

БАГАТОЦИКЛОВЕ ВТОМНЕ РУЙНУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ЇХ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ

I.С. Піняк

HIGH-CYCLE FATIGUE FRACTURE OF STRUCTURAL MATERIALS UNDER ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION

I.S. Pinyak

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

Abstract The developed method of recording current values of crack tip opening displacement made it possible to reliably establish the instant when the “material” contact between the borders of a fatigue crack near its tip in a tension half-cycle ceases and the upper time limit after which the phenomenon of contact does not occur again, as well as to develop experimentally fatigue crack growth criteria. The phenomenon of “material” contact is evidenced by the presence of residual compressive stresses on the fatigue crack borders near the tip during fracture, which impede the crack propagation in the passive part of the stress cycle. Analysis of the revealed regularities in the fatigue crack propagation, changes in its kinetic diagrams and the upper time limits of the contact phenomena due to various factors, and existing formulas for crack growth rate calculations combined with the criteria and approaches developed enabled reliable description of the fatigue crack propagation kinetics and determination of the crack growth rate, life, and fracture types, as well as establishing the relation between time-dependent local parameters of stress- and strain-based fracture criteria, which accounts for the effect of any factors, their values lying in a wide range, which cause elastic-plastic deformation of structural materials, on the fracture process.

Вступ. Відомо, що до 80% конструкцій, споруд та деталей машин руйнуються внаслідок втоми конструкційних матеріалів (металів). Втоме руйнування може протікати в умовах пружного, пружно-пластичного чи пластичного деформування металів. Однак, на практиці, найбільш чільне місце посідає багатоциклове втоме руйнування конструкційних матеріалів при їх пружно-пластичному деформуванні. Розглянемо, як приклад, руйнування сталей Ст.30Л-1 і Д9Н [1], що використовуються при виготовленні промислових тракторів “Катерпілер”, Т-330 (відповідно виробництва США та Росія), які експлуатуються в умовах Півночі. Метою роботи є достовірна оцінка кінетики поширення втомої тріщини в сталях Ст.30Л-1 і Д9Н, їх довговічності за реальних умов експлуатації тракторів.

Результати досліджень та їх обговорення. В роботі [2] приведено схему тензометрування ходової частини промислового трактора Т-330 в кліматичних умовах близьких до Півночі (м.Челябінськ, Росія) та зруйновану її боковину в умовах Півночі (м.Сінегор’є, Магаданська обл., Росія). Опрацьовані результати тензометрування дозволили описати напружено-деформівний стан ходової частини і зробити наступні висновки по зруйнованих поверхнях боковини при експлуатації трактора в умовах Півночі. Руйнування боковини протікало в небезпечно напруженій макрозоні А [2] з максимальними розтягуючими нормальними напруженнями σ_A (датчик №32). Зона А лімітує ресурс ходової частини трактора, а в ній конструкційний матеріал – сталь 30Л-1 має квазікрихкий, багатоцикловий характер втомоного руйнування.

Найбільш небезпечно напружені макрозони (датчики №10,32,56) від дії різного роду напружень і для різних конструкційних матеріалів, з яких виготовлена ходова частина, за результатами її тензометрування при різних режимах навантаження трактора Т-330 зведені в таблицю. При допомозі датчика №10 визначено напруження у

відповідній макрозоні ходової частини, що виготовлена з прокату, датчика №32 – зі сталі Ст.30Л-1 і датчика №56 – за дії тангенціальних напружень.

Таблиця

№ п/п тензо датчика	Параметри навантаженості трактора	Режими			Транспортне переміщення трактора	Вивішування трактора	Режими		Круті повороти трактора
		Розпушування скали	Переміщення скали	Переміщення глини			Розпушування щєбня	Переміщення щєбня	
10	σ_{max} , МПа	109,84	95,13	49,04	109,84	-	-	-	-
32	σ_{max} , МПа	82,38	68,65	31,38	64,73	71,59	81,4	77,48	97,09
	σ_m , МПа	37,27	31,38	18,63	28,44	-	58,84	48,05	57,86
	R	-0,09	-0,08	0,19	-0,11	-	0,45	0,24	0,19
56	τ_{max} , МПа	-	-	-	24,03	-	-	-	-

Зведені в таблицю екстремальні дані тензометрування ходової частини трактора вказують на те, що зразки зі сталей Ст.30Л-1 і D9H [1] необхідно випробувати при асиметриях циклу $-0,08 < R < 0,45$ за максимальних напружень $\sigma_a = 97,09$ МПа, що характеризують найбільш небезпечно напружену зону А при найбільш жорсткому режимі навантаження трактора.

