

Влияние режимов эксплуатации и конструкционных факторов на развитие трещины в стали 12Cr–2Ni–Mo

В. В. Покровский^а, В. Н. Ежов^а, С. Б. Кулишов^б, В. Г. Сидяченко^а,
В. С. Замотаев^а

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

^б ГП НПКГ “Заря-Машпроект”, Николаев, Украина

Исследовано влияние температуры, размеров образца, частоты нагружения и времени при длительном статическом нагружении на скорость роста трещины в стали 12Cr–2Ni–Mo. Показано незначительное влияние этих факторов на скорость роста трещины. Предложена расчетно-экспериментальная модель оценки времени докритического роста трещины с учетом длительности и цикличности нагружения.

Ключевые слова: скорость роста трещины, коэффициент интенсивности напряжений, циклическое и длительное статическое нагружение.

Введение. Энергетические газотурбинные установки (ГТУ) проектируются на длительный ресурс работы, порядка 100 тыс. ч (больше десяти лет). Наиболее нагруженными конструктивными элементами ГТУ, ограничивающими ее ресурс, являются лопатки и диски компрессора и турбины. Последствия при разрушении лопаток, как правило, носят локальный характер и приводят к отказу установки. Однако разрушение дисков не локализуется внутри ГТУ, что может привести к ее полному разрушению.

Проведение натурных или ускоренных испытаний ГТУ для определения ее ресурса затруднено их длительностью и дороговизной, при этом разброс значений по долговечности диска ввиду неоднородности свойств материала, оговоренных техническими условиями, может достигать нескольких раз.

Решить проблему исключения внезапных разрушений дисков можно с использованием концепции эксплуатации ГТУ по техническому состоянию. Ее применение позволит увеличить первичный назначенный проектный ресурс до исчерпания технического ресурса, по достижении которого возможно появление трещин. Для этого необходимо назначить такие объемы и сроки регламентных работ, которые бы, с одной стороны, исключали возможность подрастания трещины в диске до критического размера, с другой – стоимость проведения работ должна обеспечивать приемлемую рентабельность эксплуатации установки.

Характер нагружения энергетических ГТУ зависит от класса их использования: пикового, базового и полупикового. В соответствии с ними эксплуатационный цикл ГТУ можно представить в виде набора режимов, которые в итоге сводятся к двум обобщенным факторам, соответствующим характеру повреждаемости: длительности действия и цикличности нагружения. На рис. 1 приведены типичные предельные циклограммы нагружения ГТУ в зависимости от класса использования.

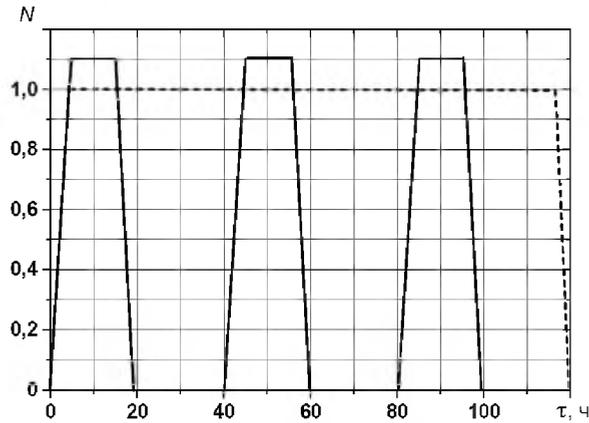


Рис. 1. Типичные предельные циклограммы нагружения энергетических ГТУ в зависимости от класса использования: штриховая линия – базовый класс; сплошные – пиковый класс.

При анализе изменения напряженного состояния дисков ГТУ в зависимости от характера эксплуатационного цикла наибольший интерес представляют диски турбины, отличающиеся максимальной напряженностью и температурой. Принятая в конструкциях энергетических ГТУ вытеснительная система охлаждения исключает доступ горячего воздуха к полотну дисков, поэтому подвод тепла реализуется в результате теплопроводности в замковых соединениях.

На рис. 2 на модельной конструкции замковой части обода диска показано распределение радиальных напряжений и температур. Численные оценки местного повышения упругих напряжений в диске и распределения температур связаны с наличием концентраторов напряжений и получены с помощью вычислительного комплекса ANSYS [1].

