

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.4

Методика экспериментальных исследований циклической трещиностойкости материалов в неизотермических условиях

А. П. Гопкало, А. А. Чернявский

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

Разработана методика испытаний образцов материалов на циклическую трещиностойкость в неизотермических условиях с регулируемым смещением фаз циклического нагрева и механического малоциклового нагружения. Полученные результаты подтвердили эффективность методики.

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

Введение. При производстве материалов и изготовлении деталей в них накапливаются дефекты (повреждения), которые в условиях эксплуатации, особенно при воздействии циклических нагрузок, зачастую являются очагами зарождения трещин усталости. Практика показывает, что процесс разрушения проходит с определенной скоростью и может достигать 90% общей долговечности изделия. Зарождение и развитие трещин усталости из поврежденных мест материалов, которые работают при многоцикловом нагружении в изотермических условиях, изучены достаточно обстоятельно, разработаны также соответствующие критерии для оценки прочности и долговечности в указанных условиях [1].

Для материалов, работающих в условиях сложного неизотермического малоциклового нагружения, когда может иметь место определенное смещение фаз механического нагружения и циклического нагрева, такие надежные критерии отсутствуют. Использование критериев, разработанных для малоциклового механического нагружения в изотермических условиях, дает некорректные результаты, поскольку между процессами деформирования и разрушения материалов в изотермических и неизотермических условиях имеются существенные различия [2, 3]. Известные немногочисленные экспериментальные данные о влиянии фазности циклического нагрева и “мягкого” (при сохранении постоянства максимальных и минимальных значений усилий от цикла к циклу и в течение всего периода испытаний) механического малоциклового нагружения на характеристики циклической трещиностойкости материалов свидетельствуют о том, что при синфазном нагружении скорость роста трещин усталости в титано-алюминиево-никелевом сплаве значительно больше, чем при противофазном нагружении [4].

При экспериментальных исследованиях трещиностойкости никель-кобальтовых сплавов в условиях “жесткого” (при сохранении постоянства максимальных и минимальных деформаций или перемещений от цикла к циклу и в течение всего периода испытаний) синфазного и противофазного циклического нагрева и малоциклового механического нагружения получены закономерности, противоположные аналогичному случаю мягкого нагружения [5].

Поэтому возникла необходимость в получении экспериментальных данных о поведении трещин усталости в конструкционных материалах в неизотермических условиях при регулируемом смещении фаз циклического нагрева и малоциклового механического нагружения и на их основе разработки соответствующих методов оценки долговечности. В настоящей работе предложена методика проведения экспериментальных исследований циклической трещиностойкости материалов в неизотермических условиях. Методика вполне приемлема также для экспериментального исследования малоциклового усталости в этих же условиях.

Методика и испытательное оборудование. Для проведения экспериментальных исследований по оценке влияния фазности циклического нагрева и малоциклового механического нагружения на характеристики сопротивления развитию трещин усталости была разработана специальная методика [6] и соответственно доработана стандартная испытательная электрогидравлическая машина 3201УЭ-20, которая позволяет осуществлять циклическое осевое нагружение лабораторных образцов с максимальным усилием ± 200 кН и частотой до 0,3 Гц. Погрешность измерения усилий составляет $\pm 1\%$, деформаций – $\pm 3\%$ максимальных значений указанных параметров. Суть доработки состояла в разработке нагревательного устройства в виде малогабаритной печи электросопротивления и специального блока для циклического нагрева образца [7], подсоединенного к системе управления механическим нагружением испытательной машины. Точность измерения температуры на поверхности образца при испытаниях в изотермических условиях достигала $\pm 1\%$, в неизотермических – $\pm 3\%$. В блоке предусмотрен специальный фазовращатель с целью компенсации инерционности (задержки) нагрева относительно механического нагружения и регулирования смещения фаз циклического нагрева и механического нагружения.

