

УДК 620.179:620.22

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ МЕХАНІЧНОГО РЕЗОНАНСУ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНОСТІ СТАЛЕЙ ПАРОГОНІВ ПІСЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О. В. ВДОВИЧЕНКО

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

Лінійні та нелінійні методи механічного резонансу використано для виявлення пошкодженості сталей після $\sim 7 \cdot 10^4 \dots 2,45 \cdot 10^5$ h експлуатації в парогонях теплоелектроцентралі. Визначено швидкість звуку, декремент коливань і його залежність від амплітуди максимальних циклічних напружень, а також залежність резонансної частоти коливань консольно закріпленого стрижневого зразка від амплітуди деформації. Виявлено, що декремент коливань матеріалів після експлуатації вищий, ніж у стані постачання, а залежність його від амплітуди напружень посилюється. Зафіксовано, що матеріалу після експлуатації властива нелінійна пружна поведінка, яка проявляється у спотворенні резонансної кривої і залежності резонансної частоти від амплітуди. Встановлена лінійна залежність резонансної частоти від амплітуди деформації, яка корелює з такою самою для декременту коливань. Підтверджено перспективність нелінійних методів для виявлення пошкоджень у парогонях.

Ключові слова: *сталь парогонів, внутрішнє тертя, нелінійні резонансні методи.*

Розрахунковий ресурс більшої частини промислового теплотехнічного обладнання в Україні вичерпаний. Тому оцінити його стан, щоб обґрунтовано продовжити термін експлуатації – важливе економічне та інженерне завдання. Зокрема, останнім часом вивчають стан матеріалів котельного обладнання та парогонів [1–3]. Відомо, що під час тривалої експлуатації у сталях парогонів відбуваються структурно-фазові перетворення та, під впливом середовища за підвищених температур та тиску, а також циклічної їх зміни внаслідок зупинок і пусків обладнання, утворюються дефекти [4]. За сучасними уявленнями [3, 5] пошкодження мікроструктури еволюціонують у декілька стадій, упродовж яких мікропорожини, спричинені рухом дислокацій, і клиновидні тріщини, що з'являються через зеренномежове проковзування, орієнтуються ортогонально до напрямку дії напружень, об'єднуються в мікротріщини, які згодом перетворюються в макротріщини, спричиняючи руйнування.

Серед перспективних для неруйнівного контролю енергетичного обладнання є методи, що ґрунтуються на визначенні характеристик непружності матеріалів та нелінійних параметрів ультразвукових (УЗ) коливань, які дуже чутливі до внутрішніх мікропереміщень. Зокрема, встановлено, що нелінійний параметр УЗ коливань титанового сплаву, визначений під час випроб на повзучість за амплітудами других гармонік, добре узгоджується з результатами металографічних досліджень і чутливіший за швидкість поширення поздовжньої хвилі [6]. Подібні результати одержано за повзучості міді [7].

Нижче методами механічного резонансу досліджено характеристики пружності, непружності та нелінійності коливань зразків зі сталей 20 та 12Х1МФ, вирізаних з парогонів після тривалої експлуатації за високих температури та тиску, щоб обґрунтувати можливість кількісно оцінювати їх пошкодженість.

Контактна особа: О. В. ВДОВИЧЕНКО, e-mail: vdovyche@gmail.com

Об'єкт та методи дослідження. Використовували сталі 20 (0,2% C) та 12Х1МФ (0,12% С; 1,1 Cr; 0,55 Mn; 0,3 Мо; 0,27 Si; 0,22 V; < 0,3% Ni). Зразки вирізали з різних елементів парогонів під час капітального ремонту котла на Київській ТЕЦ-5, а також з відповідних трубних елементів у стані постачання (базові матеріали). Умови їх експлуатації наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Режими експлуатації парогонів

№ режиму	Сталь	Тиск p_a , МПа	Температура t , °С	Тривалість $\tau \cdot 10^{-3}$, h
1	20	15,6	249	245,8
2	20	15,6	249	245,8
3	20	15,6	345	70,4
4	12Х1МФ	14,2	505	70,4
5	12Х1МФ	14,2	505	70,4
6	12Х1МФ	13,7	560	72,2
7	12Х1МФ	13,7	560	72,2