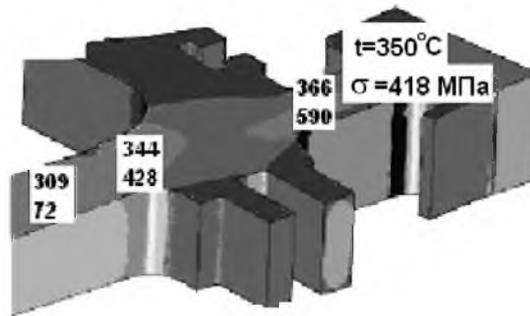


Рис. 2. Распределение радиальных температур и напряжений в периферийной части диска.

Материалы и методы исследований. В качестве материала для исследований была выбрана жаропрочная сталь типа 12Cr–2Ni–Mo.

Исследования по оценке влияния температуры на скорость роста трещин (СРТ) при циклическом нагружении и длительном статическом одноосном нагружении проводили на компактных образцах (СТ) в соответствии с рекомендациями [2, 3]. Выбор типов образцов, их геометрических размеров определялся как рекомендациями [3], так и геометрией диска ГТУ

Результаты и их обсуждение. Поскольку зависимости механических свойств материалов от температуры при статическом нагружении известны, для учета влияния повышения температуры на закономерности СРТ вначале проводили исследования на образцах толщиной 10 (СТ-0,5) и 25 мм (СТ-1) при температуре 20°C, асимметрии цикла нагружения $R = 0,1$, частотах $f = 10; 15$ Гц при синусоидальной форме цикла. На рис. 3 в двойных логарифмических координатах $da/dN - K_{\max}$ представлены результаты таких исследований. Различие в СРТ в образцах толщиной 10 и 25 мм незначительное и укладывается в полосу разброса экспериментальных данных. Края изломов плоскости трещин не имеют заметных пластических деформаций. В дальнейшем все исследования проводили на образцах типа СТ-0,5.

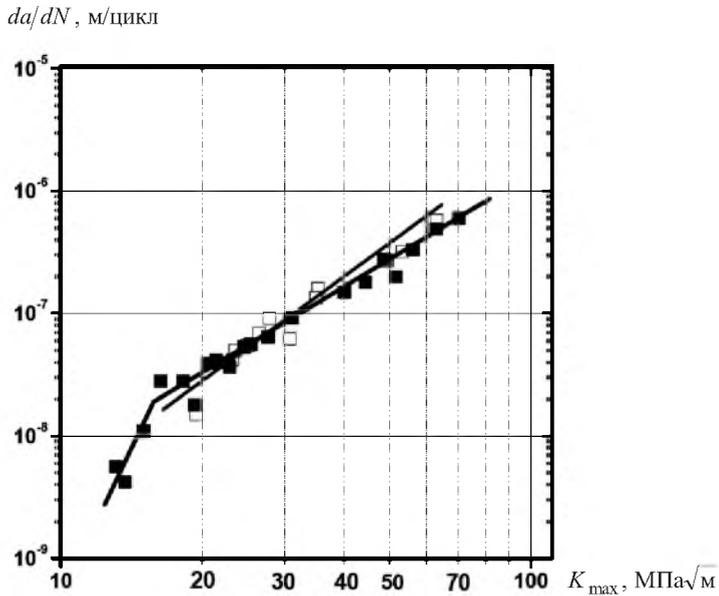


Рис. 3. Кинетическая диаграмма усталостного роста трещин в стали 12Cr-2Ni-Mo при температуре 20°C и частоте 15 Гц: ■ – СТ-0,5; □ – СТ -1. (Здесь и на рис. 4: сплошные линии – результаты усреднения экспериментальных данных.)

