

Циклічна тріщиностійкість та мікромеханізми руйнування сталі 25X1M1Ф

П. О. Марущак¹, Д. Я. Баран, А. П. Сорочак, Р. Т. Біщак, В. П. Ясній

Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, Тернопіль, Україна

¹ Maruschak.tu.edu@gmail.com

Досліджено ріст утомної тріщини у зразках із бічним надрізом із теплостійкої сталі 25X1M1Ф за коефіцієнта асиметрії циклу $R=0$ та контрольованого зусилля навантаження. Оцінено вплив частоти навантаження (0,1 і 1,0 Гц) на швидкість росту тріщини. Досліджено тріщиностійкість біметалу 25X1M1Ф/15X13МФ та вплив пружних і пластичних властивостей на закономірності росту утомної тріщини.

Ключові слова: тріщиностійкість, мікромеханізми руйнування, ріст утомної тріщини, циклічне навантаження.

Вступ. Відомо, що значна частина металургійного обладнання працює за умов низькочастотного циклічного навантаження. Підвищення їх продуктивності потребує збільшення технологічних швидкостей, що спричиняє ріст частот навантаження несівних елементів конструкцій. Це зумовлює актуальність дослідження впливу частоти навантаження на швидкість росту утомних тріщин (РУТ) у теплостійких сталях. Врахування впливу частоти навантаження і мікромеханізмів руйнування на швидкість РУТ дозволяє уточнити залишковий ресурс конструкції і сформувати фізичне підґрунтя діагностування технічного стану конструкції [1]. Оскільки кількість праць, що присвячені впливу частоти навантаження на швидкість РУТ у теплостійких сталях обмежена, це питання потребує подальшого дослідження [2].

Метою роботи є дослідження циклічної тріщиностійкості сталі 25X1M1Ф, яку традиційно використовують для виготовлення моно- та біметалевих роликів машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ).

Матеріали та методики дослідження. Мікроструктура сталі 25X1M1Ф має феритно-перлітну будову (рис. 1). За допомогою металографічних досліджень недеформованого матеріалу виявлено феритні і перлітні зерна, карбідні включення витягнутої та глобулярної форми.

За попередньо проведеними дослідженнями дисперсності цементитних пластин структуру можна класифікувати як сорбіт. У початковому стані дислокаційна мікроструктура сталі 25X1M1Ф має сіткову і частково комірчасту будову [3].

Досліджували швидкість РУТ у призматичних зразках із бічним надрізом (SENT) за одновісного циклічного розтягу. Частота навантаження становила 0,1 і 1,0 Гц. Попередньо у зразках зароджувались утомні тріщини за частоти 25,0 Гц [4]. Під час експерименту контролювали зусилля навантаження і швидкість підростання тріщини. Фотографували вершину тріщини у навантаженому і вільному станах. Швидкість поширення тріщини у межах середньо-

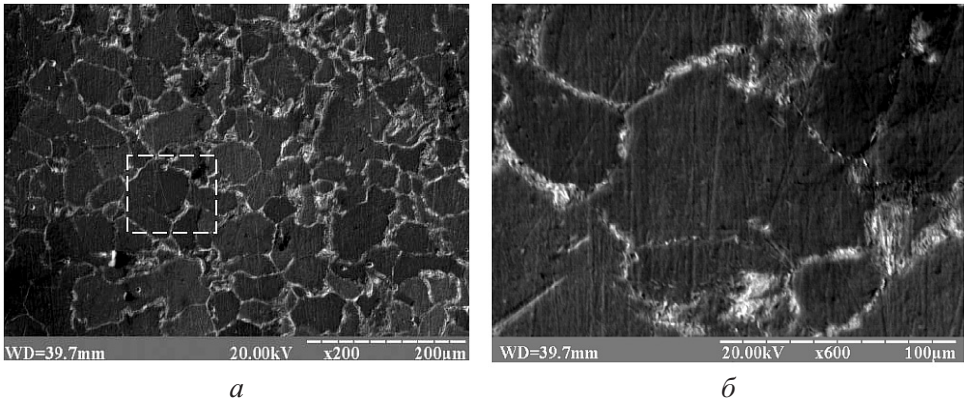


Рис. 1. Мікроструктура сталі 25X1M1Φ у вихідному стані: *a* – $\times 200$; *б* – $\times 600$.

амплітудної ділянки кінетичної діаграми утомного руйнування (КДУР) описували залежністю Паріса:

$$\frac{da}{dN} = CK_{\max}^m, \quad (1)$$

де C , m – сталі матеріалу.

Коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) для плоского призматичного зразка (рис. 2,*a*) з жорстким затисненням визначали за формулою [5]

$$K_I = \sigma_{app} \sqrt{W} F_1 \left(\frac{a}{W} \right), \quad (2)$$

для зразка розміром $L/W = 4$ маємо

$$F_1 \left(\frac{a}{W} \right) = 0,288 + 3,779 \left(\frac{a}{W} \right) - 1,985 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 3,662 \left(\frac{a}{W} \right)^3,$$

де a – довжина тріщини; N – кількість циклів навантаження; W – ширина зразка; σ_{app} – напруження в бруто-перерізі зразка; L – відстань між захоплювачами.

Узагальнений вигляд КІН для біметалевого зразка (рис. 2,*б*) можна записати так [6, 7]:

$$K_{Ibi} = \frac{\sigma_{app} \sqrt{W}}{\left[\left(1 - \frac{E_2}{E_1} \right) \sqrt{\left(\frac{W_1}{W} \right)^2 - \left(\frac{a}{W} \right)^2} + \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{a}{W} \right)^2} \right]} F_1 \left(\frac{a}{W} \right), \quad (3)$$

де E_1 , E_2 – модулі пружності першого роду відповідно першого (на рис. 2,*б* I) та другого (II) матеріалу біметалу; W_1 – ширина 1-ї ділянки біметалевого зразка.

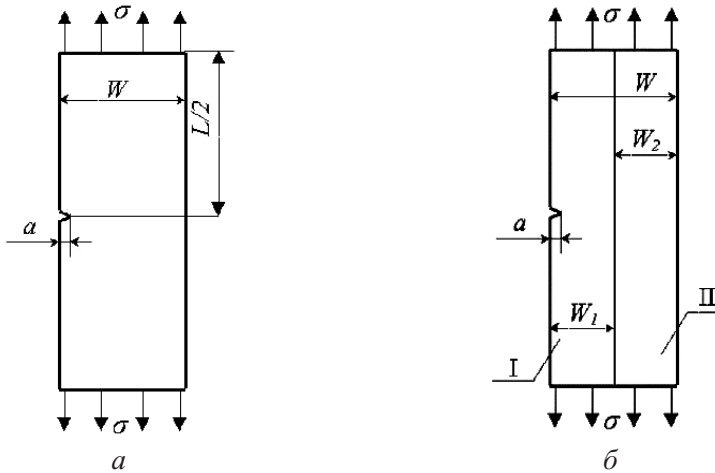


Рис. 2. Схема монометалевого (а) та біметалевого (б) зразків із бічною тріщиною.

Методом пружної піддатливості було одержано формулу [4]

$$K_I = \frac{P}{W\sqrt{2t}} F_2 \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

$$F_2 \left(\frac{a}{W} \right) = 4,008 + 180,76 \left(\frac{a}{W} \right) - 709,21 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 1065,9 \left(\frac{a}{W} \right)^3.$$

Отриману формулу для визначення КІН зіставляли з даними аналітичного розв'язку, в результаті чого виявлено їх задовільне узгодження [6].

Злами зразків досліджували методом електронної фрактографії за допомогою растрового електронного мікроскопа типу РЕМ-106И.

Темплети для електронно-фрактографічних досліджень вирізали на спеціальному верстаті Мікро-1.

Аналіз експериментальних результатів. Статична міцність та утомна довговічність матеріалу. На рис. 3,а наведено повну діаграму статичного деформування сталі 25Х1М1Ф. Її умовна межа текучості $\sigma_{0,2} = 650$ МПа, межа міцності $\sigma_B = 700$ МПа, відносна деформація матеріалу становить 25%, що свідчить про високу пластичність матеріалу.

На рис. 3,б представлено залежність довжини утомної тріщини a від числа циклів навантаження N . У цілому графік має “класичний” вигляд для подібних кривих утомної довговічності. Виявлено, що утомна довговічність сталі 25Х1М1Ф під час постійного розмаху напружень ($\Delta\sigma = 216$ МПа) за частоти навантаження 0,1 Гц становить $2,8 \cdot 10^4$ цикл, за частоти 1,0 Гц – $3 \cdot 10^4$ цикл. Таким чином, підвищення частоти навантаження збільшує залишкову довговічність матеріалу приблизно на 10%, що, очевидно, зумовлено зменшенням часу активного навантаження зразка [7].