Визначали швидкість поширення пружної хвилі V_r в стрижні, модуль Юнга E , декремент коливань δ та залежність резонансної частоти від амплітуди коливань сталей парогонів після експлуатації та у стані постачання (за відсутності тривалого термосилового впливу). Всі заміри виконані за кімнатної температури. Параметри V_r та E розраховували за значенням власної частоти коливань балкових зразків $50 \times 1,5 \times 4$ mm осьової орієнтації, використовуючи формули теорії пружності [8]:

$$E = \rho \cdot V_r^2 = \rho \cdot (2 \cdot l \cdot f_r)^2, \quad (1)$$

де ρ – густина матеріалу; l – довжина стрижня, а f_r – частота першої моди його поздовжніх резонансних коливань, яку визначали за резонансним спектром, отриманим методом резонансної УЗ спектроскопії [9]. Максимальні відносні циклічні деформації при цьому не перевищували 10^{-6} . Густина матеріалу зразків розраховували методом гідростатичного зважування.

Непружність сталей характеризували декрементом коливань, визначеним методом резонансної кривої, згідно з яким її “гострота” за вимушених коливань зразка обернено пропорційна внутрішньому тертю матеріалу, яке, як відомо [10], достатньо чутливе до зміни його технічного стану під час експлуатації. Декремент коливань визначали за першою модою поздовжніх та поперечних резонансних коливань зразків [11]:

$$\delta = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{f_+ - f_-}{f_1},$$

де f_1 – резонансна частота коливань, а f_- та f_+ – відповідно, частоти коливань перед та після резонансу, за яких амплітуда коливань зразка дорівнює половині амплітуди його коливань за резонансу.

Поперечні коливання в консольно закріплених зразках збурювали на електродинамічному вібростенді. Вважали, що стрижень навантажується розподіленими по довжині силами інерції, а максимальні напруження в зоні кріплення зразка розраховували за формулою

$$\sigma = \pi \cdot A \cdot f_{b1} \cdot \sqrt{3 \cdot E \cdot \rho},$$

де A – амплітуда коливань вільного кінця консольно закріпленого зразка; f_{b1} –

частота першої моди резонансних поперечних коливань; E – модуль Юнга, визначений за результатами замірів частоти поздовжніх коливань стрижневого зразка.

Частоту коливань зразків, яка змінювалася в діапазоні 550...850 Hz, заміряли з точністю до 0,1 Hz. За малих збурень максимальні систематичні похибки визначення амплітуди коливань вільного кінця зразка (a відтак, і максимальних циклічних напружень) та $\Delta f = f_+ - f_-$ (i , відповідно, δ) не перевищували 10%. Декремент коливань експериментальної установки в цьому діапазоні частот не перевищував 0,1%.

За параметр, що характеризує нелінійність коливань, обрали похідну функції відносної резонансної частоти від максимальних циклічних деформацій ε_{\max} по максимальних циклічних деформаціях $\frac{d}{d\varepsilon_{\max}} \frac{f_r(\varepsilon_{\max})}{f_0}$ [12]. Виявили, що функція залежності резонансної частоти від амплітуди коливань лінійна для всіх досліджених зразків, тому її похідну для кожного з матеріалів вважали сталою:

$$\frac{d}{d\varepsilon_{\max}} \frac{f_r(\varepsilon_{\max})}{f_0} = C_f. \quad (2)$$

Резонансну частоту за нульової амплітуди коливань f_0 визначали у точці перетину прямої, що з'єднувала піки отриманих резонансних кривих, з віссю абсцис на графіку $f(A)$ [13]. Усі заміри здійснювали в області пружних деформацій за напружень σ , менших за межу витривалості сталей (для вуглецевих сталей близько 150 МПа [14]), тому отримані ефекти не могли бути наслідком руйнування зразків від втоми.

Результати та їх аналіз. Характеристики досліджуваних матеріалів, визначені за резонансними кривими під час поздовжніх коливань і за припущення лінійності деформування, наведено в табл. 2. Швидкість звуку та модуль Юнга сталей після експлуатації практично не змінилися. Натомість, декремент коливань експлуатованої сталі 20 істотно вищий, ніж неексплуатованої. Причому значення δ для сталі, експлуатованої за режимом № 2, суттєво вище, ніж за режимом № 1 (незважаючи на однакові термосилові умови експлуатації).