Скорость роста трещины при циклическом нагружении. Результаты исследования СРТ при циклическом нагружении и температуре 450 и 20°C иллюстрирует рис. 4. С увеличением значений K_{\max} СРТ возрастает линейно и усредненно представляется прямой. Сравнение результатов исследований СРТ (рис. 3 и 4) показывает, что расхождение между ними незначительное, и разброс значений определяется стохастической природой усталостных разрушений [4]. Однако можно отметить некоторое повышение СРТ при значении $K_{\max} > 30 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Для аналитического описания линейного участка диаграммы усталостного разрушения использовали известную зависимость Париса

$$\frac{dl}{dN} = A(K_{\max})^n. \quad (1)$$

Т а б л и ц а 1

Значения коэффициентов уравнения Париса

Тип образца	Вид нагружения	$T, ^\circ\text{C}$	A	n
СТ-0,5	Циклическое, $f = 15 \text{ Гц}$	20	$5,17 \cdot 10^{-11}$	2,201
СТ-1	Циклическое, $f = 10 \text{ Гц}$	20	$2,43 \cdot 10^{-12}$	3,070
СТ-0,5	Циклическое, $t_h = 20 \text{ с}$	300	$4,20 \cdot 10^{-12}$	2,800
СТ-0,5	Циклическое, $f = 15 \text{ Гц}$	450	$2,28 \cdot 10^{-12}$	3,100
СТ-0,5	Циклическое, $t_h = 20 \text{ с}$	450	$6,00 \cdot 10^{-12}$	2,792

Примечание. t_h – время выдержки в цикле нагружения.

da/dN , м/цикл

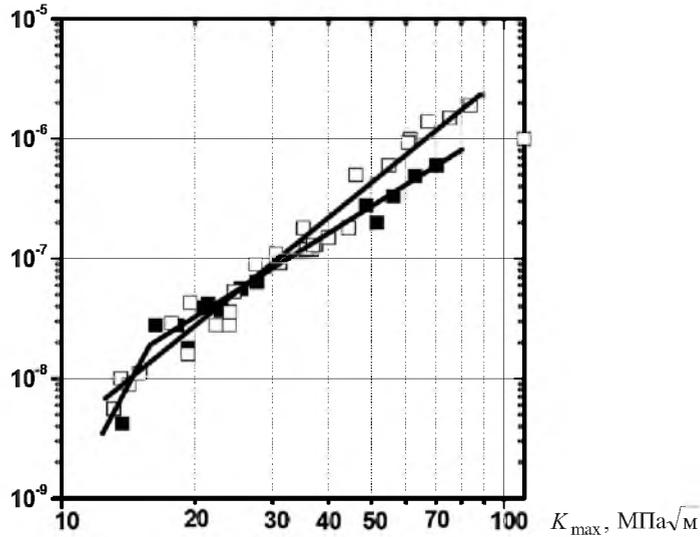


Рис. 4. Влияние температуры испытаний на скорость роста усталостных трещин: ■ – СТ-0,5, $T = 20^\circ\text{C}$, $f = 15 \text{ Гц}$; □ – СТ-0,5, $T = 450^\circ\text{C}$, $f = 15 \text{ Гц}$.

Коэффициенты уравнения Париса рассчитывали по методикам [2, 3]. Результаты этих расчетов представлены в табл. 1 для стали 12Cr–2Ni–Mo.

Скорость роста трещины при циклическом нагружении с выдержкой. Для учета особенностей эксплуатации ГТУ исследования по оценке взаимовлияния усталости и длительного статического нагружения на скорость роста трещин проводили при температурах 300 и 450°C и различном времени выдержки.

На рис. 5 для сравнения представлены результаты экспериментальных исследований СРТ в стали 12Cr–2Ni–Mo при циклическом нагружении с частотой $f = 15 \text{ Гц}$ и выдержкой при максимальном уровне нагружения 20 с

при температуре 450°С. Видно, что влияния ползучести на СРТ в координатах $da/dN - K_{\max}$ практически не наблюдается. Можно отметить некоторые тенденции к уменьшению значений скорости роста усталостных трещин (РУТ) при выдержке 20 с по сравнению со значениями скорости роста при $f = 15$ Гц. Однако это уменьшение является незначительным.

