

Изменение коэффициента интенсивности напряжений в вершине краевой трещины при скачкообразном увеличении ее длины

Г. В. Степанов, А. И. Бабуцкий

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

Представлены результаты расчетов для оценки изменения во времени коэффициента интенсивности напряжений в вершине краевой трещины при скачкообразном увеличении ее длины. Показано, что проскок трещины в толстой пластине, находящейся под действием растягивающей нагрузки, вызывает циклическое изменение K_1 с периодом и амплитудой, которые зависят от длины исходной трещины, длины проскока и размеров пластины. Усредненное по времени значение K_1 соответствует рассчитанному для стационарной трещины.

Ключевые слова: трещина, проскок трещины, остановка трещины, коэффициент интенсивности напряжений, нестационарное напряженно-деформированное состояние.

Обозначения

- K_1 – коэффициент интенсивности напряжений
- K_{1c} – трещиностойкость (вязкость разрушения) при статическом нагружении
- K_{1a} – трещиностойкость (вязкость разрушения) при остановке трещины
- $K_1^{ст}$ – коэффициент интенсивности напряжений при статическом нагружении
- $K_1^{дин}$ – коэффициент интенсивности напряжений при динамическом нагружении (мгновенное приложение нагрузки)

Введение. При высоких уровнях нагрузки, прикладываемой к телу с трещиной, коэффициент интенсивности напряжений K_1 в ее вершине может достигать критического значения. Такие нагрузки приводят к быстрому увеличению длины трещины с последующей остановкой (проскок) или к полному разрушению тела в результате ее распространения через все его сечение [1–3]. Остановку трещины после проскока обычно связывают со снижением K_1 в вершине трещины до уровня, соответствующего специфической характеристике сопротивления хрупкому разрушению – трещиностойкости при остановке трещины K_{1a} [4].

При режимах нагружения, вызывающих быстрое подрастание трещины, в образце или элементе конструкции возникает нестационарное напряженно-деформированное состояние (НДС). Для анализа условий распространения трещины изменение во времени коэффициента интенсивности напряжений $K_1(t)$ должно быть сопоставлено с характеристиками вязкости разрушения материала. Если принять, что остановка движущейся трещины определяется характеристикой трещиностойкости K_{1a} , в момент ее остановки должно выполняться равенство между расчетным коэффициентом K_1 , учитывающим нестационарное НДС в элементе конструкции, и величиной трещиностойкости материала K_{1a} .

Экспериментальное определение K_{1a} сопряжено со значительными трудностями. Разработанные для этого специальные методики постоянно совершенствуются [5, 6]. Однако объем выполненных к настоящему времени исследований и полученных данных все еще недостаточен для оценки сопротивления хрупкому разрушению конструкций с трещинами с учетом их возможных проскоков. Целесообразность использования K_{1a} в качестве особой характеристики материала вызывает сомнения, поскольку динамические эффекты, обусловленные инерционными силами в образце и элементах цепи нагружения, а также взаимодействием в них волн напряжений, не учитываются при ее оценке в полной мере. Если принять, что величина K_{1a} равна вязкости разрушения при статическом нагружении K_{1c} , что следует, например, из анализа данных работ [2, 7], то K_{1a} можно не использовать в качестве специфической характеристики материала.

В настоящем сообщении представлены результаты расчетов для оценки изменения во времени коэффициента интенсивности напряжений K_1 в вершине краевой трещины с учетом нестационарных эффектов, связанных с распространением волн разгрузки при проскоке трещины на разную длину.

Расчетная схема. Численные расчеты для прямоугольной пластины ($a \times b = 50 \times 100$ мм), находящейся в условиях плоской деформации, выполняли методом конечных элементов [8, 9]. Краевую трещину располагали по оси симметрии пластины, нормально к удлиненной стороне наружного контура. Для расчетов НДС, соответствующего плоской деформации в пластине с трещиной, использовали конечноэлементную модель половины пластины в силу ее симметрии.

