

9. Ровный, К. Н. Исследование возможности использования существующего узла статор–спиральная камера турбины РО230/821 для условий эксплуатации насос–турбины ОРО230–В–221 / К. Н. Ровный // Вісн. НТУ «ХП». Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2015. – № 15. – С. 146–150.
10. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов и др. – Спб: БХВ-Петербург, 2005. – 780 с.

Поступила в редакцию 24.10.15

**Н. Г. Шульженко**,  
д-р техн. наук,  
**П. П. Гонтаровский**,  
канд. техн. наук,  
**Н. Г. Гармаш**,  
канд. техн. наук  
**И. И. Мележик**,  
канд. техн. наук

Институт проблем машино-  
строения им. А. Н. Подгорного  
НАН Украины,  
г. Харьков, e-mail:  
shulzh@ipmach.kharkov.ua

УДК 539.4

## ОЦЕНКА РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ ПРИ МНОГОРЕЖИМНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАССЕЯННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ МАТЕРИАЛА

*Наведені результати аналізу розвитку тріщини при багаторежимному циклічному навантаженні із застосуванням концепції розсіяних пошкоджень для плоских і осесиметричних елементів конструкцій: пластини й циліндра. Напружено-деформований стан елементів визначається на різних режимах методом скінченних елементів, розмахи пружнопластичних деформацій – за принципом Нейбера, пошкодження – по кривих малоциклової втоми гладких зразків з використанням гіпотези лінійного підсумовування ушкоджень. Результати порівнюються з даними, отриманими методами механіки крихкого руйнування на основі рівнянь Періса. Узгодження отриманих результатів свідчить про можливість використання запропонованого підходу для оцінки тріщиностійкості плоских і осесиметричних елементів конструкцій.*

**Ключові слова:** розвиток тріщини, пластина та циліндр, циклічне навантаження, розсіяні пошкодження, принцип Нейбера.

### Введение

В [1] предложена инженерная методика расчета кинетики трещин в плоских или осесимметричных объектах при многорежимном циклическом нагружении, основанная на концепции накопления рассеянных повреждений в материале. Поврежденность материала от малоциклового усталости определяется на основе методики [2], которая рекомендуется для оценки ресурса роторов и корпусов турбин [3, 4] по данным испытаний гладких образцов. Применяемые обычно кинетические диаграммы усталостного разрушения Перриса [5] при этом не используются.

### Метод расчета кинетики трещины

Суть методики [1] заключается в следующем. Упругое термонапряженное состояние конструкции в области развития трещины для различных режимов нагружения определяется методом конечных элементов. Для получения размахов эквивалентных упругопластических деформаций при расчетной температуре, в качестве которой принимается максимальная температура в области трещины на стационарном режиме эксплуатации, используется метод Нейбера [3]. По ним с помощью экспериментальных кривых усталости при изотермическом симметричном цикле нагружения определяется количество циклов  $N$  до появления трещины. Для оценки поврежденности в точке  $x_i$  при многорежимном циклическом нагружении за один обобщенный цикл от всех режимов нагружения используется гипотеза линейного суммирования повреждений [6]

$$\Delta\Pi(x_i) = \sum_j \frac{1}{N_{pj}(x_i)} d_{Nj},$$

где  $d_{N_j} = N_j/N$  – относительное число циклов  $j$ -го режима в общем количестве циклов;  $N_{pj}$  – количество циклов до разрушения от  $j$ -го режима.

Суммирование проводится по всем режимам нагружения. Точки  $x_i$  на пути продвижения трещины располагаются на одинаковом достаточно малом расстоянии  $dl = 0,1 \div 0,2$  мм. Это расстояние выбирается из соображений, что радиусы скруглений, меньшие 0,1 мм в вершине, по экспериментальным исследованиям [7] не влияют на усталостное разрушение конструкций.

