

*Галина КРЕЧКОВСЬКА, Леся СВІРСЬКА, Олександра СТУДЕНТ*

## **ВИКОРИСТАННЯ НАВОДНЮВАННЯ ДЛЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ У СТАЛІ 12Х1МФ ГИНУ ПАРОГОНІВ ТЕС**

*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України  
Україна, Львів, 79060, вул. Наукова, 5. E-mail: galyna@ipm.lviv.ua*

*Halyna KRECHKOVSKA, Lesya SVIRSKA, Oleksandra STUDENT*

## **USING OF HYDROGENATION OF THE 12Kh1MF STEEL FROM STEAM PIPELINE BENDING ON THE TPP FOR VISUALIZATION OF THE OPERATIONAL DEFECTS**

*Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS Ukraine,  
5, Naukova Str., Lviv, 79060, Ukraine. E-mail: galyna@ipm.lviv.ua*

### **ABSTRACT**

The metal of different zones of the bend was compared for its sensitivity to hydrogen embrittlement. For this purpose the axial specimens were undergone the tensile test in air after preliminary electrolytic hydrogenation. The plasticity of the hydrogenated metal from all zones of bend decreased relative to the non-hydrogenated one, but the greatest hydrogenation effect was revealed for the metal of the compressed zone of bend. Despite the generally ductile relief of the fracture surfaces of specimens from both zones (stretched and compressed zones) of bend, an essential secondary cracking and bands with transgranular cleavage fragments were additionally detected in metal of compressed zone of the bend. Their appearance was concerned with defects of operational origin, in which hydrogen have accumulated. These fractographical features were associated with operational defects as the microaccumulators of hydrogen, which contributed to reducing of the plasticity of the hydrogenated metal. Appearance of the step-like fracture surface in the hydrogenated metal of the compressed zone of bend was associated with revealed its banding microstructure as a result of plastic deformation of pipe during bend forming.

**KEY WORDS:** *steam pipeline bend, mechanical properties, degradation, hydrogen effect.*

### **ВСТУП**

Парогони сучасних електростанцій – це розгалужена система з'єднаних між собою прямих і зігнутих труб. До основних чинників, які спричиняють втрату початкової робото-здатності металу парогонів, відносять робочі температуру (до 570 °С), тиск середовища (до 24 МПа) [1], тривалість експлуатації (яка на сьогодні вже перевищує  $3 \cdot 10^5$  h) [2, 3], кількість зупинок технологічного процесу з охолодженням системи парогонів [4] та складний напружено деформований стан у стінці труб [5]. Ці експлуатаційні чинники сприяють протіканню у металі парогонів повзучості і малоциклової втоми, які призводять до деградації мікроструктури сталей (аж до зародження і розвитку пошкоджень у них). Важливо при цьому враховувати також можливий вплив водню із робочого середовища. Адже водень, абсорбований металом під час експлуатації [6], може інтенсифікувати структурні перетворення внаслідок пришвидшення дифузії вуглецю і легувальних елементів [7] та виділення карбідів вздовж меж зерен [8], спричиняти внутрішнє сповільнене руйнування на мікроструктурному рівні.

### **ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ**

Досліджували товстостінний вертикальний гин головного парогону ТЕС, виготовлений у заводських умовах із теплотривкої сталі 12Х1МФ, експлуатованого впродовж  $\sim 13,3 \cdot 10^4$  h з 817 зупинками технологічного процесу. Температура і тиск пари у трубі під час експлуатації становили 540 °С та 14 МПа відповідно. Зовнішній діаметр прямої ділянки гину становив

273 mm, товщина стінки – 36 mm, кут його загинання – 90 °С, а радіус – 1 m. У стисненій і розтягненій зонах гину товщина стінки становила 39,5 mm та 33 mm відповідно.

