

Образование и развитие сеток трещин в теплонапряженных элементах конструкций

А.О. Чернявский

Челябинский государственный технический университет

В ряде элементов современных теплонапряженных конструкций интенсивность воздействий и связанная с ней неравномерность распределения температурных деформаций по объему детали настолько велики, что не удается обеспечить работу конструкции без трещин. В таких условиях работают, например, многие детали металлургического оборудования. В подобных условиях находятся и элементы конструкций, где дилатационное, т.е. связанное с изменением объема, нагружение вызвано воздействием облучения, структурными превращениями, взаимодействием со средой (водородная дилатация, например).

Особенности развития трещин в этих условиях связаны с самоуравновешенным характером поля напряжений, что приводит к замедлению трещин по мере их роста. Кроме того, во многих случаях условия на поверхности таких деталей близки к однородным. При этом место зарождения трещины не может быть однозначно определено, а разгрузка в прилегающей к трещине области – при не слишком длинных трещинах – не запрещает появления других трещин. Следствием может явиться появление сеток трещин (аналогично тому, как это происходит в металлургическом оборудовании [1] или в горных породах при остывании больших лавовых масс [2,3]). По мере подрастания трещин они могут начинать взаимодействовать, что может влиять на скорость их роста.

Методы расчета конструкций с одиночными трещинами достаточно хорошо разработаны. Рассмотрение одновременного роста большого числа взаимодействующих трещин представляет собой более сложную задачу, в которой аналитические решения могут быть получены только для некоторых простых случаев [4,5,6], а численные решения – при использовании методов, ориентированных на одиночные трещины – слишком трудоемки. В данной работе рассматривается приближенный подход к решению таких задач, использующий предположение о периодичности сетки трещин у поверхности детали.

Рассмотрим вначале развитие сетки трещин в конструкции из хрупкого материала. Будем считать, что у поверхности детали уже имеются достаточно часто расположенные трещиноподобные дефекты, возникшие в процессе производства (что характерно для таких материалов, как искусственный графит) или предшествующего нагружения; задачей является описание развития этих дефектов при однократном или циклическом тепловом нагружении с учетом их взаимодействия (предполагается, что закономерности роста одиночной трещины – например, параметры формулы Пэриса – известны).

Для детали с периодической сеткой трещин, разделяя поле напряжений на (энергетически) ортогональные составляющие (с использованием результатов работы [7]), и определяя энергию отдельных составляющих из приближенного решения вариационной задачи (принципа Лагранжа), можно получить оценку потенциальной энергии напряжений, обладающую – при приемлемой трудоемкости вычислений – достаточной точностью [8].

Этой оценкой можно воспользоваться для рассмотрения роста сетки трещин. Пусть в детали уже существует система трещин длиной l , расположенных на расстоянии c друг от друга, и нагружение таково, что вызывает подрастание трещин. Будем считать, что периодичность системы трещин в процессе роста сохраняется. При этом подрастать может либо каждая трещина, либо каждая вторая, либо каждая третья и так далее. Рост трещин, расположенных далеко друг от друга, требует сравнительно малых затрат энергии, но не приводит к заметному снижению термических напряжений в зоне между

трещинами и уменьшению упругой энергии; близкие трещины вызывают значительное уменьшение упругой энергии, но большое число этих трещин требует больших затрат энергии на их движение. Какой-то из вариантов подрастания сетки трещин окажется в энергетическом отношении выгоднее других: выделение энергии в расчете на единицу приращения площади одной трещины будет максимально. С помощью энергетического критерия механики разрушения может быть определена возможность страгивания таких трещин; для определения их подрастания в этом случае необходимо применить пошаговую процедуру, учитывающую уменьшение номинальных напряжений с ростом трещин в поле самоуравновешенных напряжений. На каждом шаге длины трещин дается малое приращение и вновь анализируется возможность подрастания трещин. При циклическом нагружении и значениях коэффициента интенсивности напряжений, недостаточных для страгивания (и заметного подрастания) трещины в одном цикле, применяются формулы типа формулы Пэриса.