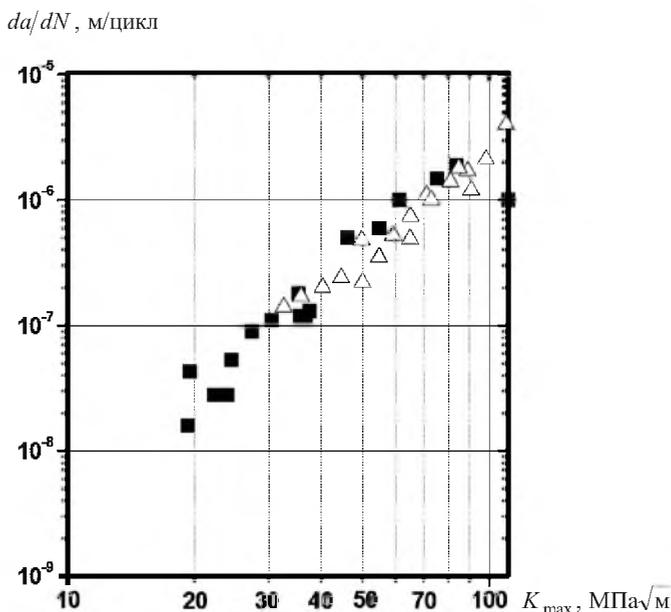


Рис. 5. Влияние выдержки при максимальной нагрузке в трапецидальном цикле на скорость роста усталостных трещин: ■ – СТ-0,5, $T = 450^\circ\text{C}$, $f = 15$ Гц; □ – СТ-0,5, $T = 450^\circ\text{C}$, выдержка 20 с.

Объяснить полученные результаты можно с помощью двух предположений. Согласно первому, при температурах 300 и 450°С время выдержки в цикле нагружения 20 с недостаточно для процессов накопления деформации ползучести. В соответствии со вторым, при выдержке происходит затупление в вершине трещины, что приводит к уменьшению величины местных напряжений и, как следствие, понижению скорости (или невозможности) накопления деформаций ползучести.

Для проверки предположений исследования скорости роста трещин проводили на образцах при трапецидальном цикле нагружения с выдержкой 3600 с и температуре 350°С. Выбор начальных значений КИН (K_{in}) обусловлен его критическими значениями (K_c , K_Q), определенными при статическом нагружении образцов. При данной температуре значение вязкости разрушения усредненно равно 110 МПа $\sqrt{м}$, и за начальное значение КИН принимали $K_{in} = 33$ МПа $\sqrt{м}$. При длительности испытаний в течение 384 ч (16 сут.) рост трещины не наблюдался. Затем значение K_{in} увеличивали до 50 МПа $\sqrt{м}$, и образец испытывали непрерывно еще 864 ч (36 сут.), рост трещины также не наблюдался. Далее K_{in} увеличивали до 58,5 МПа $\sqrt{м}$ и только спустя 720 ч (30 сут.) зафиксировали некоторое подрастание трещины.

Испытания другого образца показывают, что при начальном значении $K_{in} = 33,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ после 1392 ч (58 сут.) рост трещины также не наблюдался. Затем значение K_{in} повысили до $68,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ и уже через 168 ч было отмечено подрастание трещины, а через 3288 ч (137 сут.) образец разрушился. Результаты экспериментов приведены на рис. 6. Видно, что даже при выдержке в цикле в течение 1 ч и повышенной температуре не наблюдается существенного увеличения скорости роста трещин. Результаты лежат в полосе разброса измерений проведенных экспериментов.