Стан експлуатованого металу оцінювали за характеристиками міцності ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ) та пластичності ( $\delta$ ,  $\psi$ ) за одновісного розтягу осьових зразків. Гладкі циліндричні зразки діаметром 5 mm розтягували на розривній машині УМЕ–10Т за швидкості деформації  $3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ . Зразки вирізали з розтягнутої (РЗ), нейтральної (НЗ), стисненої (СЗ) зон гину та його прямої ділянки (ПД). Механічні характеристики металу визначали за випроб на повітрі (без і після попереднього електролітичного наводнювання зразків). Щоб виключити вплив чистоти оброблювання поверхні зразків, їх робочу частину полірували з використанням алмазних паст різної зернистості. Зразки електролітично наводнювали впродовж 15 min у 5% водному розчині  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (рН = 0) з додаванням 2 g/l тіосечовини за густини струму  $50 \text{ mA/sm}^2$ . Для фрактографічних досліджень використали електронний мікроскоп ZEISS EVO 40XVP.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Відповідно до станційних протоколів про введення парогонів в експлуатацію та відповідних сертифікатів на постачання вимоги до механічних характеристик досліджуваної сталі 12Х1МФ на початку її експлуатації були дотримані. Після експлуатації результати випроб осьових зразків (табл. 1), показали, що найнижчі значення  $\sigma_{0,2}$  властиві металу ПД та НЗ гину, а в СЗ вони вищі, ніж у РЗ. Разом з тим, відносне видовження  $\delta$  металу СЗ гину в усьому перерізі труби є нижчим за регламентований рівень (згідно з нормативним документом ТУ 14–3–460–2003), що вважали за ознаку критичної деградації металу цієї зони. Отже, за механічними характеристиками сталі, саме на основі істотного зниження відносного видовження  $\delta$  металу СЗ зробили висновок про її непридатність до подальшої експлуатації.

Таблиця 1. Характеристики міцності і пластичності сталі 12Х1МФ різних зон гину після експлуатації та після попереднього електролітичного наводнювання з руйнуванням на повітрі

Table 1. Strength and ductile characteristics of the 12Kh1MF steel from different zones of operated bending before and after preliminary electrolytic hydrogenation of specimens with their following destruction in air

Розташування зразка		Без наводнювання				За попереднього наводнювання			
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Зона гину	Розтягнена	555	412	23,6	74,9	567	436	22,2	74,5
	Нейтральна	547	340	24,7	75,4	551	383	24	71,4
	Стиснена	538	509	15,6	69	541	491	12	40
Пряма ділянка		552	370	26	75,3	-	-	-	-
Нормативний документ ТУ 14-3-460-2003		441 – 637	>274	>21	>55	-	-	-	-

Аналіз макрозламів осьових зразків, вирізаних з різних зон гину та випробуваних розтягом, виявив характерну для в'язкого руйнування гладких зразків геометрію спряжених поверхонь типу «чашка–конус» на зразках із усіх зон гину окрім СЗ (рис. 1 *a, b, c*). На них чітко окреслені центральні ділянки зламів, так звані волоконні зони, в яких відбувається зародження руйнування, радіальні зони докритичного поширення руйнування з гребенями, які радіально розходяться від центральної зони, та конусні частини завершального етапу руйнування за механізмом зсуву. І лише на зразку із СЗ гину (рис. 1 *c*) злам крихкий і на ньому практично відсутня конусна частина зламу, що узгоджується з отриманим у цьому випадку низьким значенням відносного видовження  $\delta$ .

За вищої роздільної здатності в центральній волоконній зоні зламів спостерігали класичні елементи в'язкого руйнування, що утворилися шляхом зародження росту та злиття мікропорожнин, які на зламах сформували ямковий рельєф (рис. 2). Як особливість зламу СЗ гину відзначили великі за розмірами, але плиткі лінзоподібні ямки, на дні яких були дрібні ямки від включень з характерними слідами виходу смуг ковзання на поверхню, що формувалися під час руйнування перетинок між ними (рис. 2 *c*). Виявлені всередині волоконної частини зламу СЗ гину практично плиткі і неструктуровані овальні ямки пов'язали з впливом наводнювання. Адже дрібні ямки на їх дні, які вважали за сліди від карбідів, могли слугувати

мікрорезервуарами для водню, абсорбованого металом під час експлуатації, який полегшував і руйнування перетинок між дрібними ямками, і ріст лінзоподібних великих ямок. З усіх боків такі лінзоподібні плиткі ямки оточували гребені з характерними слідами витягування. Низька рельєфність зламу, сформованого з таких елементів, свідчить про те, що енергозатрати на його формування були значно меншими, ніж на формування розвинутого ямкового рельєфу у волоконній зоні зламів зразків з інших зон гину (рис. 2 *a, b, c*).