Граничные условия: нулевые перемещения по нормали к плоскости с трещиной, исключая трещину, и нулевое давление на поверхности трещины.

Начальные условия: нулевые перемещения и напряжения в объеме пластины.

Теплоотвод с наружной поверхности пластины не учитывался.

Расчеты проводили для пластины из линейно-упругого материала плотностью $\rho = 7,8$ кг/м³, модулем Юнга $E = 200$ ГПа и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$.

Рассмотрены две схемы нагружения. Согласно первой схеме равномерно распределенную растягивающую нагрузку (как статическую, так и мгновенную) прилагали по короткой стороне наружного контура пластины с краевой трещиной длиной $a/4$ для оценки коэффициентов интенсивности напряжений у вершины трещины K_1 и $K_1(t)$ соответственно. В случае второй схемы мгновенное приложение давления, которое имитирует изменение нагрузки при проскоке трещины до длины $a/4$, осуществляли на прилегающем к ее вершине участке берега трещины различной длины.

Результаты расчетов НДС и их анализ. Анализ результатов расчетов, приведенных на рис. 1–3, показал, что при мгновенном приложении нагрузки к пластине с трещиной происходит циклическое изменение $K_1(t)$, при этом максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений $K_{1\max}^{\text{дин}}$ примерно в два раза выше, чем $K_1^{\text{ст}}$ при статическом нагружении, $K_{1\max}^{\text{дин}} \approx 2K_1^{\text{ст}}$ (рис. 1). При динамическом нагружении коэффициент K_1 из-

меняется во времени с периодом примерно $\lambda \approx 2b/c_0 \approx 40$ мкс (c_0 – скорость звука в материале), что позволяет связать эти изменения с распространением и интерференцией в пластине продольных волн упругих напряжений, вызванных мгновенной нагрузкой. При увеличении длительности роста нагрузки, т.е. при ее линейном росте, отличающемся от мгновенного, до одной и той же величины, максимальное значение K_1 снижается и приближается к $K_1^{ст}$. Отметим, что подобный циклический характер изменения $K_1(t)$ наблюдали также экспериментально [10].

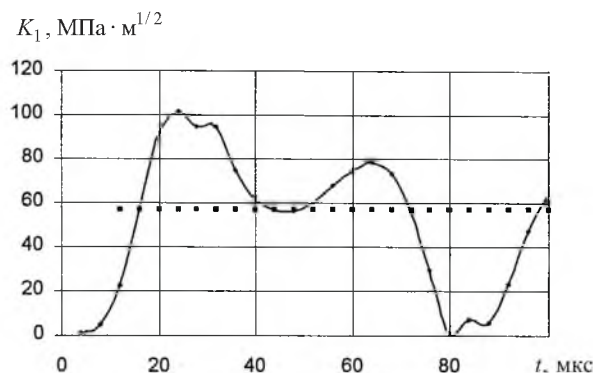


Рис. 1. Изменение во времени K_1 в вершине краевой трещины длиной $a/4$ в пластине, мгновенно нагруженной распределенной растягивающей нагрузкой 200 МПа. (Здесь и на рис. 2: пунктирные линии – K_1 при статическом нагружении пластины с трещиной длиной $a/4$.)

Для определения характера изменения коэффициента интенсивности напряжений при проскоке трещины достаточно оценить изменение $K_1(t)$ в первоначально свободной от нагрузок пластине при мгновенном приложении давления на участке берега трещины, соответствующем ее проскоку. Правомерность использования такого подхода для оценки K_1 подтверждается равенством величин коэффициентов интенсивности напряжений, рассчитанных для пластины с трещиной, статически нагруженной постоянной распределенной растягивающей нагрузкой по ее короткой стороне, и для первоначально свободной от нагрузок пластины, нагруженной по берегу трещины давлением, равным вышеуказанной нагрузке.

