

METHODOLOGY AND SOME RESULTS OF STUDY OF FREQUENCY AND WAVEFORM EFFECT ON THE FATIGUE CRACK GROWTH RESISTANCE OF HEAT-RESISTANT STEEL

P. Yasniy ^a, A. Rudawska ^b, V. Iasnii ^a, V. Zelenskiy^a

^a Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ukraine

^b Politechnika Lubelska, Poland

Abstract

Investigation of frequency and waveform effect on the fatigue crack growth resistance of heat-resistant 12Cr1MoV steel of a thermal power plant header after exploitation is presented. The studies showed that the crack growth is very non even. The increase of fatigue crack growth rate was 0.2-0.65 mm. The decrease of loading frequency at 500 C decreases significantly the FCG rate on the right part of FCG diagram.

1. Вступ

Під час експлуатації елементів конструкцій, котрі призначені для роботи при високих температурах та піддаються дії циклічного навантаження, на їх поверхнях виникають пошкодження, які згодом перетворюються у тріщини [1]. До таких елементів конструкцій відносяться корпуси реакторів, колектори пароперегрівників, паропроводи, ролик МБЛЗ та ін. У елементах енергетичного обладнання тріщини на початковому етапі спричинені термовтомою матеріалів, яка зумовлена зміною температур під час виходу на робочий режим, а також внутрішнім тиском [2,3].

Тому для прогнозування міцності і довговічності, а також для обґрунтування залишкового ресурсу високотемпературних елементів теплоенергетичного обладнання необхідно дослідити вплив експлуатаційних чинників на швидкість росту втомних тріщин (РВТ). До них, зокрема відносяться висока температура, швидкість зміни напружень (частота навантаження), а також час витримки за максимального навантаження.

У праці [4] було досліджено вплив температури на циклічну тріщиностійкість сталі 12Х1МФ колектора пароперегрівника після 178,5 тис. год. експлуатації. Було виявлено, що із збільшенням температури від 20°C до 500°C швидкість РВТ на середньоамплітудній ділянці зростає приблизно у чотири рази. Проте за розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) $\Delta K > 26 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ зміна температури не впливає на швидкість РВТ. Тут $\Delta K = K_{\text{max}} - K_{\text{min}}$; K_{max} , K_{min} – максимальний і мінімальний КІН.

Вплив частоти навантаження при високій температурі залежить від значення пластичних деформацій у вершині тріщини, мікроструктури матеріалу і мікромеханізмів розвитку тріщини в умовах втоми-повзучості [5,6]. Час витримки при максимальному напруженні може прискорювати [6], сповільнювати [7] і не впливати на швидкість росту тріщини, залежно від взаємодії механізмів руйнування [5].

Подібні закономірності були виявлені у сталі 15Х13МФ [8], зокрема у діапазоні розмаху КІН від 26 до 28 $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$ швидкість РВТ не чутлива до частоти навантаження, проте при $\Delta K < 24 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ швидкість зменшується із зменшенням частоти, і збільшується при збільшенні частоти. Зменшення частоти навантаження з 0,1 до 0,01 Гц зменшує швидкість поширення тріщини для $\Delta K = 26-28 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, короткотривала витримка при максимальному навантаженні вродовж 10 сек. зменшує швидкість росту втомної тріщини у 5-6 разів у порівнянні із трикутним циклом.

Із аналізу результатів дослідження очевидно, що за високих температур при різних частотах навантаження та в залежності від форми циклу, швидкість РВТ може як збільшуватися, так і зменшуватися. Тому для безпечної експлуатації та при обґрунтуванні

продовження ресурсу елементів конструкцій з наявними дефектами необхідно отримати діаграми втомного руйнування при різних частотах та формах циклів навантаження.

2. Методика дослідження і матеріал

Досліджували матеріал «гарячого колектора» пароперегрівника (рис. 1), після 187000 год. експлуатації, виготовленого із сталі 12Х1МФ. Механічні властивості та хімічний склад сталі подано у праці [4]. Інформація про колектор та експлуатаційні навантаження представлено у праці [3].