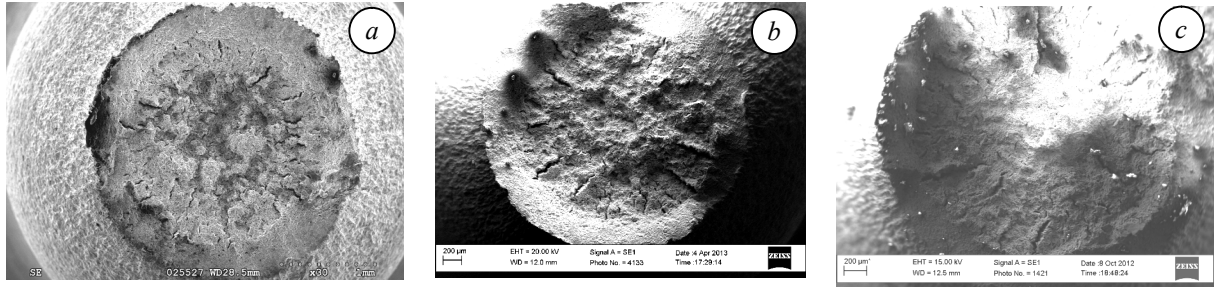


Рис. 1. Макрофрактограми руйнування розтягом на повітрі осьових зразків сталі 12Х1МФ, вирізаних у розтягненій (*a*), нейтральній (*b*), стисненій (*c*) зонах товстостінного гину та на його прямій ділянці (*d*) в околі зовнішньої поверхні труби гину після  $\sim 13,3 \cdot 10^4$  год експлуатації на головному парогоні ТЕС.

Fig. 1. Macrofractograms of axial specimens of 12Kh1MF steel cut in stretched (*a*), neutral (*b*), compressed (*c*) zones and in the straight section (*d*) of the thick-walled bending in the vicinity of the outer surface of the tube after  $\sim 13.3 \times 10^4$  hours of operation on the main steam pipeline of TPP after their tensile fracture in air.

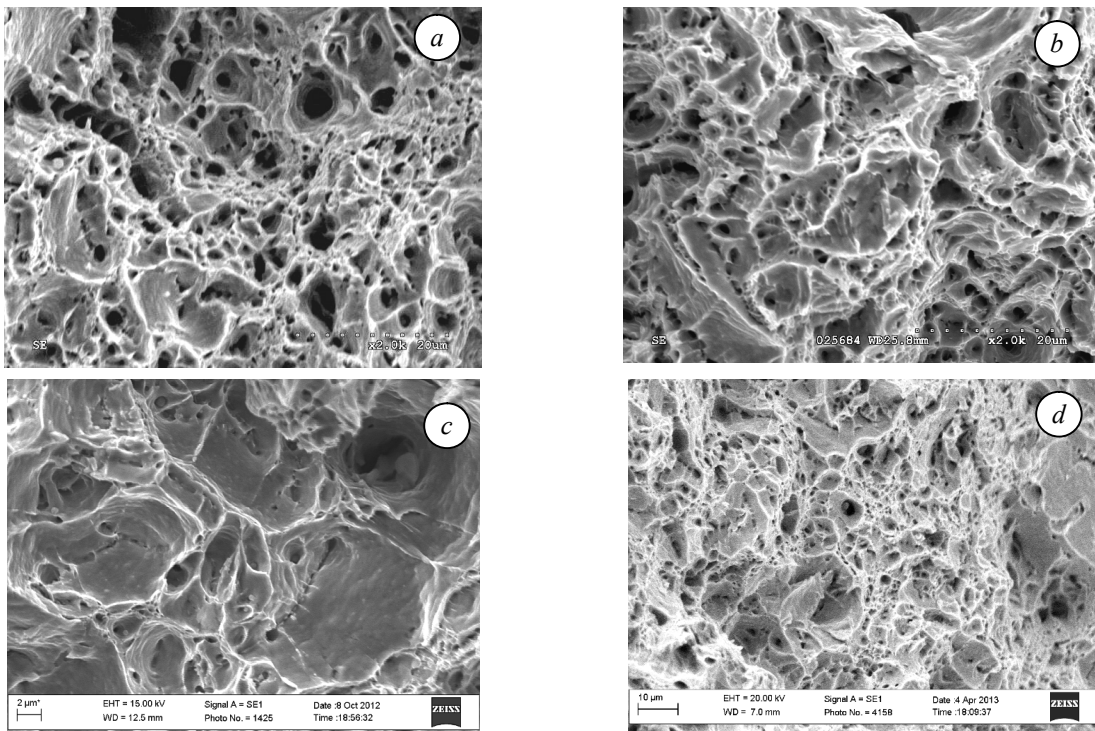


Рис. 2. Фрактограми з центральної волоконної зони зламів осьових зразків сталі 12Х1МФ, вирізаних у розтягненій (*a*), нейтральній (*b*), стисненій (*c*) зоні товстостінного гину та на його прямій ділянці (*d*) в околі зовнішньої поверхні труби після  $\sim 13,3 \cdot 10^4$  год експлуатації на головному парогоні ТЕС.