Основные результаты расчетов для трещин различной длины приведены на рис. 2, 3. Расчет коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины после проскока выполняли следующим образом: приращение ΔK_1 за счет проскока, рассчитанное при мгновенном приложении давления на участке берега трещины, соответствующем проскоку, суммировали с составляющей $K_1^{ст}$, определяемой при статическом нагружении участка берега трещины до проскока. Как видно, увеличение длины проскока трещины влияет на максимальное значение K_1 и его приращение ΔK_1 . За начальным периодом роста K_1 до максимальной величины K_{1max} следует циклическое изменение коэффициента интенсивности напряжений относительно среднего его значения, соответствующего K_1 при статическом нагружении. Амплитуда циклического изменения K_1 понижается с уменьшением длины проскока трещины.

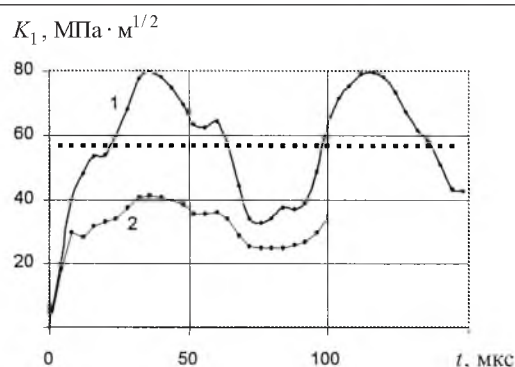


Рис. 2. Изменение во времени K_1 в вершине краевой трещины длиной $a/4$ вследствие ее проскока на всю длину $a/4$ (1) и проскока исходной трещины длиной $a/8$ на величину $a/8$ (2).

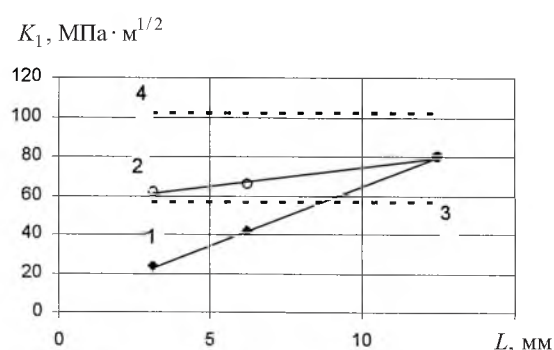


Рис. 3. Максимальные значения ΔK_1 (1) и K_1 (2) в вершине краевой трещины конечной длины $a/4$ вследствие ее проскока на длину L . (3, 4 – значения K_1 соответственно при статическом и мгновенном нагружении пластины с трещиной длиной $a/4$ (рис. 1).)

Амплитуда $K_{1\max}$ в вершине трещины после проскока (на рис. 3 точки на линии 2) попадает в диапазон значений коэффициента интенсивности напряжений, полученных при статическом и мгновенном нагружении пластины (на рис. 3 линии 3, 4). Зависимость коэффициента интенсивности напряжений K_1 от длины проскока трещины (рис. 3) подтверждает влияние волновых процессов в пластине, вследствие которых интенсивность напряжений в вершине трещины является результатом суммирования возмущений от всех точек берега трещины на участке проскока. Увеличенная длина проскока вызывает повышение уровня напряжений в расходящейся упругой волне разгрузки, инициированной проскоком, что и определяет прирост коэффициента интенсивности напряжений ΔK_1 . Причем максимальный коэффициент интенсивности напряжений при длине проскока, равной длине трещины, не превышает его величины при мгновенном нагружении пластины.

Значение амплитуды коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины при реальном процессе подрастания трещины (проскок за конечный промежуток времени) будет меньшим, чем при мгновенном изменении длины трещины. Причина состоит в том, что указанная амплитуда определяется суммированием последовательных затухающих возмущений от точек берега трещины на участке ее роста, что вызовет размытие фронтов волн напряжений и, как следствие, снижение их амплитуды.

