

УДК 620.17:620.18:004.932.2

РАНЖУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ ПАРОГОНІВ ТЕС ЗА ЧУТЛИВІСТЮ ДО ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ

О. З. СТУДЕНТ¹, Г. В. КРЕЧКОВСЬКА^{1,2}, Л. М. СВІРСЬКА¹,
Б. І. КІНДРАЦЬКИЙ², В. В. ШИРОКОВ³

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

² Національний університет "Львівська політехніка";

³ Українська академія друкарства, Львів

Проаналізовано механічні властивості теплотривких сталей після тривалої експлуатації на об'єктах теплоенергетики. Встановлено, що умови роботи (високі температура та тиск корозивно-наводнювального середовища, термічні і механічні напруження) негативно впливають на їх структурно-механічний стан. Узагальнено результати про механічні характеристики сталей після їх експлуатації в різних елементах (прямі ділянки, гини труб, зварні з'єднання) головних парогонів ТЕС за сукупного впливу експлуатаційних чинників і на цій основі проранжовано їх за чутливістю до високотемпературної водневої деградації.

Ключові слова: *теплотривкі сталі, головні парогони, зварні з'єднання, різні зони гинів, деградація, механічні характеристики, теплоенергетика.*

The mechanical properties of heat-resistant steels after long-term operation at heat-power facilities are analyzed. It is found that working conditions (high temperature and pressure of a corrosive-hydrogenation environment, thermal and mechanical stresses) negatively affect the structural and mechanical state of steels. The data on the different mechanical characteristics of steels after their operation in various elements (straight sections, bands of pipes, welded joints) of the main steam pipelines of TPPs according to the combined effect of operating factors are summarized. On this basis, all these characteristics are ranked according to their sensitivity to high-temperature hydrogen degradation.

Keywords: *heat-resistant steels, main steam pipeline, welded joins, different zones of the bend, degradation, mechanical characteristics, heat power engineering.*

Вступ. Через підвищені параметри експлуатації (тиск пари до 24 МПа та температура ~ 540°C) та розташування поза межами котлів (що особливо небезпечно для персоналу) до надійності головних парогонів ТЕС висувають високі вимоги. До того ж більшість з них або вже вичерпали, або ж на межі вичерпання розрахункового ресурсу [1]. Встановлено також негативний вплив корозивно-активного наводнювального середовища, пусків-зупинок технологічного процесу, термічних та механічних навантажень, що зумовлює корозійно-водневу деградацію сталей [2], зокрема, зміну їх мікроструктури [3–5], погіршення механічних властивостей [6–8], характеристик статичної та циклічної тріщиностійкості [9, 10]. За нагрівання і охолодження труб під час зупинок блоків виникають додаткові термічні напруження [11], які сумарно з напруженнями від внутрішнього тиску можуть подекуди навіть перевищувати допустимі. Однак практика експлуатації парогонів свідчить, що найуразливіші до крихких руйнувань зварні з'єднання (ЗЗ) труб та розтягнені зони гинів. При цьому, попри високу чутливість до деградації теплотривких сталей параметрів механіки руйнування [9, 10], для оцінювання

їх поточного технічного стану галузеві нормативні документи регламентують твердість, характеристики міцності і пластичності та ударну в'язкість KCU .

Мета дослідження – проранжувати теплотривкі сталі після тривалої експлуатації в різних елементах головних парогонів ТЕС за їх механічними характеристиками та обґрунтувати вибір найчутливіших показників, щоб оцінити їх деградацію.

Об'єкти та методи досліджень. Аналізували механічні властивості основного металу (ОМ) та металу шва (МШ) 33 на трубах зі сталі 15X1M1Ф прямих ділянок (ПД) головного парогону ТЕС після $\sim 2 \cdot 10^5$ h експлуатації та зі сталі 12X1MФ з різних зон двох гинів головного парогону після експлуатації $\sim 133 \cdot 10^3$ (№ 1) та $\sim 286 \cdot 10^3$ h (№ 3), а також пароперепускного гину (№ 2) упродовж $\sim 256 \cdot 10^3$ h. Визначали твердість HB , характеристики міцності та пластичності за розтягу гладких циліндричних зразків (діаметром 5 mm і робочою частиною завдовжки 25 mm) на машині УМЕ-10Т, ударну в'язкість KCV та KCU – відповідно на зразках Шарпі та Менаже, використовуючи маятниковий копер типу ІО-5003, а також статичну та циклічну тріщиностійкість (ЦТ).