Fig. 2. Fractograms of the central fibre-like zones of the fracture surfaces of axial specimens of 12Kh1MF steel cut in stretched (*a*), neutral (*b*), compressed (*c*) zones and in the straight part (*d*) of the thick-walled bend in the vicinity of the outer surface of the pipe after  $\sim 13.3 \cdot 10^4$  h operation on the main steam pipeline of TPP.

Ямки в РЗ гину були значно глибшими (через сприятливіші умови для повзучості металу в цій зоні гину), і включення на їх дні фіксували рідко, бо під час руйнування зразка вони легко усувалися зі своїх місць через втрату когезивного зв'язку з матрицею (рис. 2 *a*). Крім того, в РЗ гину часто фіксували ланцюжки з таких ямок, які зливалися в єдину порожнину внаслідок повзучості. Кількість таких ланцюжків із ямок та розкриття утворених внаслідок цього дефектів зростала з наближенням до зовнішньої поверхні труби.

Особливістю радіальної зони докритичного руйнування зразків усіх зон гину стала поява характерних елементів зламу, пов'язаних із розшаруваннями (рис. 3). Якщо в НЗ гину та на його ПД ці розшарування пов'язані з полегшеним руйнуванням вздовж меж зерен чи субзерен, ослаблених карбідами, які втратили зв'язок з матрицею (рис. 3 *b, d*), то в РЗ і СЗ гину ці розшарування були значно глибшими (рис. 3 *a, c*). Якщо у РЗ гині це наслідок пороутворення вздовж меж зерен, спричиненого повзучістю, то у СЗ – це скоріше крихкі розшарування (сліди на поверхнях розшарування значною мірою нагадують гребені відриву між суміжними площинами мікротріщин). Останнє узгоджується з найнижчою пластичністю (за характеристикою  $\delta$ ) металу цієї зони гину.