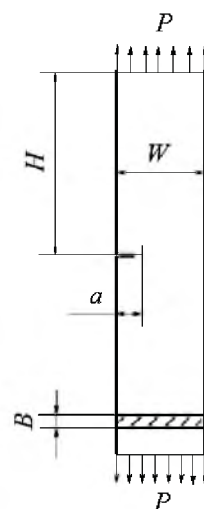
С использованием методики можно проводить испытания образцов, в том числе с трещинами, при малоциклового нагружении в изотермических условиях, а также при циклическом нагреве и механическом нагружении при простых видах деформирования (растяжение–сжатие). Испытания проводятся в малоциклового области упругопластического деформирования до 10^5 цикл. Методика позволяет реализовать треугольный или трапецеидальный (с выдержкой при максимальных и минимальных значениях заданных параметров) мягкий или жесткий режимы механического нагружения в изотермических условиях или в условиях циклического нагрева синфазно, противофазно или с регулируемым смещением фаз механического нагружения и циклического нагрева.

В процессе испытаний регистрируют максимальную и минимальную температуры термического цикла, величину действующих на образец нагрузок и длину трещины усталости по числу циклов нагружения. Длину трещи-

ны усталости на образце измеряют с помощью микроскопа МБС-10 с точностью до 0,015 мм. Перед испытаниями на инструментальном микроскопе на образец наносят линии с шагом 1,0 мм перпендикулярно фронту движения трещины усталости. Для материалов, склонных к окислению при высоких температурах, на поверхность образца вакуум-плазменным методом наносят 0,5...1,0 мкм аморфного хрома [8], который не влияет на циклическую долговечность материала [9]. Измерение температуры осуществляется хромель-алюмелевыми термопарами с диаметром термоэлектродов 0,2 мм, приваренных конденсаторной сваркой к поверхности тыльной стороны рабочей части образца по линии развития трещины усталости. Термометрирование рабочей части образца показало, что колебания температуры на его поверхности вблизи линии развития трещины достигают ~3°C. Численный расчет* распределения температуры по сечению рабочей части образца с помощью программного обеспечения конечноэлементного анализа плоских и осесимметричных задач термоупругопластичности "RELAX" свидетельствует о том, что максимальное различие температуры в наиболее нагретой и наиболее холодной его части достигает ~0,6°C. При этом максимальные термические напряжения таковы: $\sigma_x = 1,68$ МПа; $\sigma_y = 0,88$ МПа; $\sigma_z = 0$ и $\tau_{xy} = 0,41$ МПа. Таким образом, значения максимальных термических напряжений составляют ~0,5% условного предела текучести исследуемого материала (321 МПа при $T = 600^\circ\text{C}$), и поэтому их в дальнейшем не учитывали.

Исходную трещину усталости на образце выращивали из краевого концентратора напряжений на вибростенде ВЭДС-200 при нагружении на консольный изгиб при частоте 150 Гц.

Образцы для проведения испытаний. Для испытаний на циклическую трещиностойкость в изотермических и неизотермических условиях использовали плоские (сечение 25×5 мм) образцы с краевой трещиной (рис. 1). Испытания проводили при циклическом осевом растяжении.



$$K = \frac{P\sqrt{\lambda}}{B\sqrt{W}} y, \quad [10]$$

где $y = 1,99 - 0,41\lambda + 18,7\lambda^2 \dots$;
 $\lambda = a/W, 0 \leq \lambda \leq 0,6$;

$$K = \frac{P}{B\sqrt{W}} \alpha, \quad [11]$$

где $\lambda = f(a/W, H/W)$.

Рис. 1. Схема нагружения образца и основные соотношения.

* Проведен А. Ю. Чирковым.

Коэффициент интенсивности напряжений (КИН) в зависимости от уровня нагружения и длины трещины определяли в соответствии с требованиями [10, 11]. Сравнение двух методов определения КИН (рис. 2) показывает, что при малой длине трещины (до 5 мм) значения K_{\max} совпадают, при трещинах более 5 мм они отличаются, поскольку в работе [11] учитывалось влияние на значения КИН расстояния H от концентратора напряжений до места жесткого закрепления образца в захватах испытательной машины.

