

УДК 620.171.2; 620.187.22

Л. Свірська<sup>1</sup>; О. Студент<sup>1</sup>, докт. техн. наук;  
Ю. Никифорчин<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

<sup>2</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

## ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛІ 12Х1МФ З РІЗНИХ ЗОН ГИНУ ПАРОГОНУ ТЕС

**Резюме.** Гини парогонів ТЕС характеризуються неоднаковою деформацією металу різних зон: розтягнутої, нейтральної, стисненої. Як результат – різні механічні властивості цих зон унаслідок деградації. Досліджено міру деградації сталі 12Х1МФ з різних зон гину після  $2,5 \cdot 10^5$  год її експлуатації у системі парогонів ТЕС. Стан металу оцінювали за результатами візуального обстеження та за механічними характеристиками за одновісного розтягу та удару на повітрі. Виявили, що максимальних змін внаслідок експлуатації зазнають механічні характеристики сталі розтягнутої та нейтральної зон гину.

**Ключові слова:** гин парогону ТЕС, теплотривка сталь, деградація, механічні характеристики.

L. Svirska, O. Student, Yu. Nykyforchyn

## REGULARITIES OF CHANGING THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE 12KH1MF STEEL FROM DIFFERENT ZONES OF STEAM PIPELINE BEND FROM TPP

**Summary.** Hard temperature-power operating mode of the steam pipeline (vapor pressure up to 14 MPa, temperature – up to 565 °C and a large number of shutdowns of the process), and long-term influence of an aggressive hydrogenating environment on stressed metal promote degradation of its structure and reduce the mechanical properties, which were ensured by their workability at the beginning of operation. Therefore, the diagnostics of the technical state of metal of the steam pipeline ensures the reliability of their operation and does not lose relevance to the power system of Ukraine with critically worn-out equipment.

Features of degradation of thermal power plant steam pipeline bending were caused by non-identical conditions of deformation of the metal in different zones (tensile, compressed and neutral) of bend as on the stage of production and the follow long-term operation. Due to the technological features of production and peculiarities of the cross-sectional shape of bends the maximum tensile stresses occur in the tensile zone of bending, where the wall thickness of tube is minimal. Mechanical properties of metal from different bend zones were differed after long-term impact of stress.

The level of degradation of 12Kh1MF steel from different zones of bend after  $2,5 \cdot 10^5$  hours of operation in the steam pipeline system of TPP was evaluated in this paper. Technical state of metal was estimated by visual inspection of bend and using mechanical characteristics determined at uniaxial tension and impact test on the air. During visual inspection of outer surface of the pipe an axial cracks in the tensile zone of bend, caused by high temperature creep, were detected. It was established that mechanical properties of operated steel from tensile and neutral zones of bend is maximally changed. That is, the characteristics of plasticity, determined on the tangential specimens were sensitive to changes in the technical state of steel. Reduction of area of metal from tensile zone of bend is in 2 times lower than the minimum allowable value (27% and 55% respectively). Impact toughness level of the metal from tensile zone of bend determined on specimens of both orientations was lower than the regulated value for heat-resistant steels too. This confirmed that the brittle fracture resistance characteristic is also highly sensitive to changes in the technical state of the pipeline bend metal. Taking into account the fact that degradation of damaged bending has reached the maximum degree (since the bend has been damaged during operation), the level of the impact toughness of the metal can be proved expediency of stopping the exploitation the actual structural elements of steam pipeline.

**Key words:** thermal power plant, steam pipeline bend of TPP, heat resistant steel, degradation, mechanical characteristics.

**Вступ.** Останнім часом вплив корозійних та корозійно-механічних чинників на тривалу міцність матеріалів парогонів ТЕС істотно зріс у зв'язку з переходом ТЕС на маневровий режим роботи з частими зупинками енергоблоків. Адже на сьогодні 92% устаткування енергоблоків ТЕС в Україні відпрацювали свій розрахунковий ресурс

( $\sim 10^5$  год), більше 70% (81 енергоблок) перевищили прийнятий у світовій практиці граничний ресурс [1]. Зокрема, в міру зростання кількості зупинок технологічного процесу інтенсифікується деградація металу парогонів ТЕС [2]. Вплив цього чинника інтенсифікується у таких елементах, як гини парогонів [3 – 7]. Адже неоднорідність властивостей металу з різних зон гинів виникає ще на етапі їхнього виготовлення. Її пов'язують з нерівномірністю деформування металу з різних зон гину по периметру труби [8, 9].

Тому питання надійності роботи обладнання ТЕС, оцінювання ресурсу та продовження гарантованого і безпечного терміну експлуатації деталей енергетичного устаткування, до яких відносять і гини парогонів, є особливо актуальним для вітчизняної теплоенергетики [1, 10]. Їх вирішення потребує розуміння природи процесів, які спричиняють деградацію властивостей та руйнування матеріалів.