Результати визначення декременту коливань (внутрішнього тертя) за поперечного коливання зразків засвідчили, що значення δ всіх досліджених матеріалів істотно залежать від амплітуди максимальних циклічних напружень σ (рис. 1). Незважаючи на складний характер одержаних залежностей, для всіх зразків спостерігали властиву вуглецевим сталям тенденцію до збільшення декременту коливань з ростом напружень. Отримані для сталі 20 у стані постачання результати $\delta \approx 0,8\%$ за $\sigma = 100$ МПа (рис. 1а) і $\delta \approx 1,4\%$ за $\sigma = 150$ МПа (на рисунку не показано) близькі до відомих значень декременту коливань сталі 15 під час навантаження чистим згином призматичних зразків частотою 10...20 Hz ($\delta = 1,65\%$ за $\sigma = 100$ МПа і $\delta = 2,0\%$ за $\sigma = 150$ МПа) та нормалізованої сталі 45 за поперечних коливань консольно закріплених зразків з частотою 10...100 Hz ($\delta = 0,56\%$ за $\sigma = 100$ МПа і $\delta = 0,8\%$ за $\sigma = 150$ МПа) [11]. Значення декременту коливань сталі 12Х1МФ теж узгоджуються з відомими [15].

В усьому діапазоні досліджених амплітуд циклічного навантаження значення декременту коливань усіх зразків експлуатованих сталей були вищі, ніж зі сталей у вихідному стані (рис. 1). Зауважили особливості амплітудних залежностей внутрішнього тертя в матеріалах різних елементів, знятих з експлуатації. Попри те, що контрольовані параметри режимів експлуатації № 1 і 2 сталі 20 подібні, їх декременти коливань вже за напружень 10 МПа відрізнялися майже вдвічі (рис. 1). Зі збільшенням σ до 50 МПа значення δ для сталі, експлуатованої за режимом № 2,

досягало 2,5% і в декілька разів перевищило властиве їй у вихідному стані. Це, ймовірно, пов'язано з дефектами, що виникли під час експлуатації.

Таблиця 2. Лінійні властивості матеріалів, визначені за позовжніх коливань стрижня

Матеріал і номер режиму експлуатації	Швидкість звуку V_r , m/s	Модуль Юнга E , GPa	Декремент коливань δ , %
Сталь 20			
01 (вихідний стан)	5183	209,5	0,43
1	5192	210,2	0,78
2	5232	213,5	1,21
3	5232	213,5	0,45
12X1MФ			
02 (вихідний стан)	5248	214,8	–
4	5218	212,4	0,59
5	5243	214,4	–
6	5194	210,4	1,31
7	5251	215,1	0,84

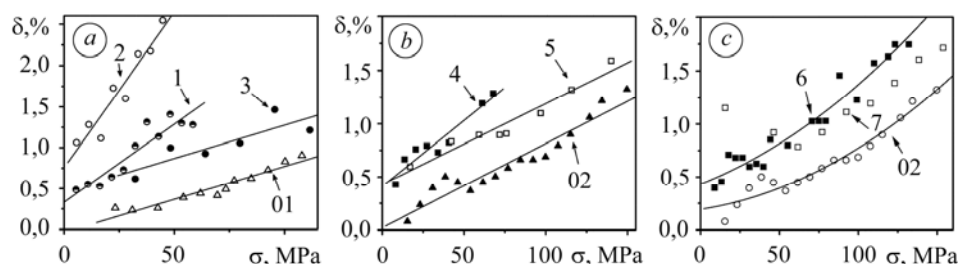


Рис. 1. Залежність декременту коливань δ сталі 20 (а) та 12X1MФ (b, c) від амплітуди максимальних циклічних напружень σ за поперечних резонансних коливань консольно закріпленого зразка з частотою 600...800 Hz у стані постачання (01; 02) та після експлуатації за режимами № 1–7 (див. табл. 1).

Fig. 1. Dependence of vibration decrement, δ , of steel 20 (a) and 12X1MФ (b, c) on maximum cyclic stress, σ , under bending resonant oscillation of cantilever bar at 600...800 Hz in initial state (01; 02) and after service in conditions № 1–7 (see Table 1).