За мікромеханізмами поширення утомної тріщини, характерними картинами деформаційного рельєфу [8], що формується у вершині та біля берегів

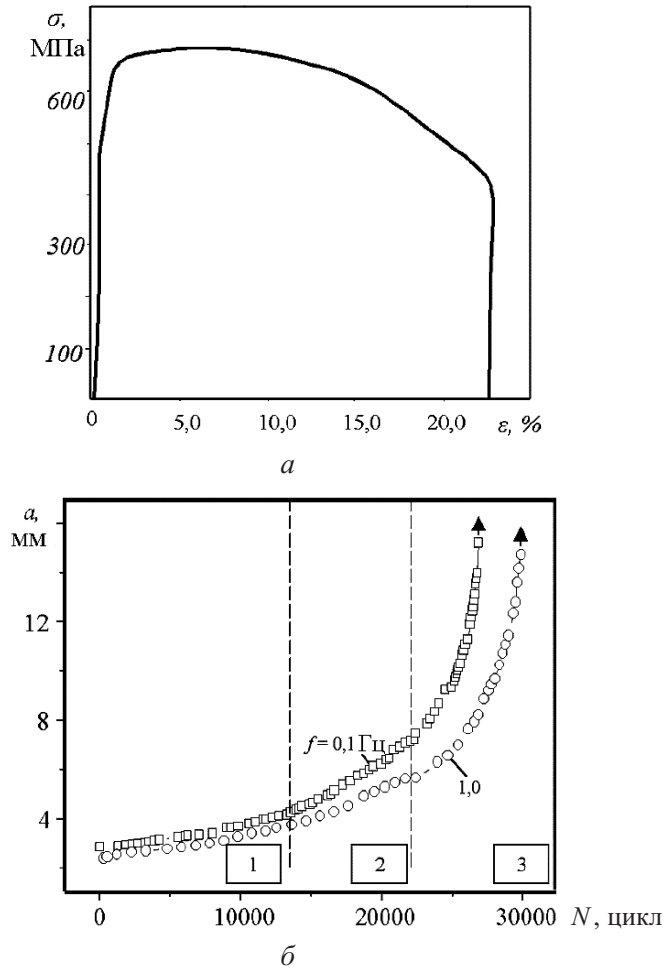


Рис. 3. Повна діаграма деформування сталі 25X1M1Ф за статичного розтягу – а та криві залишкової втомної довговічності за різних частот навантаження – б ($a_0 = 2,25$ мм, $\Delta\sigma = 216$ МПа).

такої тріщини, можна виділити ряд ділянок на кривих залишкової втомної довговічності (рис. 3,б).

Ділянка 1 визначається за $N \leq 14 \cdot 10^3$ цикл і довжині тріщини $a \leq 4$ мм (рис. 3,б). За даними мікроскопічного спостереження за бічною поверхнею зразка під час навантаження квазікрихке поширення тріщини супроводжується переважно мікро- і частково мезомасштабною пластичною деформацією при досліджених частотах навантаження. На бічній поверхні поблизу вершини тріщини спостерігається формування деформаційного рельєфу.

Ділянка 2 визначається мезомасштабним рівнем деформування матеріалу, для неї характерне поступове збільшення швидкості підростання тріщини у діапазоні довжин $4 \leq a \leq 8$ мм (рис. 3,б). Для частот випробувань 0,1 і 1,0 Гц залишкова утомна довговічність матеріалу на цій ділянці буде $N_1 \approx (14 \dots 23) \cdot 10^3$ цикл і $N_2 \approx (14 \dots 27) \cdot 10^3$ цикл відповідно. За результатами мікροаналізу поверхні зразків виявлено “переривчастий” характер поши-

рення тріщини, що супроводжується локальними змінами напрямку її поширення, розгалуженням та утворенням мікротріщин. Слід зазначити, що активніше ці механізми проявляються за частоти 0,1 Гц. Інтенсифікація пластичного деформування у вершині тріщини призводить до активізації механізмів накопичення пошкоджень і руйнування.

Ділянка 3 характеризує перехід механізмів деформування на макромасштабний рівень, і швидкість РУТ на ній підвищена (рис. 3,б). Для обох досліджених частот (0,1 та 1,0 Гц) на цій ділянці механізми підростання тріщини набувають в'язкого характеру, що зумовлено зростанням локалізації деформування та зсувних деформацій у вершині тріщини (рис. 4). Зі збільшенням розгалуження має місце накопичення деформацій в околі елементів мікроструктури (включення, межі субзерен, мікроруйнування і розрив когерентних зв'язків включень і матриці), що пояснює утворення локальних зон ямкового відриву [9, 10]. В околі вершини магістральної тріщини спостерігаються місцеві "надриви" матеріалу зразка, формування яких супроводжується зсувними деформаціями (на рис. 4 стрілки). При поширенні тріщин спостерігаються активізація вторинного розтріскування і розгалуження магістральної тріщини. На поверхні зразка формуються смуги локалізованого пластичного деформування, що розташовані під кутом 50...60° до осі навантаження. Виявлено, що за частоти навантаження 0,1 і 1,0 Гц механізми поширення тріщин є подібними, основні відмінності спостерігаються при розвитку ротаційної пластичності, яка є вищою за частоти 0,1 Гц, що визначається більшим часом активного навантаження матеріалу (рис. 4).