**Мета роботи** – проаналізувати причини виникнення наскрізних пошкоджень у тривало експлуатованому гині парогону ТЕС та дослідити механічні характеристики металу з його різних зон (розтягнутої, нейтральної та стисненої).

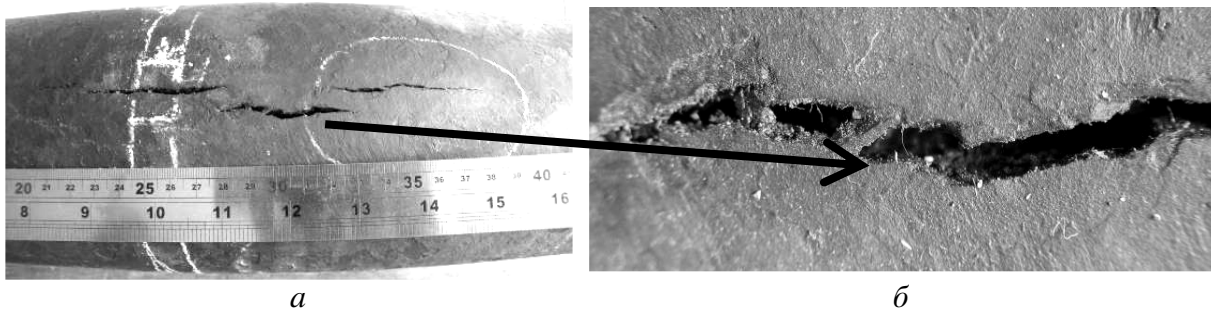
**Об'єкт дослідження.** Досліджували вертикальний гин труби до парозбірної камери котла ТП-100, виготовлений зі сталі 12Х1МФ (0,1% С; 0,019% S; 0,015% Р; 0,26% Si; 0,54% Mn; 1,1% Cr; 0,17% V; 0,26% Mo) після  $\sim 25 \cdot 10^4$  год експлуатації і 1560 зупинок технологічного процесу ТЕС. Тиск пари у трубі під час експлуатації становив 14 МПа, температура впродовж перших  $\sim 2 \cdot 10^4$  год експлуатації становила  $565^\circ\text{C}$ , а в подальшому –  $545^\circ\text{C}$ . Зовнішній діаметр прямої ділянки труби становив 133 мм, товщина стінки – 17 мм. Кут загину –  $120^\circ$ . Діаметральний переріз гину мав форму деформованого еліпса з товщиною стінки труби 18 мм у стисненій, 16 мм у нейтральній та 14 мм у розтягненій зонах. Таке суттєве стоншення стінки труби у розтягненій зоні гину могло відбутися внаслідок повзучості металу під впливом робочих напружень упродовж тривалої високотемпературної експлуатації. В міру поступового стоншення стінки труби концентрація напружень у цьому місці зростала [11, 12], що сприяло зародженню тут тріщини повзучості, ріст яких завершився руйнуванням гину.

**Методи досліджень.** Стан металу гину оцінювали за результатами візуального обстеження та аналізу морфології тріщин, характеристиками міцності та пластичності, ударною в'язкістю. Оскільки гину властива неоднорідність деформованого стану металу на етапі його виготовлення, то рівень деградації оцінювали на зразках осьової і тангенціальної орієнтації, вирізаних з розтягнутої, нейтральної та стисненої зон гину.

Механічні характеристики металу за одновісного розтягу визначали на розривній машині УМЕ-10Т із використанням гладких циліндричних зразків діаметром 5 мм з п'ятикратною довжиною робочої частини згідно з ГОСТом 1497–84 [13]. Щоб усунути сліди шліфування, які під час випроб могли служити концентраторами напружень, поверхню робочої частини зразків перед випробами полірували із застосуванням паст різної зернистості. Зразки випробовували на повітрі за швидкості деформування робочої частини  $3,3 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ .

Ударну в'язкість металу з різних зон гину визначали згідно з ГОСТом 9454–78 [14] на зразках Менаже (10×10×55 мм) з U-подібним надрізом глибиною 2 мм. Концентратори на зразках нарізували з боку зовнішньої поверхні труби. Зразки випробовували на маятниковому копрі ИО-5003.

**Результати візуального обстеження.** Під час візуального обстеження зовнішньої поверхні розтягнутої зони гину виявили три наскрізні макротріщини осьової орієнтації завдовжки 50...60 мм кожна (рис. 1а). Їхня сумарна довжина досягала  $\sim 150$  мм.