Количество циклов до разрушения в ближайшем к вершине трещины элементе длиной  $l_i$  получено по формуле

$$N_i = \frac{1 - \Pi(x_i)}{\Delta \Pi(x_i)},$$

где  $\Pi(x_i)$  – накопленная повреждаемость в вершине трещины за время ее подрастания до текущей длины  $l_i$ . Количество циклов, за которые трещина достигала длины  $l_i$ , определяется суммированием  $N(l_i) = \sum N_i$ .

Разрушенный элемент, для которого поврежденность достигает 0,99, исключается из рассмотрения. Поврежденность в остальных элементах на пути роста трещины вычисляется по соотношению

$$\Pi(x_{i+1}) = \Pi(x_i) + \Delta \Pi(x_{i+1})N_i.$$

Далее определяются эпюры эквивалентных напряжений для нового размера трещины длиной  $l_i = l_i + d_i$  и расчет повторяется до следующего скачкообразного продвижения трещины. С целью сокращения объемов вычислений расчеты термонапряженного состояния производятся для нескольких фиксированных длин трещины с интервалом 10–20 мм с одинаковыми сгущениями сетки к вершине трещины, а для текущих длин трещины  $l_i$  во всех равноотстоящих точках  $x_i$  на пути роста трещины определяются с помощью квадратичной интерполяции, что сокращает время счета примерно в сто раз.

### Результаты исследований

В работе [1] с помощью предложенного программного обеспечения выполнены расчеты кинетики трещины в пластине, нагруженной отнулевым циклом для двух материалов с различными уровнями нагрузок и температур. Сравнение с результатами, полученными по уравнениям Пэриса, показало удовлетворительное совпадение, а расхождение результатов можно объяснить несогласованием кривых усталости с константами в уравнении Пэриса. В этой работе приводятся результаты сравнения данных, полученных по указанной методике, с определенными по принципам механики хрупкого разрушения для пластины с двумя симметричными трещинами (рис. 1), а также для кольцевой трещины в цилиндре, нагруженном осесимметрично в осевом направлении (рис. 2).

Рассматривается пластина шириной 20 см с двумя начальными трещинами длиной 2 см, расположенными симметрично с двух сторон (рис. 1).

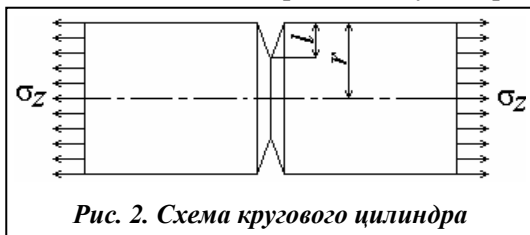


Рис. 2. Схема кругового цилиндра

Пластина нагружена отнулевым циклом с максимальными растягивающими напряжениями на краях  $\sigma_{\max} = 100$  МПа и  $\sigma_{\min} = 10$  МПа. Расчеты проводились для стали 15X1M1ФЛ при температурах 540 и 200 °С, а также для стали P2MA при температуре 535 °С. Свойства материалов и кривые усталости были взяты из работы [3]. Константы  $C_N$  в уравнении Пэриса

