

УДК 539.4

Кондряков Е.А. к.т.н.

Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАНУ, г. Киев, Украина

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ ШАРПИ В ДВУХМЕРНОЙ И ТРЕХМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ

Kondryakov E.

G.S.Pisarenko Institute for Problems of Strength, Kyiv, Ukraine (kondryakov@ipp.kiev.ua)

NUMERICAL SIMULATION OF CHARPY SPECIMENS IMPACT TESTS IN THE TWO- DIMENSIONAL AND THREE-DIMENSIONAL FORMULATION

Было проведено численное моделирование ударных испытаний образцов Шарпи в двухмерной и трехмерной постановках методом конечных элементов с использованием модели повреждаемости материала Гарсона-Твергарда-Нидлмана. Проведен анализ кинетики НДС в вершине трещины при ее зарождении и распространении в материале образца Шарпи. Построены зависимости скорости распространения трещины от времени при различном виде разрушения. Проведен анализ влияния вида напряженного состояния на НДС в вершине трещины и на скорость её распространения.

Ключевые слова: образец Шарпи, метод конечных элементов, модель повреждаемости материала Гарсона-Твергарда-Нидлмана.

Введение

Для оценки прочности и долговечности крупногабаритных конструкций обычно используют результаты испытаний малоразмерных образцов. Одними из наиболее распространенных являются ударные испытания образцов Шарпи. В последнее время с развитием вычислительной техники кроме экспериментов проводится и численное моделирование таких испытаний. Использование локальных критериев разрушения материала позволяет получить больше информации об особенностях зарождения и распространения трещины в материале. Главной особенностью этих подходов является переносимость результатов с образца на конструкцию, так как параметры модели не должны зависеть от геометрии. В последнее время во многих работах часто используется модель повреждаемости материала Гарсона-Твергарда-Нидлмана (GTN) [1-2].

В литературе приводятся данные по определению параметров модели GTN на основе результатов экспериментального и численного моделирования ударных испытаний образцов Шарпи [3,4]. Выбирая различные значения параметров модели, можно моделировать процессы как вязкого, так и хрупкого разрушения. В некоторых последних работах показано, что результаты численного моделирования ударных испытаний, полученные для двумерной и трехмерной расчетной схемы, могут отличаться, что требует проведения дополнительных исследований [5].

В данной работе было проведено численное моделирование ударных испытаний образцов Шарпи в 2D и 3D постановках с использованием модели повреждаемости материала GTN. Проведен анализ кинетики НДС в вершине трещины и определены скорости её распространения в материале образца.

Цель

Основной задачей данной работы является исследование процессов зарождения и распространения трещины в образцах Шарпи при численном моделировании методом конечных элементов в 2D и 3D постановках.

Схематизация задачи

Численное моделирование ударных испытаний образцов Шарпи проводилось на программном комплексе Abaqus/CAE, основанном на методе конечных элементов (КЭ). В качестве материала использовалась теплостойкая легированная сталь 15X2НМФА. Истинная диаграмма деформирования, используемая в расчете, была получена по результатам испытаний гладких образцов на одноосное растяжение.

Для моделирования процесса распространения трещины использовалась модель повреждаемости материала GTN [1-2]. Эта модель описывает поведение вязкого пористого материала и учитывает как образование и рост пор, так и механизм вязкого разрушения, вызванный их слиянием. Модель включает в себя девять параметров. За начало разрушения и потерю несущей способности конструкции отвечают параметры f_c и f_f , где f_c – критическое значение объема пор, при котором в данном элементарном объеме материала начинается слияние пор; f_f – критическое значение объема пор, при котором данный элементарный объем материала

полностью теряет свою несущую способность. Параметры модели GTN определялись по результатам испытаний гладких образцов на одноосное растяжение и ударных испытаний образцов Шарпи, а также их сопоставления с результатами численного моделирования.

Моделирование проводилось с помощью плоских элементов (2D) – Quad и Tri и объемных (3D) – Hex и Wedge. С целью уменьшения затрат времени и ресурсов были использованы свойства симметрии задачи. Таким образом, моделировалась $\frac{1}{4}$ часть образца. На рис.1 показан общий вид расчетной модели и конечно-элементное разбиение в вершине надреза. Минимальный размер конечного элемента в вершине надреза $KЭ_{\min}=50$ мкм. Было промоделировано три типа разрушения: хрупкое, квазихрупкое и вязкое. Скорость нагружения – 2м/с.