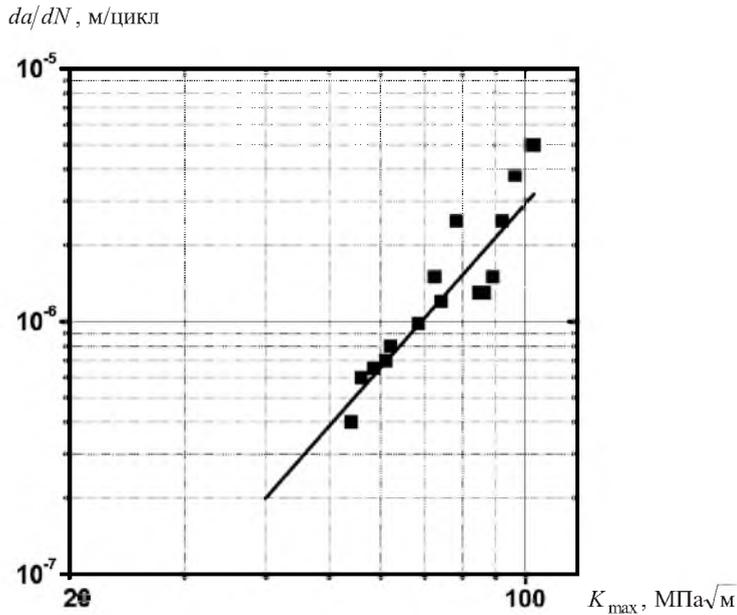


Рис. 6. Влияние выдержки при максимальном уровне нагружения в трапецидальном цикле на скорость роста усталостной трещины при $T = 350^\circ\text{C}$ и выдержке 3600 с. (Сплошная линия — усредненные данные, представленные на рис. 3.)

Как и в предыдущих экспериментах (с выдержкой 20 с), несмотря на длительное непрерывное время проведения исследований до полного разрушения образца, влияние составляющей ползучести на скорость роста трещины является несущественным.

На рис. 7 представлены данные исследований скорости роста трещин при циклическом нагружении, нагружении с выдержкой и различных температурах. Как видно, все результаты усредненно ложатся вдоль прямой линии в двойных логарифмических координатах $da/dN - K_{max}$. Существенного влияния температуры и времени выдержки в цикле при максимальной нагрузке на скорость роста трещин не наблюдается. Разброс данных по СРТ при всех видах испытаний не превышает четырех, что, как следует из статистической теории накопления усталостных повреждений, вполне удовлетворительно.

Скорость роста трещины при длительном статическом нагружении. Исследования СРТ при длительном статическом нагружении проводили на образцах СТ-0,5, в которых предварительно были выращены исходные трещины при высокочастотном нагружении. Результаты испытаний при длитель-

ном статическом нагружении представлены в табл. 2. Видно, что, как и при исследовании СРТ при циклическом нагружении с выдержкой, температура 350°C (и даже 400°C) не является температурой активации процессов накопления деформаций ползучести. Даже при времени продолжительности эксперимента 2574 ч и $K_{in} = 82 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ трещина не росла, хотя статическая вязкость разрушения для температуры 400°C равна $105 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Т а б л и ц а 2

Условия и результаты проведения исследований при длительном статическом нагружении

№ образца	$T, ^\circ\text{C}$	$K_{in}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	$K_{cr}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	Время продолжительности эксперимента, ч	Время до разрушения, ч
1	350	83,0	–	6270	Рост трещины не наблюдается
2	400	82,0	–	2574	» »
3	400	68,7	–	6270	» »
4	450	54,4	93,7	2976	2976
5	450	72,5	99,7	456	456
6	450	78,1	115,1	312	312
7	450	75,9	99,5	576	576