Появление на начальных этапах сетки частых трещин и их развитие приводит к снижению коэффициентов интенсивности напряжений у вершин трещин, остановке части из них и образованию системы более редких трещин. Эта ситуация иллюстрируется рисунком 1, где приведены результаты расчетного анализа сетки трещин на поверхности чугуновой изложницы для разливы хром-никелевых сплавов: изменение длин трещин l_i с числом циклов N (числа у кривых - расстояния между соседними трещинами одинаковой длины c_i в миллиметрах). На рис. 2 расчетные длины трещин l_i и расстояния между ними c_i (треугольники) сопоставлены с измеренными на снятой с эксплуатации - после примерно 150 циклов нагружения - изложнице (кружки).

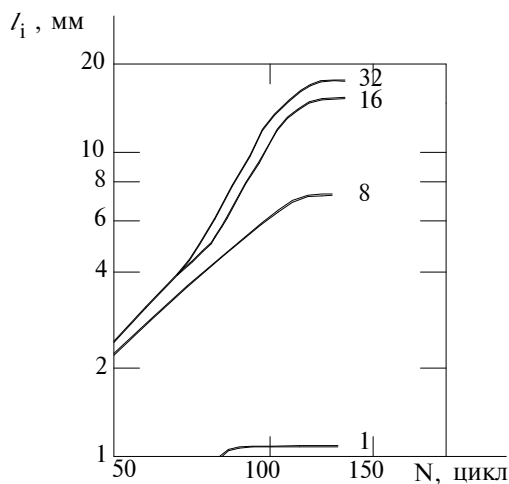


Рис. 1. Развитие сетки трещин с числом циклов

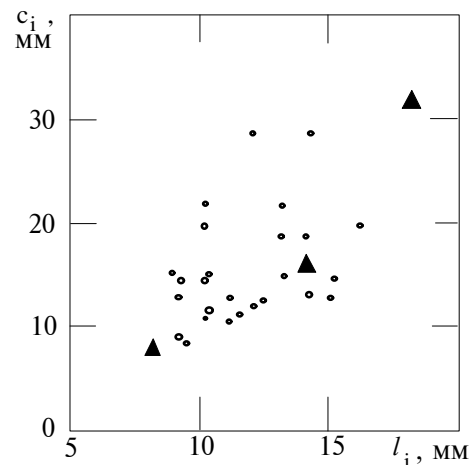


Рис. 2. Сетка трещин в изложнице (пояснения в тексте)

Наряду с конструкциями из малопластичных материалов типа графита и чугуна, развитие сеток поверхностных термических трещин наблюдается и в конструкциях, изготовленных из высокопластичных металлических материалов. На рис. 3 показано разрушение вала установки для производства шлаковаты, изготовленного из стали X18H9T.

Подобное разрушение наблюдается на передней и задней кромках лопаток газовых турбин (см., например, [9]); оно получено при циклическом нагреве и охлаждении цилиндрических образцов из 1X18H9 потоком горячих газов [10].

Для анализа роста сеток трещин в пластичном материале вновь воспользуемся энергетическим подходом, дополнив его учетом затрат энергии на пластическое деформирование.

Удобно выделить и рассматривать по отдельности два различных случая: случай, когда номинальные напряжения не превосходят предела текучести материала и

пластические зоны возникают только вблизи вершин трещин, и случай развитого пластического течения.