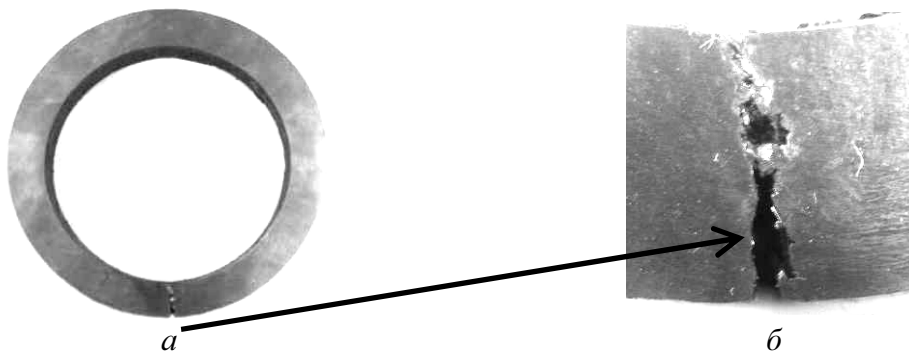


**Рисунок 1.** Загальний вигляд (а) і морфологія (б) наскрізних тріщин осьової орієнтації у розтягненій зоні гину

**Figure 1.** General view (a) and morphology (b) cracks in the diametric section of the pipe in the stretched zone of bend

За морфологією тріщини криволінійні (рис. 1б). Це є наслідком злиття між собою коротших тріщин, які зароджувались у розтягненій зоні гину труби від зовнішньої поверхні труби внаслідок повзучості. Адже через тонший поперечний переріз труби у цій зоні тут створюються найсприятливіші умови для високотемпературної повзучості металу під час тривалої експлуатації.

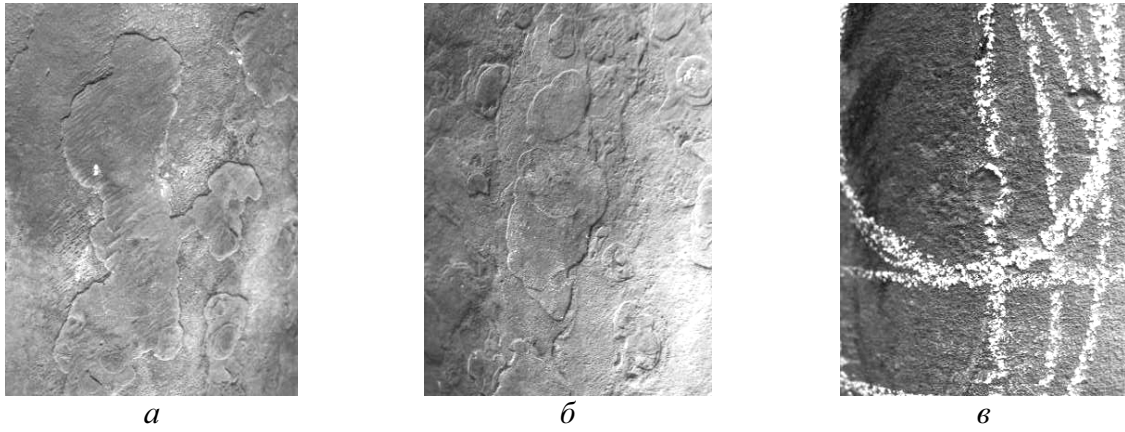
Профіль тріщини у діаметральному перерізі гину труби теж криволінійний (рис. 2). Це є ознакою росту тріщини повзучості шляхом поетапного руйнування перетинок між вершиною макротріщини і мікротріщинами, які попереду неї. Тріщина ширше розкрита біля зовнішньої поверхні труби, ніж біля внутрішньої. Це вказує на те, що її ріст відбувався саме від зовнішньої поверхні до внутрішньої. Крім того, завершальний етап руйнування за повзучості зазвичай відбувався за механізмом зсуву. Адже наявність косого зламу біля внутрішньої поверхні труби свідчить про домінування зсувних процесів, які є ознакою завершального етапу руйнування.



**Рисунок 2.** Діаметральний переріз гину труби з наскрізною тріщиною у розтягненій його зоні (а) та її морфологія (б)

**Figure 2.** Diametric section of bend with through crack in the stretched zone (a) and its morphology (b)

Проаналізували також фактуру і товщину оксидної плівки на зовнішній поверхні гину труби. У зоні розтягу гину спостерігали сліди багаторазового відшарування оксидної плівки з утворенням острівців оголеного металу (рис. 3а). Це можливо лише за значної деформації металу внаслідок повзучості. Площа острівців відшарування оксидних плівок поступово зменшується у напрямі до нейтральної зони гину (рис. 3б). У зоні стиску ці острівці практично відсутні (рис. 3в). Отже, товщина стінки труби в розтягненій зоні гину зменшується не лише внаслідок повзучості, але ще й внаслідок активації процесу окиснення активно деформованого металу. Крім того, сходинки на переходах між виступами острівців плівки з ще не відлущених окислів до тоншої плівки окислів створюють додаткову концентрацію напружень і також можуть сприяти локалізації деформації та руйнуванню.