Випробували зразки: “локалізований” прямокутний типу III [3] для вивчення закономірностей накопичення пошкоджень (поширення нанотріщин), росту мікро- і короткої тріщини та прямокутний компактний з крайовою тріщиною [4] – поширення довгої наскрізної тріщини.

Силу $P_{max} = 4,55$ кН, яку потрібно прикласти до компактного зразка розміром $62 \times 60 \times 12,5$ мм вираховували згідно [5]. Плече прикладуваної сили P_{max} від вістря початкової тріщини до лінії її дії становило 20 мм. Вирахувана сила P_{max} є меншою ніж визначені експериментально максимальні порогові сили при циклічному навантаженні $P_{max.th}$ досліджуваних сталей. Для сталі Ст.30Л-1 величина максимальної порогової сили дорівнювала $P_{max.th} = 4,8$ кН, а сталі D9H – $P_{max.th} = 5,59$ кН.

Напруження в найбільш небезпечно напруженій зоні А $\sigma_a = 97,09$ МПа [2] є меншими напружень границі витривалості сталі Ст.30Л-1 $\sigma_a = 250$ МПа [6] за випробувань “локалізованого” прямокутного зразка товщиною 6,25 мм відповідно до методик [3,4].

Дані росту втомної тріщини в сталі Ст.30Л-1 за широкого діапазону дії різних чинників X, що спричинюють її пружно-пластичне деформування, відображені у вигляді кінетичних діаграм втомного руйнування (КДВР) в [6] і узагальнені з урахуванням [7-9] на рис.1. В роботах [6,8] досліджено, що до величини зусилля розкриття вістря тріщини P_{op} нано і мікротріщина повністю оповиті залишковими стискувальними напруженнями, а макротріщина – лише у її вістрі. Експериментально визначено в часі зусилля P_{op} вздовж всього фронту мікро- та макротріщини. Окрім цього, на відміну від [6], позначення на рис.1 для короткої тріщини прийняті згідно роботи [9], а не [4]. Такі рішення дозволили з допомогою методу реєстрації поточного розкриття вістря тріщини достовірно виміряти зусилля $P_{op,I,A,B}$ розкриття короткої тріщини в точках А,В [8] і при допомозі формул роботи [9] визначати в них ефективний $\Delta K_{eff,A,B}$ і номінальний $\Delta K_{I,A,B}$ розмахи коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН).

Таким чином, приведена на рис.1 кінетика поширення втомної тріщини в сталі Ст.30Л-1 за широкого діапазону дії різних чинників, які породжують пружно-пластичне деформування конструкційного матеріалу елемента дозволяє записати критерій росту втомної тріщини (за поширення нано-, мікро-, короткої та довгої наскрізної тріщин)

$$\Delta \sigma_{eff}^{ncr} \leq \Delta \sigma_{eff}^{cr,el-pl} \leq \Delta \sigma_{fcl,X}^a \quad (1)$$