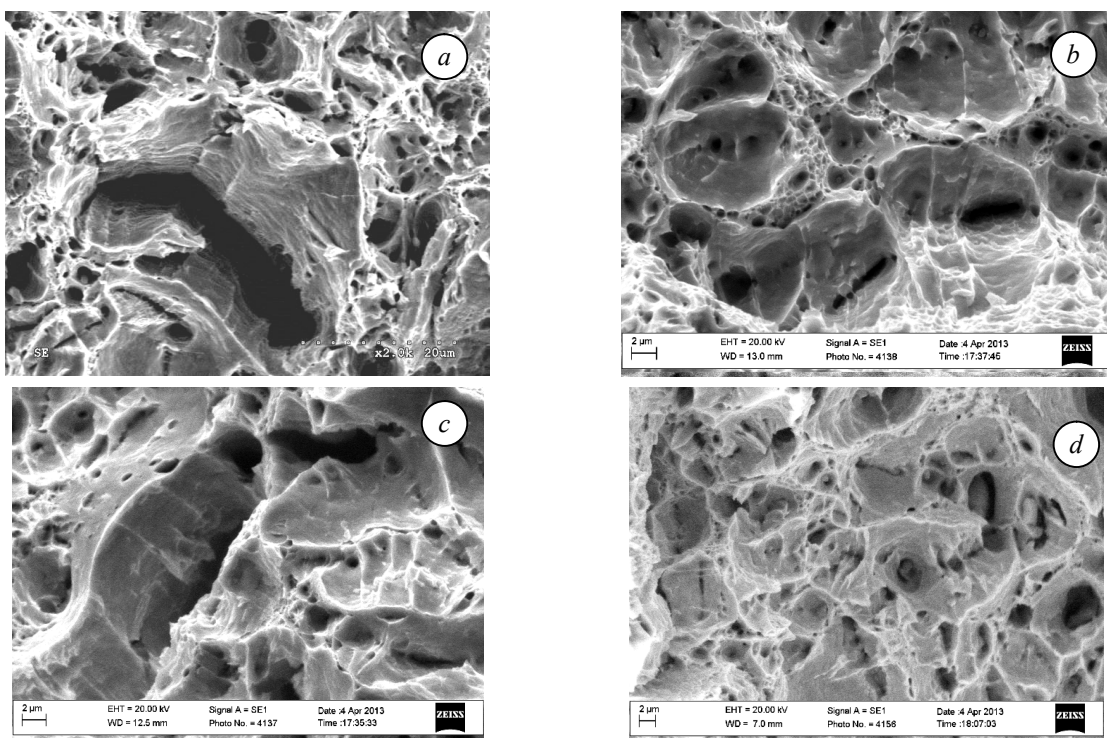


Рис. 3. Фрактограми з радіальної зони зламу осевих зразків сталі 12Х1МФ, вирізаних у розтягненій (*a*), нейтральній (*b*), стисненій (*c*) зоні товстостінного гину та на його прямій ділянці (*d*) в околі зовнішньої поверхні труби після  $\sim 13,3 \cdot 10^4$  год експлуатації на головному парогоні ТЕС.

Fig. 3. Fractograms of the radial zones of the fracture surfaces of axial specimens of 12Kh1MF steel in stretched (*a*), neutral (*b*), compressed (*c*) zones and in the straight part (*d*) of the thick-walled bend in the vicinity of the outer surface of the pipe after  $\sim 13.3 \cdot 10^4$  h operation on the main steam pipeline of TPP.

На ділянці косоного зламу в усіх випадках спостерігали типовий механізм руйнування, спричинений зсувом (рис. 4). Про це свідчать ямки, витягнені в одному напрямі і окантовані параболічними гребенями. Оскільки це завершальний етап руйнування, то мікропорожнини, що утворилися навколо включень (або на етапі експлуатації металу на парогоні, або під час наступного активного навантаження зразків) істотно zdeформовані в напрямі зсуву, і перетинки між ними руйнувалися внаслідок зсуву, формуючи такий рельєф. Разом з тим, у площині зсуву безпосередньо біля зовнішньої поверхні труби у СЗ гину зафіксували значну кількість достатньо великих виразок без явних ознак їх деформування під час розтягування зразків (чорні виразки неправильної форми, рис. 4 *c*). Їх вважали за експлуатаційні дефекти, які виникли навколо великих карбідів, сформованих у локальних смугах інтенсивних структурних перетворень у зовнішніх прошарках труби ще під час її високотемпературного інтенсивного деформу-

вання на етапі виготовлення гину. Адже відомо, що структурні перетворення в металі можуть пришвидшуватися не лише за тривалої дії температурно-силових умов, сприятливих для повзучості, але і короткочасна високотемпературна пластична деформація (зокрема, в теплотривких сталях [9]). При цьому істотно пришвидшує дифузія карбідотвірних елементів, що проявляється утворенням і інтенсивним ростом карбідів вздовж меж зерен. Саме з карбідами, які утворилися внаслідок інтенсивної деформації труби на етапі виготовлення гину, та, відповідно, з дефектами, що формувалися внаслідок їх відокремлення від матриці впродовж експлуатації гину, зв'язали найнижчі значення відносних видовження і звуження металу СЗ гину в околі зовнішньої поверхні труби.