Аналіз залежностей $\delta(\sigma)$ сталі 12X1MФ свідчить про те, що після експлуатації її декремент коливань теж більш ніж удвічі зростає (рис. 1b, c). Про таке зростання значень δ (від 0,7 до 1,2%) цієї сталі, експлуатованої (впродовж $28 \cdot 10^3$ h) за подібних умов, повідомлялось раніше [15]. Як і в нашому випадку, залежності $\delta(\sigma)$ деяких матеріалів, що працювали за таких режимів, подібні. Це стосується, наприклад, сталі 12X1MФ, експлуатованої за режимами № 6 та 7, що відпрацювала $72,2 \cdot 10^3$ h при температурі 560°C під тиском 13,7 МПа (рис. 1c). Водночас для сталі, експлуатованої за режимом № 4, параметр δ зростає стрімкіше зі збільшенням амплітуди σ , порівняно з іншими її варіантами (рис. 1b).

Загалом слід зауважити, що методи внутрішнього тертя чутливі до трансформації структури сталей [10]. Зміна фазового складу чи утворення дефектів упродовж тривалої експлуатації впливають на декремент коливань. Під час висо-

котемпературної експлуатації в металі формуються нові дислокації, внаслідок руху яких зростає внутрішнє тертя. З іншого боку, через наклеп та гальмування дислокацій на карбідах матеріал зміцнюється [14]. Тому за отриманими результатами робити висновки про небезпечні пошкодження непросто.

Дослідженнями методом резонансної кривої встановили, що за пружних коливань зразків експлуатованих сталей виникають нелінійні ефекти, невластивні їм у стані постачання, і які посилюються зі збільшенням амплітуди коливань: форма резонансної кривої спотворюється і вона стає істотно несиметричною відносно резонансної частоти; відрізняється характер зміни амплітуди коливань під час збільшення та зменшення частоти збурення; за відносно великої амплітуди збурення стрімко зростає або знижується амплітуда коливання зразка за незначної зміни частоти збурення (т. зв. зрив коливань). Крім того, зі збільшенням амплітуди коливань зменшується резонансна частота.

Резонансні криві поперечних коливань за першою модою зразків сталі 20, одержані за збільшення та зменшення частоти збурення, ілюструють їх нелінійний характер (рис. 2). Залежності побудовано в координатах $A/A_{b1}-f/f_{b1}$, де A_{b1} і f_{b1} – амплітуда та частота коливань за резонансу.

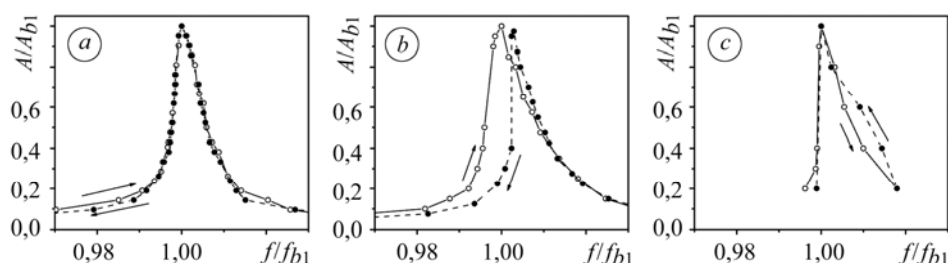


Рис. 2. Резонансні криві зразків сталі 20 у стані постачання ($A = 1050 \mu\text{m}$) (a); після експлуатації за режимами № 3, $A = 1000 \mu\text{m}$ (b); № 2, $A = 150 \mu\text{m}$ (c) (див. табл. 1), визначені за збільшення (○) і зменшення (●) частоти збурення поперечних резонансних коливань консольно закріплених зразків.

Fig. 2. Resonant curves of steel 20 samples measured at increase (○) and decrease (●) of driving frequency of bending oscillation of cantilever bar in the initial state ($A = 1050 \mu\text{m}$) (a); after service of sample № 3, $A = 1000 \mu\text{m}$ (b); № 2, $A = 150 \mu\text{m}$ (c) (see Table 1).