$da/dN, \text{ м/цикл}$

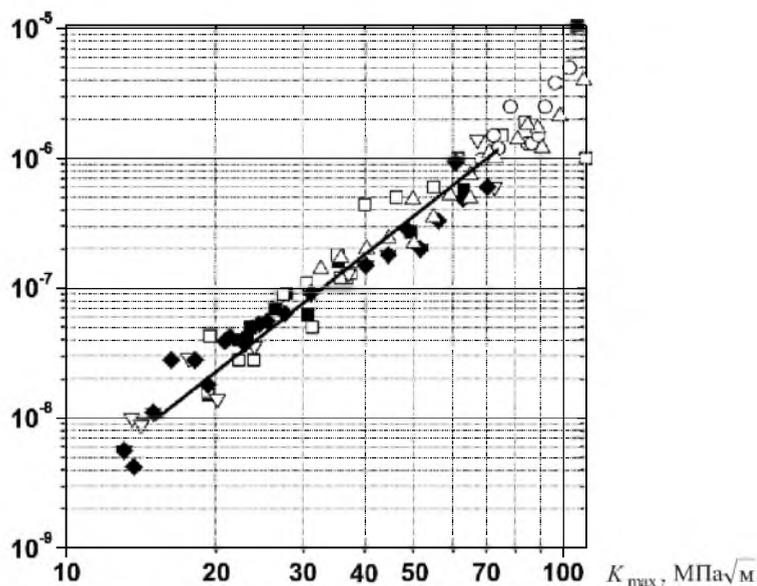


Рис. 7. Результаты исследования скорости роста трещин при циклическом нагружении, нагружении с выдержкой и различных температурах: ■ – СТ-1, $T = 20^\circ\text{C}$, $f = 10 \text{ Гц}$; □ – СТ-0,5, $T = 450^\circ\text{C}$, $f = 15 \text{ Гц}$; ▽ – СТ-0,5, $T = 450^\circ\text{C}$, $f = 15 \text{ Гц}$; ◆ – СТ-0,5, $T = 20^\circ\text{C}$, $f = 15 \text{ Гц}$; ○ – СТ-0,5, $T = 350^\circ\text{C}$, выдержка 3600 с; △ – СТ-0,5, $T = 450^\circ\text{C}$, выдержка 20 с.

Повышение температуры испытаний до 450°C приводит к резкому увеличению скорости накопления деформаций ползучести в вершине трещины и, как следствие, к росту трещины (например, образцы № 4–7 в табл. 2). На основе этих данных были построены диаграммы скорости роста трещин ползучести (РТП) при длительном статическом нагружении (рис. 8).

При увеличении КИН от $K_{in} = 78,1 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ до критических значений, равных $115 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, скорость роста трещины возросла примерно в десять раз.

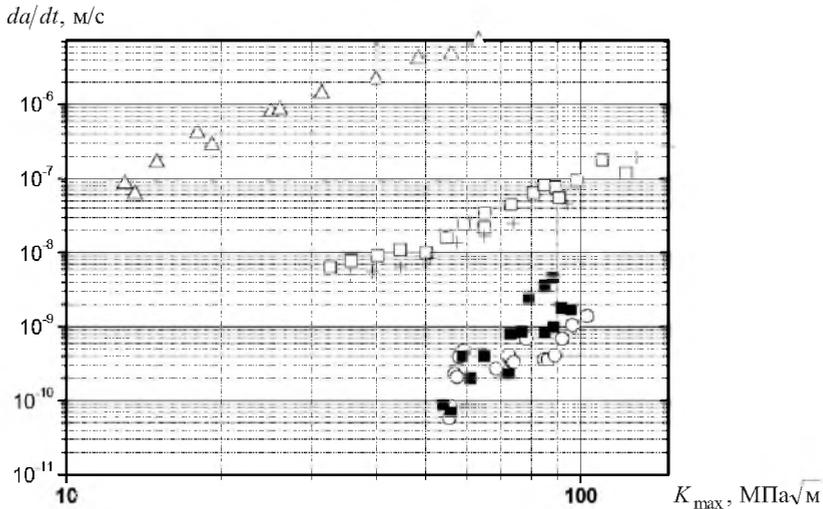


Рис. 8. Зависимость $da/dt - K_{\max}$ при циклическом и длительном статическом нагружении: Δ – СТ-0,5, $T = 20^\circ\text{C}$, $f = 15 \text{ Гц}$; \square – СТ-0,5, $T = 450^\circ\text{C}$, выдержка 20 с; \circ – СТ-0,5, $T = 350^\circ\text{C}$, выдержка 3600 с; $+$ – СТ-0,5, $T = 300^\circ\text{C}$, выдержка 20 с; \blacksquare – СТ-0,5, $T = 450^\circ\text{C}$, длительное статическое нагружение.

Для аналитического описания СРТ при длительном статическом нагружении использовали зависимость, аналогичную для диаграмм РУТ:

$$\frac{da}{dt} = B(K_{\max})^m, \quad (2)$$

где B и m – коэффициенты, используемые при описании скорости РТП при температуре исследований 450°C , $B = 4,32 \cdot 10^{-17}$, $m = 3,92$.

Кроме того, на рис. 8 в двойных логарифмических координатах $da/dt - K_{\max}$ представлены полученные результаты исследований СРТ.

Анализ данных (рис. 7 и табл. 2) показывает, что для исследуемой стали при выбранных температурах, уровнях и длительностях нагружения влияния выдержки в цикле на скорость роста трещин не наблюдается. Это свидетельствует о том, что известные модели накопления повреждений [5–8] и др. при взаимодействии усталости и ползучести не работают.