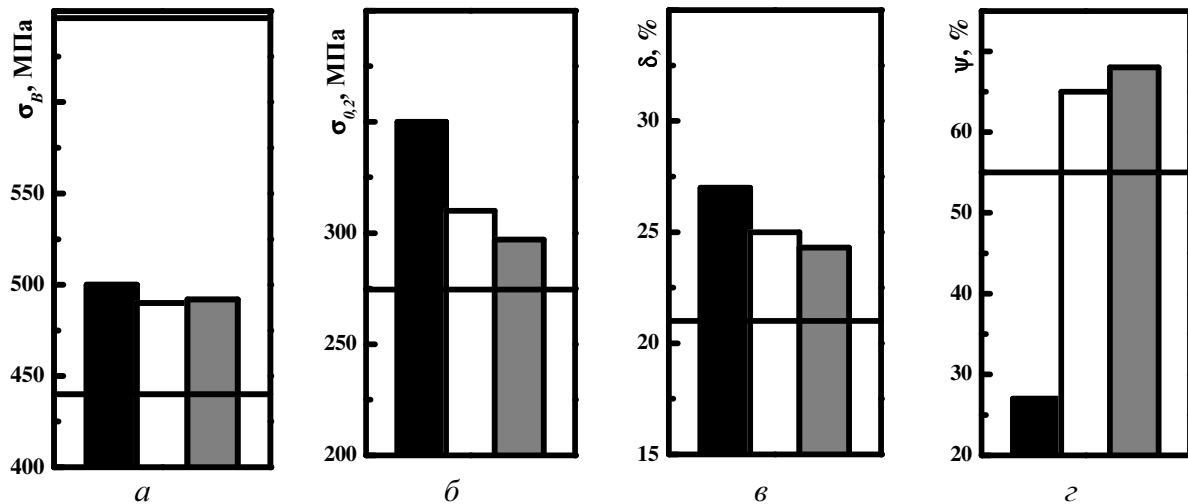


**Рисунок 3.** Фактура оксидної плівки на зовнішній поверхні розтягнутої (а), перехідної до нейтральної (б) та стисненої (в) зон гину труби

**Figure 3.** The texture of the oxide film on the external surface of stretched (a), the transition to neutral (b) and compressed (c) zones of pipeline bend

**Механічні характеристики за розтягу.** Нормативний документ ТУ 14–3–460–2003 регламентує механічні властивості теплотривких сталей парогонів ТЕС [15]. Зокрема, границя міцності  $\sigma_B$  сталі 12Х1МФ не повинна виходити за межі 441...637 МПа, а границя плинності  $\sigma_{0,2}$  повинна бути не нижчою за 274 МПа. Відносне видовження  $\delta$  та відносне звуження  $\psi$  повинні бути не нижчими за 19% і 50% для зразків, вирізаних у тангенціальному напрямі, та 21% і 55% для зразків осьової орієнтації відповідно.

Дослідження сталі 12Х1МФ з різних зон експлуатованого гину на тангенціально орієнтованих зразках виявили, що за практично незмінності рівня  $\sigma_B$  по периметру труби границя плинності металу зони розтягу зросла до 350 МПа порівняно з 300 МПа, зафіксованими у зоні стиску (рис. 4а, б). Отже, за характеристиками міцності сталь 12Х1МФ задовольняє регламентованим вимогам.

