

Моделирование кинетики распространения трещины

Г. В. Степанов, А. В. Широков

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

Рассмотрено развитие центральной трещины в полосе металла при растяжении с использованием модели из регулярных конечных элементов. Развитие трещины моделируется удалением конечного элемента, в котором выполняются условия разрушения. Показано, что такой подход позволяет качественно проследить развитие трещины и отразить некоторые экспериментально наблюдаемые эффекты, в частности скачкообразное развитие трещины в металле.

Ключевые слова: распространение трещины, импульсное нагружение, уравнение состояния Джонсона–Кука.

Введение. В последнее время в связи с недостаточным уровнем достоверности оценки при прогнозировании инициирования и распространения трещин в металлических материалах увеличился интерес к изучению данных процессов [1–9]. Несмотря на возросшие возможности современной измерительной аппаратуры, в литературных источниках остается крайне мало экспериментальных работ. Это обусловлено сложностью и дороговизной проведения подобных экспериментов, а также невозможностью детально проследить процессы зарождения и дальнейшего развития трещин в объеме материала [8, 10]. Учитывая значительное увеличение возможностей вычислительной техники, развитие методик численного моделирования и совершенствование пакетов прикладных программ, расчеты в основном проводятся с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Исследования выполнялись для таких процессов, как растяжение, образование лепестков при пробое тонких пластин ударниками различных диаметров [3], пробивание пластин и балок плоским ударником [7], кручение стержня, ветвление трещин в пластинах, тест Тейлора [2] и т.д. Несмотря на то что результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с известными экспериментальными данными, проводится дальнейшая модификация существующих моделей материалов и методик расчетов [1, 4, 5, 9] для повышения уровня достоверности результатов при моделировании инициирования и распространения трещин в различных материалах, а также отображения их реального поведения.

В данном сообщении рассмотрено развитие центральной трещины в полосе металла при растяжении с использованием модели из регулярных конечных элементов (КЭ), имитирующих зернистую структуру. Поведение металла моделировали с помощью уравнения Джонсона–Кука, развитие трещины – путем удаления КЭ, в котором выполняются условия разрушения.

Модель полосы с центральной сквозной трещиной. Поликристаллическое строение конструкционных металлических материалов позволяет предположить возможность развития трещины путем последовательного разрушения зерен в соответствии с их напряженно-деформированным состоянием (НДС). Это дает основания рассчитывать кинетику деформирования и разру-

шения отдельных зерен с использованием континуального подхода с учетом реального упрочнения (деформационного и скоростного) и адиабатического разогрева без привлечения априорных предположений о распределении напряжений в вершине трещины.

При оценке разрушения материала предполагали:

независимо от истории нагружения разрушение металла в локальных объемах, в том числе в области вершины трещины, определяется исчерпанием возможности дальнейшего деформирования с сохранением сплошности;

в поликристаллическом металле скачкообразное разрушение связано с разрушением отдельных зерен при выполнении соответствующих критериев разрушения, усредненных по объему зерна;

образец имеет достаточную толщину, т.е. находится в условиях плоской деформации.

С учетом этих предположений исследовали кинетику развития разрушения в полосе шириной $2b$, длиной $4b$ с центральной сквозной трещиной при плоском деформированном состоянии. Вследствие симметрии рассматривали КЭ модель четверти полосы ($b = 25$ мм) с трещиной, равной $b/4$ (рис. 1). Перемещения в направлении, перпендикулярном к осям симметрии рассматриваемой четверти, принимали равными нулю.

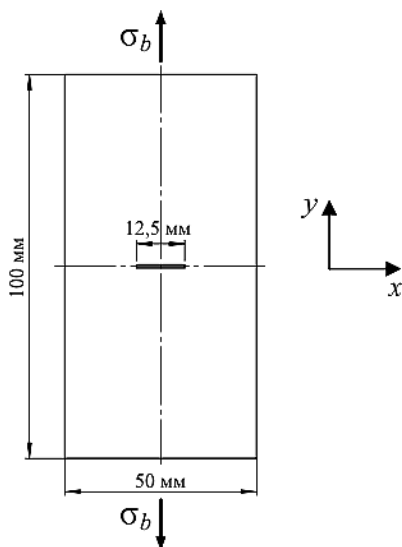


Рис. 1. Полоса с трещиной.