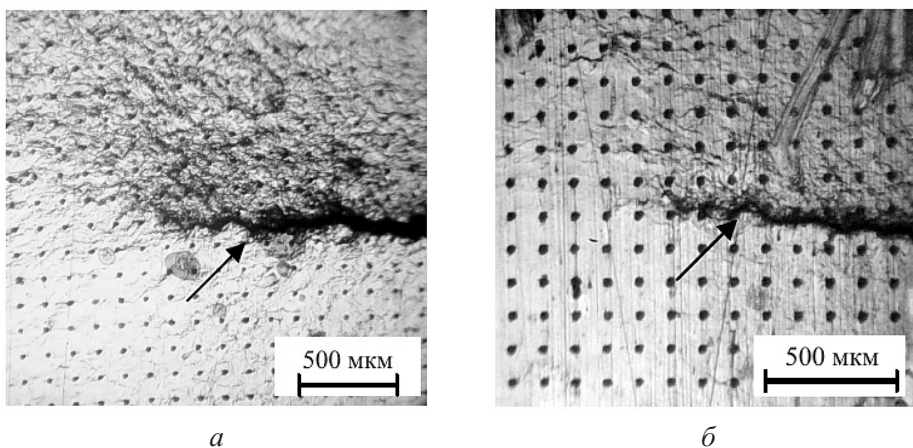


Рис. 4. Розгалуження вершини утомної тріщини в сталі 25X1M1Ф довжиною $a = 12,0$ мм за частоти 0,1 (а) і 1,0 Гц (б).

Вплив частоти навантаження на циклічну тріщиностійкість. Вплив частоти на циклічну тріщиностійкість зумовлений не лише зміною швидкості навантаження зразка, що призводить до зменшення часу розкриття тріщини, а й дією високих напружень у її околі. Важливим є взаємозв'язок між опором деформуванню і опором руйнуванню матеріалу, що пов'язано з впливом кінетики накопичення пошкоджень та деформацій на макро- і мікрорівнях (рис. 5,а).