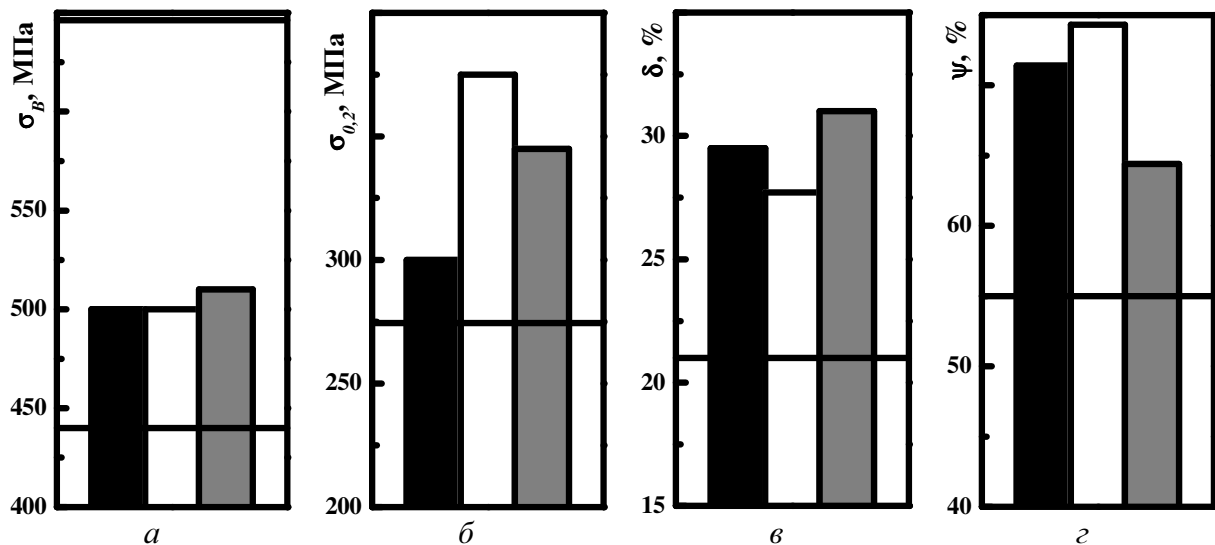


**Рисунок 4.** Характеристики міцності  $\sigma_B$  (а),  $\sigma_{0,2}$  (б) та пластичності  $\delta$  (в),  $\psi$  (г), отримані на тангенціальних зразках, вирізаних з розтягнутої (чорні стовпчики), нейтральної (білі) та стисненої (сірі) зон гину. Чорні горизонтальні лінії обмежують регламентовані рівні механічних характеристик чи діапазон їх зміни

**Figure 4.** The characteristics of strength  $\sigma_{UTS}$  (a),  $\sigma_{YS}$  (b), and plasticity  $\delta$  (c),  $\psi$  (d) obtained for tangentially oriented specimens cut from the stretched (black bars), neutral (white) and compressed (gray) zones of bend. Black horizontal line delimits the regulated level of mechanical properties or range of their changes

Стосовно характеристик пластичності виявили значне зниження відносного звуження  $\psi$  металу зони розтягу гину (до 27% порівняно з 68% у зоні стиску) (рис. 3в). Відзначили також невідповідність характеру зміни характеристик пластичності в зоні розтягу. Адже попри зниження відносного звуження  $\psi$  відносно видовження металу зони розтягу  $\delta$  зростає до 27% (порівняно з 24,3%, отриманим для металу із стисненої зони) (рис. 4з). Подібну тенденцію раніше зв'язували з розкриттям внутрішніх дефектів у деградованих теплостійких сталях та їх зварних з'єднаннях, які виникли за тривалого впливу експлуатаційних температурно-силових і корозійних чинників [16]. Якщо це справедливо, то можна стверджувати, що в зоні розтягу аналізованого гину кількість таких дефектів є більшою, аніж у зоні стиску. Отже, якщо оцінювати за характеристиками міцності металу, визначеними на тангенціальних зразках, то можна зробити висновок про припинення експлуатації гину, оскільки відносне звуження металу з розтягнутої зони гину є у 2 рази нижче за мінімально допустиме.

У випадку осьових зразків зафіксували практично однакові (~500 МПа) значення границі міцності  $\sigma_B$  для металу з усіх зон гину (рис. 5а). Проте на відміну від тангенціальних зразків найнижче значення границі текучості  $\sigma_{0,2}$  зафіксоване у розтягненій зоні гину, у той час як найвище зафіксоване у нейтральній (300 МПа і 375 МПа відповідно) (рис. 5б). Отже, якщо оцінювати за характеристиками міцності металу, визначеними на зразках осьової орієнтації, то також можна дійти однозначного висновку, що підстав для демонтажу та припинення експлуатації гину не було, оскільки їх характеристики міцності не вийшли за межі регламентованого діапазону.