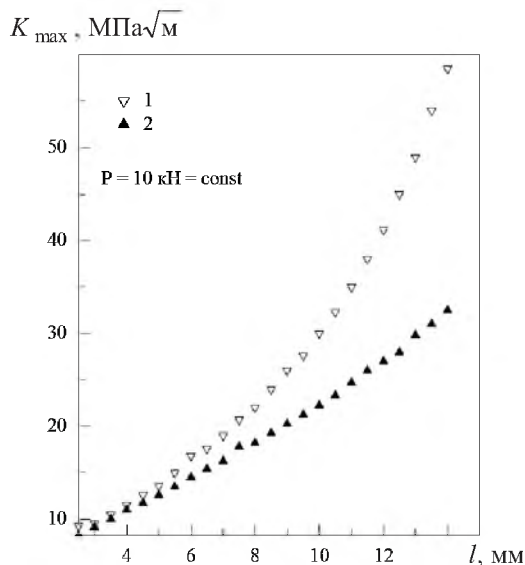


Рис. 2. K -тарировки образцов при различных методах определения КИН: 1, 2 – соответственно данные [10, 11].

Нагрев образцов. Образцы нагревали радиационным методом с помощью малоинерционной малогабаритной печи электросопротивления (рис. 3). Наблюдение за ростом трещины усталости при циклическом нагружении образца осуществляли через окно с кварцевым стеклом в печи электросопротивления. Для управления циклическим нагревом образца сигнал управления перемещением активного захвата испытательной машины поступает также в блок управления циклическим нагревом. Затем он трансформируется в сигнал управления напряжением первичной обмотки силового трансформатора ОСУ-20, с другой обмотки которого напряжение (до 10 В) подается на нагреватели печи электросопротивления. Диапазон задания температуры на рабочей части образца по линии роста трещины усталости колеблется от 20 до 800°C. Охлаждение образца происходит естественным путем передачи тепла в атмосферу и на охлаждаемые захваты машины или принудительно – путем обдува поверхности образца сжатым воздухом в полциклах охлаждения. Для компенсации задержки фазы нагрева образца относительно фазы механического нагружения (вследствие инерционности нагревателей печи электросопротивления и системы нагрева в целом) и регулирования смещения фаз циклического нагрева и механического нагружения в блоке управления циклическим нагревом предусмотрен специальный фазовращатель [7].

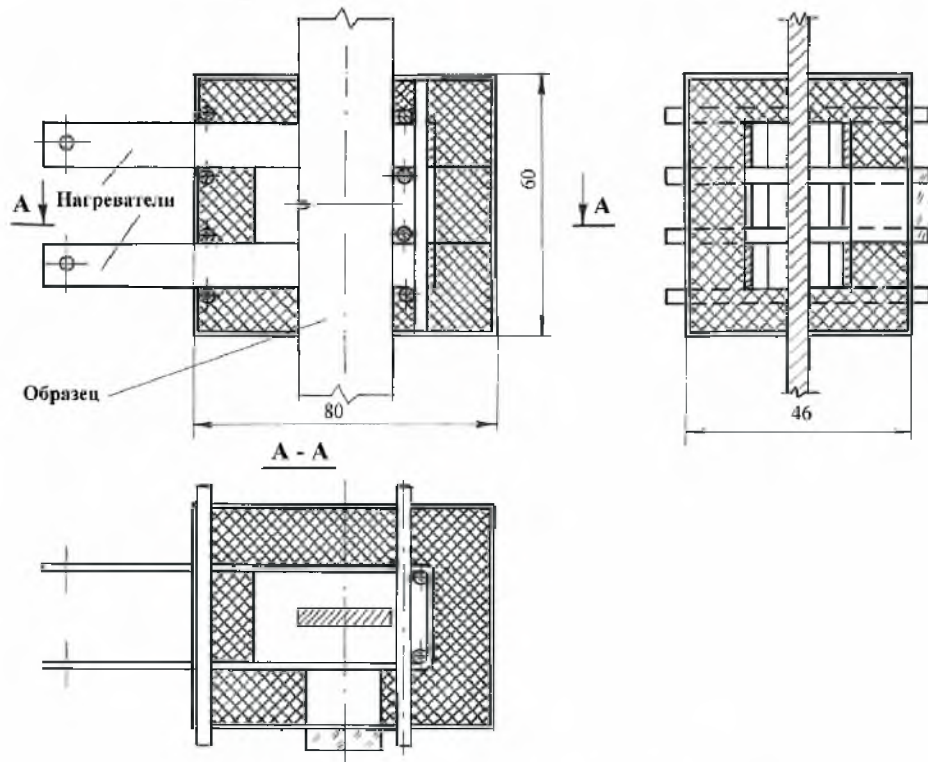


Рис. 3. Конструкция печи электросопротивления.