Нелінійні ефекти накладають певні обмеження на застосування методу резонансної кривої для визначення декременту коливань та амплітудної залежності резонансної частоти. Через сильне спотворення форми кривої, а також її неоднозначність важко точно встановити резонансну частоту і ширину резонансної кривої. Тому з досягненням критичної амплітуди коливань заміри припиняли. З іншого боку, згадані ефекти свідчать про пошкодженість сталей і придатні для її кількісного оцінювання.

Встановили, що для всіх досліджених зразків сталей резонансна частота лінійно залежить від амплітуди максимальних циклічних деформацій (рис. 3). Це дало змогу описати стан металу коефіцієнтом C_f , розрахованим за формулою (2), який характеризує швидкість зменшення резонансної частоти.

Подібні нелінійні ефекти спостерігали у частково спечених порошковому залізі та оксиді алюмінію і виявили, що ця нелінійна пружність пов'язана з дефектами, які втрачають стабільність під навантаженнями [9, 16]. Це могли бути тріщини, несучільність міжфазних меж або недосконалий контакт частинок порошкових матеріалів. Нестабільність цих дефектів свідчила про їх схильність до росту, тому їх вважали небезпечними. Макродефекти такого типу викликають істотне зростання декременту коливань порошкових матеріалів [17, 18]. Зафіксовано

лінійний характер залежності внутрішнього тертя від амплітуди деформації геоматеріалів та пошкодженого шиферу [19, 20]. Для порівняння властивостей експлуатованих сталей з притаманними їм у вихідному стані залежності декрементів коливань від амплітуди максимальних циклічних деформацій апроксимували в першому наближенні прямими і визначили коефіцієнт C_δ , що характеризує кути їх нахилу. Зрозуміло, що таке оцінювання доволі умовне, бо амплітудні залежності декременту коливань сталей різного фазового складу неадитивні: крім макродефектів, характер дії яких можна вважати однаковим, на амплітудну залежність декременту впливають фазові перетворення, які прямо не пов'язані з формуванням дефектів.

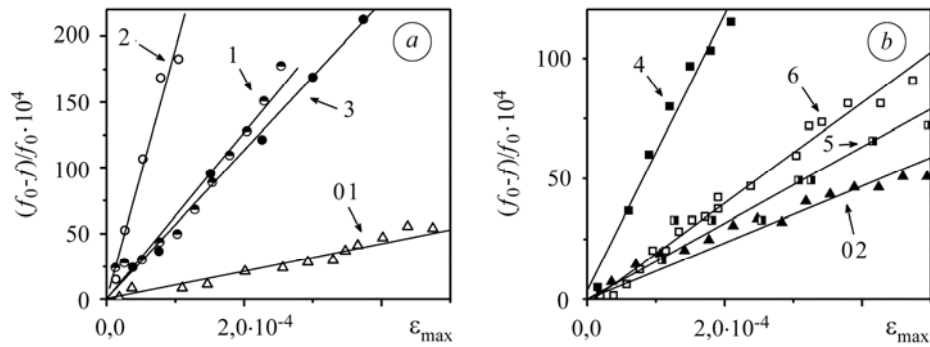


Рис. 3. Відносна зміна резонансної частоти поперечних коливань зразків сталі 20 (а) та 12Х1МФ (б) як функція амплітуди максимальних циклічних деформацій ϵ_{\max} у стані постачання (01; 02) та після експлуатації за режимами № 1–6 (див. табл. 1).

Fig. 3. Relative shift of resonant frequency of bending oscillation of steel 20 (a) and 12X1MФ (b) samples vs amplitude of maximum cyclic strain, ϵ_{\max} , in the initial state (01; 02) and after service № 1–6 (see Table 1).

Значення нормованих коефіцієнтів C_f та C_δ , а також швидкості звуку V_r для сталей, експлуатованих за режимами, поданими в табл. 1 (номер під віссю абсцис відповідає режиму експлуатації з таблиці), наведено на рис. 4.

Рис. 4. Швидкість звуку V_r (\square), коефіцієнти нахилу залежностей резонансної частоти C_f (\bullet) та декременту коливань C_δ (\circ) від деформації, нормовані за відповідними характеристиками у стані постачання (V_{r0} , C_{f0} та $C_{\delta 0}$) сталей 20 (1–3 на осі абсцис) та 12Х1МФ (4–6) після експлуатації за режимами № 1–6 (див. табл. 1).