Моделирование проводили с помощью уравнения состояния Джонсона–Кука. Поскольку цель работы заключается в том, чтобы показать возможность использования данных предположений при моделировании распространения трещины, для упрощения расчетной модели не учитывали влияние скорости деформации и температуры на деформирование и разрушение металла: $\sigma = \sigma_Y [1 + A(\varepsilon_i^P)^n]$, где σ_Y – предел текучести металла при статическом нагружении; A , n – коэффициенты деформационного упрочнения; ε_i^P – пластическая деформация материала.

Размеры конечных элементов в области разрушения выбирали согласно условию их применимости для расчета локального деформирования металла в области трещины с достаточной точностью. Если принять, что работа разрушения G по распространению трещины в слое пластически деформированного материала, прилегающего к поверхности трещины, определяется величиной интенсивности напряжений σ_m , то при разрушающей деформации ε_f условие распространения трещины примет следующий вид:

$$G = 2\sigma_m \varepsilon_f \delta_m,$$

где δ_m – толщина слоя пластически деформированного материала при распространении трещины.

Учитывая, что $G = (1 - \nu^2)K_{ID}^2/E$, толщину слоя деформированного металла записывали так:

$$\delta_m = \frac{G}{2\sigma_m \varepsilon_f} = \frac{(1 - \nu^2)K_{ID}^2}{2E\sigma_m \varepsilon_f}, \quad (1)$$

где K_{ID} – коэффициент интенсивности напряжений при страгивании и распространении трещины.

Для корректного моделирования локальной деформации при распространении трещины необходимо использовать КЭ с размерами меньше δ_m . Для низкоуглеродистой стали в пластическом состоянии ($K_{ID} > 100$ МПа·м^{1/2} при $\varepsilon_f \approx 0,5$, $\sigma_m \approx 350$ МПа) расчетное значение $\delta_m > 0,13$, поэтому в области роста трещины были использованы КЭ, меньше 0,13 мм.

На границе образца (рис. 1), параллельной плоскости трещины, при мягком нагружении приложен импульс равномерно распределенного растягивающего напряжения длительностью 60 мкс (повышение напряжения за 10 мкс до 250...350 МПа, выдержка при этой нагрузке 40 мкс, линейное снижение нагрузки до нулевого уровня за 10 мкс). При жестком нагружении задавали постоянную скорость перемещения границы образца (скорость нарастает мгновенно до 1,25 м/с на каждой из нагружаемых сторон образца и сохраняется неизменной). Расчет проводили с использованием пакета прикладных программ ANSYS-ED.

Разрушение моделировали удалением КЭ, в котором выполняются условия разрушения. В качестве критерия разрушения принимали значение эквивалентной пластической деформации ε_f , величина которой зависит от жесткости напряженного состояния $\eta = p/\sigma_{eff}$ (отношение давления p к эффективному напряжению σ_{eff}), в соответствии с экспоненциальной зависимостью:

$$\varepsilon_f = D_1 + D_2 \exp(D_3 \eta). \quad (2)$$

Три константы в этом уравнении могут быть найдены по эквивалентной деформации разрушения при трех деформационных состояниях, которые определяются экспериментально. Например, при сдвиге $\varepsilon_{f,s}$ ($\eta = 0$), при одноосном растяжении $\varepsilon_{f,t}$ ($\eta = -1/3$) и двухосном растяжении $\varepsilon_{f,2t}$ ($\eta = -2/3$) параметры разрушения в уравнении (2) определяются соотношениями:

$$D_1 = \varepsilon_{f,s} - D_2; \quad D_2 = \frac{\varepsilon_{f,t} - \varepsilon_{f,s}}{\exp(-D_3/3) - 1}; \quad D_3 = -3 \ln \left(\frac{\varepsilon_{f,t} - D_1}{\varepsilon_{f,s} - D_1} \right).$$

Эквивалентная деформация разрушения изменяется с повышением давления сжатия ($\varepsilon_{f,s} = 0,45$; $\varepsilon_{f,t} = 0,4$; $\varepsilon_{f,2t} = 0,346$; $D_1 = 1,025$; $D_2 = -0,575$; $D_3 = -0,25$). Это согласуется с известными данными, свидетельствующими о том, что давление влияет на повышение пластичности металлов [11] (рис. 2).