Характеристики ЦТ оцінювали у повітрі за віднульового циклу навантаження балкових зразків (12×18×160 mm) з боковим надрізом консольним згином частотою 10 Hz. Оперували номінальним $\Delta K_{th} = K_{th \max} - K_{th \min}$ та ефективним $\Delta K_{th \text{eff}} = K_{th \max} - K_{th \text{cl}}$ пороговими розмахами коефіцієнта інтенсивності напружень, де значення $K_{th \text{cl}}$ характеризувало ефект закриття тріщини. Їх визначали за кінетичними діаграмами втомного руйнування, які будували в номінальних і ефективних (з урахуванням закриття тріщини [7]) координатах. Статичну тріщиностійкість J_{Ic} визначали методом J -інтеграла з побудовою R -кривих за багаторазового часткового розвантаження балкових зразків, навантажених триточковим згином згідно з рекомендаціями стандарту [12].

Механічні характеристики сталі 15X1M1Ф та різних зон 33 ранжували за чутливістю до високотемпературної водневої деградації, використовуючи коефіцієнт λ , який характеризує зміну аналізованого показника сталі після експлуатації на парогоні C_t проти відповідного у вихідному стані C_0 :

$$\lambda = [(C_t - C_0) / C_0] \cdot 100\%. \quad (1)$$

Подібно ранжували механічні властивості сталі 12X1MФ зі зон гинів № 1–3 після тривалої експлуатації на парогоні ТЕС

$$\lambda = [(C_{3Г} - C_{ПД}) / C_{ПД}] \cdot 100\%, \quad (2)$$

але у цьому випадку $C_{ПД}$ і $C_{3Г}$ – аналізовані характеристики металу прямої ділянки (ПД) і зон гину (3Г): розтягнутої (РЗ), нейтральної (НЗ) чи стисненої (СЗ).

Результати та їх обговорення. *Ранжування характеристик металу різних зон 33 головного парогону.* Узагальнивши результати зміни механічних властивостей експлуатованих ОМ та МШ сталі 15X1M1Ф [13, 14] (властивості у вихідному стані наведені в табл. 1), виявили, що найчутливішими до деградації є характеристики тріщиностійкості (J_{Ic} та $\Delta K_{th \text{eff}}$) та ударна в'язкість KCV та KCU (рис. 1a, b, d, e), що вказує на схильність експлуатованого металу до крихкого руйнування. Твердість HB , міцність (σ_{UTS} , σ_{YS}) та пластичність (δ , ψ) виявились менш чутливими.

Крім того, встановили, що для сталі 15X1M1Ф з ферит-бейнітною структурою чутливість всіх параметрів до деградації після більшої кількості зупинок технологічного процесу зростала (рис. 1a, b) [15]. Після 576 зупинок МШ деградував значно інтенсивніше, ніж ОМ з ферит-перлітною структурою (рис. 1d, e), про що свідчило зниження практично усіх показників (окрім відносного видовження δ) [15, 16].

Виявили, що сталь з ферит-бейнітною структурою деградує швидше, ніж з ферит-перлітною (рис. 1b, d). І це попри те, що на початку експлуатації її харак-

теристиками були суттєво вищими (табл. 1). Очевидно, термодинамічна нестабільність структури цієї сталі, привнесена гартуванням труб, зумовила інтенсивніше погіршення її властивостей впродовж тривалої високотемпературної експлуатації.

