

Fig. 1. Yield strength $\sigma_{0,2}$ (a, b), ultimate strength σ_B (c, d), relative elongations δ (e, f) and reduction of area ψ (g, h) of 12X1MF steel after service on the main steam pipeline determined on tangential (a, c, e, g) and axial (b, d, f, h) specimens cut out from elongated (I), neutral (II), compressed (III) zones of pipe bend and straight part of steam pipe (IV) near external (black bars) and internal (white) surfaces of a tube and inside pipe wall (grey). Regulated levels (a, b, e-h) and acceptable range of changes (c, d) of the corresponding mechanical properties are marked by horizontal line.

ки труби, відзначили також їх анізотропію, оскільки спостерігали зміну залежно від орієнтації зразків. Зокрема, величини $\sigma_{0,2}$ і ψ всіх зон гину і прямої ділянки

Результати випроб осьових зразків підтвердили висновок, зроблений за результатами досліджень тангенціальних зразків щодо відповідності характеристик міцності і відносного звуження експлуатованої сталі вимогам регламентувального документа [18] (рис. 1b, d, h). Найнижчі значення $\sigma_{0,2}$ властиві нейтральній зоні гину та прямій ділянці труби, а в стисненій зоні вони менші, ніж у розтягненій. Підтвердилася також незначна тенденція до зниження $\sigma_{0,2}$ та σ_B металу всіх зон гину від зовнішньої до внутрішньої поверхні труби (рис. 1a-d). І лише в околі внутрішньої поверхні труби з розтягнутої зони гину зафіксували істотне зміцнення металу (рис. 1b). Але при цьому відносне видовження δ металу з розтягнутої зони стало нижчим за регламентований рівень (рис. 1f), що є ознакою критичної деградації металу в цій зоні. Отже, за характеристиками сталі, визначеними на осьових зразках, а саме через відносне видовження δ металу з розтягнутої зони гину слід зробити висновок про її непридатність до подальшої експлуатації. Більше того, тонша стінка перерізу труби у розтягненій зоні, загалом сприяє інтенсивній деформації і зародженню тріщин повзучості.

Загалом, окрім незначного градієнта характеристик по товщині стінки

парогону, визначені на осьових зразках, більші, ніж на тангенціальних (рис. 1а, b, g, h). Анізотропія характеристики δ найяскравіше проявилася у розтягненій і стисненій зонах гину (рис. 1e, f). Важко лише стверджувати про існування анізотропії границі міцності, оскільки смуги розкиду даних за використання зразків різної орієнтації подекуди перекривалися (рис. 1c, d).

Отже, на основі отриманих результатів зробили висновок, що механічні характеристики металу гину, визначені на осьових зразках, чутливіші до зміни його технічного стану внаслідок експлуатації порівняно з тангенціальними, оскільки тільки на них вдалося зафіксувати вичерпування пластичності сталі у розтягненій зоні гину парогону і зробити висновок про втрату її робоздатності.

Результати випроб на статичну тріщиностійкість. Встановили також різні тенденції зміни статичної тріщиностійкості металу гину і прямої ділянки парогону ТЕС (рис. 2).

По-перше, відзначили загалом низьку статичну тріщиностійкість сталі порівняно з властивою їй у вихідному стані (225 kN/m [14]). Для металу з усіх зон гину і з прямої ділянки зниження статичної тріщиностійкості внаслідок експлуатаційної деградації більше проявилася на тангенціальних і дещо менше на осьових зразках (рис. 2).

По-друге, анізотропія сталі за статичною тріщиностійкістю проявилася ще разючіше, ніж за інтегральними характеристиками. При цьому статична тріщиностійкість тангенціальних зразків істотно нижча, ніж осьових (на 49 і 19% для металу зі зони розтягу, 21 і 48% – з нейтральної зони, 7 і 60% – з прямої ділянки для металу біля зовнішньої і внутрішньої поверхонь труби, відповідно) (рис. 2). Виняток лише метал зі стисненої зони гину, тріщиностійкість якого, визначена на тангенціальних зразках, на ~40% вища, ніж на осьових. Отже, існує відчутна і водночас неоднозначна анізотропія за тріщиностійкістю металу різних зон гину.