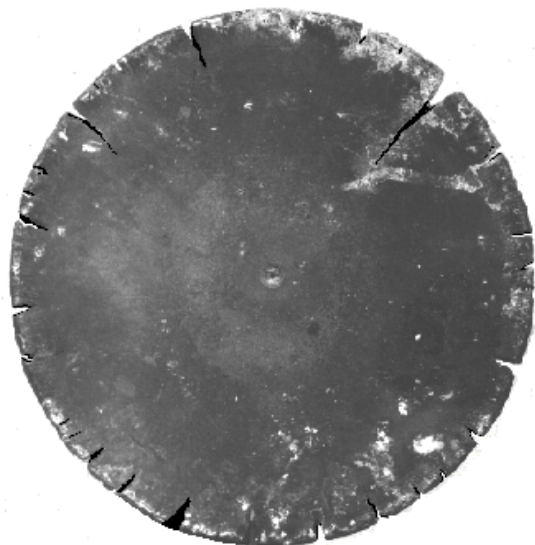


Рис. 3. Сетка трещин в элементе металлургического оборудования

В первом случае для анализа роста сетки трещин используем подход Леонова-Панасюка-Дагдейла. Затраты энергии на продвижение трещины запишем в виде

$$G' = \kappa s + \frac{d}{dl} \int_l^{l+a} \sigma_T v(x) dx$$

где κ - удельная энергия образования новых поверхностей; s - площадь новых поверхностей, образующихся при росте трещины; $v(x)$ - перемещение краев дополнительного ($l < x < l+a$) разреза, имитирующего пластическую зону (подобный подход применен в работе [5], однако полученные там решения некоторых модельных задач не могут быть распространены на сетку взаимодействующих трещин при дилатационном нагружении).

Для оценки возможности применения схематизации Дагдейла

были проведены численные эксперименты (расчеты методом конечных элементов), которые показали, что для сетки периодических трещин замена реального поля пластических деформаций "зоной ослабленных связей" в форме тонкого слоя вносит погрешность в вычисление энергетических характеристик (в частности, T^* -интеграла Черепанова [11]) не более 10% до (номинального) напряжения $0.8\sigma_T$.

Определение длины a пластической зоны для принятой схемы Дагдейла может быть выполнено (следуя, например, работе [12]) без проведения упруго-пластических расчетов - с использованием условия конечности напряжений в упруго-пластической конструкции с трещиной или, что то же самое, условия равенства коэффициентов интенсивности напряжений в двух задачах: задаче о трещине, нагруженной заданной нагрузкой, и задаче о трещине, нагруженной на длине a равномерно распределенной нагрузкой с интенсивностью σ_T . Для сетки взаимодействующих трещин решение первой из этих задач приведено в [8]; коэффициент интенсивности напряжений во второй задаче определим энергетическим способом - через производную от упругой энергии U по длине трещины l . С учетом линейности задачи упругая энергия может быть записана в виде

$$U = \frac{\sigma_T^2}{E} c^2 \cdot u\left(\frac{l}{c}, \frac{a}{c}\right)$$

где $u(l/c, a/c)$ - упругая энергия тела с $E = 1$, $\sigma_T = 1$, $c = 1$ (эта функция легко может быть определена по результатам численных решений).

Наконец, для определения функции $v(x)$, в первом приближении можно принять, что форма зоны ослабленных связей $v(x)$ может быть описана квадратичной параболой, для нахождения которой достаточно условий плавности смыкания "берегов" зоны в ее вершине и равенства раскрытия трещины критическому.

Окончательно для описания распространения сетки трещин в упруго-пластическом теле при номинальных напряжениях до $0.8\sigma_T$ получим соотношения, отличающиеся от соотношений в упругой задаче только поправкой к коэффициенту интенсивности напряжений:

$$K_1 \rightarrow K_1 \cdot \left[1 + \frac{\pi}{3} (1 - \mu^2) \frac{da}{dl} \right]$$

где a определяется из решения уравнения

$$K^2(l+a) = \frac{\sigma_T^2}{E} c \frac{du}{dl}$$

в котором K - коэффициент интенсивности напряжений для упругой задачи.