Методика проведения испытаний. Были проведены испытания образцов на циклическую трещиностойкость в изотермических и неизотермических условиях. Испытания на циклическую трещиностойкость в изотермических условиях осуществляли при двух фиксированных значениях температуры: 375 и 600°C. Циклический нагрев образцов при испытаниях на трещиностойкость в неизотермических условиях проводили в диапазоне температур 375...600°C синфазно или противофазно их механическому нагружению. Ввиду инерционности системы нагрева размах температуры термического цикла зависит от его продолжительности. Поэтому оптимальную продолжительность термического цикла, когда устанавливается максимальный размах температуры, определяли экспериментально.

На рис. 4 представлена зависимость размаха температуры на поверхности образца в течение одного термического цикла от его продолжительности. В данном исследовании продолжительность циклического нагрева образца (механическое нагружение) составляла приблизительно 180 с (90 с – нагрев и 90 с – охлаждение). Механическое нагружение образца проводили по отнулевому ($R_\sigma = 0$) мягкому режиму с частотой 0,01 Гц. На рис. 5 показаны режимы нагружения образца. Результаты экспериментальных исследований трещиностойкости стали 25Х1М1Ф в изотермических условиях, а также в условиях синфазного и противофазного циклического нагрева и малоциклового механического нагружения представлены на рис. 6 в виде диаграмм усталостного разрушения.

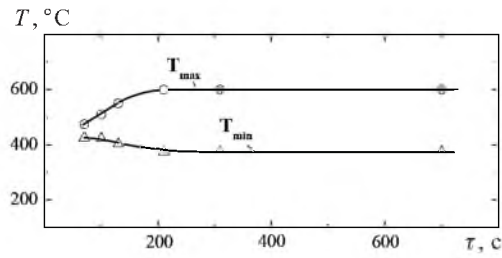


Рис. 4. Изменение температуры на поверхности образца в зависимости от длительности термоцикла.

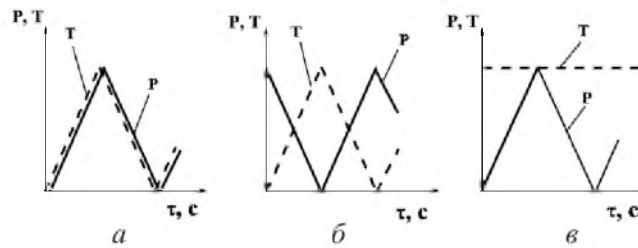


Рис. 5. Режимы нагружения образцов: неизотермический (*a* – синфазный, *б* – противофазный) и изотермический (*в*).

