

## **Влияние смещения фаз механического нагружения и циклического нагрева на скорость роста усталостных трещин. Сообщение 1. Влияние смещения фаз механического нагружения и циклического нагрева на размер пластической зоны в вершине трещины**

**А. П. Гопкало**

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*В результате расчета напряженно-деформированного состояния в вершине трещины в процессе механического нагружения и циклического нагрева с учетом кинетики параметров нагружения и свойств материала на протяжении цикла установлено, что максимальные значения размера пластической зоны при синфазном механическом нагружении и циклическом нагреве в 2,77 раза отличаются от таковых при противофазном. В случае синфазного механического нагружения и циклического нагрева имеет место трехкратное повышение скорости роста трещин усталости по сравнению с противофазным при фиксированных значениях коэффициента интенсивности напряжений.*

**Ключевые слова:** циклический нагрев, малоцикловое нагружение, циклическая трещиностойкость, скорость роста трещины, смещение фаз, пластическая зона.

**Введение.** Анализ разрушения ответственных элементов конструкций, работающих в сложных условиях механического нагружения и циклического нагрева, показывает, что основной причиной являются технологические или эксплуатационные дефекты типа трещин. На практике установлено, что процесс разрушения проходит с определенной скоростью и может достигать 90% общей долговечности изделия. На процесс роста трещин в конструкционных сталях при воздействии переменных температур и механических нагрузок существенное влияние оказывают уровни максимальной и минимальной температуры цикла, его форма и продолжительность, асимметрия цикла нагружения, диапазон изменения температуры, степень смещения фаз механического нагружения и циклического нагрева, частота нагружения, скорость нагрева и охлаждения, величина и скорость приложения механических нагрузок, режимы механического нагружения: “мягкий” (при сохранении постоянства от цикла к циклу и в течение всего периода испытаний при максимальных и минимальных значениях усилий) или “жесткий” (при сохранении постоянства от цикла к циклу и на протяжении всего периода испытаний при максимальных и минимальных значениях деформаций или перемещений). Кроме того, в условиях совместного малоциклового механического нагружения и циклического нагрева ситуация усугубляется из-за того, что механические и физические свойства материала изменяются на протяжении каждого цикла нагружения, поскольку многие из них являются температурно-зависимыми [1–3]. В таких сложных условиях нагружения многие из перечисленных факторов могут существенно влиять на скорость роста трещин (СРТ).

Термомеханическое нагружение охватывает широкий спектр возможных сочетаний механической и температурной составляющих нагружения. В зави-

симости от того, как изменяются во времени количественные соотношения температур и механических нагрузок, можно выделить термическую, малоцикловую и многоцикловую усталость. При термической усталости изменение температуры приводит к появлению термических напряжений. При малоцикловой усталости возможно взаимодействие усталости с ползучестью. Под неизотермическим нагружением понимают нагружение в условиях одновременного циклического изменения температуры и механической составляющей во времени. При этом изменение температуры не вызывает термических напряжений.

Известно, что при знакопеременном циклическом деформировании в изотермических условиях одни и те же участки материала поочередно подвергаются пластическому деформированию растяжением, а затем сжатием. В неизотермических условиях характер деформирования материала существенно усложняется. Например, при термической усталости (частный случай термомеханического нагружения при отсутствии механической нагрузки) материал пластически деформируется в полупериодах охлаждения, растяжение наблюдается при минимальной температуре термоцикла и его прочностные свойства значительно выше, чем при максимальной температуре. Затем в полупериодах нагрева происходит сжатие материала при максимальной температуре термоцикла, его прочностные свойства намного ниже, чем при минимальной температуре. При превышении температуры определенного уровня и увеличении времени нагружения на скорость роста трещин начинают влиять процессы ползучести. Если материал длительное время находится под воздействием достаточно высокой температуры, может проявиться релаксация напряжений с развитием деформаций ползучести при сжатии. Это значительно усложняет процесс деформирования, а при оценке условий разрушения возникает необходимость в учете длительного повреждения, вызванного ползучестью.