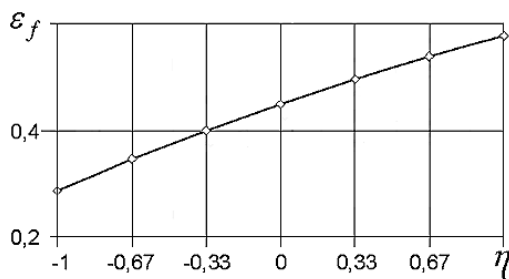


Рис. 2. Изменение эквивалентной деформации разрушения в зависимости от жесткости нагружения.

Для определения влияния размера ячейки КЭ на точность расчетов провели тестовый расчет с использованием размеров ячейки 50 и 16,7 мкм, что в несколько раз меньше величины, полученной с помощью формулы (1). Различие в скорости распространения трещины, рассчитанной при данных параметрах деформации и разрушения металла, для указанных размеров ячеек КЭ незначительное. Расчет показывает, что область локальных неупругих деформаций у вершины развивающейся трещины имеет протяженность около 50 мкм. С целью получения большей точности в расчетах использовали КЭ с размером 16,7 мкм.

Мягкое нагружение моделировали нагружением верхней границы образца, параллельной плоскости трещины, коротким импульсом равномерно распределенного растягивающего напряжения (повышение напряжения за 10 мкс до заданной величины σ_b , выдержка при этой нагрузке 40 мкс, линейное снижение нагрузки до нулевого уровня за 10 мкс). После начального периода нагружения (около 10 мкс) в образце формируется квазистационарное напряженное состояние, определяющее пластическое деформирование металла у вершины трещины (и ее затупление). При критической величине эквивалентной деформации в прилегающем к вершине трещины КЭ инициируется разрушение.

Результаты расчетов максимальной скорости трещины V_{cr} для различных значений σ_Y/σ_b , соответствующих кривой на рис. 2, приведены на рис. 3. Максимальную скорость определяли по наибольшему проскоку трещины за единицу времени. Уменьшение отношения предела текучести к нагрузке приводит к снижению скорости роста трещины V_{cr} . Темные точки на рис. 3 получены при $\sigma_b = 300$ МПа, $\sigma_Y = 250, 300$ и 350 МПа, светлая точка – при повышенном уровне нагрузки $\sigma_b = 350$ МПа и пониженном пределе текучести $\sigma_Y = 250$ МПа, т.е. V_{cr} зависит от отношения σ_Y/σ_b .

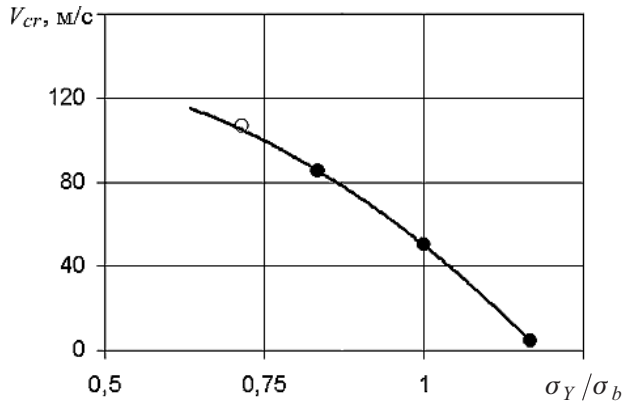


Рис. 3. Зависимость максимальной скорости трещины от отношения предела текучести к напряжению на границе (мягкое нагружение).