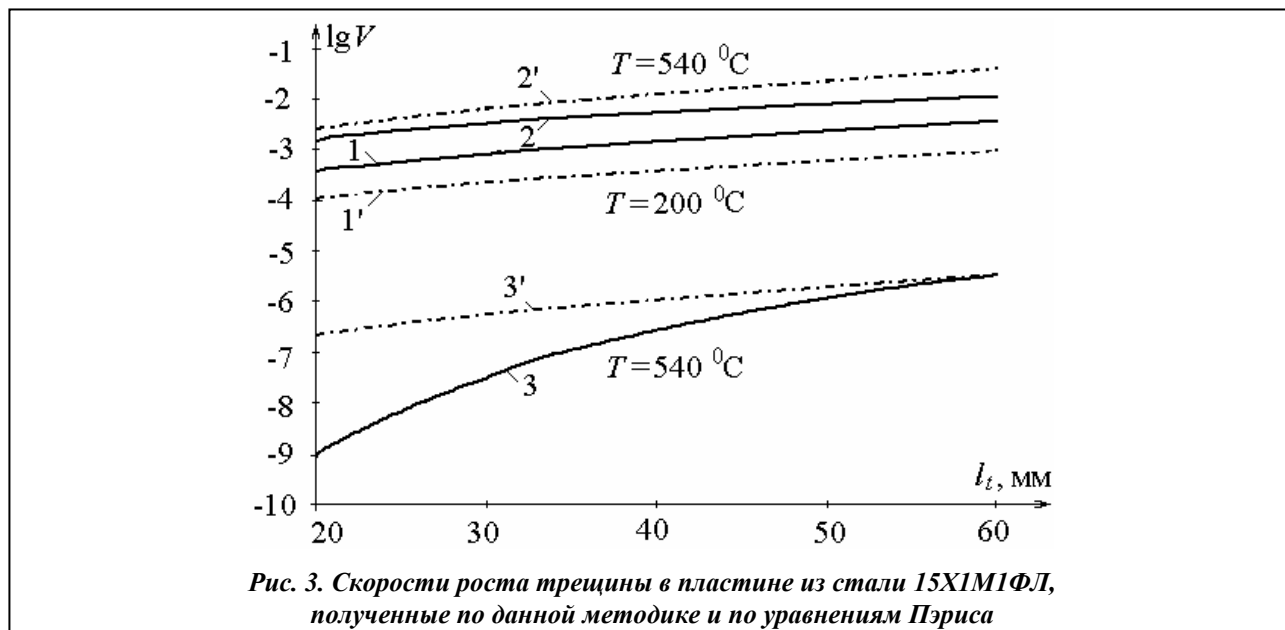


Рис. 3. Скорости роста трещины в пластине из стали 15X1M1ФЛ, полученные по данной методике и по уравнениям Пэриса

$$v = C_N \Delta K^n,$$

где  $\Delta K$  – размах коэффициента интенсивности напряжений;  $v$  – скорость роста трещины за 1 цикл, мм; при температуре  $200^\circ\text{C}$  составляли:  $C_N = 2,42 \cdot 10^{-9}$  мм за цикл  $n = 3,22$ , при температуре  $540^\circ\text{C}$  –  $C_N = 3,42 \cdot 10^{-9}$  мм за цикл  $n = 4,07$ , при температуре  $535^\circ\text{C}$  –  $C_N = 7,62 \cdot 10^{-9}$  мм за цикл  $n = 3,846$ .

Результаты расчетов при  $d_l = 0,1$  мм и  $d_l = 0,2$  мм отличались менее чем на 1%.

На рис. 3 приводятся скорости роста трещин в пластине из стали 15X1M1ФЛ, полученные по разработанной методике и уравнениям Пэриса. Здесь и в дальнейшем сплошные кривые – результаты по данной методике, пунктирные – по уравнениям Пэриса. Кривые 3 соответствуют нагрузке  $\sigma_z = 10$  МПа, при которой коэффициенты интенсивности напряжений близки к пороговым при длине трещины, меньшей 40 мм. При этом замедление скорости роста трещины не учитывается в уравнениях Пэриса, что и приводит к полученным расхождениям результатов. В этом случае более корректно использовать полные кинетические диаграммы разрушения.

На рис. 4 сравниваются данные по росту трещины со временем, полученные по данной методике и по уравнениям Пэриса.