**Рисунок 5.** Характеристики міцності  $\sigma_B$  (а),  $\sigma_{0,2}$  (б) та пластичності  $\delta$  (в),  $\psi$  (г), отримані на осьових зразках, вирізаних з розтягнутої (чорні стовпчики), нейтральної (білі) та стисненої (сірі) зон гину. Чорні горизонтальні лінії обмежують регламентовані рівні механічних характеристик чи діапазон їх зміни

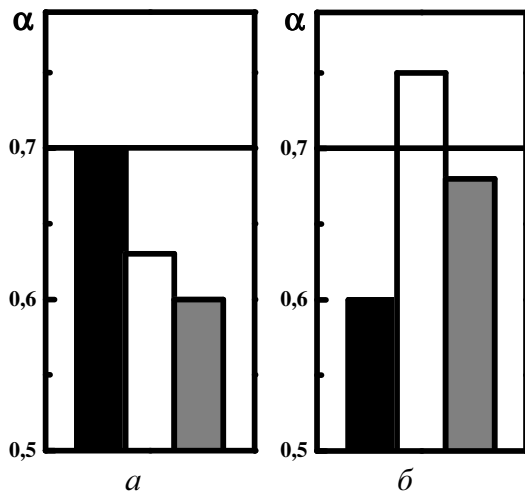
**Figure 5.** The characteristics of strength  $\sigma_{UTS}$  (a),  $\sigma_{YS}$  (b), and plasticity  $\delta$  (c),  $\psi$  (d) obtained for axial specimens cut from stretched (black bars), neutral (white) and compressed (gray) zones of bend. Black horizontal line delimits the regulated level of mechanical properties or range of their changes

Попри те, що в усіх зонах гину відносне звуження  $\psi$  вище за регламентоване значення, цей показник є найнижчим для металу зі стисненої зони (рис. 5з). Відносне видовження  $\delta$  металу з усіх зон гину перевищує регламентований рівень, але у стисненій зоні є найвищим, а у нейтральній – найнижчим.

На основі отриманих результатів можна стверджувати, що механічні характеристики металу гину, визначені на осьових зразках, є недостатньо чутливими до

зміни технічного стану металу внаслідок експлуатації та не дають підстав для вилучення гину парогону з експлуатації.

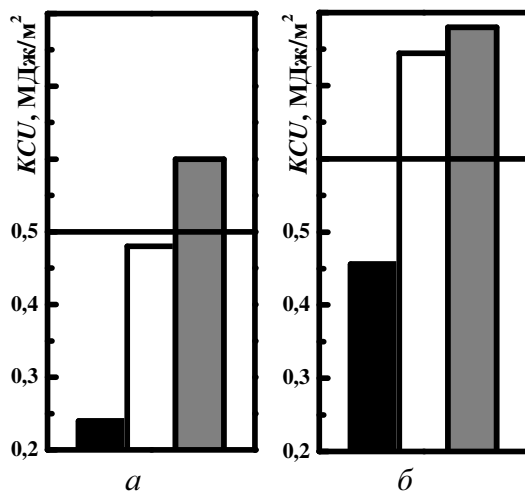
Отримані за одновісного розтягу зразків результати проаналізували також із використанням вживаного в енергетиці показника стану деградованого металу  $\alpha$  (рис. 5), який визначають як співвідношення границь плинності  $\sigma_{0,2}$  та міцності  $\sigma_B$ . Для оцідно легованої сталі 12X1МФ він не повинен перевищувати рівень 0,7 [17]. Показник  $\alpha$  визначили для зразків тангенціальної (рис. 6а) та осьової (рис. 6б) орієнтацій. Для тангенціально орієнтованих зразків найгіршим цей показник виявився для металу з розтягнутої зони, оскільки досяг максимально дозволеного значення. Для осьових зразків найвище значення показника  $\alpha$  виявили у нейтральній зоні гину і воно перевищило дозволене регламентуючим документом значення. Це свідчить про те, що згідно з цим показником ця зона гину зазнала найсильнішої деградації. Якщо оцінювати технічний стан металу за цією характеристикою, то продовжувати його експлуатувати далі не можна було, оскільки метал з розтягнутої та нейтральної зон гину не задовольняє вимогам регламентуючого документа. Крім того, відзначили, що тангенціальні зразки чутливіші до зміни стану металу гину внаслідок експлуатаційної деградації, бо з використанням цього показника зона розтягу гину, де й відбулося руйнування, виявилася найгіршою.



**Рисунок 6.** Показник  $\alpha$  визначений за результатами випроб тангенціальних (а) та осьових (б) зразків, вирізаних з розтягнутої (чорні стовпчики), нейтральної (білі) та стисненої (сірі) зон гину. Чорні горизонтальні лінії обмежують регламентовані рівні механічних показників чи діапазон їх зміни

**Figure 6.** Index  $\alpha$  defined by results of tests tangential (a) and axial (b) specimens cut from stretched (black bars), neutral (white) and compressed (gray) zones of bend. Black horizontal line delimits the regulated level of mechanical properties or range of their changes

**Випробування на ударну в'язкість.** Згідно з регламентуючим документом [15] значення  $KCU$ , визначене на тангенціально орієнтованих зразках, повинно бути не нижчим за  $0,5 \text{ МДж/м}^2$ , а на зразках осьової орієнтації –  $0,6 \text{ МДж/м}^2$ . Випробування зразків, виготовлених з різних зон гину, дали прогнозований результат (рис. 7).