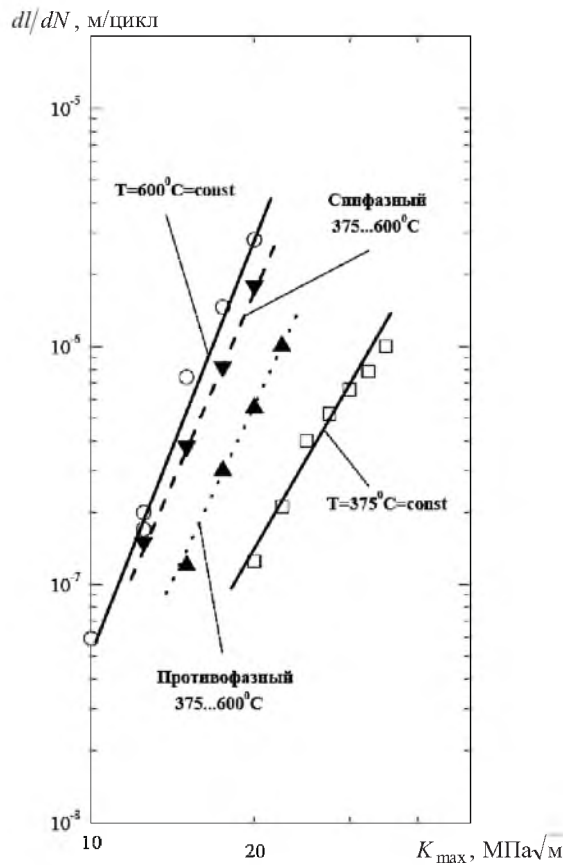


Рис. 6. Диаграммы усталостного разрушения стали 25X1M1Ф в изотермических и неизотермических условиях ($f = 0,01$ Гц; $R_\sigma = 0$).

Заключение. Разработана методика исследования циклической трещиностойкости материалов в изотермических и неизотермических условиях при регулируемом смещении фаз циклического нагрева и малоциклового механического нагружения. Испытания на трещиностойкость в изотермических и неизотермических условиях малоциклового нагружения образцов с краевой трещиной подтвердили эффективность методики. Анализ полученных результатов показал приблизительно двукратное новышение скорости роста трещины в случае синфазного механического нагружения и циклического нагрева по сравнению с противофазным.

С помощью методики можно количественно оценить специфичность влияния цикличности и фазности нагрева, а также механического малоциклового нагружения на служебные свойства материалов, работающих в сложных условиях циклического воздействия температур и механических нагрузок.

Резюме

Розроблено методику виробувань зразків матеріалів на циклічну тріщиностійкість у неизотермічних умовах із регульованим зміщенням фаз циклічного нагрівання та механічного малоциклового навантаження. Отримані результати підтвердили ефективність методики.

1. *Механика* разрушения и прочность материалов. Справочное пособие: В 4 т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. – Киев: Наук. думка, 1988–1990. – 680 с.
2. Гонкало А. П. Исследование особенностей нагруженности материалов при термической усталости // Пробл. прочности. – 1994. – № 10. – С. 17 – 22.
3. Гонкало А. П. Оценка циклической долговечности сталей 15ХМл и 20ХМл в неизотермических условиях // Там же. – 1998. – № 3. – С. 22 – 27.
4. Pernot J. J., Nicolas T., and Moll S. Modeling thermomechanical fatigue crack growth rates in Ti–24Al–11Ni // Fatigue. – 1994. – **16**, No. 2. – P. 111 – 122.
5. Rau C. A., Jr., Gemma A. E., and Leverant G. R. Thermal-mechanical fatigue crack propagation in nickel- and cobalt-base superalloys under various strain–temperature cycles // Fatigue at Elevated Temperatures, ASTM STP 520. – 1973, P. 166 – 178.
6. Патент України 1142955А, (51) 7 G01N3/60. Спосіб дослідження металевих матеріалів на малоциклово втому / В. Т. Троценко, О. П. Гонкало. – Онубл. 15. 05. 2001, Бюл. № 4.
7. Гонкало А. П., Теслюк Н. Н. Устройство для обеспечения испытаний материалов при совместном действии механических нагрузок и циклического нагрева на стандартной малоцикловой испытательной машине // Пробл. прочности. – 2001. – № 2. – С. 123 – 129.

8. Патент України 47958А, (51) 7 G01N1/02. Спосіб підготовки зразка до досліджень металевих матеріалів на циклічну тріщиностійкість / В. Т. Трощенко, О. П. Гопкало. – Опубл. 15. 07. 2002, Бюл. № 7.
9. Трапезон А. Г., Ляшенко Б. А., Рутковский А. В. О влиянии вакуумных покрытий на сопротивление усталости технического титана // Пробл. прочности. – 1995. – № 11. – С. 32 – 40.
10. РД 50-345-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении. (Методические указания). – М.: Изд-во стандартов. – 1983. – 96 с.
11. Gros B. Mode I analysis of a face-cracked plate subjected to rotationally constrained end displacements // Int. J. Fracture. – 1978. – **14**, No. 6. – P. 623 – 629.

Поступила 22. 03. 2004