Рассмотрена кинетика внешней кольцевой трещины в сплошном цилиндре радиусом 10 см, нагруженном в осевом направлении по торцам растягивающими напряжениями  $\sigma_{z\max} = 100$  МПа. На-

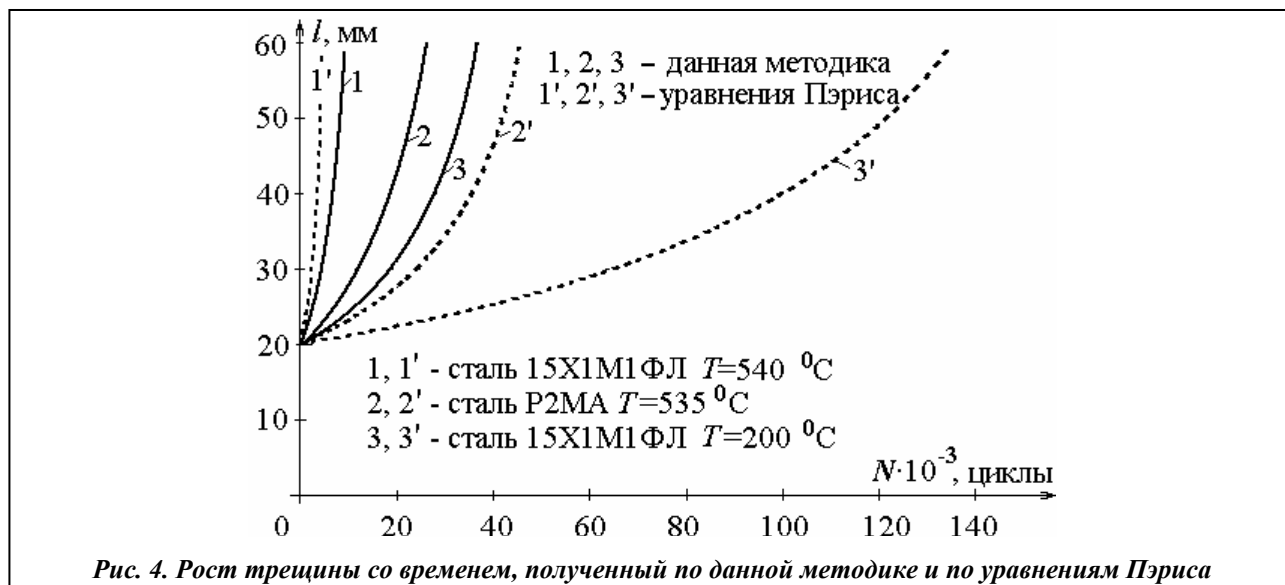


Рис. 4. Рост трещины со временем, полученный по данной методике и по уравнениям Пэриса