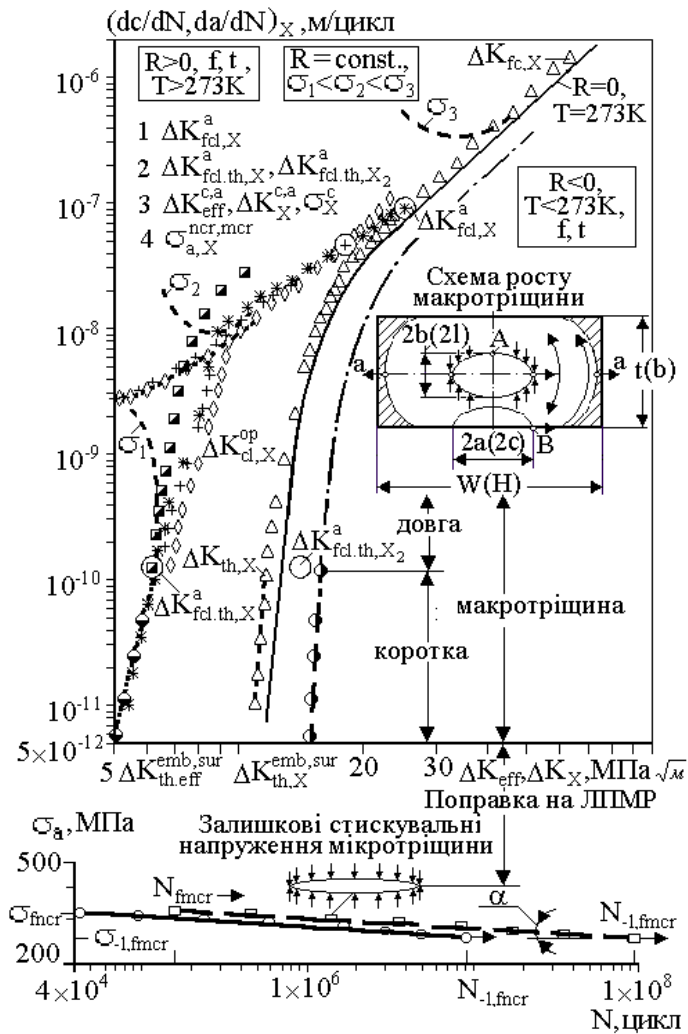


Рис. 1 Залежності кількості циклів N_i до появи втомної нано-, мікротріщини від амплітудних напружень σ_a та швидкості поширення макротріщини $dc, da/dN$ від ефективного ΔK_{eff} і номінального ΔK розмахів КІН [6] з урахуванням [7-9] для сталі Ст.30Л-1; 1 – верхня межа критерія росту втомної тріщини при пружно-пластичному деформуванні сталі, 2 – критичні порогові розмахи КІН довгої тріщини, 3 – ефективний і номінальний розмахи КІН та напружень макротріщини, 4 – амплітудні напруження нано-, мікротріщини.

Дія чинників X , що спричинюють перехід від пружно-пластичного до пружного деформування елемента з тріщиною – його крихкого руйнування (низькі температури) зумовлюють пониження верхньої межі критерія росту втомної тріщини $\Delta \sigma_{fcl,X}^a$ ($\Delta K_{fcl,X}^a$) до критичного порогового розмаху КІН $\Delta K_{fcl,th,X_2}^a$. Чинники, які впливають на наявність залишкових стискувальних напружень на берегах поблизу вістря тріщини (частота, асиметрія циклу навантаження, товщина зразка та ін.) зумовлюють пониження верхньої межі $\Delta K_{fcl,X}^a$ критерія до критичного порогового розмаху КІН $\Delta K_{fcl,th,X}^a$. Чинники, що розвивають пластичність при переході від пружно-пластичного до пластичного деформування елемента з тріщиною спочатку підвищують верхню межу $\Delta K_{fcl,X}^a$ критерія росту втомної тріщини (підвищені температури), а потім розвивають *пластичність* (високі температури), яка не дозволяє застосовувати експериментально розроблений критерій (1). Нижня межа $\Delta \sigma_{eff}^{ncr}$ критерія обмежена *розвитком* нанотріщини, який неможливо достовірно вивчати сучасними засобами і принципами механіки руйнування.

Формули для визначення швидкості поширення втомної макротріщини $dc, da/dN$ за наявності та відсутності залишкових стискувальних напружень на берегах поблизу її вістря приведені в [2].

Кінетика, типи руйнування конструкційного матеріалу, швидкість росту довгої наскрізної da/dN втомної тріщини і її зв'язок з мікрошвидкістю за дії різних чинників X при пружно-пластичному деформуванні елемента вивчалися в [6,10-13].