Ріст втомної тріщини досліджували в умовах втоми-повзучості, згідно із рекомендаціями [9] при температурі 500°C за одновісного розтягу компактних зразків, які вирізали із перфорованої ділянки експлуатованого колектора пароперегрівника (рис. 2). Товщина зразків $t = 12$ мм, ширина $W = 25$ мм. В усіх випадках площина шевронного надрізу зразків перпендикулярна до осі колекторної труби (рис. 2), площина тріщини – орієнтація L-R [10].



Рис. 1. Фрагмент перфорованої ділянки «гарячого колектора» пароперегрівника після експлуатації

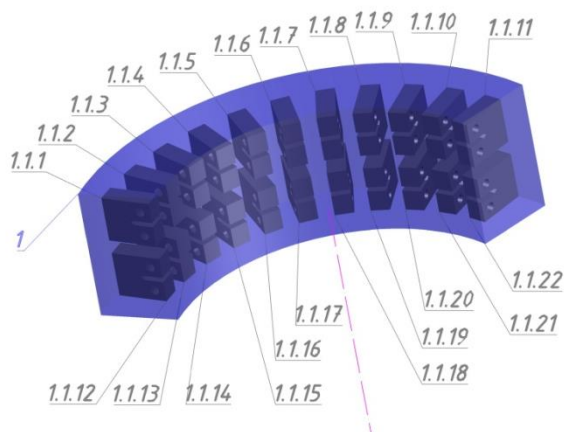


Рис. 2. Схема вирізки компактних зразків для визначення РВТ

Зразки випробовували за знакосталого навантаження з трапецевидною та трикутною формами циклу з коефіцієнтом асиметрії $R = K_{\min}/K_{\max} = 0,1$. За трикутного та трапецевидного циклів час навантаження (t_n) та розвантаження (t_p) складав 5 с. для кожного, з витримкою (t_b) для трапецевидного 10 секунд. Максимальне зусилля P_{\max} в усіх експериментах складало 5,0 кН (рис. 3).

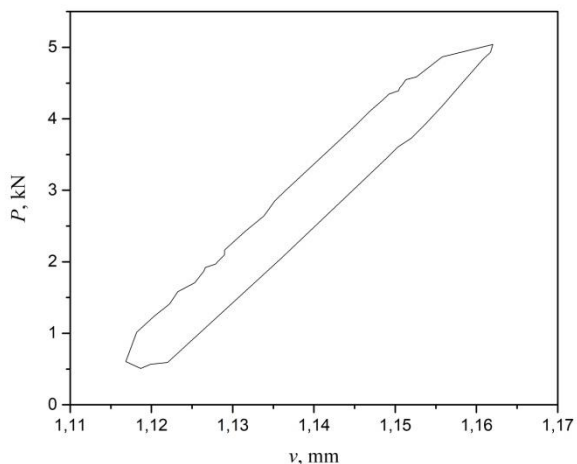


Рис. 3 Залежність зусилля P та переміщення вздовж лінії дії сили v під час випробування за трикутного циклу навантаження при 500°C

Під час проведення експерименту за допомогою програми Test Builder V2 призначеної для проведення втомних досліджень, в автоматичному режимі керування через кожних 98 циклів реєстрували зусилля P та переміщення вздовж лінії дії сили v упродовж трьох циклів навантаження з частотою запису 10 Hz. Переміщення вздовж лінії дії сили визначали за допомогою екстензометра моделі Ві-06-308 виробництва BISS, максимальна похибка не перевищувала 0,1%.

Типова діаграма для трикутної форми циклу навантаження $P-v$ представлена на рис. 3. За вказаними діаграмами чисельним методом трапецій визначали площу петлі гістерезису за якою обчислювали розмах J -інтегралу згідно рекомендацій [11]

$$\Delta J = \frac{\eta A}{tb_0},$$

де $\eta = 2 + 0,522b_0/W$; $b_0 = W - a$; a - поточна довжина тріщини; A - площа петлі гістерезису.