В некоторых случаях размахи деформаций в цикле могут быть таковы, что имеет место знакопеременное пластическое течение материала (даже без учета концентрации деформаций у вершины трещины); сетки трещин при этом развиваются как сетки трещин малоциклового усталости (см. рис. 3). В случае пластических деформаций, значительно превышающих упругие, в качестве энергетического (необходимого, хотя, возможно, недостаточного) условия возможности подрастания трещин примем равенство пластической диссипации за цикл в системе без трещин и суммы пластической диссипации и энергии на образование новых поверхностей в системе с трещинами. Рассмотрим в качестве методического примера сетку трещин у границы полуплоскости, нагруженной циклически изменяющимся однопараметрическим температурным полем

(рассматривалось поле вида $T(x) = A \frac{\sigma_T}{\alpha E} \exp\left(-\frac{x}{B}\right)$, $A > 2$). Для вычисления

пластической диссипации воспользуемся приближенным кинематическим методом, задав поле скоростей пластических деформаций в виде поля линий скольжения. Решая теперь уравнение баланса работ, получим, что выделение энергии, достаточное для некоторого подрастания Δl длин трещин за цикл, может быть получено при различных соотношениях глубины трещин l и расстояния между соседними трещинами c . На рис. 4а показаны решения, полученные для приведенного выше температурного поля при значении параметра $A=16$; H - глубина зоны знакопеременного течения. Используя их, можно проследить за возможным ростом сетки трещин (рис. 4б).

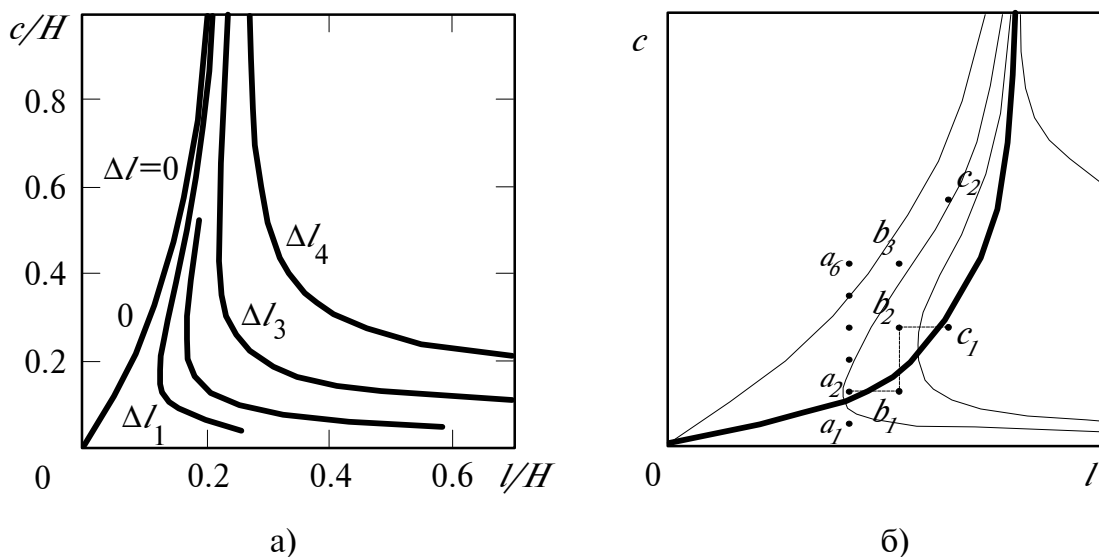


Рис. 4. Решения уравнения баланса работ при различных значениях Δl (а) и распространение сетки трещин (б)

Пусть после некоторого числа циклов у поверхности детали зародится система мелких, но достаточно часто расположенных трещин (точка a_1). В качестве возможных теперь следует рассматривать все системы трещин, у которых расстояние между трещинами кратно расстоянию в системе a_1 (т.е. системы, изображаемые точками $a_2 \dots a_6$). Энергия, которая может быть затрачена на подрастание трещин, различна для различных систем. В частности, для системы, изображаемой точкой a_6 , требуется много энергии на пластическое деформирование, а на подрастание трещин энергии недостаточно. Наибольшей скоростью подрастания обладает система трещин,