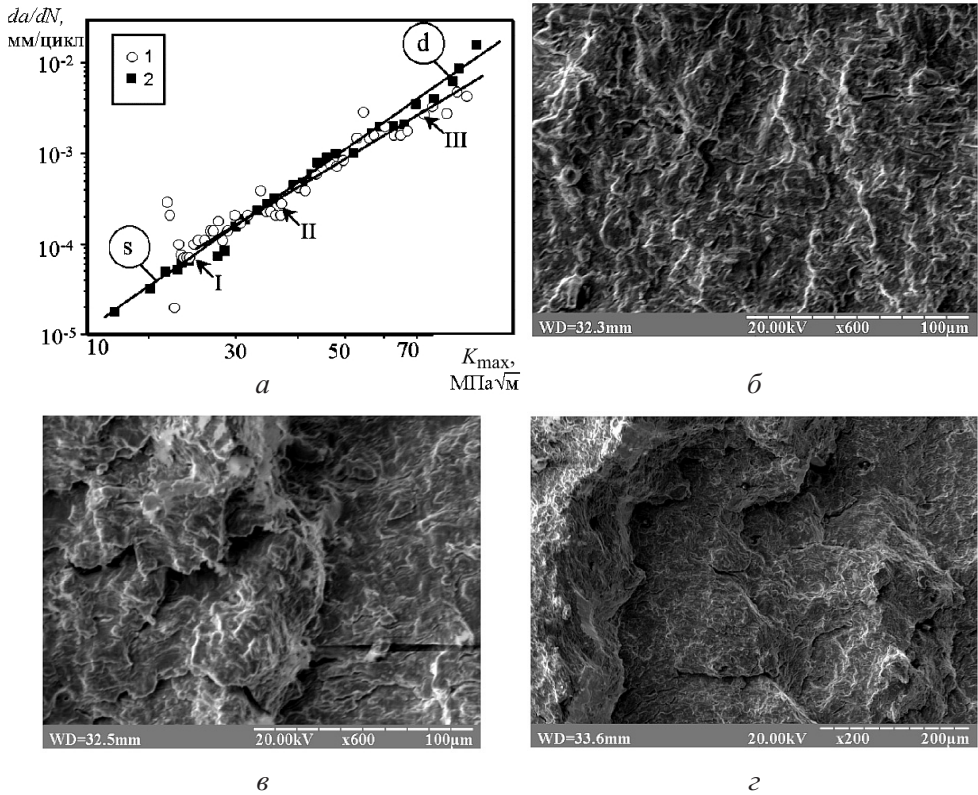


Рис. 5. Кінетична діаграма утомного руйнування сталі 25X1M1Ф за частоти навантаження 0,1 (1) і 1,0 Гц (2) – a та фрактограми поверхонь руйнування (б–з): б – I; в – II; з – III; s – утомні борозенки; d – ямки відриву.

Установлено, що збільшення швидкості навантаження від 0,1 до 1,0 Гц практично не впливає на швидкість РУТ на ділянці до $K_{\max} < 38 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. У подальшому зі зростанням K_{\max} в інтервалі 40...80 $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$ швидкість РУТ за частоти 1,0 Гц знижується у 2,0...4,0 рази, що особливо помітно поблизу ділянки нестабільного її поширення. Мікромеханізми поширення тріщини є подібними, їх поглиблений аналіз за частоти 0,1 Гц подано у попередніх роботах [11, 12].

Мікрорельєф зламу свідчить про міцність і пластичність матеріалу. Поверхня руйнування утворена “гребінчастим” рельєфом, орієнтованим під кутом 90° до напрямку поширення тріщини (рис. 5, б–з). Фронт тріщини поширюється неоднорідно, що вказує на локалізацію деформацій на певних ділянках матеріалу [13].

На зламах зразків при обох частотах спостерігали вторинні мікротріщини, що орієнтовані поперек напрямку поширення магістральної утомної тріщини, проте фронт тріщини, сформований за частоти 0,1 Гц, містить більше ділянок із мікропластичною складовою руйнування, дещо меншою є частка мікросколювання матеріалу.

Локальне зниження РУТ під час її призупинення впливає на бічну поверхню зразків, локальне розгалуження тріщини більш виражене за час-

тоти 0,1 Гц, що пов'язано зі збільшенням пластичних зсувів в околі вершини утомної тріщини [8].

Тріщиностійкість сталі 25X1M1Ф у складі біметалу. Цікавим із наукової точки зору є поширення тріщини в неомогенній системі, коли механічна неоднорідність біметалевого зразка змінює мікромеханізми деформування і руйнування матеріалу. Це зумовлено зміною напружено-деформованого стану, що особливо проявляється під час наближення утомної тріщини до межі поділу складових біметалу (рис. 6). Під час поширення тріщини у сталі 25X1M1Ф на відстані 1–2 мм до поверхні поділу циклічна пластична зона розвивається також у матеріалі з меншою границею текучості (сталь 15X13МФ). Поблизу вершини тріщини формуються смуги локалізованого пластичного деформування, які спочатку орієнтовані під кутом 40...50° до осі навантаження і мають форму, близьку до прямолінійної. Із наближенням до поверхні поділу на відстань до 1,0 мм вони набувають криволінійної форми (рис. 6,а). При цьому зростає локальна швидкість РУТ, і тріщина проростає крізь поверхню поділу біметалу (рис. 6,б).

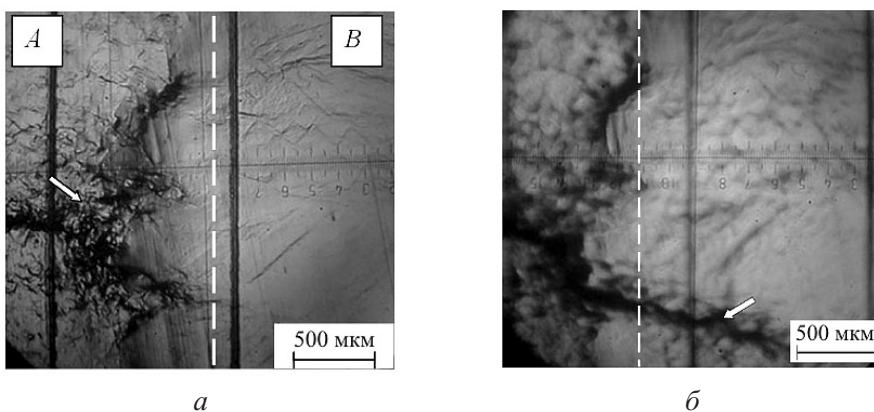


Рис. 6. Вершина утомної тріщини (стрілки) сталі 25X1M1Ф в околі поверхні поділу біметалу (штрихові лінії): *а* – тріщина на відстані 0,5 мм від поверхні поділу; *б* – тріщина пододала поверхню поділу між складовими біметалу – сталі 25X1M1Ф (*А*) і 15X13МФ (*В*).