Довговічність N_X конструкційного матеріалу елемента в умовах його пружно-пластичного деформування і за широкого діапазону дії різних чинників X (наявності залишкових стискувальних напружень на берегах поблизу вістря втомної тріщини, присутності явища змикання-розмикання вістря втомної тріщини) на основі формули (6) роботи [6] та з урахуванням [8,9] записується у наступному виді

$$\begin{aligned}
 N_X &= N_0^{mcr} \cdot \left(\frac{\sigma_{eff,0}^{mcr}}{\sigma_{-1,eff}^{mcr}} \right)^{ctg\alpha, mcr} + \frac{\Delta c_X^{sur}}{(dc/dN)_{th,X}^{sur}} + \\
 &+ \int \frac{a_{th,X}}{c_{th,X}^{sur}} \frac{dc_X}{C_1 \cdot (\Delta K_{th,X} \cdot \Delta K_{fc,X})^{\frac{n_2}{2}} - \left(\sqrt{\Delta K_{th,X}^{sur} \cdot \Delta K_{fc,X}} - \Delta \sigma_{t,X}^{sur} \sqrt{\pi b} (M/\Phi) S \right)^{q_{2,I}}} \Delta K_{fcl,X}^{n_2 - n_1}} + \\
 &+ \int \frac{a_{1-2,X}}{a_{th,X}} \frac{da_X}{C_1 \cdot (\Delta K_{th,X} \cdot \Delta K_{fc,X})^{\frac{n_2}{2}} - \left(\sqrt{\Delta K_{th,X} \cdot \Delta K_{fc,X}} - \frac{\Delta P_X \cdot \sqrt{\lambda}}{t \cdot \sqrt{b}} \cdot Y \right)^{q_{2,I}}} + \\
 &+ \frac{\Delta K_{fcl,X}^{n_2 - n_1}}{C_1} \cdot \int \frac{a_{2-3,X}}{a_{1-2,X}} \frac{da_X}{\left(\frac{\Delta P_X \cdot \sqrt{\lambda}}{t \cdot \sqrt{b}} \cdot Y \right)^{n_2}} + \\
 &+ \int \frac{a_{fc,X}}{a_{2-3,X}} \frac{da_X}{C_1 \cdot (\Delta K_{th,X} \cdot \Delta K_{fc,X})^{\frac{n_2}{2}} + \left(\frac{\Delta P_X \cdot \sqrt{\lambda}}{t \cdot \sqrt{b}} \cdot Y - \sqrt{\Delta K_{th,X} \cdot \Delta K_{fc,X}} \right)^{q_{2,III}}} \Delta K_{fcl,X}^{n_2 - n_1}}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Позначення, що застосовуються в формулі (2) приведені на рис.1 і в [6,9,11].

Відомо, що залежність швидкості поширення довгої наскрізної втомної тріщини da/dN від розмаху КІН ΔK_I графічно зображується кінетичною діаграмою втомного руйнування. КДВР по вісі абсцис обмежена знизу пороговим розмахом КІН ΔK_{th} , а зверху – критичним значенням розмаху КІН ΔK_{fc} . Складовими КДВР по вісі ординат є три ділянки, а саме: дві криволінійні (низьких $da/dN < 10^{-8}$ м/цикл та високих $da/dN > 10^{-6}$ м/цикл швидкостей росту тріщини) і середня апроксимована прямолінійна (діапазон середніх 10^{-8} м/цикл $\leq da/dN \leq 10^{-6}$ м/цикл швидкостей). Мікрофрактографічний аналіз побудови зломів на ділянках КДВР вказує на еволюцію мікромеханізму втомного руйнування, тобто різноманітність рельєфу (мікробудова) злomu (поверхня руйнування) [14,15]

В роботі [16] показано, що на першій ділянці КДВР в зломі зразка переважає рядковий рельєф поверхні руйнування, який сповільнює ріст тріщини, другій – боріздки, а третій – скол. Фрактографічний аналіз зразків вказує на те, що приведені механізми руйнування присутні в досліджуваному діапазоні температур.