**Рисунок 7.** Ударна в'язкість  $KCU$ , визначена на тангенціальних (а) та осьових (б) зразках, вирізаних з розтягнутої (чорні стовпчики), нейтральної (білі) та стисненої (сірі) зон гину. Чорною горизонтальною лінією позначено найнижчий з допустимих рівень  $KCU$  для металу у вихідному стані

**Figure 7.** Impact strength  $KCU$ , defined on the tangential (a) and axial (b) specimens cut from stretched (black bars), neutral (white) and compressed (gray) zones of bend. Black horizontal lines show the lowest acceptable levels of  $KCU$  for metal in the virgin state

Для зразків тангенціальної та осьової орієнтації значення *KCU* змінюються якісно подібно: найнижчими вони є для металу розтягнутої, а найвищими – стисненої зони гину. Проте значення *KCU* металу розтягнутої зони гину на зразках і тангенціальної, і осьової орієнтації не задовольнили вимог регламентуючого документа [15, 18]. Крім того, значення *KCU*, визначені на тангенціально орієнтованих зразках майже вдвічі нижчі, аніж визначені на осьових зразках. Такі низькі значення *KCU* розтягнутої зони гину труби, визначені на зразках тангенціальної орієнтації, можна зв'язати з наявністю дефектів, або окрихчених ділянок у металі, орієнтованих уздовж осі труби. Руйнування тангенціальних зразків поширюється в радіальному напрямі осьового перерізу труби від зовнішньої поверхні, що співпадає з напрямом поширення тріщин повзучості. Нижчим за регламентоване виявилось також значення *KCU* металу нейтральної зони гину, визначені на тангенціально орієнтованих зразках, хоча визначені на осьових зразках все ще задовольняють вимоги регламентуючого документа. Значення *KCU* металу стисненої зони гину, визначені на зразках обох орієнтацій задовольнили вимоги регламенту.

Отже, за ударною в'язкістю, яка характеризує опір крихкому руйнуванню, метал розтягнутої зони гину не задовольнив вимоги до теплостійких сталей.

**Висновки.** Візуальне обстеження гину показало, що тріщин у розтягненій зоні гину труби утворилися від зовнішньої поверхні труби внаслідок високотемпературної повзучості.

Незалежно від орієнтації зразків (осьові чи тангенціальні) характеристики міцності тривало експлуатованого металу різних зон гину виявилися не чутливими до зміни його технічного стану. Характеристики пластичності, визначені на осьових зразках, теж виявилися нечутливими до зміни технічного стану металу різних зон гину внаслідок експлуатації. Тоді як характеристики пластичності, визначені на тангенціальних зразках, підтвердили доцільність припинення експлуатації гину, оскільки відносне звуження металу з розтягнутої зони гину є у 2 рази нижче за мінімально допустиме (27% і 55% відповідно).

Оцінювання стану металу за співвідношенням границь плинності та міцності металу з відповідних зон гину теж підтвердило висновок про те, що метал розтягнутої зони гину парогону ТЕС не задовольняє вимоги регламентуючого документа.

Стрімке зниження ударної в'язкості металу розтягнутої зони гину парогону, отримане на зразках обох орієнтацій, до рівня, що не задовольняє вимог до теплостійких сталей, підтвердило, що характеристики опору крихкому руйнуванню мають високу чутливість до зміни технічного стану металу парогонів, зокрема виявляють різницю стану металу різних зон гину.

**Conclusions.** Visual inspection showed that cracks in the stretched zone of pipeline bend are formed from the external surface of the pipe as a result of high temperature creep.

Strength characteristics of long time exploited metal from different zones of pipeline bend are not sensitive to changes of its technical state regardless of the specimen's orientation (axial or tangential). Plasticity characteristics defined in the axial specimens also are not sensitive to changes in the technical state of metal from different zones of operated bend. But the characteristics of plasticity, defined on the tangential specimens confirmed the feasibility of decommissioning of bend as reduction of area for metal from stretched zone of band is in 2 times lower than minimum acceptable value (27% and 55% respectively).

Evaluation of the metal state by the ratio of yield strength to tensile strength from respective pipe zones confirmed that the metal of stretched zone of pipeline bends from TPP does not satisfy the requirements of regulatory documents.

The rapid reduction in impact toughness of the specimens of both orientations from the stretched zone of bend to a level, which does not satisfy the requirements for heat-resistant steels, confirmed that characteristics of brittle fracture resistance are highly sensitive to

changes in the technical state of the pipeline metal, demonstrate the difference in the state of metal of different pipeline bend zones in particular.