У даному випадку наявність крихкої складової (сталь 15X13МФ) послаблює тріщиностійкість біметалу (8,0...10,0 разів) порівняно з тріщиностійкістю монометалевого зразка. Під “крихкою” складовою біметалу будемо розуміти один із двох його компонентів, який має нижчі характеристики пружності і пластичності [14]. Сталь 15X13МФ має умовну границю текучості $\sigma_{0,2} = 338$ МПа, границю міцності $\sigma_B = 456$ МПа.

Отримані результати підтверджуються експлуатаційними даними про механізми поширення утомної тріщини у біметалевому роликуні МБЛЗ [3]. Вплив поверхні поділу на механізми деформування і швидкість РУТ визначаються локальною зміною напружено-деформованого стану. Існуюча неоднорідність напружено-деформованого стану у зоні поділу спричиняє ефект екранування, локалізацію пластичності й інтенсифікацію пошкоджуваності, збільшуючи рушійну силу тріщини, що й зумовлює її проростання крізь поверхню поділу. Даний механізм є типовим для біметалів, його фізичні передумови детально описано у [15].

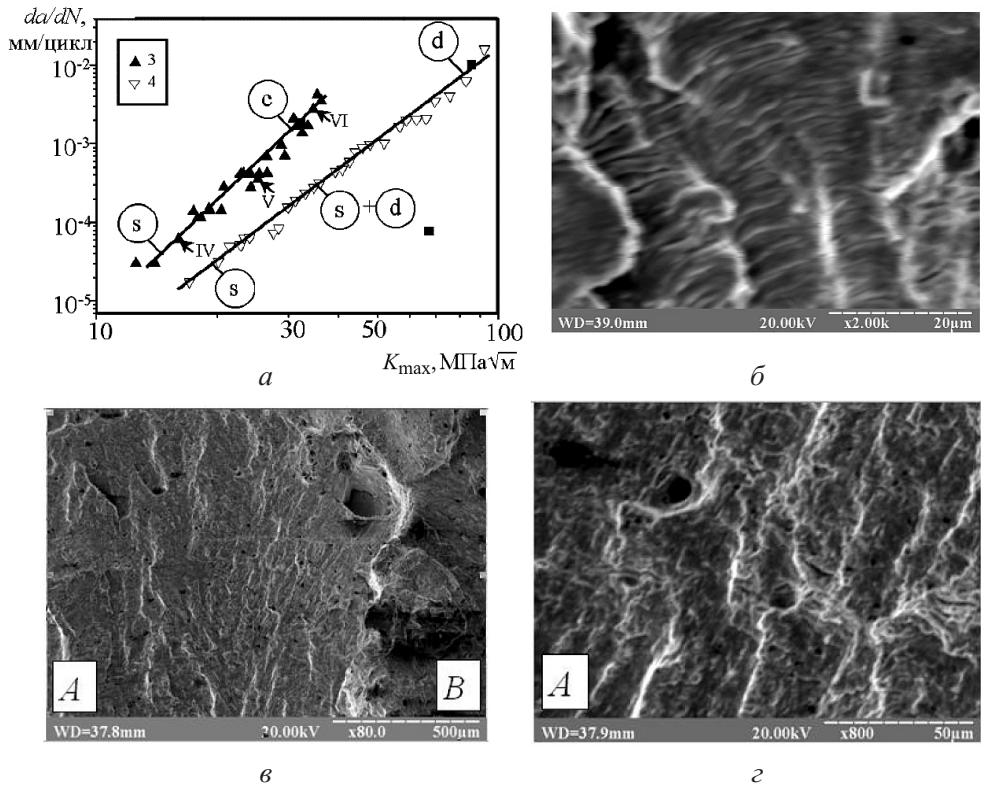


Рис. 7. Кінетична діаграма утомного руйнування сталі 25X1M1Ф у моно- та біметалевому зразках (а) і фрактограми поверхонь руйнування (б–г): б – IV; в – V; г – VI; s – утомні борозенки; d – ямки відриву; c – крихке квазісколювання.