Для объяснения этого явления воспользуемся подходами, предложенными в работе [7]. Учитывая, что в начальный период времени выдержки t_h распределение напряжений пропорционально $(K^2/(ERt))^{1/n+1}$, то СРТ определяется по изменению напряжений от времени (релаксации) [7]:

$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{da}{dN} \right)_0 + \int_0^{t_h} b \left(\frac{K^2}{t} \right)^p dt, \quad (3)$$

где первое слагаемое учитывает подрастание трещины при циклическом нагружении, второе – при выдержке.

В окончательном виде уравнение (3) имеет вид

$$\frac{da}{dN} = A(K_{\max})^n + B(K_{\max})^{2p} t_T^{(1-p)} + D(C^*)(t_h - t_T), \quad (4)$$

где A , n , B , p , D – коэффициенты, определяемые по результатам экспериментов; C^* – C -интеграл [9]; t_T – время перехода от маломасштабной к установившейся ползучести, по которому определяют, какой из параметров K или C^* контролирует процесс накопления повреждений [10],

$$t_T = \frac{K_I^2(1-\nu^2)}{E(n+1)C^*}. \quad (5)$$

Если время выдержки t_h меньше времени перехода t_T , то третье слагаемое в (4) теряет смысл.

В работах [11, 12 и др.] вводится понятие времени инкубационного периода t_{in} как времени накопления деформаций ползучести у вершины трещины, происходящего с малой скоростью. Так, в работе [10] t_{in} определено как время, за которое трещина подрастает на $\sim 0,2$ мм, что соответствует рекомендациям при построении R - J -кривых [13]. В работе [11] t_{in} определено как время подрастания трещины на величину зоны повреждения, принятой равной размеру зерна:

$$t_{in} = \left[\frac{n+1-m}{n+1} \right] \frac{\varepsilon^* f_0}{\dot{\varepsilon}_0} \left[\frac{I_n \sigma_0 \dot{\varepsilon}_0 r_c}{C^*} \right]^{m/(n+1)}, \quad (6)$$

где коэффициенты являются характеристиками материала, полученными при исследовании свойств ползучести и длительной прочности.

Расчеты, выполненные по формулам (5) и (6), показывают, что время перехода t_T и время инкубационного периода t_{in} на несколько порядков больше как времени выдержки t_h , так и реального времени проводимых экспериментов (табл. 2) при выбранных значениях температур и начальных K_{in} .

Анализ экспериментальных данных, приведенных в табл. 2 и на рис. 7, и численных результатов расчетов по формулам (5) и (6) дает основание для разработки метода ускоренного определения скорости роста трещин при циклическом нагружении с высокой частотой без проведения длительных испытаний при различных температурах и режимах нагружения.

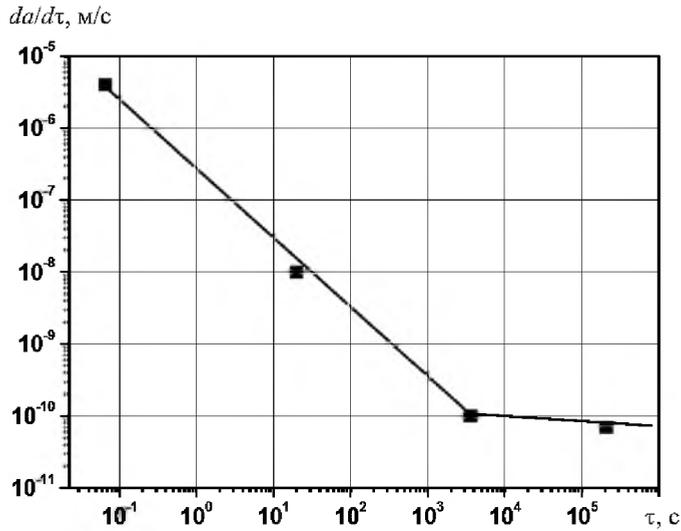


Рис. 9. Зависимость скорости роста трещины в цикле нагружения от времени выдержки при температуре 450°C.