Розглянемо вплив низьких температур на еволюцію рельєфа поверхні злomu при втомному руйнуванні сталі Ст. 30Л-1 і сталі Д9Н. Еволюцію мікромеханізму руйнування проілюструємо на сімействі КДВР досліджуваних сталей, що отримані за

різних кліматичних температур [13], шляхом розташування на них фрактограм вибірових ділянок зломів прямокутних компактних зразків.

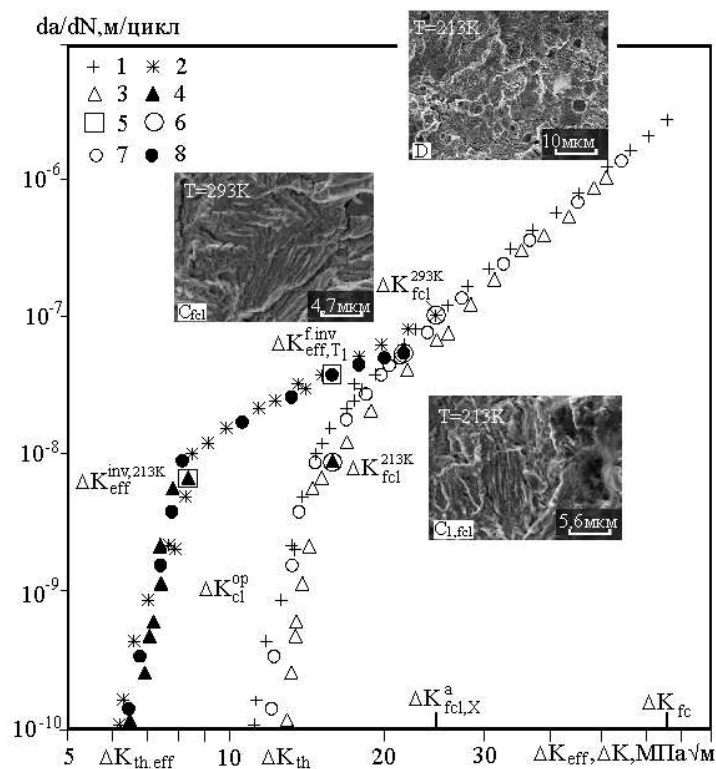
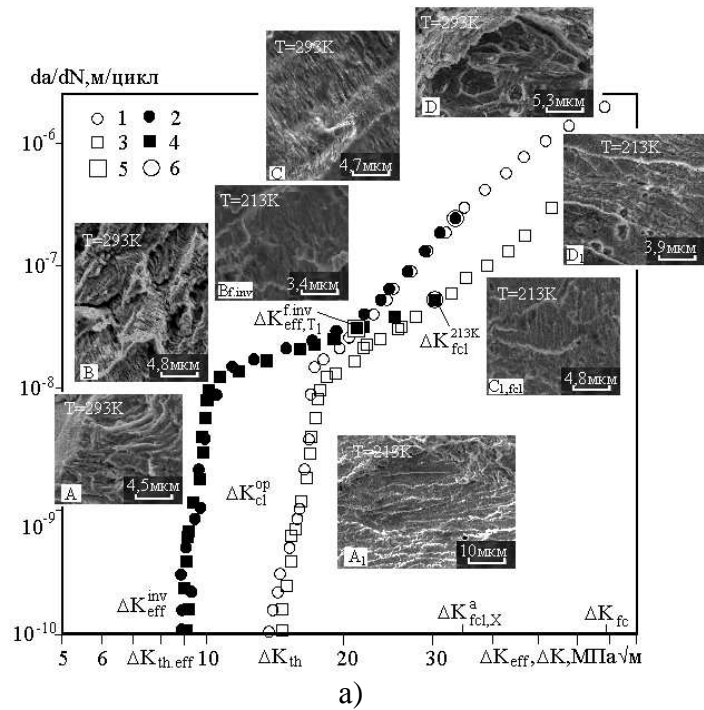