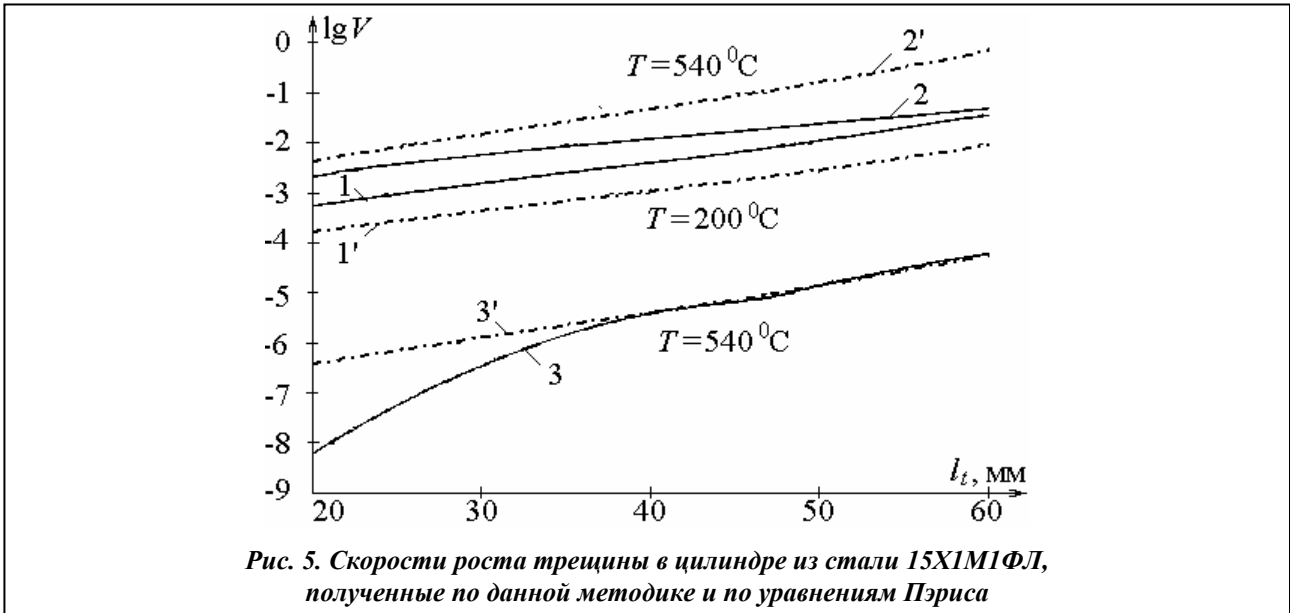


Рис. 5. Скорости роста трещины в цилиндре из стали 15Х1М1ФЛ, полученные по данной методике и по уравнениям Пэриса

чальная глубина трещины принималась равной 20 мм. Коэффициенты интенсивности напряжений для уравнений Пэриса вычислялись по формуле [8] (погрешность не более 1%)

$$K_1 = \frac{\sigma_z \sqrt{\pi l}}{\eta^{3/2}} \left( 0,5 + 0,25\eta + 0,1875\eta^2 - 0,1815\eta^3 + 0,3655\eta^4 \right) \left( 1 + 0,1\sqrt{\frac{l}{r}} \cdot \eta^2 \right),$$

где  $\eta = 1 - l/r$ .

На рис. 5 и 6 сравниваются характеристики роста кольцевой трещины в цилиндре по данной методике и по уравнениям Пэриса.

Погрешность при применении данной методики может быть вызвана использованием обобщенной диаграммы деформирования, приведением амплитуд деформаций к расчетной температуре и симметричному циклу нагружения, интерполяцией эпюр напряжений на пути роста трещины, погрешностью метода Нейбера при оценке упругопластических деформаций и др.

Для лучшего согласования результатов расчетов с экспериментальными данными можно рекомендовать выбор эквивалентных напряжений в виде критерия Писаренко–Лебедева [9]  $\sigma_l = \chi\sigma_i + (1 - \chi)\sigma_1$  (вместо интенсивности напряжений  $\sigma_i$ ), который рекомендуется как для материа-