3. Результати досліджень та їх обговорення

З використанням підходів лінійної та нелінійної механіки руйнування досліджено вплив частоти і форми циклу навантаження на закономірності поширення втомної тріщини в сталі 12Х1МФ за 500°C. Детальні дослідження показали, що ріст тріщини є суттєво нерівномірний. Із аналізу зламів зразків слідує, що при високотемпературних випробуваннях на повітрі відбувається інтенсивне окиснення поверхні зразка і берегів тріщини, яке впливає на напружено-деформований стан у її вершині. Значний розкид швидкості росту втомної тріщини, спричинений тим, що періоди поширення тріщини чергуються із її затримкою (рис. 4). При обчисленні швидкості РВТ, її приріст складав 0,2-0,65 мм.

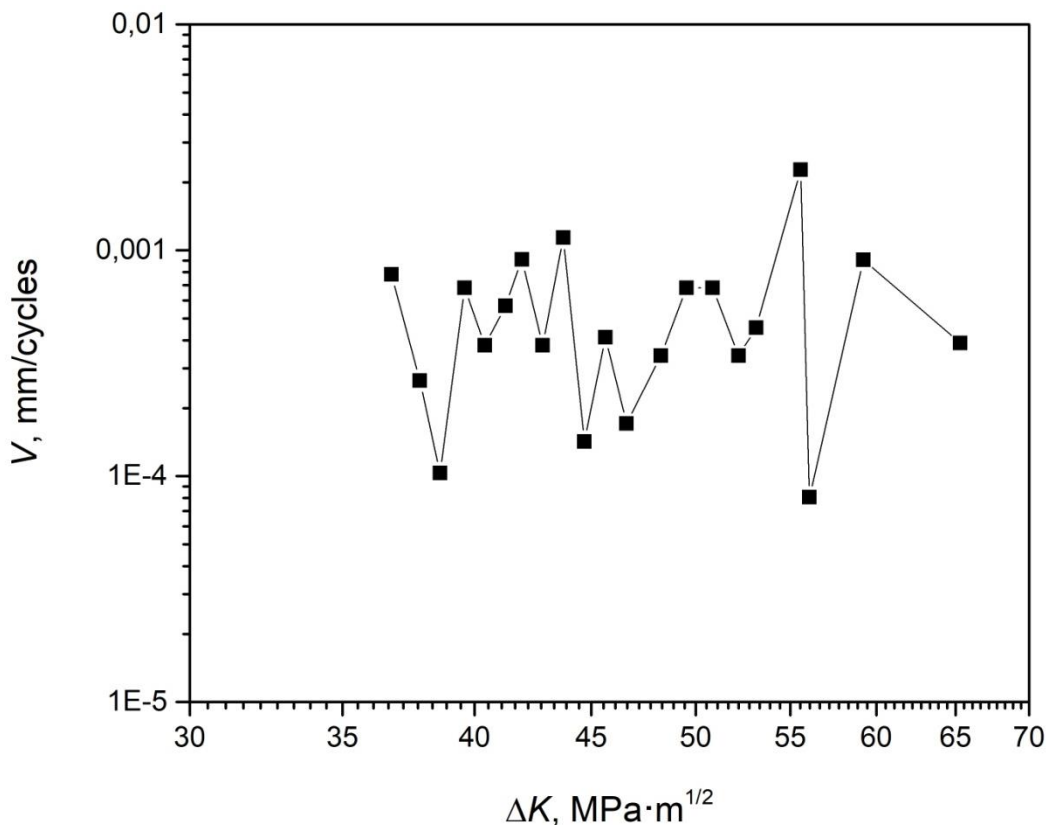


Рис. 4 Діаграма втомного руйнування експлуатованої сталі 12Х1МФ за трикутного циклу навантаження при 500°C з частотою 0,1 Гц та коефіцієнті асиметрії циклу $R=0,1$

Із збільшенням розмаху J -інтегралу швидкість росту тріщини в сталі 12Х1МФ зростає (рис. 5). Проаналізовано вплив частоти, а також форми циклу навантаження на залежності швидкості РВТ від розмаху КІН та розмаху J -інтегралу. Отримані результати при частоті 0,1 Гц порівнюються із швидкістю РВТ при частоті навантаження 25 Гц, отриманими в праці [4].