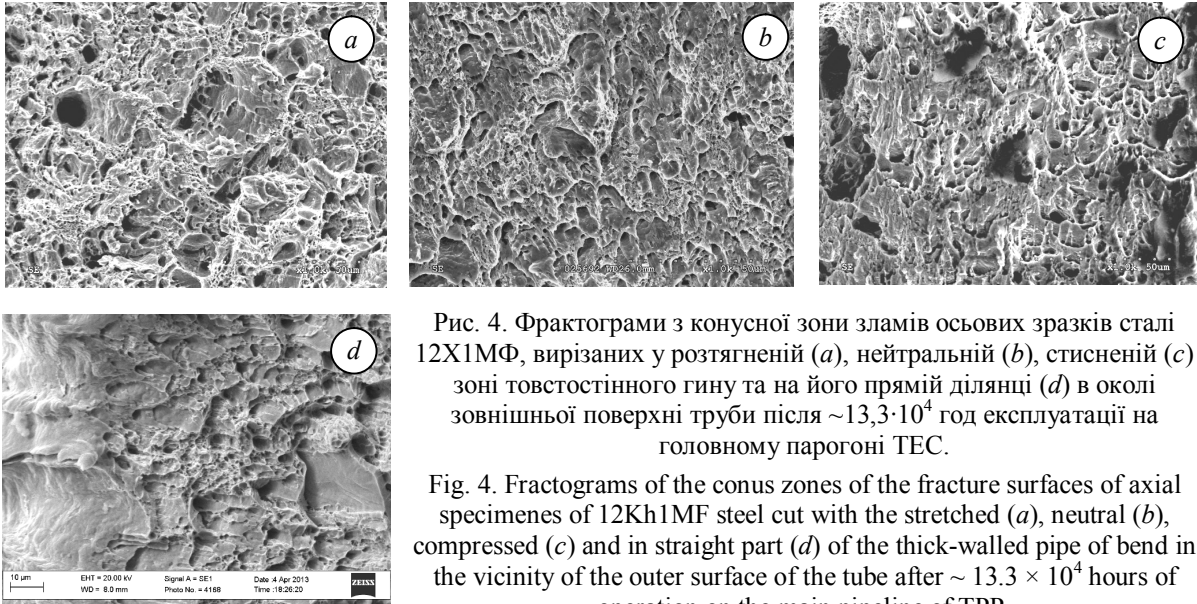


Рис. 4. Фрактограми з конусної зони зламів осьових зразків сталі 12Х1МФ, вирізаних у розтягненій (а), нейтральній (b), стисненій (с) зоні товстостінного гину та на його прямій ділянці (d) в околі зовнішньої поверхні труби після  $\sim 13,3 \cdot 10^4$  год експлуатації на головному парогоні ТЕС.

Fig. 4. Fractograms of the conus zones of the fracture surfaces of axial specimens of 12Kh1MF steel cut with the stretched (a), neutral (b), compressed (c) and in straight part (d) of the thick-walled pipe of bend in the vicinity of the outer surface of the tube after  $\sim 13,3 \times 10^4$  hours of operation on the main pipeline of TPP.

Отже, фрактографічні дослідження зламів осьових зразків сталі 12Х1МФ із різних зон товстостінного гину після  $\sim 13,3 \cdot 10^4$  год експлуатації на головному парогоні ТЕС підтвердили висновок, зроблений за результатами механічних випроб. Найменш енергоємним виявилось руйнування зразків, вирізаних із СЗ гину. Причому ознаки окрихчення металу СЗ виявили на всіх етапах руйнування зразків у вигляді великих і плитких лінзоподібних ямок у центральній частині зламу, глибоких розшарувань у межах радіальної зони та великих і неправильної форми розпоршених пошкоджень в околі зовнішньої поверхні труби, які не деформувалися під час розтягування зразків і тому їх вважали за дефекти експлуатаційного походження, які візуалізувалися завдяки зсуву на фінішному етапі руйнування.

Механічні характеристики осьових зразків металу СЗ гину після попереднього електролітичного наводнювання із подальшим їх розтягуванням на повітрі засвідчили практичну незмінність їх границі міцності на фоні ще більшого, ніж без наводнювання підвищення границі плинності (табл. 1). Зберігся також характер зміни  $\sigma_{0,2}$  із максимумом для металу СЗ і мінімумом – НЗ гину.

Характеристики пластичності металу НЗ та РЗ гину за впливу попереднього наводнювання практично не змінилися і залишилися вищими за регламентовані значення. Для СЗ попри сильніше (на понад 20 %) зниження  $\delta$  порівняно з ненаводненим металом, істотно (на понад 40 %) знизилася  $\psi$ , яке стало значно нижчим за регламентоване значення. Відомо, що під час експлуатації метал парогонів адсорбує водень із технологічного середовища, підвищений локальний вміст якого зафіксовано поблизу реальних зламів [10]. З урахуванням описаного вище зниження пластичності під впливом наводнювання, отриманого на лабораторних зразках, можна припустити, що пластичність металу на реальному об'єкті, може також суттєво знизитися за його насичення воднем. Як результат, це може стати причиною непрогнозованого пошкодження гину парогону.

Вплив наводнювання на характеристики пластичності металу різних зон гину виокремили за їх зміною по відношенню до відповідних характеристик для ненаводненого

металу (рис. 5). Очевидно, що пластичність наводненого металу знизилася по відношенню до ненаводненого у всіх зонах гину, але найбільше у його СЗ, саме в тій зоні, яка також виявилася найбільш деградованою за результатами випроб не наводненого металу.