изображаемая точкой a_2 . После некоторого числа циклов трещины подрастут до точки b_1 , далее все рассуждения могут быть повторены. Развитие системы трещин при этом будет изображаться штриховой линией; по мере роста глубины трещин расстояние между подрастающими трещинами будет возрастать. При различном выборе начальной точки a_1 можно получить различные варианты решения; все они, однако, будут лежать не слишком далеко от толстой сплошной линии (рис. 4б); приближению этой линии к вертикали соответствует вырождение сетки трещин в одну магистральную трещину. Общие закономерности развития сетки трещин при этом (образование вначале сетки частых и мелких трещин и затем ее изреживание) такие же, как в хрупком материале, хотя механизм роста трещин совершенно другой.

Сопоставление расчетов с результатами эксперимента, описанного в [13] (цилиндр диаметром 60 мм из стали X18H9T подвергался циклическому тепловому нагружению обдувом потоком газов 120 циклов $1300 \leftrightarrow 300^\circ\text{C}$; число циклов - 120), приведено на рис. 5.

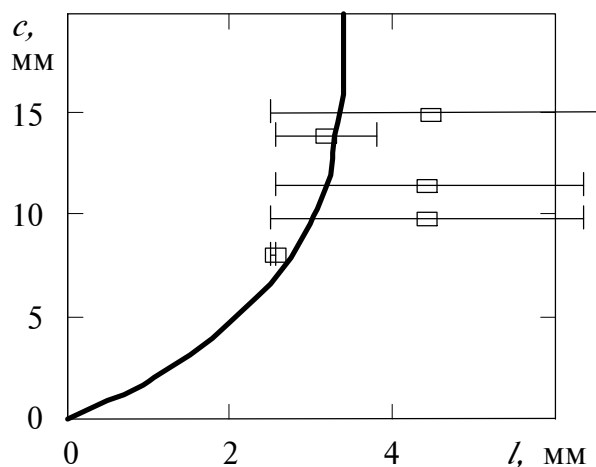


Рис. 5. Сетка трещин в цилиндре (расчет, эксперимент)

Литература:

1. Повышение стойкости изложниц и прокатных валков/ Могилев В.К., Лев О.И.//М.: Металлургия, 1986.- 116 с.
2. Cyclic fracture mechanisms in cooling basalt/ Ryan M.P., Sammis C.G.//Geological society of America bulletin.-1978.- vol.89.- N9.- P.1295-1308.
3. Kantha L.H. "Basalt fingers" - origin of columnar joints?// Geological magazine.-1981.- vol.118, N3, p.251-264.
4. Артыкова С.И. Влияние системы трещин на прочность балки//В сб.: К проблеме механики реального твердого тела. Фрунзе Илим, 1984.- С.96-103.
5. Механика упругопластического разрушения/ Партон В.З., Морозов Е.М. - М: Наука, 1985.- 502 с.
6. Взаимодействие жестких линейных включений и трещин в деформируемом теле/ Бержницкий Л.Т. Панасюк В.В. Сташук Н.Г. Киев: Наукова думка, 1983.- 288 с.
7. Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях/Гохфельд Д.А., Садаков О.С. - М.: Машиностроение, 1984.- 256 с.
8. Чернявский А.О. Проблемы прочности 1990 N3
9. Мэнсон С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость. Перевод с англ. М.: Машиностроение, 1974, 344 с.
10. Писаренко Г.С., Козлов И.А., Третьяченко Г.Н. Некоторые вопросы прочности лопаток и дисков газовых турбин. Киев, изд-во АН УССР, 1962 - 76 с.
11. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения
12. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела - М.: Наука, 1979 - 744 с.
13. Писаренко Г.С., Козлов И.А., Третьяченко Г.Н. Некоторые вопросы прочности лопаток и дисков газовых турбин. Киев, изд-во АН УССР, 1962 - 76 с.