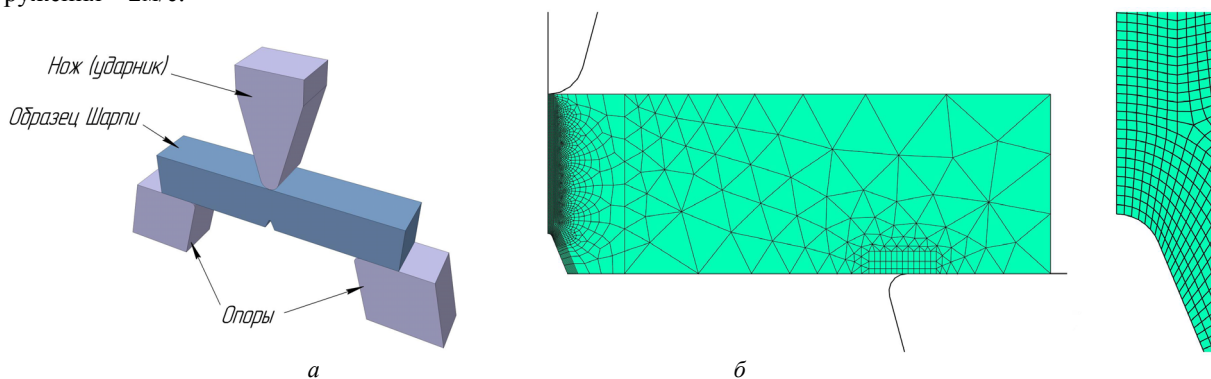


Рис. 1. *а* – общий вид расчетной модели ударного испытания образца Шарпи, *б* – конечно элементная модель

Анализ результатов

Для анализа кинетики НДС в вершине трещины при её распространении использовались параметры модели GTN $f_c = 0.066$, $f_F = 0.4$, при которых происходит вязкое разрушение [3]. На рис. 2 и 3 показаны диаграммы изменения напряжений σ_x и деформаций ϵ_x в центральном сечении образца в момент старта трещины – рис. 2а и 3а и при длине трещины 1 мм – рис. 2б и 3б в 2D и 3D постановках.

Из рис. 2 видно, что с ростом трещины увеличивается максимальное нормальное напряжение. Так при старте трещины максимальное нормальное напряжение для 2D модели составляет 1740 МПа, а для 3D – 1850 МПа, при длине трещины 1 мм – 1860 МПа для 2D и 1900 МПа для 3D. Также видно, что нормальные напряжения достигают максимума на некотором расстоянии от вершины трещины (надреза). В 2D модели нормальные напряжения достигают максимума раньше, чем в 3D модели, таким образом, при двумерной постановке задачи разрушение образца начинается раньше.

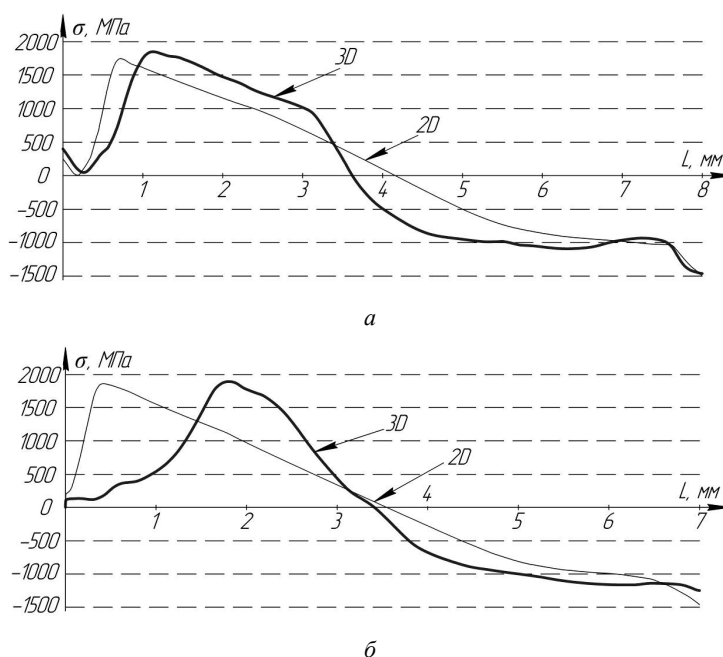


Рис. 2. Распределение напряжений σ_x в центральном сечении образца в 2D и 3D постановках: *а* – в момент старта трещины, *б* – при длине трещины 1мм

Как видно на рис. 3, значения деформаций в 2D модели выше, при этом максимальное значение деформаций уменьшается с ростом трещины.