Рис.2 КДВР сталі D9H (а) і сталі Ст. 30Л-1 (б), що отримані за різних температур [13]: 1,2 – $T=293\text{K}$, 3,4 – $T=213\text{K}$, 5 – межа інваріантності КДВР за дії різних чинників, 6 – верхня межа критерія (1) та інваріантності КДВР за комплексної дії чинників, 7,8 – $T=253\text{K}$; А, А₁ ($\Delta K=17,2$ і $18,1\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) – рядковість зі струмковими та хвильовими візерунками, В, В_{f,inv} ($\Delta K=20,3$ і $21,8\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) – квазіборіздки, С, С_{fcl}, С_{1,fcl} ($\Delta K=52,6$ і $30,68$; $25,7$ і $15,4\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) – боріздки, D, D₁ ($\Delta K=70,1$ і $52,6$; $51,3\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) – фасетки скла, ямки з борізтками.

Електронні фрактограми надають можливість досліджувати мікропроцеси руйнування. Мікробудову поверхні руйнування зразка в напрямку поширення довгої тріщини досліджували на растровому електронному мікроскопі “CamScan-4DV” (чутливість 50...60⁰А). З метою отримання достовірної мікрофрактографічної інформації поверхню руйнування ретельно очищали від твердих частинок, вуглеводів та оксидів заліза в наступній послідовності. Спочатку її промивали ацетоном і спиртом, а потім наносили на неї 30% розчин ортофосфорної кислоти і видержували в ньому протягом 40...45 с. Після витримки старанно промивали поверхню дистильованою водою та ректифікованим спиртом і просушували теплим повітрям.

Руйнування сталей Ст. 30Л-1 і D9Н за різних температур протікало наступним чином: на першій ділянці КДВР в зломі зразка переважає рядковий рельєф зі струмковими та хвильвими візерунками, другій – квазіборізки та борізки і третій – скол.

Установлено зв'язок між локальними параметрами деформаційного $\Delta\delta_{eff,i}$ (ефективний розмах розкриття у вістрі тріщини) та силового $\Delta K_{eff,i}$ (ефективний розмах КІН) критеріїв у виді залежності $\Delta K_{eff,i}=f(\Delta\delta_{eff,i})$, що отримана за плинності процесу руйнування в часі з урахуванням впливу на нього в широкому діапазоні дії різних температур T та асиметрій R циклу навантаження, які зумовлюють пружно-пластичне деформування сталі D9Н (рис.3). Залежність має пряме практичне застосування. Вимірявши параметри розкриття вістря тріщини вираховуємо ефективний розмах КІН $\Delta K_{eff,i}$ за формулою, що виведена емпірично із залежності $\Delta K_{eff,i}=f(\Delta\delta_{eff,i})$.