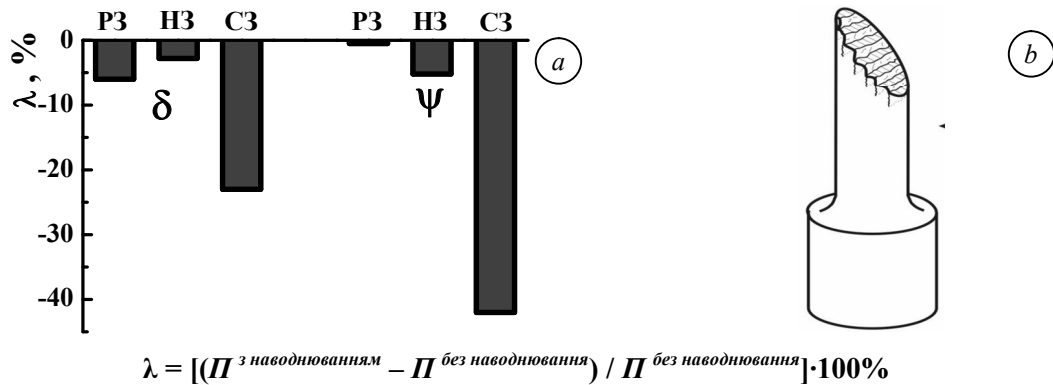


Рис. 5. Зміна характеристик пластичності попередньо наводненого металу різних зон товстостінного гину стосовно відповідних характеристик ненаводненого металу за коефіцієнтом  $\lambda$  (a) та схема зруйнованого зразка з металу стисненої зони гину після його попереднього наводнювання (b). Позначення  $\Pi$  відповідає одній з аналізованих характеристик пластичності.

Fig. 5. The change in the ductility characteristics ( $\delta$ ,  $\psi$ ) of the pre-hydrogenated metal of various zones of thick-walled bending relative to the corresponding characteristics of the non-hydrogenated metals using the coefficient  $\lambda$  (a) and the scheme of the destroyed specimen from compressed zone after preliminary hydrogenation (b). The designation  $\Pi$  corresponds to one of the analysed characteristics of ductility.

На зламі наводненого металу P3 гину з'явилися великі за розмірами плитці ямки у вигляді дископодібних мікротріщини (рис. 6 a), тоді як у його СЗ – глибокі розшарування з істотним вторинним розтріскуванням (рис. 6 b) і смуги з фрагментів кризьзеренного відколу (рис. 6 c). Їх появу зв'язали з дефектами експлуатаційного походження, в яких під час наводнювання зразків акумулювався водень, сприяючи руйнуванню перетинок між суміжними пастками для водню, якими служили пори навколо великих карбідів, що утворилися внаслідок інтенсивного високотемпературного деформування труби під час виготовлення товстостінного гину. Ці дефекти полегшили руйнування зразків під час випроб розтягом і знизили характеристики пластичності наводненого металу.

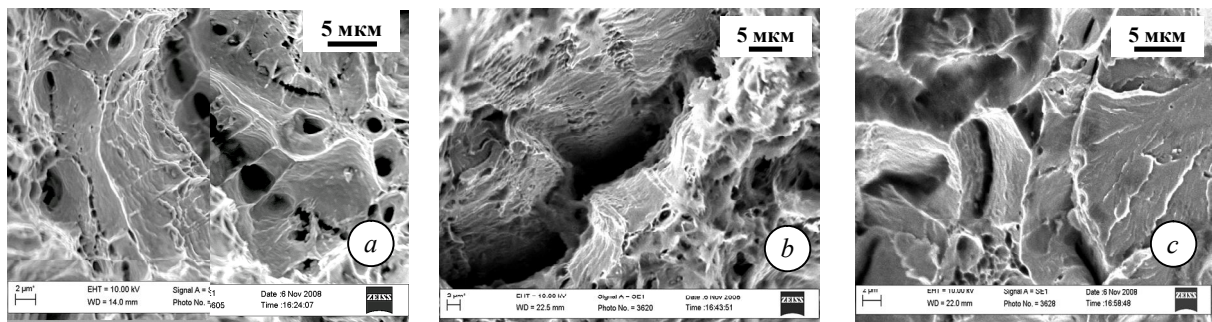


Рис. 6. Фрактограми осевих зразків з розтягнутої (a) та стисненої (b, c) зон товстостінного гину, зруйнованих на повітрі після попередньо наводнювання.

Fig. 6. Fractograms of axial specimens with stretched (a) and compressed (b, c) zones of the thick-walled bend destruction in air after their pre-hydrogenation.