По результатам численного моделирования ударных испытаний образцов Шарпи была рассчитана скорость распространения трещины. Скорость трещины определялась по формуле $V=\Delta L/\Delta t$, где ΔL – изменение длины трещины за временной интервал Δt . На рис. 4 показаны зависимости изменения скорости распространения трещины от времени для случая квазихрупкого разрушения при $f_c = 0.005$, $f_F = 0.05$ [3]. Плоская модель дает несколько завышенные значения скорости продвижения трещины. Видно, как на начальном этапе роста трещины происходит характерный вязкий подрост трещины, за которым следует хрупкое разрушение. Скорость трещины при хрупком разрушении достигает 330 м/с для плоской модели и 306 м/с для объемной модели. После хрупкого проскока скорость продвижения трещины падает и начинается вязкий долом. При этом средняя скорость в момент долома составляет 5 м/с. Средняя скорость продвижения трещины в плоской модели превышает скорость трещины в объемной.

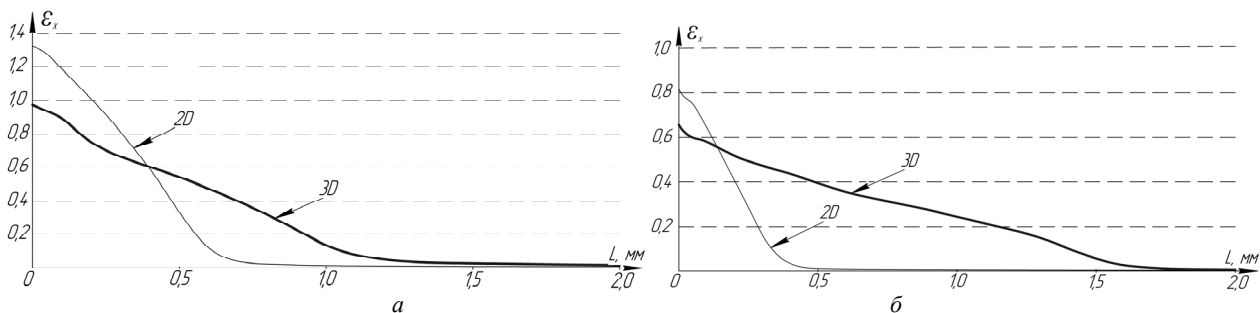


Рис. 3. Распределение деформаций ε_x в центральном сечении образца в 2D и 3D постановках: а) в момент старта трещины, б) длина трещины составляет 1мм

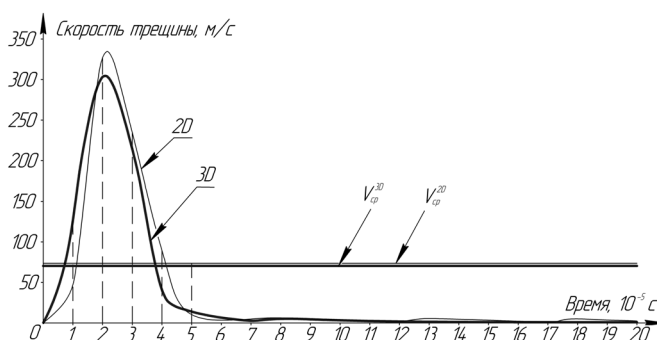


Рис. 4. Изменение скорости распространения трещины в образце Шарпи от времени при $f_c=0,005$, $f_F=0,05$

На рис. 5 показано изменение скорости распространения трещины в образце Шарпи от времени при значениях $f_c = 0.066$, $f_F = 0.4$ для случая вязкого разрушения. Наблюдается распространение вязкой трещины с небольшим проскоком в начале, что согласуется с экспериментальными данными, полученными при испытаниях образцов при температурах выше 20°C . Скорость распространения вязкой трещины изменяется от 2 м/с до 10 м/с. Как и в предыдущем случае, средняя скорость продвижения трещины в плоской модели выше, чем в объемной.

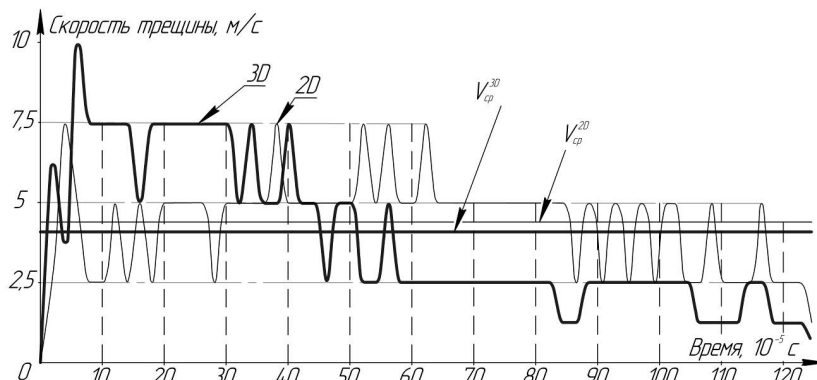


Рис. 5. Изменение скорости распространения трещины в образце Шарпи от времени при $f_c=0,066$, $f_F=0,4$

Выводы

- Проведено численне моделювання ударних випробувань зразків Шарпи из стали 15X2НМФА в 2D и 3D постановках с использованием модели повреждаемости материала GTN.
- Проведен анализ кинетики НДС в вершине трещины при её распространении. Показано, что в 2D модели нормальные напряжения достигают максимума раньше, чем в 3D модели.
- Оценено изменение скорости распространения трещины в образце Шарпи. Плоская модель дает завышенные значения скорости продвижения трещины по сравнению с объемной.