При повышенной нагрузке ($\sigma_Y / \sigma_b \leq 1$) пластическое деформирование распространяется на весь объем полосы, а разрушение развивается в плоскости исходной трещины (вдоль оси x) со скоростью, возрастающей с увеличением нагрузки, что соответствует вязкому характеру разрушения. Затем развитие трещины происходит под углом 45° . При снижении нагрузки рост трещины замедляется вплоть до ее остановки. Деформирование при нагрузке 250 МПа и пределе текучести 350 МПа не вызывает распространения трещины вследствие высокой пластичности металла. Немонотонный характер изменения напряжений и деформаций в устье трещины при ее распространении свидетельствует о влиянии волновых процессов, вызванных нагружением и развитием разрушения. Особенно явно это наблюдается в диапазоне повышенной скорости роста трещины.

Отметим, что в материале с пониженной плотностью (при сохранении остальных параметров в уравнениях состояния металла) скорость трещины выше, что обусловлено проявлением влияния инерционных эффектов на ее развитие.

Разрушение инициируется во втором, начиная от вершины трещины, КЭ в результате его всестороннего растяжения и, как следствие, повышенной величины среднего растягивающего напряжения в нем, т.е. разрушение происходит при уменьшенной величине эквивалентной деформации. Это соответствует экспериментально установленному появлению зоны вытяжки в устье трещины при ее страгивании.

При сохранении нагрузки после ее начального повышения до уровня выше критического имеет место последовательное разрушение одного элемента за другим вдоль линии трещины и остановка последней при снижении нагрузки. Скорость роста трещины определяется относительной величиной нагрузки (рис. 3).

При жестком нагружении задавали постоянную скорость перемещения нагружаемой грани полосы (1,25 м/с), которая нарастала мгновенно и сохранялась неизменной. Параметры материала имели следующие значения: $\sigma_Y = 350$ МПа; $\varepsilon_{f,s} = 0,35$; $\varepsilon_{f,t} = 0,3$; $\varepsilon_{f,2t} = 0,24$; $D_1 = 0,6$; $D_2 = -0,25$; $D_3 = -0,547$.

Развитие трещины при жестком нагружении представлено на рис. 4. При заданных параметрах разрушения трещина подрастает ступенчато в результате изменения жесткости НДС в КЭ, прилегающем к разрушенному. Разрушение КЭ приводит к снижению среднего напряжения в одном-двух КЭ, следующих за разрушенным, вследствие чего происходит периодическое разрушение через два элемента третьего с перемычками между разрушенными элементами (рис. 4). При дальнейшем деформировании эквивалентная деформация в нескольких перемычках повышается до критической величины, что вызывает практически одновременное разрушение 3–5 таких перемычек. После периода стабильного деформирования процесс образования и разрушения перемычек повторяется, что проявляется в скачкообразном подрастании трещины.