Таблиця 1. Механічні властивості сталі 15X1M1Ф та металу 33 у вихідному стані

Ділянки труб		HB	σ_{YS}	σ_{UTS}	δ	ψ	KCU, MJ/m ²	J _{IC} , kN/m ²	ΔK_{th}	$\Delta K_{th\,eff}$
			MPa		%				MPa	
ОМ з ферит-бейнітною структурою		170	643	396	22,5	75	2,02	200	8,5	4,1
33	ОМ з ферит-перлітною структурою	168	530	340	20	63	1,00	165	–	2,5
	МШ	240	622	450	19	76	2,55	450	10,5	4,6

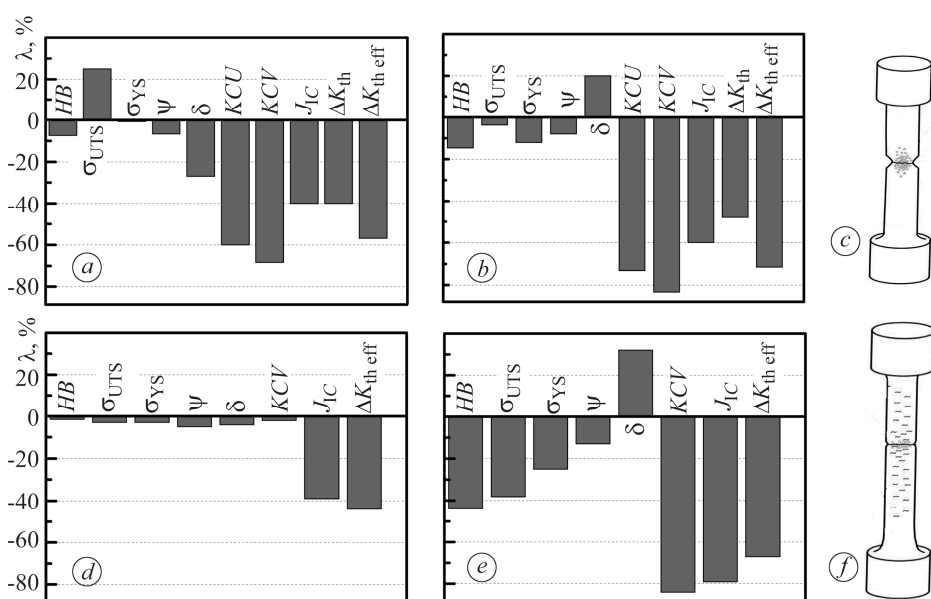


Рис. 1. Порівняння за чутливістю до експлуатаційної деградації механічних характеристик сталі 15X1M1Ф з ферит-бейнітною (a, b) та ферит-перлітною (d) структурами, а також МШ (e) після $\sim 2 \cdot 10^5$ h експлуатації на парогонях з різною кількістю зупинок технологічного процесу (a – 502 та b, d, e – 576) та схеми зразків з пошкодженнями на їх поверхні, що ілюструють аномальне зростання відносного видовження деградованого металу (c, f).

Fig. 1. Comparison by the sensitivity to high-temperature hydrogen degradation of the mechanical characteristics of 15X1M1Ф steel with ferrite-bainite (a, b) and ferrite-perlite (d) structures and the weld metal (e) after $\sim 2 \cdot 10^5$ h operation on the main steam pipeline of the thermal power plant (TPP) for a different number of shutdowns of technological process (a – 502 and b, d, e – 576) and the charts of specimens with damages on their surfaces after tensile tests that illustrate the abnormal increase in the exploited metal elongation (c, f).

На відміну від виявленої низької чутливості твердості, міцності і пластичності до деградації ОМ з ферит-перлітною структурою (рис. 1d), ці показники достатньо чутливо зреагували на зміну стану МШ (рис. 1e) [16, 17]. Сумірне зниження твердості HB (на 44%) і границі плинності $\sigma_{0,2}$ (37%) закономірне, оскільки вони характеризують здатність металу до деформації (рис. 1e). Суттєве зниження границі міцності σ_B (26%) вказує на можливий спад опору відриву експлуатованого МШ. Загалом такі зміни механічних характеристик свідчать про інтен-

сивнішу деградацію МШ проти ОМ. Одночасне зниження, з одного боку, твердості та міцності експлуатованого МШ, за яким, як правило, оцінюють опір в'язкому руйнуванню, а з іншого – ударної в'язкості і тріщиностійкості, які визначають опір крихкому руйнуванню, є нетиповим результатом, причому не лише для високотемпературної експлуатації [18]. Таку аномальну зміну властивостей вважали особливою ознакою деградації МШ.