І, по-третє, незалежно від зони вирізання зразків і їх орієнтації виявили градієнт статичної тріщиностійкості по товщині стінки труби (рис. 2). Зокрема, результати, отримані на тангенціально орієнтованих зразках, тріщини в яких відповідають осьовим тріщинам в трубі, які поширюються в радіальному напрямі, свідчать, що металу розтягнутої зони гину притаманні найнижчі значення J_{Ic} біля зовнішньої, але найвищі – біля внутрішньої поверхні труби (рис. 2a). Така орієнтація властива тріщинам, спричиненим повзучістю [19]. Причому перепад статичної тріщиностійкості по товщині стінки труби в зоні розтягу виявився найбільшим (майже у 4,5 рази). Отже, імовірність зародження та поширення тріщин від зовнішньої поверхні труби в розтягненій зоні гину найвища. Така низька тріщиностійкість цієї зони може бути наслідком сумісного впливу технологічних

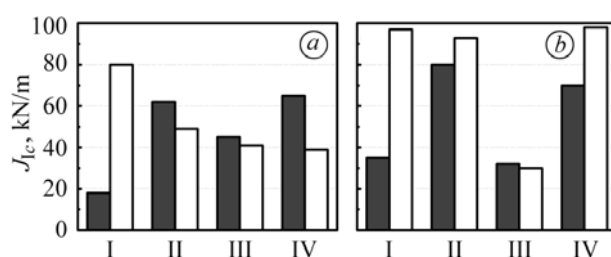


Рис. 2. Статична тріщиностійкість J_{Ic} сталі 12X1MΦ після експлуатації на парогоні ТЕС, визначена на тангенціальних (а) та осьових (b) зразках, вирізаних з розтягнутої (I), нейтральної (II) та стисненої (III) зон гину та його прямої ділянки (IV) біля зовнішньої (чорні стовпчики) і внутрішньої (білі) поверхні труби.

Fig. 2. Fracture toughness J_{Ic} of 12X1MΦ steel after service on the main steam pipeline determined on tangential (a) and axial (b) specimens cut out from elongated (I), neutral (II), compressed (III) zones of pipe bend and straight part of steam pipe (IV) near external (black bars) and internal (white) surface of a tube.

чинників виготовлення гину, експлуатаційних напружень розтягу (термічних та від внутрішнього тиску технологічного середовища) та наводнювання. Несиметричність діаметрального перерізу гину (більша випуклість перерізу труби в розтягненій зоні гину) та істотна різниця між товщиною стінки труби в розтягненій та стисненій зонах (різниця товщин становила 6,5 mm) сприяють підвищенню концентрації напружень у розтягненій зоні. Відомо також, що наводнювання під час експлуатації [20, 21] і високоградієнтне поле напружень інтенсифікують структурні перетворення з перерозподілом вуглецю і елементів легування з твердого розчину в карбіді вздовж меж зерен [22–25]. Це послаблює межі зерен [23] і опір руйнуванню в цілому. Тому логічно припустити, що значне зниження тріщиностійкості металу в околі зовнішньої поверхні труби в розтягненій зоні гину відзеркалює її сильнішу деградацію під впливом обох цих чинників.

Щодо нейтральної та стисненої зон гину та прямої ділянки, то перепад статичної тріщиностійкості по товщині стінки труби на тангенціальних зразках стає значно меншим і, крім того, якісно протилежним, ніж у зоні розтягу: значення J_{Ic} біля зовнішньої поверхні труби вищі, ніж біля внутрішньої (на 35, 7 і 63% відповідно). Отже, опір росту осьових тріщин в цих зонах значно вищий, а, отже, імовірність виникнення відповерхневих тріщин менша. Подібну тенденцію зниження статичної тріщиностійкості біля внутрішньої поверхні труби за використання тангенціальних зразків встановили раніше для металу шва у зварних з'єднаннях після їх тривалої експлуатації на головних парогонках ТЕС [26].

Деякі інші закономірності зміни характеристики J_{Ic} виявили за результатами випроб осьових зразків (рис. 2b). Тут оцінювали опір росту тріщин, які, як і в тангенціальних зразках, поширюються в радіальному напрямі, але не в осьовому, а в діаметральному перерізі труби. Виникнення таких колових тріщин зазвичай пов'язують з впливом осьових термічних напружень, виникненням згинальних моментів через недосконалу систему компенсації напружень тощо [20]. Загалом опір росту колових тріщин виявився вищий, ніж осьових (за винятком металу зі стисненої зони гину, для якої він на 40% нижчий, ніж визначений на тангенціальних зразках). Значення J_{Ic} всіх досліджених зразків металу (за винятком металу зі стисненої зони гину) біля зовнішньої поверхні труби істотно нижчі, ніж біля внутрішньої (на 64, 15 і 31% для розтягнутої, нейтральної зон гину та прямої ділянки труби, відповідно). У стисненій зоні значення J_{Ic} практично однакові для обох поверхонь труби, але істотно нижчі, ніж визначені у інших зонах. Отже, опір росту колових тріщин у стисненій зоні гину виявився найменшим. Нижча тріщиностійкість в околі внутрішньої поверхні труби в розтягненій зоні гину може бути ознакою неповної компенсації згинального моменту під час його експлуатації. Слід відзначити також, що за випроб осьових зразків статична тріщиностійкість металу біля зовнішньої поверхні труби в розтягненій і стисненій зонах гину є, по-перше, майже однакова (їх відносна зміна не перевищує 8%), а, по-друге – найменша.