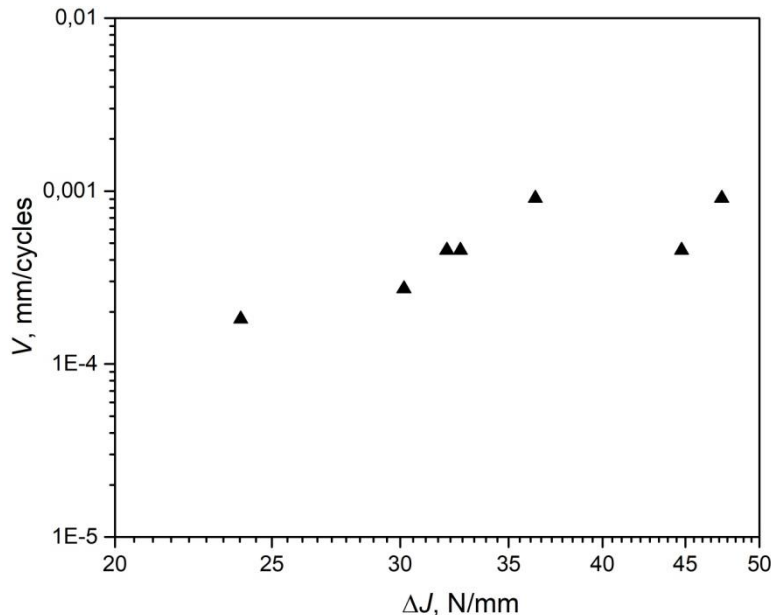


Рис. 5 Залежність швидкості РВТ від розмаху J -інтегралу за трикутного циклу навантаження при 500°C з частотою $0,1$ Гц та коефіцієнті асиметрії циклу $R = 0,1$

При представленні даних в координатах V - ΔK , зменшення частоти навантаження від 25 до $0,1$ Гц за 500°C значно знижує швидкість РВТ на правій ділянці діаграми втомного руйнування. Витримка 10 сек. за максимального навантаження неоднозначно впливає на швидкість росту втомних тріщин порівняно з трикутною формою циклу.

Література

1. Ясній О. et al. Пошкодження внутрішньої поверхні ділянки колектора пароперегрівника під час експлуатації // *Машинознавство*. 2011. № 1–2. Р. 16–19.
2. Kwon O. et al. The effect of the steam temperature fluctuations during steady state operation on the remnant life of the superheater header // *Int. J. Press. Vessel. Pip.* 2006. Vol. 83, № 5. Р. 349–358.
3. Yasniy O. et al. Lifetime estimation of superheater header // *Procedia Struct. Integr. Elsevier B.V.*, 2016. Vol. 2. Р. 840–846.
4. Ясній О., Бревус В., Немченко В. Вплив температури на циклічну тріщиностійкість сталі колектора пароперегрівника // *Вісник ТНТУ*. 2012. Vol. 68, № 4. Р. 35–41.
5. Yasniy P., Maruschak P., Lapusta Y. Experimental Study of Crack Growth in a Bimetal Under Fatigue and Fatigue-Creep Conditions // *Int. J. Fract.* 2006. Vol. 139, № 3. Р. 545–552.
6. Merah N., Bui-Quoc T., Bernard M. Creep–fatigue crack growth in notched SS-304 plates at 600°C // *Eng. Fract. Mech.* 1999. Vol. 63, № 1. Р. 39–55.
7. Im J.W. et al. Creep-fatigue crack growth and creep rupture behavior in type 316 stainless steels-effect of hold time and aging treatment // *Int. J. Automot. Technol.* 2000. Vol. 1, № 2. Р. 71–77.
8. Ясній П., Марущак П., Ващенко О. Вплив частоти та форми циклу навантаження на високотемпературну тріщиностійкість покриття біметалевого ролика МБЛЗ // *Вісник ТДТУ*. 2004. Vol. 9, № 3. Р. 5–11.
9. E2760-10e2. Standard Test Method for Creep-Fatigue Crack Growth Testing // *ASTM B. Stand.* 2010. № July 2010. Р. 1–19.
10. ASTM E 399–90. Standard Test Method for Plane–Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. // *Annu. B. ASTM Stand. Philadelphia.* – V. 03.01. 1990.
11. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken: ASTM E1820-08a, PA, USA. 2008.