Деградованому металу ЗЗ (ОМ з ферит-бейнітною структурою та МШ) після 576 зупинок технологічного процесу властива, крім того, нетипова протилежна зміна значень δ та ψ (рис. 1b, e) [13, 16]. Зокрема, значення ψ для МШ знизилося на 13%, а δ зросло на ~ 30%, що ускладнило їх вживання як характеристик пластичності. Аномальне підвищення відносного видовження МШ і ОМ з ферит-бейнітною структурою пов'язали з розпорошеними в них експлуатаційними пошкодженнями, що розкривалися під час рівномірного деформування зразків (рис. 1f). Такі розкриті дефекти виявляли також на бічній поверхні сталевих зразків з меншою пошкодженістю (рис. 1a, d), але лише на етапі локалізації їх деформації (рис. 1c). Таким чином, відносне видовження МШ і ОМ з ферит-бейнітною структурою після експлуатації, найімовірніше, характеризує їх критичну пошкодженість. Адже дефекти, які розкривалися навіть під час рівномірного пластичного деформування зразків, можна розглядати як зародки тріщин, поширення яких сприятиме локалізації руйнування в перетинах з найбільшим скупченням пошкоджень.

Якісно протилежна зміна показників пластичності інтенсивніше деградованих МШ і ОМ, з одного боку, та феномен одночасного зниження їх характеристик міцності і опору крихкому руйнуванню – з іншого, свідчать про специфічну кореляцію параметрів пластичності з іншими механічними властивостями. Зокрема, зростання їх видовження δ узгоджується зі зниженням міцності, а зниження звуження ψ – із втратою опору крихкому руйнуванню.

Ранжування характеристик сталі 12Х1МФ з різних зон гинів парогонів. Особливість гинів – змінна геометрія поперечного перетину труби, який має форму еліпсоподібного кільця з неоднаковою товщиною стінки в різних зонах гину. Тому по периметру труби (тобто залежно від зони гину) виникає градієнт напружень, нехарактерний для ПД труб. Сумарні напруження (від тиску пари в трубі та від перепаду температури під час зупинок блоків тощо) у РЗ гину з найменшою товщиною стінки труби будуть найвищими, а в СЗ з найбільшою товщиною – найнижчими. Через це силові умови експлуатації металу РЗ гину найжорсткіші і тут найчастіше виникають найсприятливіші умови для зміни і структури, і властивостей сталі [19].

Порівняли механічні характеристики сталі з різних зон гинів (РЗ, НЗ та СЗ) після експлуатації впродовж $133 \cdot 10^3$ h (№ 1) та $286 \cdot 10^3$ h (№ 3), а також гину пароперепускної труби після $256 \cdot 10^3$ h (№ 2) з відповідними для ПД труб (табл. 2).

Таблиця 2. Механічні властивості сталі 12Х1МФ прямої ділянки гинів парогонів

№ гину	σ_{YS}	σ_{UTS}	δ	ψ	KCU , MJ/m ²	J_{Ic} , kN/m ²	ΔK_{th}	$\Delta K_{th\ eff}$
	МПа		%				МПа	
1, 3	560	272	22	68	0,72	50	5,2	4,0
2	568	264	21	63	0,63	–	4,9	3,9

Для гину № 1, виготовленого із товстостінної труби (товщина стінки 36 mm), неочікувано виявили (рис. 2a–c), що попри зміну механічних властивостей сталі з усіх його зон, найвідчутніше вони погіршилися для металу СЗ (за винятком гра-

ниці плинності). І хоча властивості металу РЗ гину також погіршилися, але показник λ для нього все ж виявився нижчим, ніж для металу СЗ. Найчутливішою до експлуатаційної деградації металу цього гину стала статична тріщиностійкість J_{Ic} , яка у РЗ і СЗ гину зменшилася відповідно на 60 і 75% порівняно зі значенням для ПД.

Після тривалішої експлуатації властивості металу з гину № 2, виготовленого із тонкостінної труби (товщина стінки 17 mm), максимально погіршилися в його РЗ (рис. 2*d-f*). Найчутливішим до деградації металу виявився ефективний поріг ЦТ $\Delta K_{th\,eff}$, який у СЗ і РЗ гину знизився відповідно на 60 і майже на 80% проти значень для металу ПД.