Отже, за результатами випроб на статичну тріщиностійкість прийшли до висновку, що найнижчий опір росту тріщин, які за напрямом поширення відповідають осьовим тріщинам в трубі, властивий металу з розтягнутої зони гину в околі зовнішньої поверхні труби. Тоді як для тріщин, які за напрямом поширення відповідають коловим тріщинам в трубі, найнижчі значення статичної тріщиностійкості зафіксували для металу стисненої зони гину в околі внутрішньої поверхні труби.

ВИСНОВКИ

Виявлено градієнт характеристик міцності, пластичності та статичної тріщиностійкості поперек стінки труби та їх анізотропію за руйнування в діаметральному і осьовому перерізах експлуатованої труби. Механічні характеристики ме-

талу гину, визначені на осьових зразках, чутливіші до зміни його технічного стану внаслідок експлуатації порівняно з тангенціальними зразками, оскільки лише на них зафіксували вичерпування пластичності сталі в розтягненій зоні гину парогону. Найнижчий опір росту тріщин зафіксували на тангенціальних зразках в розтягненій зоні гину в околі зовнішньої поверхні труби, а на осьових – у стисненій в околі внутрішньої поверхні труби.

РЕЗЮМЕ. Определены характеристики прочности, пластичности и статической трещиностойкости стали 12Х1МФ из растянутой, нейтральной и сжатой зон вертикального изгиба главного паропровода ТЭС и его прямого участка после $\sim 1,3 \cdot 10^5$ h эксплуатации. Выявили анизотропию характеристик при разрушении в диаметральном и осевом сечениях трубы и их градиент поперек стенки трубы.

SUMMARY. The characteristics of strength, ductility and static fracture toughness of the 12Х1МФ steel from the elongated, compressed, and the neutral zones of vertical bending and straight part of the pipe after $\sim 1,3 \cdot 10^5$ h of operation at the main steam power station were estimated. Anisotropy of fracture characteristics in diametric and axial section of the tube and the gradient of change across the pipe wall under fracture were revealed.

1. Соломаха М. А., Макобоцкий С. И. О надежности гибов паропроводов из стали 12Х1МФ // Электрические станции. – 1988. – № 4. – С. 15–19.
2. Крутасова Е. И. Надежность металла энергетического оборудования. – М.: Энергоиздат, 1981. – 240 с.
3. Бугай Н. В., Мухомад Г. В., Красовский А. Я. Повышение надежности котлов электростанций. – К.: Техника, 1986. – 176 с.
4. Нахалов В. А. Надежность гибов труб теплоэнергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 184 с.
5. Кравченко В. П. Эрозионно-коррозионный износ гибов трубопроводов на блоках АЭС с ВВЭР-1000 // Восточно-Европейский журнал передовых. – 2006. – № 4/3. – С. 65–68.
6. Туляков Г. А., Скоробогатых Н. В., Гриневский В. В. Конструкционные материалы для энергомашиностроения – М.: Машиностроение, 1991. – 240 с.
7. Станюкович А. В. Пути повышения ресурса и надежности гибов паропроводов ТЭЦ // Тр. ЦКТИ. – 1988. – 246 с.
8. Антикайн П. А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.
9. Мелехов Р. К., Похмурський В. І. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. – К.: Наук. думка, 2003. – 382 с.
10. Слободчикова Н. И. Анализ и обобщение случаев разрушения гибов необогреваемых труб котлов и паропроводов // Тр. ВТИ. – 1981. – 29. – С. 18–23.
11. Застосування підходів механіки руйнування до оцінки водневої деградації сталей нафто- та паропроводів / В. В. Панасюк, Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, З. В. Слободян // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій / За заг. ред. О. Є. Андрейківа, Й. Й. Лучка, В. В. Божидарника. – Львів: Каменярь, 2002. – С. 537–546.
12. Загурський А., Студент О. Чутливість механічних властивостей теплостійких сталей та їх зварних з'єднань до високотемпературної водневої деградації // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / Під заг. ред. В. В. Панасюка. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2009. – С. 643–652.
13. ГОСТ 1497–84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Стандартиформ, 2006. – 22 с.
14. Вплив експлуатаційної пошкодженості паропровідної сталі 12Х1МФ на характеристики її тріщиностійкості / О. М. Романів, Г. М. Никифорчин, О. З. Студент та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1998. – 34, №1. – С. 101–104.
(Effect of damage in service of 12Kh1MF steam-pipe steel on its crack resistance characteristics / O. M. Romaniv, H. M. Nykyforchyn, I. R. Dzyoba, O. Z. Student et al. // Materials Science. – 1998. – 34, № 1. – P. 110–114).
15. Landes J. D., Begley J. A. Test results from J -integral studies: an attempt to establish a J_{Ic} testing procedure // Fracture Analysis, STP 560. – N.Y.: ASTM, 1974. – P. 170–186.