### **Список використаної літератури**

1. Енергетики обговорили проблеми діагностики обладнання ТЕС і продовження термінів його експлуатації. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.centrenerg.com/newsroom/news/item\\_114/](http://www.centrenerg.com/newsroom/news/item_114/)
2. 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 // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. – Т. 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 / Nykyforchyn H.M., Student O.Z., Krechkov'ska H.V., Markov A.D. // Materials Science. – 2010. – V 46, №2. – P. 177 – 189.)
3. Соломаха, М.А. О надежности гибов паропроводов из стали 12Х1МФ [Текст] / М.А. Соломаха, С.И. Макобоцкий // Электрические станции. – 1988. – № 4. – С. 15 – 19.
4. Беляев, С.А. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС [Текст] / С.А. Беляев, В.В. Литвак, С.С. Солод. – Томск: Изд-во НТЛ, 2008. – 218 с.
5. Студент, О.З. Вплив тривалої експлуатації сталі 12Х1МФ з різних зон гину парогону ТЕС на її механічні характеристики [Текст] / О.З. Студент, Л.М. Свірська, І.Р. Дзіоба // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2012. – Т. 48, № 2. – С. 111 – 118. (Influence of the long-term operation of 12Kh1M1F steel from different zones of a bend of steam pipeline of a thermal power plant on its mechanical characteristics / Student O.Z., Svirs'ka L.M., Dzioba I.R. // Materials Science. – 2012. – V. 48, №2. – P. 239 – 246).
6. Остащ, О.П. Циклічна тріщиностійкість сталей тривало експлуатованих згинів парогонів [Текст] / О.П. Остащ, О.В. Вольдемаров, П.В. Гладиш // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2012. – Т. 48, № 4. – С. 14 – 24. (Ostash O.P. Cyclic crack resistance of the steels of bends of steam pipelines after long-term operation / O.P. Ostash, O.V. Vol'demarov, P.V. Hladysh // Materials Science. – 2013. – V. 48, № 4. – P. 427 – 437.)
7. Структурна мікропошкоджуваність сталей парогонів ТЕС [Текст] / О.П. Остащ, А.І. Кондир, О.В. Вольдемаров, П.В. Гладиш, М.В. Куречко // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2009. – Т. 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, P.V. Hladysh, M.V. Kurechko // Materials Science. – 2009. – V. 45, № 3. – P. 340 – 349.)
8. Бугай, Н.В. Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования [Текст] / Н.В. Бугай, Т.Г. Березина, И.И. Трунин. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 272 с.
9. Ріпей, І.В. Значення вимірювання твердості у діагностуванні високотемпературних згинів труб [Текст] / І.В. Ріпей, Р.М. Хімка // Енергетика та електрифікація. – 2009. – № 8. – С. 26 – 28.
10. Механіка руйнування та міцність матеріалів: довідн. посібник у 9 т. [Текст]; за заг. ред. В.В. Панасюка, О.І. Балицького. – Т. 8: Міцність матеріалів і довговічність елементів конструкцій атомних електростанцій. – К.: Академперіодика, 2005. – 544 с.
11. Нахалов, В.А. Надежность гибов труб теплоэнергетических установок [Текст] / В.А. Нахалов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 184 с.
12. Бугай, Н.В. Повышение надежности котлов электростанций [Текст] / Н.В. Бугай, Г.В. Мухопад, А.Я. Красовский. – К.: Техника, 1986. – 176 с.
13. Металлы. Методы испытаний на растяжение: ГОСТ 1497–84. – Офіц. вид. – Москва: Стандартинформ, 2006. – 22 с.
14. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах: ГОСТ 9454–78. – Офіц. вид. – Москва: Издательство стандартов, 2008. – 12 с.
15. ТУ. 14–3–460–2003 Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. – 41 с.
16. Никифорчин, Г.М. Аномальный прояв високотемпературної деградації металу зварного з'єднання ошаднолегованої сталі [Текст] / Г.М. Никифорчин, О.З. Студент, А.Д. Марков // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2007. – Т. 43, № 1. – С. 73 – 79. (Abnormal manifestation of the high-temperature degradation of the weld metal of a low-alloy steel welded joint / H.M. Nykyforchyn, O.Z. Student, A.D. Markov // Materials Science – 2007. – V. 43, № 1. – P. 77 – 84.)
17. ДНАОП 0.00-1.11-98. Правил будови і безпечної експлуатації трубопроводів пари та гарячої води. – 224 с.
18. Мелехов, Р.К. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання [Текст] / Р.К. Мелехов, В.І. Похмурський. – К.: Наукова думка, 2003.– 382 с.

*Отримано 22.08.2013*