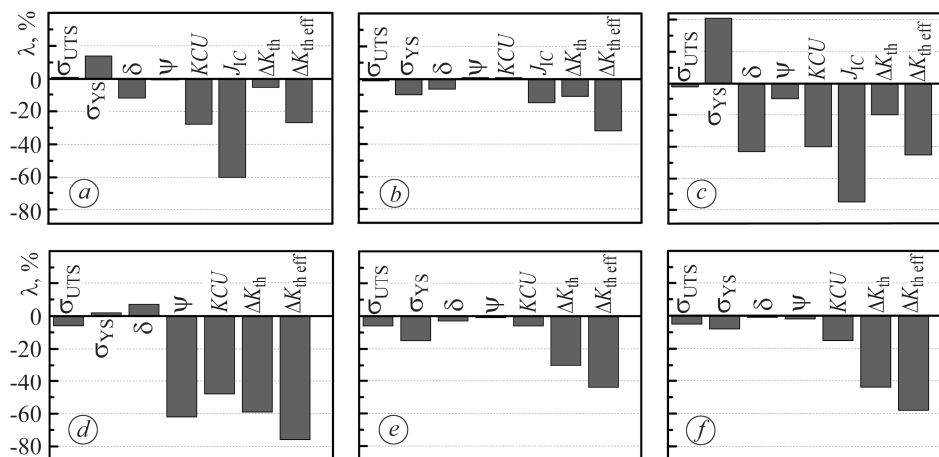


Рис. 2. Механічні характеристики сталі 12X1MΦ розтягнутої (*a, d*), нейтральної (*b, e*) і стисненої (*c, f*) зон гинів № 1 після $133 \cdot 10^3$ (*a-c*) та № 2 після $256 \cdot 10^3$ (*d-f*) експлуатації на парогоні ТЕС, оцінені за показником λ , визначеним з виразу (2).

Fig. 2. Mechanical characteristics of 12X1MΦ steel from the tensioned (*a, d*), neutral (*b, e*) and compressed (*c, f*) zones of the pipe bends № 1 after $133 \cdot 10^3$ h (*a-c*) and № 2 after $256 \cdot 10^3$ h (*d-f*) operation on the TPP steam pipeline by the λ parameter obtained by relation (2).

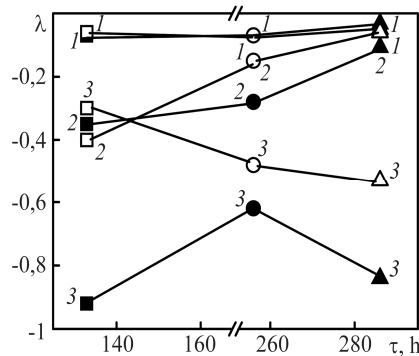
Таким чином, зниження механічних характеристик (в першу чергу – опору крихкому руйнуванню) властиве для металу всіх зон обох гинів парогонів. Це, з одного боку, пов’язано зі змінами вихідної структури металу (виділенням та коагуляцією карбідів уздовж меж зерен), а з іншого – з формуванням мікропошкоджень (через декогезію карбідів від матриці з виникненням навколо них пор). Таке структурування було активнішим у перетинах, де діяли вищі напруження, або зосереджувалась більша кількість пошкоджень від попередніх технологічних операцій тощо. Тому спостерігали певні відмінності за ознаками експлуатаційної деградації металу тонко- і товстостінного гинів. У тонкостінному найсильніше деградував метал РЗ, а в товстостінному – СЗ. І це попри усталене уявлення, що метал РЗ завжди деградує відчутніше. Причому тріщини у СЗ товстостінного гину виникли вдвічі швидше, ніж у РЗ тонкостінного. Цю особливість СЗ пояснили наявністю вздовж меж зерен пор навколо крупних карбідів, що сформувалися в смугах інтенсивного деформування металу цієї зони зсувом ще під час його виготовлення (тобто вплинула передісторія інтенсивного деформування труби). Крім того, для товстостінного гину важливу роль відіграли ще і термічні напруження в стінці труби під час пусків-зупинок блоків, які сприяли декогезії крупних карбідів від матриці та полегшували формування міжзеренних пошкоджень у СЗ гину.