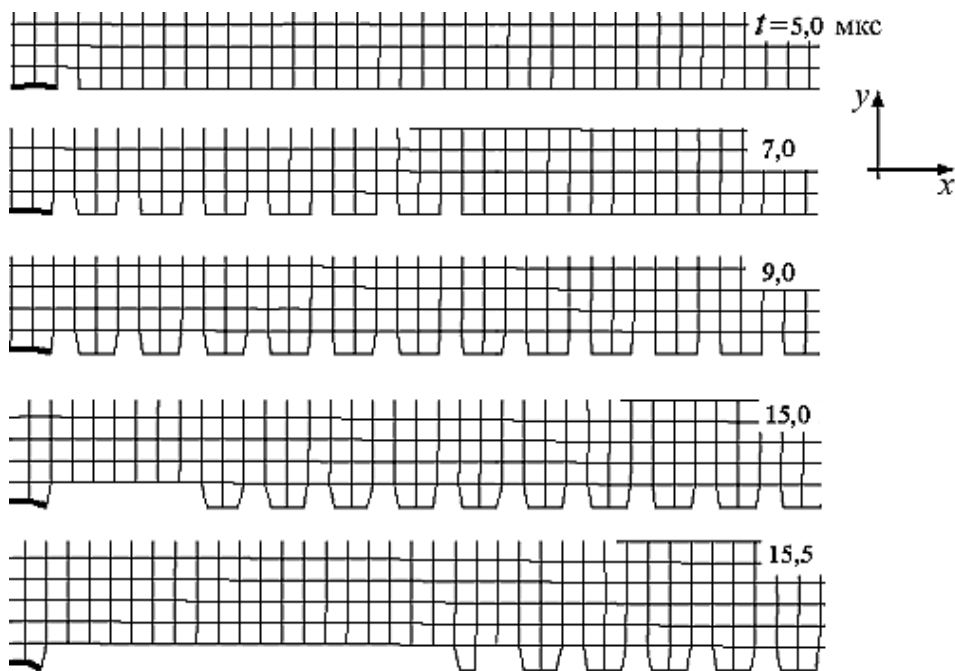


Рис. 4. Распределение разрушенных КЭ на линии трещины в различные моменты времени t от начала растяжения со скоростью 1,25 м/с. (Утолщенные линии – исходный берег трещины.)

Распределение растягивающих напряжений (по оси y) в КЭ, примыкающих к области разрушения, вдоль линии трещины (рис. 5,а) через 5, 7 и 9 мкс после начала нагружения соответствует высокой концентрации напряжений, характерной для устья трещины. Пластическая деформация (по оси y) в перемычках в течение 9 мкс после начала нагружения возрастает (рис. 5,б). Распределение деформации в моменты времени 15 и 15,5 мкс от начала нагружения является результатом разрушения в перемычках, а нулевые значения деформации на кривых характеризуют перемещение границы разрушения перемычек.

Распространение трещины на 3,0 мм характеризуется ее эффективной скоростью выше 500 м/с на участках проскока с понижением до 100 м/с между ними (рис. 6).

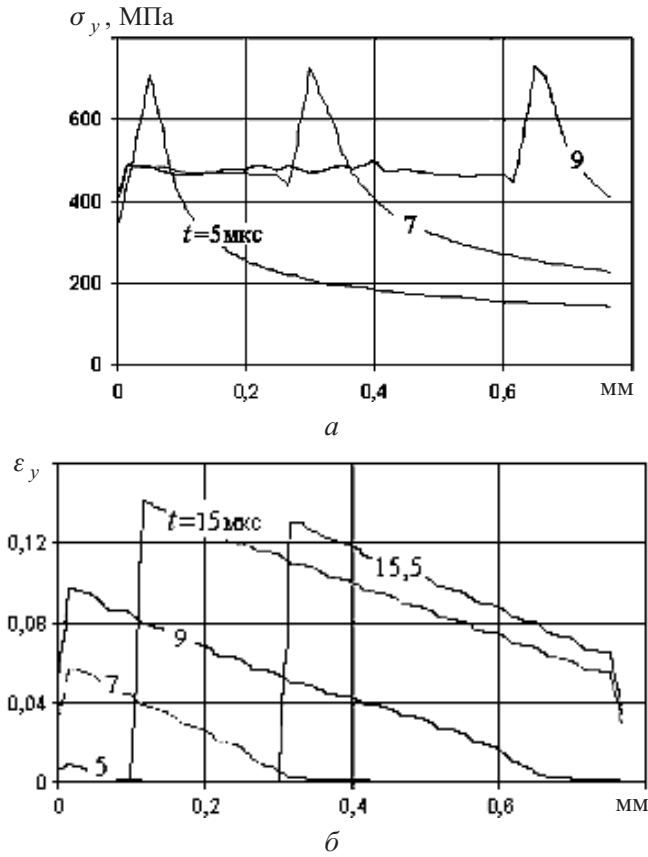


Рис. 5. Распределение напряжения (а) и пластической деформации (б) в элементах, примыкающих к области разрушения, вдоль линии трещины в различные моменты времени t после начала нагружения со скоростью 1,25 м/с.