16. *ASTM E 1737-96*. Standard test method for J-integral characterization of fracture toughness // *Annual Book of ASTM Standards*. – 1996. – Vol. 03.01. – 24 p.
17. *СТО ЦКТИ 10.003-2007*. Трубопроводы пара и горячей воды тепловых станций. Общие технические требования к изготовлению. – Санкт-Петербург: ЦКТИ, 2007. – 92 с.
18. *TU 14-3-460-2003*. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. – 2003. – 41 с.
19. *Вайнман А. Б., Мелехов Р. К., Смян О. Д.* Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления. – К.: Наук. думка, 1990. – 272 с.
20. *Вайнман А. Б.* Водородное охрупчивание экранных труб барабанных котлов высокого давления и его предупреждение // *Энергетика*. – 1985. – № 7. – С. 11–14.
21. *Образование межкристаллитных трещин в экранных трубах котлов ТЭС / Р. К. Мелехов, А. М. Круцан, А. В. Василик, И. И. Василенко // Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 1985. – **21**, № 5. – С. 92–96.
(*Formation of intergranular cracks in the water-wall tubes of thermal electric power station boilers / R. K. Melekhov, A. M. Krutsan, A. V. Vasilik, I. I. Vasilenko // Materials Science*. – 1985. – **21**, № 5. – P. 483–487).
22. *Дзіоба І. Р.* Властивості сталі 13ХМФ після експлуатації та деградації в лабораторних умовах // Там же. – 2010. – № 3. – С. 67–72.
(*Dzioba I. R.* Properties of 13KhMF steel after operation and degradation under the laboratory conditions // *Ibid.* – 2010. – **46**, № 3. – P. 357–364).
23. *Оцінювання впливу зупинок технологічного процесу на зміну технічного стану металу головних парогонів ТЕС / Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, Г. В. Кречковська, А. Д. Марков // Там же*. – 2010. – **46**, № 2. – С. 42–54.
(*Evaluation of the influence of shutdowns of a technological process on changes in the in-service state of the metal of main steam pipelines of thermal power plants / H. M. Nykyforchyn, O. Z. Student, H. V. Krechkov's'ka, A. D. Markov // Ibid.* – 2010. – **46**, № 2. – P. 177–189.)
24. *Оцінювання деградації сталей парогонів за їх структурними, механічними та електрохімічними характеристиками / О. П. Осташ, О. В. Вольдемаров, П. В. Гладиш, А. Д. Івасишин // Там же*. – 2010. – **46**, № 4. – С. 5–12.
(*Evaluation of the degradation of steels of steam pipelines according to their structural, mechanical, and electrochemical characteristics / O. P. Ostash, O. V. Vol'demarov, P. V. Hladysh and A. D. Ivasyshyn // Ibid.* – 2010. – **46**, № 4. – P. 431–439.)
25. *Структурна мікропошкоджуваність сталей парогонів ТЕС / О. П. Осташ, А. І. Кондир, О. В. Вольдемаров та ін. // Там же*. – 2009. – **45**, № 3. – С. 13–22.
(*Structural microdamageability of steels of the steam pipelines of thermal power plants / O. P. Ostash, A. I. Kondyr, O. V. Vol'demarov et. al // Ibid.* – 2009. – **45**, № 3. – P. 340–349).
26. *Никифорчин Г. М., Студент О. З., Марков А. Д.* Аномальний прояв високотемпературної деградації металу зварного з'єднання оцаднолегованої сталі // Там же. – 2007. – № 1. – С. 73–79.
(*Nykyforchyn H. M., Student O. Z., Markov A. D.* Abnormal manifestation of the high-temperature degradation of the weld metal of a low-alloy steel welded joint // *Ibid.* – 2007. – **43**, № 1. – P. 77–84).

Одержано 02.04.2012