Влияние асимметрии цикла нагружения на СРТ носит неоднозначный и противоречивый характер и зависит от свойств материала [4–6]. В диапазоне положительных асимметрий, как правило, происходит увеличение скорости роста трещин и уменьшение предельных значений коэффициента интенсивности напряжений (КИН) при относительной стабильности среднеамплитудного участка диаграммы разрушения. В то же время в диапазоне отрицательных значений асимметрии цикла нагружения может наблюдаться как повышение, так и снижение СРТ.

Работ по исследованию влияния фазности механического нагружения и циклического нагрева при жестком нагружении на циклическую долговечность известно достаточно много [7, 8]. Так, при жестком синфазном нагреве опережение на  $20^\circ$  цикла механического нагружения относительно цикла нагрева приводит к увеличению циклической долговечности на порядок [9]. Проведенные экспериментальные исследования трещиностойкости никель-кобальтовых сплавов в условиях жесткого синфазного и противофазного малоциклового механического нагружения и циклического нагрева показывают, что скорость роста усталостных трещин при противофазном циклическом нагреве больше, чем при синфазном [10].

Экспериментальные данные о влиянии фазности мягкого малоциклового механического нагружения и циклического нагрева на характеристики циклической трещиностойкости материалов свидетельствуют о том, что в условиях синфазного нагрева СРТ в титано-алюминиево-никелевом сплаве значительно превышает таковую при противофазном [11].

Поскольку скорость роста трещины усталости связана с размером пластической зоны в ее вершине, который в соответствии с [4] зависит прямо пропорционально от КИН и обратно пропорционально от условного предела текучести, естественно, фазность механического нагружения и циклического нагрева будет проявляться в их соотношении, когда наибольшему КИН при максимальной или минимальной температуре термоцикла соответствуют минимальные или максимальные значения условного предела текучести. В данном сообщении для понимания протекающих процессов детально рассмотрено влияние фазности мягкого механического нагружения и циклического нагрева на кинетику формирования пластической зоны в вершине трещины усталости.

**Анализ параметров нагружения.** Результаты экспериментальных исследований трещиностойкости стали 25Х1М1Ф в изотермических и изотермических условиях, а также при синфазном и противофазном мягком малоцикловом механическом нагружении и циклическом нагреве [12] представлены на рис. 1 в виде ограниченных кинетических диаграмм усталостного разрушения (КДУР). Испытанию на циклическую трещиностойкость подвергали плоские образцы с краевым концентратором (рис. 2).

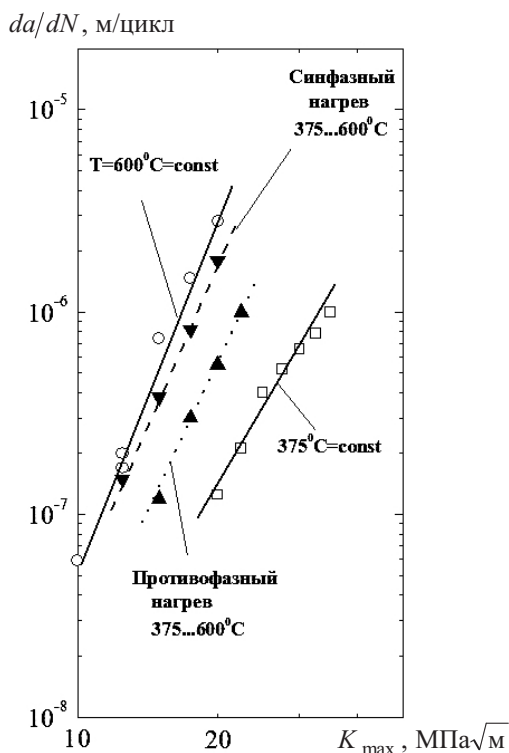
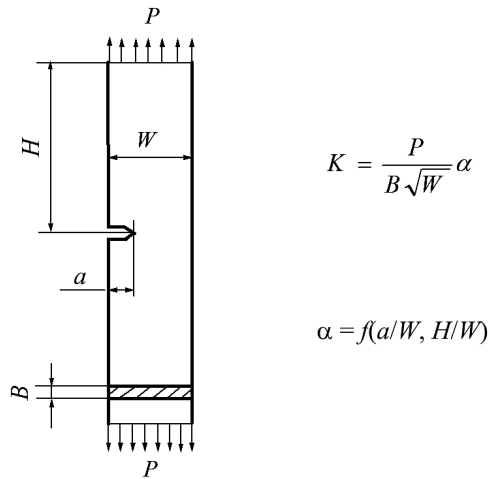