Для исключения катастрофического разрушения дисков ГТУ и проведения своевременного технического обслуживания необходимо оценить длительность периода докритического роста трещин в дисках следующим образом. Из диаграмм на рис. 8 определяются скорости роста трещин в зависимости от времени выдержки и уровня напряжения за цикл (рис. 9). Таким образом, оценка длительности периода времени докритического роста трещины представляется как сумма времен режимов использования ГТУ. Алгоритм вычисления времени докритического роста трещин следующий:

$$t_{cr} = \sum_i \Delta N_i t_h^i; \quad (7)$$

$$\Delta a_i = \int_{\Delta N_i} A(K_i)^n dn; \quad (8)$$

$$a = \sum_i \Delta a_i < a_{cr}, \quad (9)$$

где t_{cr} – суммарное время докритического роста трещин; t_h^i – время выдержки на i -м режиме нагружения; ΔN_i , Δa_i – число циклов и подрастание трещин на i -м уровне нагружения; a_{cr} – критическая длина трещины.

Выполнение неравенства (9) обеспечивает исключение катастрофического разрушения элементов (дисков) ГТУ

Выводы

1. Исследовано влияние температуры, частоты нагружения и времени выдержки при длительном статическом нагружении на скорость роста тре-

щин в стали типа 12Cr–2Ni–Mo. Показано, что в диапазоне изменения значений указанных факторов влияние их на СРТ незначительно.

2. Анализ полученных экспериментальных данных и особенностей режимов эксплуатации дисков ГТУ дает основание для создания метода ускоренного определения скорости роста усталостных трещин без проведения длительных испытаний при различных температурах и режимах нагружения.

Резюме

Досліджено вплив температури, розміру зразка, частоти навантаження і часу при тривалому статичному навантаженні на швидкість росту тріщин у сталі 12Cr–2Ni–Mo. Показано незначний вплив цих чинників на швидкість росту тріщини. Запропоновано розрахунково-експериментальну модель оцінки часу докритичного росту тріщин з урахуванням тривалості та циклічності навантаження.

1. *Кандун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А.* ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
2. *РД 50-345-82.* Расчет и испытание на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. Методические указания. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 96 с.
3. *ASTM E647-00.* Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rate. – Annual Book of ASTM Standards. – 2000.
4. *Иванова В. С., Терентьев В. Ф.* Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.
5. *Batte A. D., Murphy M. C., and Stringer M. B.* High strain high temperature fatigue properties of a 0.5Cr–Mo–V steam turbine casing steel // *Metals Technol.* – 1978. – 5. – P. 4 – 5.
6. *Pedron J. P. and Pinean A.* Effect of hold times on the elevated temperature fatigue crack growth behavior of Inconel 718 alloy // *Advances in Fracture Research (5th Int. Conf. on Fracture, Cannes, France).* – 1981. – P. 23 – 85.
7. *Saxena A., Williams R. S., and Shih T. T.* A model for representing and predicting the influence of time on fatigue crack growth behavior at elevated temperature // *Fracture Mechanics.* – ASTM STP 743. – 1981. – P. 86 – 99.
8. *Усталость материалов при высокой температуре /* Под ред. Р. П. Скелтона. – М.: Металлургия, 1988. – 343 с.
9. *Landes J. D. and Begley J. A.* A fracture mechanics approach to creep crack growth // *Mechanics of Crack Growth.* – ASTM STP 590. – 1976. – P. 128 – 148.
10. *Riedel H. and Rice J. R.* Tensile crack in creeping solids // *Fracture Mechanics.* – ASTM STP 700. – 1980. – P. 112 – 130.

11. *Schwalbe K.-H., Ainsworth R. H., Saxena A., and Yokobori T.* Recommendation for a modification of ASTM E 1457 to include creep-brittle materials // *Eng. Fract. Mech.* – 1999. – **62**. – P. 123 – 142.
12. *Austin T. S. P. and Webster G. A.* Prediction of creep crack growth incubation periods // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 1992. – **15**. – P. 1081 – 1090.
13. *ASTM E 1820-01.* Standard Test for Measurement of Fracture Toughness. – Annual Book of ASTM Standards. – 1999.

Поступила 11. 07. 2008