На стадії виготовлення гин з труби із меншою товщиною стінки деформувався менш інтенсивно, а отже, вплив цього чинника на експлуатаційну деградацію металу слабший. Тому для формування відповідної ферит-карбідної структури в РЗ тонкостінного гину необхідно більше часу на дифузійний перерозподіл елементів. Через максимальні напруження розтягу у цій зоні ключову роль у деградації металу і пошкодженні гину відіграла повзучість, яка, як відомо, інтенсифікується за наводнювання [20], якого неможливо уникнути за тривалої експлуатації парогонів [21]. Через сукупний вплив цих двох чинників (повзучості і наводнювання) навколо карбідів уздовж меж зерен утворилися пори, зорієнтовані, в основному, у поздовжньому напрямі, та руйнувалися перетинки між ними з виникненням фасеток міжзеренних пошкоджень.

Оцінюючи деградацію сталей у трубних елементах з високоградієнтним розподілом робочих напружень у їх поперечному перетині (якими і є гини парогонів через змінну товщину стінки труби вздовж їх периметра), важливо також враховувати орієнтацію експлуатаційних дефектів. Адже дефекти, спричинені повзучістю металу, найчастіше орієнтовані в поздовжньому напрямі, а від термовтоми – у поперечному. Опір крихкому руйнуванню зразків змінювався залежно від орієнтації різних за походженням дефектів у різних зонах аналізованих гинів (рис. 3).

Рис. 3. Зміна ударної в'язкості за показником λ для сталі 12Х1МФ нейтральної (1), стисненої (2) і розтягнутої (3) зон гинів № 1–3 залежно від часу τ їх експлуатації на парогоних ТЕС (●, ▲, ■ – поперечна орієнтація зразків, ○, △, □ – поздовжня).

Fig. 3. Relative change in impact toughness by index λ of 2Х1МФsteel from the neutral (1), compressed (2) and tensioned (3) zones of the № 1–3 bends, depending on time τ of their operation at TPPs steam pipelines (●, ▲, ■ – transverse orientation of the specimens, ○, △, □ – longitudinal).



Незалежно від тривалості експлуатації найінтенсивніше деградував метал РЗ гинів. Причому в усіх зонах деградація найвідчутніше проявилася на поперечних зразках, що дає підстави пояснити зафіксовані ефекти впливом поздовжніх експлуатаційних дефектів від повзучості. Винятком з цього правила є метал СЗ товстостінного гину, де ефект деградації на поздовжніх зразках дещо вищий, ніж на поперечних. Вважали, що у цьому випадку вплив дефектів термічної втоми на ударну в'язкість сильніший, ніж дефектів від повзучості, які ще не встигли розвинутися. Через відносно нетривалу експлуатацію цього гину не відбулося дифузійного перерозподілу елементів з виділенням і коагуляцією карбідів уздовж меж зерен в його РЗ, які передують пороутворенню і формуванню дефектів від повзучості. Ці результати корисні для персоналу електростанцій під час оцінювання технічного стану теплозмішувачів сталей, експлуатованих на парогоних, і прийняття рішення про можливість продовження їх роботи чи обґрунтуванні термінів подальших обстежень. Адже чинні нормативні документи рекомендують використовувати поздовжні зразки, що може завульовувати фактичний стан деградованих сталей і спричиняти помилкові рішення.

ВИСНОВКИ

Виявлено, що інтенсивніша деградація сталі 15Х1М1Ф з ферит-бейнітною структурою після більшої кількості зупинок технологічного процесу проявилася суттєвішим зниженням механічних характеристик, особливо опору крихкому руйнуванню. Порівняно з нею властивості сталі з ферит-перлітною структурою

стабільніші після тривалої експлуатації. Зафіксовано сильнішу втрату механічних властивостей металу шва проти відповідних для основного металу в обох структурних станах. Продемонстровано перевагу характеристик опору крихкому руйнуванню за чутливістю до експлуатаційної деградації металу різних зон гинів зі сталі 12Х1МФ, а також основного металу і металу шва на трубах зі сталі 15Х1М1Ф. Зокрема, ударна в'язкість, циклічна та статична тріщиностійкість чутливіші до структурних змін у металі під час експлуатації проти показників міцності, пластичності та твердості. Встановлено також значно вищу чутливість до деградації металу різних зон гинів ударної в'язкості, визначеної на поперечних зразках, ніж на поздовжніх.