Если принять, что страгивание и остановка трещины определяются одним и тем же критическим уровнем K_{1a} в вершине трещины, остановка трещины в момент t_a и ее нераспространение после остановки соответствуют условию $K_1(t) \leq K_{1a}$ при $t \geq t_a$. Это условие указывает на то, что длина проскока трещины в нагруженной пластине должна быть такой, чтобы в результате снижения интенсивности напряжений вследствие изменения внешней нагрузки или развития трещины значение K_1 не превышало K_{1a} , в противном случае трещина будет развиваться до полного разрушения образца или элемента конструкции. При этом необходимо учитывать зависимость критической трещиностойкости материала от скорости нагружения [11, 12].

В заключение отметим, что для оценки сопротивления хрупкому разрушению реальных конструкций при проскоке трещины необходимо дальнейшее изучение кинетики нестационарного НДС в образцах и элементах конструкций с трещинами при различных условиях нагружения с учетом реального упругопластического поведения материала.

Выводы

1. Мгновенное приложение растягивающей нагрузки к пластине с трещиной приводит к нестационарному изменению напряжений в ее вершине с максимальным коэффициентом интенсивности напряжений $K_{1\max}^{\text{дин}}$, который примерно в два раза выше, чем $K_1^{\text{ст}}$ при статическом нагружении.

2. Увеличение длины краевой трещины L под действием мгновенной нагрузки вызывает приращение коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины $\Delta K_1^{\text{дин}}(t, L)$, при этом максимальное значение $K_{1\max}^{\text{дин}}$ у вершины трещины, увеличенной на длину проскока, значительно выше, чем $K_1^{\text{ст}}$.

Резюме

Наведено результати розрахунків для оцінки зміни в часі коефіцієнта інтенсивності напружень у вістрі краєвої тріщини при скачкоподібному збільшенні її довжини. Показано, що проскок тріщини у товстій пластині, яка знаходиться під дією розтягального навантаження, призводить до циклічних змін K_1 із періодом і амплітудою, які залежать від довжини початкової тріщини, довжини проскока та розмірів пластини. Усереднене за часом значення K_1 відповідає розрахованому для стаціонарної тріщини.

1. Irwin G. R. Comments on dynamic fracturing // Fast Fracture and Crack Arrest. – ASTM STP 627. – 1977. – P. 7 – 18.
2. Hahn G. T., Rosenfield A. R., Marschallat C. W., et al. Crack arrest concepts and applications // Fracture Mechanics / Eds. N. Perrone, H. Libowitz, D. Mulville, and W. Pilkey. – University of Virginia, 1978.
3. Степанов Г. В. Анализ разрушения труб распространением быстрой трещины // Пробл. прочности, 1997. – № 2. – С. 119 – 125.

4. *Crosley P. B. and Ripling E. J.* Towards development of standard test for measuring K_{Ia} // Fast Fracture and Crack Arrest. – ASTM STP 627. – 1977. – P. 372 – 391.
5. *Pussegoda L. N., Malik L., and Morrison J.* Measurement of crack arrest fracture toughness of a ship steel plate // J. Test. Eval. – 1998. – **26**, No. 3. – P. 187 – 197.
6. *Iskander S. K., Milella P. P., Pini A., and Mannes Schmidt E. T.* Crack-arrest testing of irradiated nuclear reactor pressure vessel steels at the Oak Ridge National Laboratory // Ibid. – No. 6. – P. 546 – 554.
7. *Красовский А. Я., Красико В. Н.* Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов. – Киев: Наук. думка, 1993. – 140 с.
8. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
9. *Морозов Е. М., Никшиков Г. П.* Метод конечных элементов в механике разрушения. – М.: Наука, 1980. – 254 с.
10. *Kalthoff J. F., Beinert J., and Winkler S.* Measurements of dynamic stress intensity factors for fast running and arresting cracks in double-cantilever-beam specimens // Fast Fracture and Crack Arrest. – ASTM STP 627. – 1977. – P. 161 – 176.
11. *Степанов Г. В.* Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 288 с.
12. *Степанов Г. В., Маковей В. А.* Динамическая трещиностойкость конструкционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1993. – 140 с.

Поступила 20. 11. 2003