У СЗ гину смуги кризьзеренного відколу перемежувалися смугами в'язкого ямкового рельєфу. Сходиноподібна будова зламу визначила його макрокосий характер (рис. 5) і дала підстави зв'язати його з виявленою смугастою неоднорідністю структури металу СЗ гину. Локалізація високотемпературної деформації труби під час виготовлення гину в окремих смугах інтенсифікувала перерозподіл карбідтвірних елементів із формуванням у межах цих смуг вузьких зон із практично феритних зерен і великих карбідів вздовж їх меж. Саме ці великі карбіди вздовж меж зерен у СЗ гину послужили зародками пошкодження, що і спричинило

найсильніше зниження характеристик пластичності металу СЗ гину, яке особливо чітко проявилось за впливу наводнювання.

## ВИСНОВКИ

Фрактографічно встановлено, що руйнування розтягом зразка, вирізаного із СЗ гину, було найменш енергоємним. Ознаками окрихчення металу були великі і плиткі лінзоподібні ямки в центральній частині зламу, глибокі розшарування в межах радіальної зони зламу та великі, неправильної форми, розпорошені в околі зовнішньої поверхні труби пошкодження, які пов'язали з експлуатаційною деградацією металу.

За наводнювання зразків на розтяг найбільше знизилася пластичність металу СЗ гину, що вважали прямою ознакою найсильнішої деградації металу цієї зони гину. На зламі наводненого металу цієї зони гину виявили суттєве вторинне розтріскування та смуги з фрагментів крізьзеренного відколу. Їх виникнення зв'язали з дефектами експлуатаційного походження, в яких під час наводнювання зразків акумулювався водень, сприяючи руйнуванню перетинку між суміжними пастками для водню. Отримані результати показали, що не лише метал розтягнутої зони гину, деградацію якого пов'язували з найсприятливішими умовами для повзучості металу в цій зоні гину (як це вважалося дотепер), а ще і метал стисненої зони гину парогону ТЕС може стати найсильніше деградованим, якщо пластично деформувати товсто-стінну трубу (на етапі виготовлення гину), що сприяє формуванню смугастої структури з великими карбідами в зонах максимального зсуву, які під час експлуатації спричиняють міжзеренне руйнування металу в цих смугах.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Галашов Н. Н. Технологические процессы выработки электроэнергии на ТЭС и ГЭС: учебное пособие // Томский политехнический университет. Томск: Из-во Томского политехнического университета, 2010. 90 с.
2. Heloisa Cunha Furtado, Iain Le May. High temperature degradation in power plants and refineries. *Materials Research*. 2004. Vol. 7. No 1. P. 103–110.
3. Студент О.З. Оцінка високотемпературної водневої деградації сталей енергетичного та нафтохімічного обладнання : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук : спец. 05.02.01 "Матеріалознавство" / О. З. Студент. – Львів, 2003. – 34 с.
4. Студент О.З., Кречковська Г.В. Оцінка технічного стану металу парогонів з урахуванням впливу зупинок в експлуатації блоків ТЕС. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: зб. наук. статей. Київ: ІЕЗ НАН України, 2006. С. 563–566.
5. Jakovljevic A. Stress Analysis of High Pressure Steamlines in Thermal Power Plants. In: *Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures: Proceedings of the 16th European Conference of Fracture (Alexandroupolis, Greece, July 3–7, 2006)*. Dordrecht: Springer, 2006. P. 1033–1034.
6. Кречковська Г., Марков А., Ріпей І. Властивості сталі 15Х1М1Ф після експлуатації на головному парогоні ТЕС // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2008. – Т. 2, Спецвип. 7. – С. 844–847.
7. Кречковська Г. В. Фрактографічні ознаки механізмів транспортування водню в конструкційних сталях. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2015. – 51, №4 – С. 67–70.
8. Похмурський В.І., Федоров В.В. Вплив водню на дифузійні процеси в металах. – Львів: Еней, 1998. – 208 с.
9. Осташ О.П., Вольдемаров О.В., Гладиш П.В. Діагностування структурно-механічного стану сталей парогонів коерцитиметричним методом і прогнозування їх ресурсу // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2013. – Т. 49, № 5. – С. 98–111.
10. Василик А.В., Палащук Є.І., Мелехов Р.К. Дослідження крихких корозійних пошкоджень трубних елементів котлів високого тиску // *Проблеми експлуатації і модернізації енергообладнання: збірник статей*. – Львів: Вид. «Край», 1995. – С. 32–40.