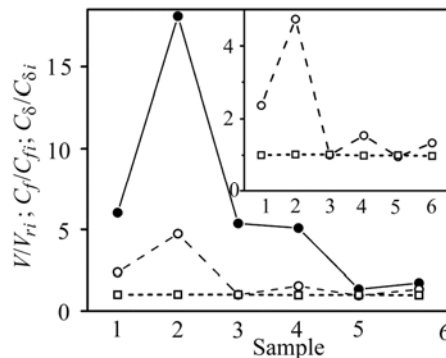


Fig. 4. Sound velocity, V_r , (\square) and slope coefficients of linear dependences of resonant frequency, C_f , (\bullet) and vibration decrement, C_δ , (\circ) on strain, normalized by respective characteristics in the initial state (V_{r0} , C_{f0} and $C_{\delta 0}$) of steels 20 (1–3 on x-axis) and 12X1MФ (4–6 on x-axis) after service for regimes № 1–6 (see Table 1).

На відміну від швидкості звуку, що практично нечутлива до експлуатаційних змін сталей, інші дві характеристики продемонстрували якісно однакові тенденції (рис. 4). Проте чутливішим до структурних змін виявився зсув резонансної

частоти зі збільшенням амплітуди коливань (а відтак, і максимальних циклічних деформацій) зразка. Метод визначення параметра нелінійності за зсувом резонансної частоти простий для реалізації та інтерпретації результатів. Адже бездефектний метал за використаних напружень повинен деформуватись лінійно пружно і тому будь-яке збільшення параметра нелінійності пов'язували лише з дефектами і їх нестабільністю. Водночас зміну декременту коливань можуть зумовити багато чинників, у тому числі і такі, що не впливають на міцність матеріалів.

ВИСНОВКИ

З використанням лінійних і нелінійних методів механічного резонансу встановили, що тривало експлуатовані сталі парогонів мають нелінійну поведінку, яка, зокрема, проявляється у спотворенні резонансної кривої і залежності резонансної частоти від амплітуди коливань. Параметр нелінійності C_f , визначений як похідна зміни відносної резонансної частоти за амплітудою максимальних циклічних деформацій, є сталою матеріалу. Загалом він корелює зі середньою швидкістю зростання декременту коливань з амплітудою ϵ , ймовірно, пов'язаний з наявністю нестабільних дефектів. Зважаючи на те, що параметри нелінійності характеризують вміст нестабільних дефектів, що здатні еволюціонувати під дією напружень, нелінійні резонансні методи перспективні для діагностування стану конструкційних матеріалів.

РЕЗЮМЕ. Линейные и нелинейные методы механического резонанса использованы для обнаружения поврежденности сталей после $\sim 7 \cdot 10^4 \dots 2,45 \cdot 10^5$ h эксплуатации в паропроводах теплоэлектроцентрали. Измерены скорость звука, декремент колебаний и его зависимость от амплитуды максимальных циклических напряжений, а также построена зависимость резонансной частоты колебаний консольно закрепленного стержневого образца от амплитуды деформации. Установлено, что декремент колебаний материалов после эксплуатации больше, чем в состоянии поставки, а его зависимость от амплитуды напряжений усиливается. Показано, что материалы после эксплуатации демонстрируют нелинейное упругое поведение, которое проявляется в искажении резонансной кривой и зависимости резонансной частоты от амплитуды. Установлена линейная зависимость резонансной частоты от амплитуды деформации, которая коррелирует с таковой для декремента колебаний. Экспериментальные результаты свидетельствуют о перспективности нелинейных методов для обнаружения повреждений в паропроводах.

SUMMARY. The linear and nonlinear techniques of mechanical resonance have been used for the detection of the damage in steel after $\sim 7 \cdot 10^4$ to $2.45 \cdot 10^5$ h of its operation in the steam pipeline of a thermal power plant. Sound velocity, vibration decrement and its dependence on the maximum cyclic stress amplitude were measured and also the dependence of resonance frequency of cantilever bar on strain amplitude was constructed. The vibration decrement of materials after operation exceeds those in the initial state and its dependence on the stress amplitude became sharper. The nonlinear effects such as distortion of resonant curve and resonant frequency shift depending on the strain amplitude were found in the materials after operation. The linear dependence of resonant frequency on strain amplitude that correlated with that characteristic of the vibration decrement was established. The experimental results indicate that nonlinear techniques are promising for detection of the damages of steam pipeline.