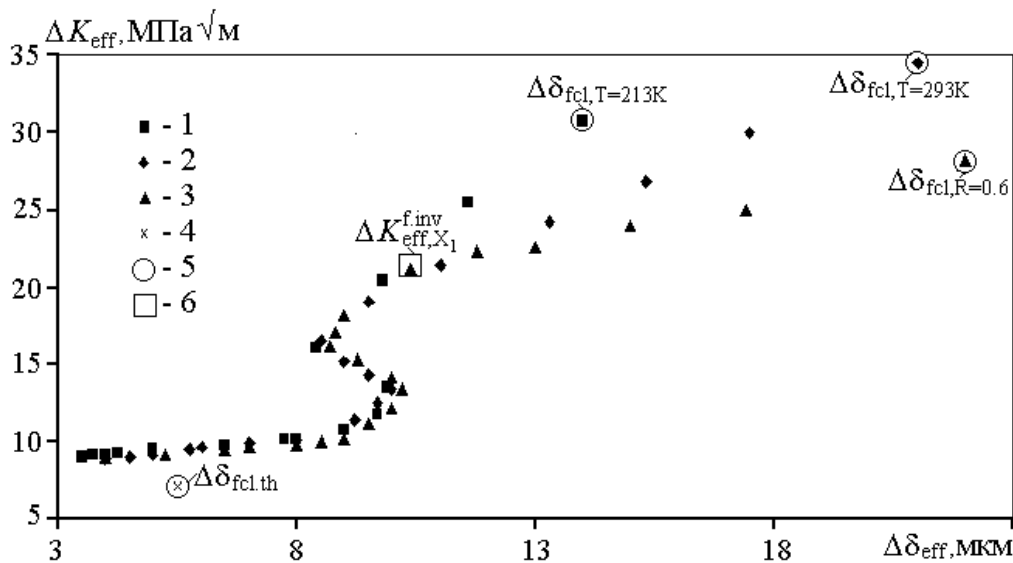


Рис.3 Залежності ефективного розмаху КІН $\Delta K_{eff,i}$ від ефективного розмаху розкриття вістря втомної тріщини $\Delta\delta_{eff,i}$ для сталі D9Н при частоті навантаження 15Гц за різних температур та асиметрій циклу: 1- $T=213K$, $R=0.1$; 2- $T=293K$, $R=0.1$; 3- $T=293K$, $R=0.6$; 4- $T=293K$, $R=0.75$; 5-верхня межа закриття вістря тріщини; 6-величина ефективного розмаху КІН до зачення якого руйнування матеріалу в часі за широкого діапазону дії багатьох чинників X (температури і асиметрії циклу) протікає адекватно та незмінно.

Висновок Достовірно оцінено стан конструкційного матеріалу елемента за плинності в часі процесу багатоциклового втомного руйнування з урахуванням впливу на нього в широкому діапазоні дії будь-яких чинників, що спричинюють пружно-пластичне деформування елемента.

Література

1. Пиняк И.С. Влияние закрытия трещины на определяемые характеристики циклической трещиностойкости сталей // Пробл. прочности - 1998. - №2. - С.161-171.
2. Пиняк І.С. Оцінка граничного стану боковин тракторів на основі двохпараметричного підходу при розрахунку на міцність // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2005. №1. – С.115-121.
3. ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 34с.
4. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении. Методические указания. Сер.: Проблемы прочности, долговечности и надежности продукции машиностроения. – М.: МНТК “Надежность машин”, 1993. - 56с.
5. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 61с.
6. Пиняк І.С. Оцінка стану елемента з тріщиною на основі двохпараметричного підходу до його розрахунку на міцність в умовах пружнопластичного руйнування // Праці 3 Міжнар. конф. “Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій”. – Львів : 2004. – С.159-165.
7. Красовский А.Я., Пиняк И.С. Аналитическое описание скорости роста усталостной макротрещины в металлах при различных условиях их эксплуатации // Праці IV Міжнар. симп. з трибофатики (ISTF 4). – Тернопіль, 2002. – Т.1. – С.284-289.
8. Пиняк І.С. Оцінка стану конструкційного елемента в умовах пружно-пластичного деформквання // Надійність і довговічність машин і споруд. - 2006. - Вип.27. - С.28-33.
9. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2 т. Пер. с англ. / Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – 1016с.
10. Пиняк И.С. Двухпараметрический подход к расчету на прочность конструктивного элемента с трещиной // Надійність і довговічність машин і споруд. – 2004. – №2. - С.99-105.
11. Пиняк И.С. К оценке кинетики упругопластического роста сквозной усталостной макротрещины в металлах при экстремальных и естественных условиях эксплуатации // Пробл. прочности. - 2004. - № 2. - С.130–143.
12. Пиняк И.С. Микро- и макроскорость роста усталостной трещины в сталях и сплавах под влиянием закрытия трещины // Там же . – 2002. – №1. - С.88-101.
13. Пиняк И.С. Вязкохрупкий переход в хладноломких металлах при многоцикловом нагружении // Там же. – №5. - С.53-69.
14. Стандартизация фрактографического метода оценки скорости усталостного разрушения металлов. – М.: Изд-во стандартов, вып.5, 1984. – 96с.
15. Расчеты и испытания на прочность. Метод оценки сопротивления металлических материалов усталостному разрушению по шагу усталостных бороздок. Методические рекомендации МР-189-86. – М.: ВНИИНМАШ, 1986. – 36с.
16. Красовский А. Я. Хрупкость металлов при низких температурах. - Киев: Наук. думка, 1980. - 340с.