Рис. 1. Ограниченные КДУР стали 25Х1М1Ф в изотермических и неизотермических условиях мягкого механического нагружения и циклического нагрева.



$$K = \frac{P}{B\sqrt{W}} \alpha$$

$$\alpha = f(a/W, H/W)$$

Рис. 2. Схема нагружения образца и основные соотношения ( $W$  – ширина образца,  $W = 25$  мм;  $B$  – толщина,  $B = 5$  мм;  $a$  – глубина концентратора вместе с трещиной;  $H$  – расстояние от концентратора до места приложения усилий).

Следует отметить, что в условиях мягкого механического нагружения и циклического нагрева диаграммы усталостного разрушения для синфазного и противофазного циклов располагаются между диаграммами для изотермических условий нагружения при температурах, соответствующих максимальной и минимальной температуре неизотермического цикла. В изотермических условиях с повышением температуры испытаний с  $375$  до  $600^\circ\text{C}$  скорость роста трещин усталости увеличивается более чем на порядок. Для неизотермических условий нагружения полученные результаты показывают приблизительно трехкратное повышение скорости роста трещин усталости в случае синфазного механического нагружения и циклического нагрева по сравнению с противофазным.

Поскольку при фиксированном значении  $K_{\max}$  скорость роста трещин усталости зависит от температуры испытаний, фазности механического нагружения и циклического нагрева, что связано с вариацией механических и физических свойств материала (см. введение), можно предположить, что перечисленные факторы могут влиять также на формирование пластической зоны в вершине трещины.

В соответствии со схемами нагружения (рис. 3) и экспериментально полученными КДУР (рис. 1) для нагружающей части цикла механического нагружения в неизотермических условиях детально рассмотрены изменение КИН, температуры и условного предела текучести во времени (рис. 4–6), а также связь условного предела текучести с КИН (рис. 7). В данном исследовании длительность полуциклов механического нагружения и циклического нагрева составляет  $90$  с.

**Определение размера пластической зоны в вершине трещины.** В результате конечноэлементного расчета\* напряженно-деформированного состояния в вершине трещины образца в процессе циклического нагружения с учетом рассмотренной выше кинетики параметров нагружения и физико-меха-

\* Расчет проведен А. А. Чернявским.

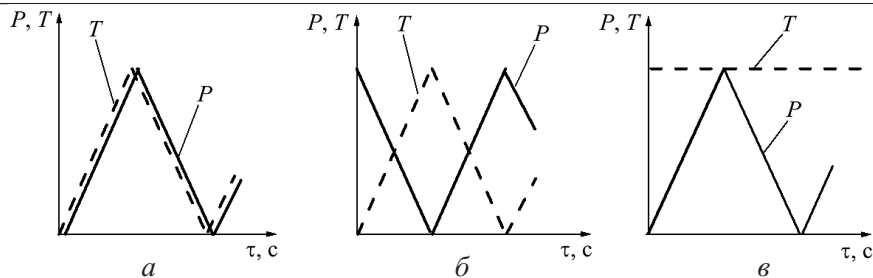


Рис. 3. Схемы нагружения образцов: неизотермическое (а, б – синфазное и противофазное) и изотермическое (в);  $P$  – усилие,  $T$  – температура,  $\tau$  – длительность цикла.