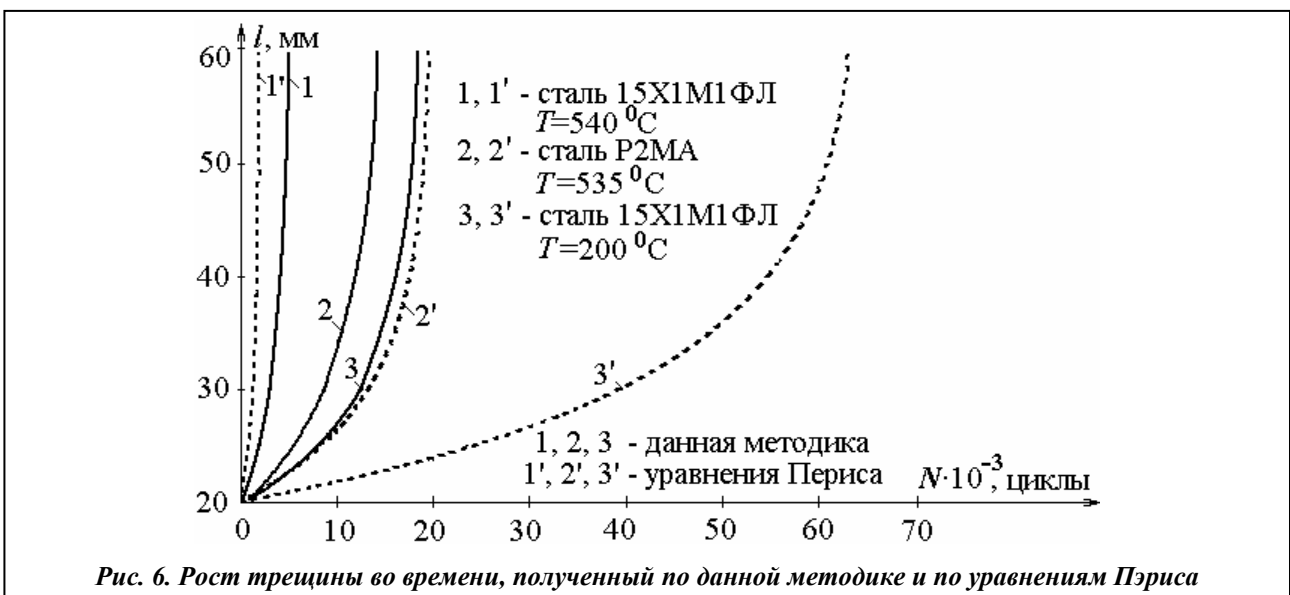


Рис. 6. Рост трещины во времени, полученный по данной методике и по уравнениям Пэриса

лов, имеющих неодинаковую прочность при растяжении и сжатии, так и для показателя  $m$  в обобщенном методе Нейбера [10].

### Выводы

Таким образом, полученные результаты роста начальных трещин в пластине и осесимметричном цилиндре с использованием принципа рассеянных повреждений и уравнений Пэриса свидетельствуют о возможности применения предложенного подхода для решения задачи с использованием экспериментальных данных для гладких образцов. Представляет дальнейший интерес расширение класса решаемых задач этим методом и сопоставление результатов с данными известных исследований.

### Литература

1. *Розрахункове оцінювання розвитку тріщини при циклічному навантаженні з використанням параметрів розсіяних пошкоджень* / М. Шульженко, П. Гонтаровський, Н. Гармаш, І. Мележик // Вісн. Тернопіль. нац. техн. унт-ту. – 2013. – № 3 (71). – С. 197–204.
2. *Детали паровых стационарных турбин. Расчет на малоцикловую усталость*: РТМ 108.021.103-85. – Взамен РТМ 108.021.103-76; введ. 01.07.86. – Л.: НПО ЦКТИ, 1986. – 48 с.
3. *Шульженко, Н. Г. Задачи термочности, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований)* / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Б. Ф. Зайцев. – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2011. – 370 с.
4. *Визначення розрахункового ресурсу та оцінка живучості роторів і корпусних деталей турбін*: СОУ-Н МЕН 40.1-21677681-52:2011. – К.: М-во енергетики та вугільної промисловості України, 2011. – 42 с. – (Нормативний документ Міненерговугілля України. Методичні вказівки).
5. *Механика разрушения и прочность материалов. Справ. пособие*: В 4 т. Т. 4. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив [и др.]. – Киев: Наук. думка, 1990. – 680 с.
6. *Коллинз, Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение* / Дж. Коллинз. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
7. *Хейвуд, Р. Б. Проектирование с учетом усталости* / Р. Б. Хейвуд. – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.
8. *Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений*: В 2 т. / под ред. Ю. Мураками. – М. Мир, 1990. – Т. 2. – 1016 с.
9. *Писаренко, Г. С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии* / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. – Киев: Наук. думка, 1976. – 416 с.
10. *Прочность и долговечность элементов энергетического оборудования* / Б. Поспишил [и др.]. – Киев: Наук. думка, 1987. – 216 с.

*Поступила в редакцию 30.10.15*