1. Черноусенко О. Ю., Пешко В. А. Вплив роботи енергоблоків ТЕС в маневровому режимі на вичерпання ресурсу енергетичного обладнання // Вісник НТУ "ХП". – 2016. – № 10 (1182). – С. 6–16.
2. Назарчук З. Т., Никифорчин Г. М. Структурна та корозійна механіка руйнування як складові фізико-хімічної механіки матеріалів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 1. – С. 17–30.
(Nazarchuk Z. T. and Nykyforchyn H. M. Structural and corrosion fracture mechanics as components of the physicochemical mechanics of materials // Materials Science. – 2018. – **54**, № 1. – P. 7–21.)
3. Dobrzański J., Krztoń H., and Zieliński A. Development of the precipitation processes in low-alloy Cr–Mo type steel for evolution of the material state after exceeding the assessed lifetime // J. Achievements of Mat. and Manufacturing Eng. – 2007. – **23**, № 2. – P. 19–22.
4. Оцінювання деградації сталей парогонів за їх структурними, механічними та електрохімічними характеристиками / О. П. Осташ, О. В. Вольдемаров, П. В. Гладиш, А. Д. Іванишин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 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. Hladys, and A. D. Ivasyshyn // Materials Science. – 2011. – **46**, № 4. – P. 431–439.)
5. Дзіоба І. Р. Властивості сталі 13ХМФ після експлуатації та деградації в лабораторних умовах // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – **46**, № 3. – С. 67–72.
(Dzioba I. R. Properties of 13KhMF steel after operation and degradation under the laboratory conditions // Materials Science. – 2010. – **46**, № 3. – P. 357–364.)
6. Кречковська Г. В., Студент О. З. Оцінювання деградації сталей парогонів за ударною в'язкістю на зразках з різною геометрією надрізу // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 4. – С. 106–110.
(Krechkovs'ka H. V. and Student O. Z. Determination of the degree of degradation of steels of steam pipelines according to their impact toughness on specimens with different geometries of notches // Materials Science. – 2017. – **52**, № 4. – P. 566–571.)
7. Scale levels of deformation and fracture and mechanical properties of 25Cr1Mo1V steel before and after nonisothermal loading / P. V. Yasniy, P. O. Maruschak, S. V. Panin, and R. T. Bishchak // Physical Mesomechanics. – 2011. – **14** (1–2). – P. 57–65.
8. Відновлення властивостей теплотривкої сталі після тривалої експлуатації в паровій турбіні / О. З. Студент, Г. В. Кречковська, Л. М. Свірська, П. Р. Соловей // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2021. – **57**, № 1. – С. 69–77.
9. Вплив експлуатаційної пошкодженості паропровідної сталі 12Х1МФ на характеристики її тріщиностійкості / О. М. Романів, Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, І. Р. Дзіоба, Б. П. Лонюк // 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. Dzioba, and B. P. Lonyuk // Materials Science. – 1998. – **34**, № 1. – P. 110–114.)
10. Циклічна тріщиностійкість та мікромеханізми руйнування сталі 25Х1М1Ф / П. О. Марушак, Д. Я. Баран, А. П. Сорочак, Р. Т. Бішчак, В. П. Ясній // Проблеми міцності. – 2012. – **44**, № 4. – С. 88–98.
(Cyclic crack resistance and micromechanisms of fracture of steel 25Kh1M1F / P. O. Maruschak, D. Y. Baran, A. P. Sorochak, R. T. Bishchak, and V. P. Yasniy // Strength of Materials. – 2012. – **44**, № 4. – P. 410–418.)