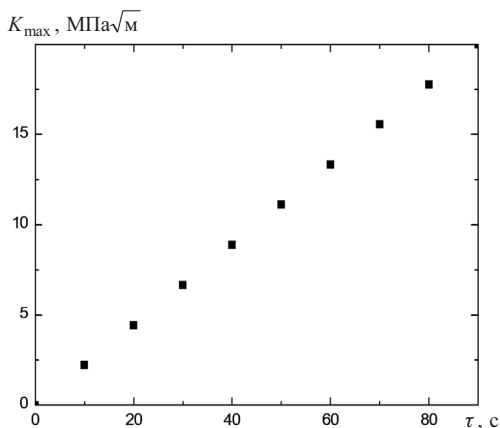


Рис. 4

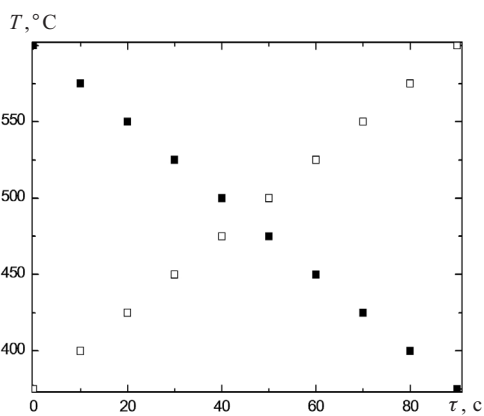


Рис. 5

Рис. 4. Кинетика КИН для нагружающей части цикла механического нагружения при длине трещины  $l = 4$  мм.

Рис. 5. Изменение температуры для нагружающей части цикла механического нагружения при синфазном (светлые точки) и противофазном (темные точки) циклическом нагреве.

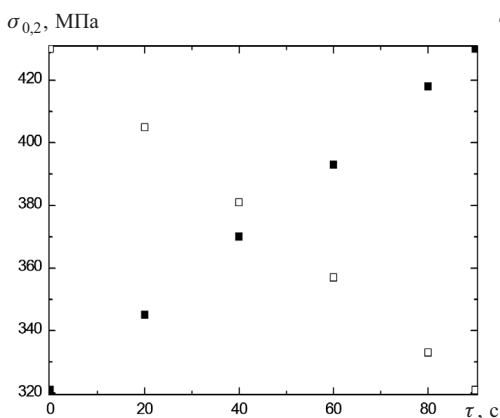


Рис. 6

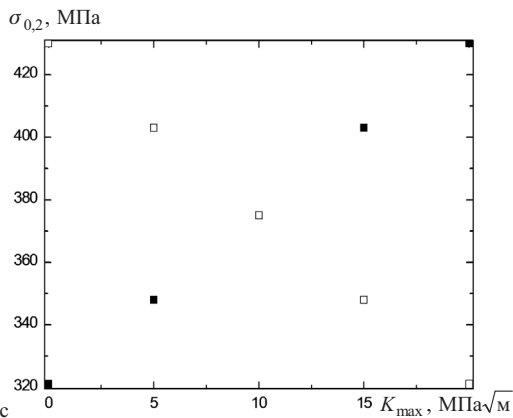


Рис. 7

Рис. 6. Изменение условного предела текучести для нагружающей части цикла механического нагружения при синфазном и противофазном циклическом нагреве. (Обозначения те же, что и на рис. 5.)

Рис. 7. Связь условного предела текучести с КИН для нагружающей части цикла механического нагружения при синфазном и противофазном циклическом нагреве. (Обозначения те же, что и на рис. 5.)

нических свойств материала были получены поля напряжений (рис. 8) и установлено существенное различие в кинетике процесса формирования размера пластической зоны  $2R_y$  в изотермических и неизотермических условиях при синфазном и противофазном циклическом нагреве (таблица, рис. 9, 10).

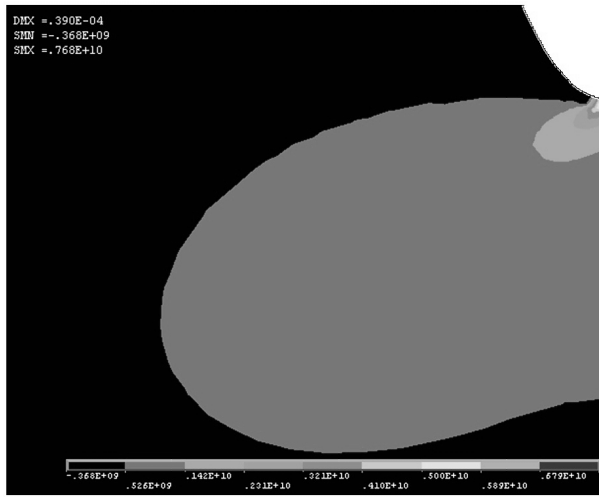


Рис. 8. Поле напряжений в вершине трещины образца из стали 25X1M1Ф при  $K = 20 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ .

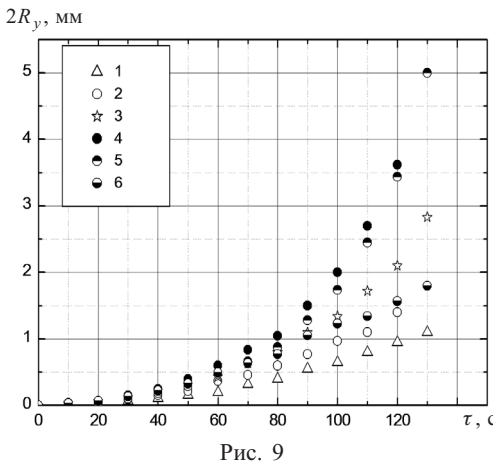


Рис. 9

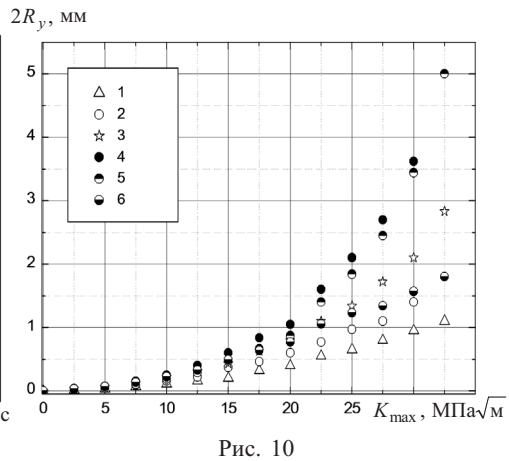


Рис. 10

Рис. 9. Изменение размера пластической зоны в вершине трещины для нагружающей части цикла при циклическом нагружении в изотермических и неизотермических условиях при синфазном и противофазном механическом нагружении и циклическом нагреве: 1 –  $T = 20^\circ\text{C} = \text{const}$ ; 2 –  $T = 375^\circ\text{C} = \text{const}$ ; 3 –  $T = 487^\circ\text{C} = \text{const}$ ; 4 –  $T = 600^\circ\text{C} = \text{const}$ ; 5 –  $T = 375\dots 600^\circ\text{C}$ , синфазное; 6 –  $T = 375\dots 600^\circ\text{C}$ , противофазное.

Рис. 10. Зависимость размера пластической зоны в вершине трещины для нагружающей части цикла от КИН при циклическом нагружении в изотермических и неизотермических условиях при синфазном и противофазном механическом нагружении и циклическом нагреве. (Обозначения те же, что и на рис. 9.)

Для неизотермических условий нагружения показано, что при синфазном механическом нагружении и циклическом нагреве максимальные значения размера пластической зоны в 2,77 раза отличаются от таковых при противофазном.

К расчету размера пластической зоны ( $2R_p$ ) в вершине трещины образца из стали 25Х1М1Ф (длина трещины  $l = 4$  мм)

Текущее время $\tau$ , с	$T$ , °С		$K$ , $\sqrt{\text{МПа}\sqrt{\text{м}}}$	$2R_p$ , мм, при					
	Синфазное	Прогнофазное		$T = 20^\circ\text{C} =$ $= \text{const}$	$T = 375^\circ\text{C} =$ $= \text{const}$	$T = 487^\circ\text{C} =$ $= \text{const}$	$T = 600^\circ\text{C} =$ $= \text{const}$	Синфазное	Прогнофазное
0	375	600	0	0	0	0	0	0	0
10	392	582	2,5	0,015	0,024	0,03	0,035	0,025	0,0340
20	409	565	5,0	0,030	0,048	0,06	0,070	0,051	0,0665
30	427	548	7,5	0,070	0,090	0,12	0,150	0,104	0,1360
40	444	530	10,0	0,110	0,160	0,22	0,250	0,187	0,2220
50	461	513	12,5	0,160	0,220	0,31	0,400	0,289	0,3300
60	479	496	15,0	0,200	0,370	0,43	0,600	0,476	0,4930
70	496	479	17,5	0,320	0,460	0,63	0,840	0,664	0,6350
80	513	461	20,0	0,400	0,600	0,80	1,050	0,876	0,7720
90	530	444	22,5	0,550	0,770	1,10	1,700	1,410	1,0550
100	548	427	25,0	0,650	0,970	1,34	2,100	1,840	1,2310
110	565	409	27,5	0,800	1,100	1,72	2,700	2,450	1,3400
120	582	392	30,0	0,950	1,400	2,10	3,620	3,440	1,5670
130	600	375	32,5	1,100	1,800	2,83	5,000	5,000	1,800

Анализ экспериментально полученных диаграмм усталостного разрушения (рис. 1) свидетельствует о том, что при фиксированных значениях КИН в случае синфазного механического нагружения и циклического нагрева скорость роста трещин усталости в три раза выше, чем при противофазном.