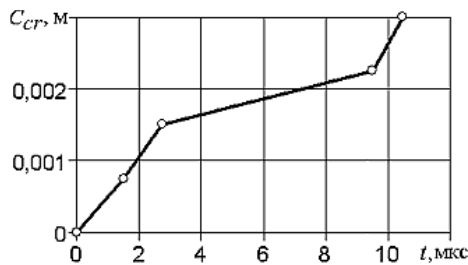


Рис. 6. Перемещение границы разрушения C_{cr} при жестком режиме нагружения.

Результаты численных расчетов свидетельствуют о следующем:

при жестком нагружении полосы (перемещение границы полосы с постоянной скоростью) развитие центральной сквозной трещины является результатом серии проскоков, связанных с разрушением перемычек между ранее разрушенными элементами в сплошном металле;

выбор конкретной зависимости эквивалентной деформации разрушения металла от отношения давления к эффективному напряжению существенно влияет на скорость, характер и направление распространения трещины.

Выводы

1. Использование конечных элементов с размерами меньше протяженности локализованной деформации позволяет рассчитывать кинетику трещины как при вязком, так и при хрупком разрушении металла.

2. Полученные результаты качественно отражают некоторые экспериментально наблюдаемые эффекты, в частности скачкообразное развитие трещины в металле.

3. Используемая в расчетах модель не позволяет учитывать влияние скорости деформации, температуры и повреждаемости металла на эквивалентную пластическую деформацию. Оценка влияния данных факторов на особенности развития трещины, несомненно, важна и требует дальнейшего исследования.

Резюме

Розглянуто розвиток центральної тріщини в смузі металу при розтязі з використанням моделі з регулярних скінчених елементів. Розвиток тріщини моделюється видаленням скінченного елемента, в якому виконуються умови руйнування. Такий підхід дозволяє якісно простежити за розвитком тріщини та відобразити деякі ефекти, що спостерігаються експериментально, зокрема стрибкоподібний розвиток тріщини в металі.

1. *Anvari M., Scheider I., and Thaulow C.* Simulation of dynamic ductile crack growth using strain-rate and triaxiality-dependent cohesive elements // *Eng. Fract. Mech.* – 2006. – **73**. – P. 2210 – 2228.
2. *Bordas S., Rabczuk T., and Goangseup Z.* Three-dimensional crack initiation, propagation, branching and junction in non-linear materials by an extended meshfree method without asymptotic enrichment // *Ibid.* – 2007. – **75**. – P. 943 – 960.
3. *Lee Y.-W. and Wierzbicki T.* Fracture prediction of thin plates under localized impulsive loading. Part II: discing and petalling // *Int. J. Impact Eng.* – 2005. – **31**. – P. 1277 – 1308.
4. *Li H. and Chandra N.* Analysis of crack growth and crack-tip plasticity in ductile materials using cohesive zone models // *Int. J. Plasticity.* – 2003. – **19**. – P. 849 – 882.
5. *Nistor I., Pantalé O., and Caperaa S.* Numerical implementation of the extended finite element method for dynamic crack analysis // *Adv. Eng. Software.* – 2007. – **39**. – P. 573 – 587.
6. *Hampton R. W. and Nelson D.* Stable crack growth and instability prediction in thin plates and cylinders // *Eng. Fract. Mech.* – 2003. – **70**. – P. 469 – 491.
7. *Teng X. and Wierzbicki T.* Dynamic shear plugging of beams and plates with an advancing crack // *Int. J. Impact Eng.* – 2005. – **31**. – P. 667 – 698.
8. *Wall O.* Dynamic crack propagation in large steel specimens // *Eng. Fract. Mech.* – 2002. – **69**. – P. 835 – 849.

9. *Wall O.* Numerical modelling of fracture initiation in large steel specimens at impact // *Ibid.* – P. 851 – 863.
10. *Степанов Г. В., Маковей В. А.* Динамическая трещиностойкость конструкционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1993. – 143 с.
11. *Бриджмен П. В.* Исследование больших пластических деформаций и разрыва. Влияние высокого гидростатического давления на механические свойства материалов. – М.: Изд-во иностр. лит., 1955. – 444 с.

Поступила 19. 11. 2008