1. *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, O. Z. Student et al. // Materials Science. – 1998. – **34**, № 1. – P. 110–114.)
2. *Dzioba I.* Failure assessment analysis of pipelines for heat and power generating plants according to the SINTAP procedures // Int. J. Press. Ves. Piping. – 2005. – **82**. – P. 787–796.

3. *Dobrzanski J.* The classification method and the technical condition evaluation of the critical elements' material of power boilers in creep service made from the 12Cr-1Mo-V // *J. Mater. Proc. Technol.* – 2005. – **164–165**. – P. 785–794.
4. *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.
(*Nykyforchyn H. M., Student O. Z., Krechkovs'ka H. V., and Markov A. D.* 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 // *Materials Science.* – 2010. – **46**, № 2. – P. 177–189.)
5. *A review of non-destructive techniques for the detection of creep damage in power plant steels* / G. Sposito, C. Ward, P. Cawley et al. // *NDT&E Int.* – 2010. – **43**. – P. 555–567.
6. *Creep damage assessment in titanium alloy using a nonlinear ultrasonic technique* / S. Baby, B. N. Kowmudi, C. M. Omprakash et al. // *Scripta Mater.* – 2008. – **59**. – P. 818–821.
7. *Valluri J. S., Balasubramaniam K., and Prakash R. V.* Creep damage characterization using non-linear ultrasonic techniques // *Acta Mater.* – 2010. – **58**. – P. 2079–2090.
8. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика. Т. VII: Теория упругости. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
9. *Вдовиченко О. В.* Вплив макродефектів структури оксиду алюмінію на нелінійність резонансних механічних коливань // *Современные проблемы физического материаловедения.* – К.: Ин-т проблем материаловедения НАН Украины, 2012. – Вып. 21. – С. 89–100.
10. *Effect of the long-term service of the gas pipeline on the properties of the ferrite–pearlite steel* / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyrlunyk et al. // *Mater. Cor.* – 2009. – **60**, № 9. – P. 716–725.
11. *Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.* Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. – К.: Наук. думка, 1971. – 375 с.
12. *Пат. 82678 UA.* Спосіб контролю дефектності матеріалів / О. В. Вдовиченко. – Опубл. 12.05.2008; Бюл. № 9.
13. *Пат. 90728 UA.* Спосіб визначення модуля пружності матеріалів / О. В. Вдовиченко. – Опубл. 25.05.2010; Бюл. № 10.
14. *Троценко В. Т., Сосновский Л. А.* Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справ. – К.: Наук. думка, 1987. – 506 с.
15. *Влияние ползучести, старения и восстановительной термообработки на амплитуднозависимое внутреннее трение в сталях 12Х1МФ и 15Х1М1Ф* / Г. С. Писаренко, П. А. Антикайн, Л. И. Рябова, Б. С. Шульгинов // *Проблемы прочности.* – 1973. – № 1. – С. 36–39.
16. *Vdovychenko O. V., Podrezov Yu. N., and Skorokhod V. V.* Mechanical resonance spectroscopy of interparticle boundaries in high-density iron powder compacts // *Powder Metall. Metal Ceramics* – 2008. – **47**, № 5/6. – P. 366–372.
17. *Вдовиченко А. В., Подрезов Ю. Н.* Эволюция динамического модуля Юнга и демпфирующей способности пористого железа // *Металлофизика и новейшие технологии.* – 2005. – **27**, № 11. – С. 1429–1440.
18. *Вдовиченко О. В.* Динамічна пружність і здатність до демпфування спечених титанових пресовок // *Современные проблемы физического материаловедения.* – К.: Ин-т проблем материаловедения НАН Украины, 2009. – Вып. 18. – С. 131–136.
19. *Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage. Part II: single mode nonlinear resonance acoustic spectroscopy* / K. Van Den Abeele, J. Carmeliet, J. A. TenCate, P. A. Johnson // *Res. Nondest. Eval.* – 2000. – **12**. – P. 31–42.
20. *Ostrovsky L. A. and Johnson P. A.* Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials // *Riv. Nuovo Cim.* – 2001. – **24**, № 7. – P. 1–46.

Одержано 25.06.2013