Виявлені макрозакономірності підтверджуються даними фрактографічного аналізу. Тріщина поширюється за втомним механізмом із формуванням утомних борозенок (рис. 7,б). Останні орієнтовані паралельно до плоских граней зразка практично по всій зоні поширення магістральної тріщини. Мають місце також мікротріщини, що орієнтовані паралельно до втомних борозенок. Це свідчить про активне розгалуження магістральної тріщини. Наявність ділянок сколювання в зоні поширення магістральної тріщини підтверджує те, що розвиток відбувається за в'язкокрихким механізмом [16]. При збільшенні K_{\max} в інтервалі 15...30 МПа $\sqrt{м}$ тріщина поширюється за борозенковим механізмом руйнування.

Поверхня поділу біметалу чітко ідентифікується на фрактограмі за зміною механізмів поширення тріщини (рис. 7,в,г). У її околі виявлено ділянки квазісколювання, які є нетиповими для високих значень K_{\max} . Із наближенням до поверхні поділу біметалу втомні борозенки зникають, проте формуються квазікрихкі зсувні ділянки. На поверхні поділу виявлено смуги мікропор, які декокують зсувний, стрічковий мікрорельєф зламу. Очевидно, вони є окремою квазістатичною складовою втомного зламу, яка спричиняє прискорення РУТ.

Зіставлення мікромеханізмів деформування бічної поверхні зразка з тріщиною та аналіз поверхні руйнування показують, що тріщина поширюється

крихко-пластично. Можна стверджувати, що формування втомних борозенок на поверхні зламу і смуг локалізованого деформування бічної поверхні зразка є двома аспектами єдиного процесу.

Збільшення швидкості РУТ сприяє формуванню переважно ямково-зсувного мікрорельєфу, при досягненні $K_{\max} = 50 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ – рельєфу ямкового відриву. Для біметалевих зразків чітко проявляються мікрофрактографічні ознаки прискорення РУТ (поблизу поверхні поділу біметалу) – ділянки інтеркристалічного сколювання. Ріст тріщини поступово набуває крихко-пластичного характеру.

Взаємозв'язок між макро- і мікрошвидкістю РУТ. Швидкість РУТ у монометалевих і біметалевих зразках зіставляли з мікрошвидкістю, яку визначали за кроком втомних борозенок, виявлених за певного K_{\max} . Розміри елементів мікрорельєфу (крок утомних борозенок та діаметр ямок) вимірювали безпосередньо на зображенні на екрані РЕМ із використанням спеціальних мікрометричних ноніусів. У таблиці подано усереднені результати визначення мікрошвидкості за даними 3–5 вимірів, що дозволяє оцінити механізми деформування та руйнування матеріалу на різних структурних рівнях.

Взаємозв'язок між макро- і мікрошвидкістю утомної тріщини в сталі 25Х1М1Ф для моно- та біметалевих зразків

$K_{\max},$ МПа $\sqrt{\text{м}}$	Мікрошвидкість, 10^{-4} мм/цикл		Макрошвидкість, 10^{-4} мм/цикл	
	Монометал	Біметал	Монометал	Біметал
25	2,0	6,5	3,0	20,0
35	4,0	8,4	6,0	25,0
55	8,0	–	15,0	–

Слід зазначити, що мікрошвидкість для обох типів досліджуваних зразків у 2,0–3,0 раза менша за макрошвидкість. У досліджуваному діапазоні швидкостей макрошвидкість у біметалі у 4–7 разів більша, ніж у монометалевому зразку, а мікрошвидкість більша у 2,0...3,0 раза.

Висновки. У результаті дослідження кінетики поширення утомної тріщини у сталі 25Х1М1Ф за нормальних умов і частот навантажування 0,1 і 1,0 Гц виявлено, що за $K_{\max} < 38 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ сталь є нечутливою до частоти навантаження. Підвищення частоти навантаження в діапазоні $K_{\max} = 40...80 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ призводить до зниження швидкості поширення тріщини у 2,0–4,0 раза, що зумовлено меншим часом активного навантаження зразка і підтверджується мікромеханізмами руйнування.

Виявлено, що у біметалевому зразку циклічна тріщиностійкість сталі 25Х1М1Ф є нижчою у 8,0–10,0 разів, ніж у мономатеріалі, що зумовлено зростанням макронеоднорідності поділу брунто-напружень зразка з наближенням втомної тріщини до межі поділу складових біметалу.

Аналіз мікромеханізмів руйнування матеріалу на різних ділянках кінетичної діаграми показує, що в біметалевому і монометалевому зразках трі-

щина поширюється переважно за втомним механізмом із формуванням втомних борозенок, проте за наявності локального плоского напруженого стану – шляхом злиття мікропор із формуванням ямок відриву.