Таким образом, при численном моделировании ударных испытаний образцов Шарпи вид напряженного состояния влияет на кинетику НДС в вершине трещины и на скорость её распространения в материале образца.

Анотація. Було проведено чисельне моделювання ударних випробувань зразків Шарпі в двовимірній та тривимірній постановках методом скінченних елементів з використанням моделі пошкоджуваності матеріалу Гарсона-Твергарда-Нідлмана (GTN). Проведено аналіз кінетики НДС в вершині тріщини при її утворенні і розповсюдженні в матеріалі зразка Шарпі. Побудовані залежності швидкості розповсюдження тріщини від часу при різному виді руйнування. Проведено аналіз впливу виду напруженого стану на НДС в вершині тріщини та на швидкість її розповсюдження.

Ключові слова: зразок Шарпі, метод скінченних елементів, модель пошкоджуваності Гарсона-Твергарда-Нідлмана.

Abstract.

Purpose. The object of the presented work is the finite element analysis of Charpy impact tests in the two-dimensional and three-dimensional formulations.

Design/methodology/approach. Charpy specimens impact tests are one of more simple and inexpensive method to determine the mechanical properties of materials. The results of these tests can be used to estimate the strength and durability of large-scale structures. Numerical simulation of Charpy specimens impact test can give more information about the features of crack initiation and propagation in materials under dynamic loading.

Findings. Numerical modelling of Charpy specimens impact tests was performed using Gurson–Tvergaard–Needleman (GTN) damage material model. According to the results of numerical simulation the diagrams of normal stresses and strains in the crack tip were plotted and the crack propagation velocities for the case of ductile and quasi-brittle fracture were calculated.

Originality/value. The results of numerical modelling of Charpy specimens impact test can be used to evaluate the strength and life time of construction elements.

Keywords: Charpy specimen, finite element method, Gurson–Tvergaard–Needleman damage material model.

Библиографический список использованной литературы

1. Gurson A.L. Continuum theorie of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I–Yield criteria and flow rules for porous ductile media / Gurson A.L. // J. Eng. Mater. Tech. – 1977. – Vol. 99, №1. – P. 2–15.
2. Tvergaard V. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar / Tvergaard V., Needleman A. // Acta Metall. – 1984. – Vol. 32, №1. – P. 157–169.
3. Кондряков Є.О. Зародження та розповсюдження тріщин у концентраторі напружень у сталях при ударному навантаженні // автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.09 «Динаміка та міцність машин». – Київ, 2009. – 20с.
4. Bernauer G. Micro-mechanical modeling of ductile damage and tearing – results of a European numerical round robin / Bernauer G., Brocks W. // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 2002. - Vol. 25, № 4. - P. 363-384.
5. Ductile to brittle transition of an A508 steel characterized by Charpy impact test Part II: modeling of the Charpy transition curve / Tanguy B., Besson J., Piques R., Pineau A. // Eng. Fract. Mec. – 2005. – Vol. 72, №3. - P. 413-434.

References

1. Gurson A.L. Continuum theorie of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I–Yield criteria and flow rules for porous ductile media. J. Eng. Mater. Tech. 1977. Vol. 99, No1. P. 2–15.
2. Tvergaard V., Needleman A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. Acta Metall. 1984. Vol. 32, No1. P. 157–169.
3. Kondrjakov Je.O. avtoref. dys. na zdobuttja nauk. stupenja kand. tehn. nauk: spec. 05.02.09 «Dynamika ta micnist' mashyn». [author's abstract of dissertation for scientific degree of candidate of technical sciences]. Kyiv, 2009, 20p.
4. Bernauer G., Brocks W. Micro-mechanical modeling of ductile damage and tearing – results of a European numerical round robin. Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. 2002. Vol. 25, No 4. P. 363-384.
5. Tanguy B., Besson J., Piques R., Pineau A. Ductile to brittle transition of an A508 steel characterized by Charpy impact test Part II: modeling of the Charpy transition curve. Eng. Fract. Mec. 2005. Vol. 72, No3. P. 413-434.

Подана до редакції 08.10.2014