11. Кречковська Г. В., Студент О. З., Никифорчин Г. М. Діагностування технічного стану парогонів ТЕС за твердістю і тріщиностійкістю // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 5. – С. 22–32.
(*Krechkovs'ka H. V., Student O. Z., and Nykyforchyn H. M. Diagnostics of the engineering state of steam pipelines of thermal power plants by the hardness and crack resistance of steel // Materials Science. – 2019. – 54, № 5. – P. 627–637.*)
12. *Standard Test Method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness. ASTM. E 1737., Unified Method of Test for the Determination of Quasistatic Fracture Toughness. Draft International Standard ISO/DIS 12135.*
13. Никифорчин Г. М., Студент О. З., Марков А. Д. Аномальний прояв високотемпературної деградації металу зварного з'єднання оцаднолегованої сталі // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – **43**, № 1. – С. 73–79.
(*Nykyforchyn H. M., Student O. Z., and Markov A. D. Abnormal manifestation of the high-temperature degradation of the weld metal of a lowalloy steel welded joint // Materials Science. – 2007. – 43, № 1. – P. 77–84.*)
14. *Student O. Hydrogen effect on properties of heat resistance steels after their high temperature hydrogen degradation in laboratory and service conditions // Proc. 18th Europ. Conf. on Fracture, ECF-18: "Fracture of Materials and Structures from Micro and Macro Scale", Dresden, Germany, 2010. – Dresden: ESIS, DVM, 2010. – CD ROM. – Proceeding ID 154: 9348 3B D 11357.*
15. 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 // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 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. Krechkovs'ka, and A. D. Markov // Materials Science. – 2010. – 46, № 2. – P. 177–189.*)
16. Деградація зварних з'єднань парогонів теплоелектростанцій у наводнювальному середовищі / Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, І. Р. Дзіоба, С. М. Степанюк, А. Д. Марков, Я. Д. Онищак // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – **40**, № 6. – С. 105–110.
(*Degradation of welded joints of steam pipelines of thermal electric power plants in hydrogenating media / H. M. Nykyforchyn, O. Z. Student, I. R. Dzioba, S. M. Stepanyuk, A. D. Markov, and Ya. D. Onyshchak // Material Science. – 2004. – 40, № 6. – P. 836–843.*)
17. *Student O. and Markov A. Hydrogen effect on the mechanical properties and fracture mechanism of the degraded welded joints from steam pipeline // 17th Europ. Conf. on Fracture 2008: Multilevel Approach to Fracture of Materials, Components and Structures / Eds: Ja. Pokluda, P. Sandera, P. Lukas, I. Dlouhy, Brno, Czech Republic 2–5 September 2008. – N.Y.: Curran Associates, Inc., 2011. – Vol. 3. – P. 2299–2307.*
18. Методи оцінювання корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів / О. І. Звірко, С. І. Крижанівський, Г. М. Никифорчин, Г. В. Кречковська // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2020. – **56**, № 5. – С. 7–14.
19. Вплив тривалої експлуатації сталі 12Х1МФ гинів головних парогонів ТЕС на її механічні властивості / О. З. Студент, Г. В. Кречковська, Т. Є. Палашук, Я. М. Гладкий // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – **53**, № 4. – С. 34–41.
(*Influence of the long-term operation of 12Kh1MF steel of the bends of main steam pipelines of thermal power plants on its mechanical properties / O. Z. Student, H. V. Krechkovs'ka, T. E. Palashchuk, and Ya. M. Hladkyi // Materials Science. – 2018. – 53, № 4. – P. 460–467.*)
20. Повзучість у водні експлуатованої сталі 2,25Cr–Mo / Л. О. Бабій, О. З. Студент, А. Загурський, А. Д. Марков // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – **43**, № 5. – С. 91–96.
(*Creep of degraded 2.25Cr–Mo steel in hydrogen / L. O. Babii, O. Z. Student, A. Zagórski, and A. D. Markov // Materials Science – 2007. – 43, № 5. – P. 701–707.*)
21. Сміян О. Д., Студент О. З. Фрактографічні ознаки гігациклової втоми та наводнювання за експлуатації теплотривких сталей // Фіз.-хім. механіка матеріалів – 2020. – **56**, № 6. – С. 5–15.

Одержано 26.02.2021