Резюме

Исследован рост усталостной трещины в образцах с боковым надрезом из теплостойкой стали 25X1M1Ф при коэффициенте асимметрии цикла $R = 0$ и контролируемом усилии нагружения. Оценено влияние частоты нагружения (0,1 и 1,0 Гц) на скорость роста трещины. Исследована трещиностойкость биметалла 25X1M1Ф/15X13MФ и влияние упругих и пластических свойств на закономерности роста усталостной трещины.

1. Pokluda J. and Sandera P. Micromechanisms of Fracture and Fatigue: In a Multi-Scale Context. – Springer, 2010. – 295 p.
2. Никифорчин Г. Н., Попов А. А., Андрусив Б. Н., Зима Ю. В. Влияние масштабного фактора на циклическую трещиностойкость пластичных сталей в низкоамплитудной области нагружения // Физ.-хим. механика материалов. – 1985. – № 4. – С. 57 – 64.
3. Ясний П. В., Марущак П. О. Ролики МБЛЗ: Деградація і тріщиностійкість матеріалів. – Тернопіль: Джура, 2009. – 232 с.
4. РД 50-345-82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 96 с.
5. Gross B. Mode analysis of a face cracked plate subjected to rotationally constrained end displacements // Int. J. Fract. – 1978. – 16, No. 6. – P. 623 – 632.
6. Ясний П. В., Марущак П. О. Методика визначення коефіцієнта інтенсивності напружень для призматичного біметалевого зразка із бічною тріщиною // Вісн. Житомир. держ. техн. ун-ту. – 2004. – № 30. – С. 35 – 41.
7. Yasniy P. V., Maruschak P. O., and Lapusta Y. Experimental study of crack growth in a bimetal under fatigue and fatigue-creep conditions // Int. J. Fract. – 2006. – 139, No. 3-4. – P. 545 – 552.
8. Yasniy P. V., Maruschak P. O., Panin S. V., and Lyubutin P. S. Investigations of fatigue crack growth stages in 25Cr1Mo1V steel within the framework of physical mesomechanics concept // Proc. of the 12th Int. Congress on Mesomechanics (June 21–25, 2010, Taipei). – Taipei, Taiwan, 2010. – P. 215 – 218.
9. Ясний П. В., Марущак П. О. Мікромеханізми усталостного руйнування сталі 25X1M1Фл // Тр. II Міжнарод. науч.-техн. конф. “Современные проблемы машиностроения” (Томск, 8–10 окт. 2004). – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – С. 90 – 93.
10. Марущак П. О., Бицак Р. Т., Фостык В. Б. Методика и некоторые результаты исследования циклической трещиностойкости сталі 25X1M1Ф // Сб. науч. трудов міжнарод. науч. форуму “Механика – машиностроению”

- / Под общ. ред. М. С. Высоцкого. – Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2010. – С. 389 – 392.
11. Ясний П. В., Панин С. В., Маруцак П. О. и др. Иерархия масштабных уровней деформации при усталостном разрушении стали 25Х1М1Ф // Материалы междунар. науч.-техн. конф. “Фундаментальные и прикладные проблемы современных технологий” (Тернополь, 19–21 мая 2010). – Тернополь: Терн. нац. техн. ун-т им. И. Пулюя, 2010. – 40 с.
 12. Маруцак П. О., Гладько В. Б., Коноваленко І. В. Кінетика втомного руйнування сталі 25Х1М1Ф на мікро-, мезо- та макрорівні // Вісн. Терн. держ. техн. ун-ту. – 2008. – № 3. – С. 21 – 27.
 13. Степаненко В. А. Экспертная фрактографическая оценка длительности роста трещин и уровня номинальных напряжений при усталости // Физ.-хим. механика материалов. – 1988. – № 6. – С. 106 – 108.
 14. Pippan R., Flechsig K., and Reimmoser F. O. Fatigue crack propagation behaviour in the vicinity of an interface between materials with different yield stresses // Mater. Sci. Eng. A. – 2000. – **283**. – P. 225 – 233.
 15. Маруцак П. О. Циклічна тріщиностійкість біматеріалу 15Х13МФл/25Х1М1Фл // Надійність та довговічність машин і споруд. – 2005. – С. 83 – 90.
 16. Стандартизація фрактографического метода оценки скорости усталостного разрушения металлов / Под ред. О. Н. Романива. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – Вып. 5. – 96 с.

Поступила 10. 02. 2011