## Выводы

1. Установлена кинетика формирования пластической зоны в вершине трещины для изотермических и неизотермических условий циклического нагружения, в том числе со смещением фаз механического нагружения и циклического нагрева.

2. Для неизотермических условий нагружения установлено, что вследствие температурной зависимости модуля упругости, условного предела текучести и физических свойств на протяжении каждого цикла нагружения максимальные значения размера пластической зоны при синфазном механическом нагружении и циклическом нагреве в 2,77 раза отличаются от таковых при противофазном. В случае синфазного механического нагружения и циклического нагрева отмечается трехкратное повышение скорости роста трещин усталости по сравнению с противофазным при фиксированных значениях коэффициента интенсивности напряжений.

## Резюме

У результаті розрахунку напружено-деформованого стану у вістрі тріщини в процесі механічного навантаження та циклічного нагрівання з урахуванням кінетики параметрів навантаження та властивостей матеріалу протягом циклу встановлено, що максимальні значення розміру пластичної зони при синфазному механічному навантаженні та циклічному нагріванні в 2,77 раза відрізняються від таких при противофазному. У випадку синфазного механічного навантаження та циклічного нагрівання має місце трикратне підвищення швидкості росту тріщин втомі відносно протифазного при фіксованих значеннях коефіцієнта інтенсивності напружень.

1. *Гопкало А. П.* Исследование особенностей нагруженности материалов при термической усталости // Пробл. прочности. – 1994. – № 10. – С. 17 – 22.
2. *Larsen J. M., Williams K. A., Balson S. J., and Strucke M. A.* High Temperature Aluminides and Intermetallics, TMS/ASM Int., Metals Park, OH, 1990. – P. 521 – 530.
3. *Guede Z., Sudret B., and Lemaire M.* Life-time reliability based assessment of structures submitted to thermal fatigue // Int. J. Fatigue. – 2007. – 29. – P. 1359 – 1373.
4. *Механика разрушения и прочность материалов.* Справ. пособие: В 4 т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. – Киев: Наук. думка, 1988–1990. – 680 с.
5. *Noroozi A. H., Glinka G., and Lambert S.* A study of the stress ratio effects on fatigue crack growth using the unified two-parameter fatigue crack growth driving force // Int. J. Fatigue. – 2007. – 29. – P. 1616 – 1633.



6. *Xiaoping H., Moan T., and Weicheng C.* An engineering model of fatigue crack growth under variable amplitude loading // *Ibid.* – 2008. – **30**. – P. 2 – 10.
7. *Evans W. J., Screech J. E., and Williams S. J.* Thermo-mechanical fatigue and fracture of INCO718 // *Ibid.* – P. 257 – 267.
8. *Okazaki M. and Sakaguchi M.* Thermo-mechanical fatigue failure of a single crystal Ni-based superalloy // *Ibid.* – P. 318 – 323.
9. *Egley T. A., Lang K.-H., and Lohe D.* Influence of phase shift and strain path on the thermomechanical fatigue behavior of CMSX-4 specimens // *Ibid.* – P. 249 – 256.
10. *Rau C. A., Jr., Gemma F. E., and Leverant G. R.* Thermal-mechanical fatigue crack propagation in nickel- and cobalt-base superalloys under various strain-temperatures cycles // *Fatigue at Elevated Temperatures.* – ASTM STP 520. – 1973. – P. 166 – 178.
11. *Pernot J. J., Nicolas T., and Mall S.* Modelling thermomechanical fatigue crack growth rates in Ti-24Al-11Ni // *Fatigue.* – 1994. – **16**, No. 2. – P. 111 – 122.
12. *Гонкало А. П., Чернявский А. А.* Методика экспериментальных исследований циклической трещиностойкости материалов в неизотермических условиях // *Пробл. прочности.* – 2005. – № 2. – С. 151 – 158.

Поступила 11. 12. 2009