

УДК 539.4

Кондряков Е.А. к.т.н., Панасенко А.В.

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

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ЗАРОЖДЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦАХ ШАРПИ И ОБРАЗЦАХ С БОКОВЫМИ НАДРЕЗАМИ

Kondryakov E., Panasenko A.

G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

kondryakov@ipp.kiev.ua

NUMERICAL DETERMINATION OF CRACK INITIATION MOMENT IN CHARPY SPECIMENS AND SIDE-GROOVED SPECIMENS

Было проведено численное моделирование ударных испытаний стандартных образцов Шарпи и образцов с боковыми надрезами в трехмерной постановке методом конечных элементов с использованием модели повреждаемости материала Гарсона-Твергарда-Нидлмана. Определены моменты зарождения трещины внутри образцов и на их боковой поверхности. Проведено численное моделирование распространения трещины при различных механизмах разрушения (хрупкое, квази-хрупкое, вязкое), соответствующих различным температурам испытаний. Проведен анализ влияния боковых утяжек на кинетику распространения трещины в образцах.

Ключевые слова: образец Шарпи; образец с боковыми надрезами; метод конечных элементов; модель повреждаемости материала Гарсона-Твергарда-Нидлмана, момент зарождения трещины, механизм разрушения.

Введение

В настоящее время в атомной энергетике используются различные методики оценки радиационного охрупчивания металла корпусов реакторов АЭС, что приводит к большому разбросу результатов. Это в значительной степени связано с ограниченным количеством результатов испытаний образцов-свидетелей (ОС), что в свою очередь не позволяет разработать единую методику обработки результатов обработки и интерпретации таких результатов. В связи с этим очень важным является повышение информативности испытаний ОС за счет использования современных экспериментальных методик, а также развитие численных методов.

В качестве ОС в атомной энергетике используются образцы Шарпи, поэтому повышенное внимание уделяется развитию и совершенствованию численных и экспериментальных методов ударных испытаний образцов такого типа. По результатам таких испытаний кроме ударной вязкости могут быть определены характеристики трещиностойкости материала [1-2]. При этом необходимо знать момент зарождения трещины. Обычно предполагается, что зарождение трещины происходит при $P=P_{max}$ на диаграмме $P(t)$ [3]. Однако в работах Шауди [4], считается, что момент зарождения трещины наступает значительно раньше.

В работе [5] описана методика экспериментального определения момента зарождения трещины в стандартных образцах Шарпи и образцах с боковыми надрезами. Данная методика является достаточно трудоемкой. Использование возможностей современной вычислительной техники и новых методик расчета позволяет получить значительно больше информации о процессах зарождения и распространения трещины в образце Шарпи. В последнее время широко используются локальные критерии разрушения материала. Одной из наиболее известных на сегодняшний день является модель повреждаемости материала Гарсона-Твергарда-Нидлмана (GTN) [6-7].

В данной работе было проведено численное моделирование ударных испытаний стандартных образцов Шарпи и образцов с боковыми выточками в 3D постановке с использованием модели повреждаемости материала GTN. Определены моменты зарождения трещины при различных видах разрушения.

Цель. Основной задачей данной работы является расчетное определение момента зарождения трещины в стандартном образце Шарпи и образце с боковыми надрезами.

Схематизация задачи

Численное моделирование проводилось методом конечных элементов с использованием программного комплекса ABAQUS. В работе [8] было показано, что вид напряженного состояния влияет на кинетику НДС в

вершине трещины и на скорость её распространения в материале образца, поэтому в данной работе численное моделирование проводилось в трехмерной постановке.

На рис. 1 показаны геометрические размеры стандартного образца Шарпи и образца с боковыми надрезами. Использование образцов с боковыми надрезами позволяет исключить влияние боковых утяжек и, таким образом, более точно определять момент зарождения трещины. Фрагменты конечно-элементного разбиения образцов показаны на рис. 2.

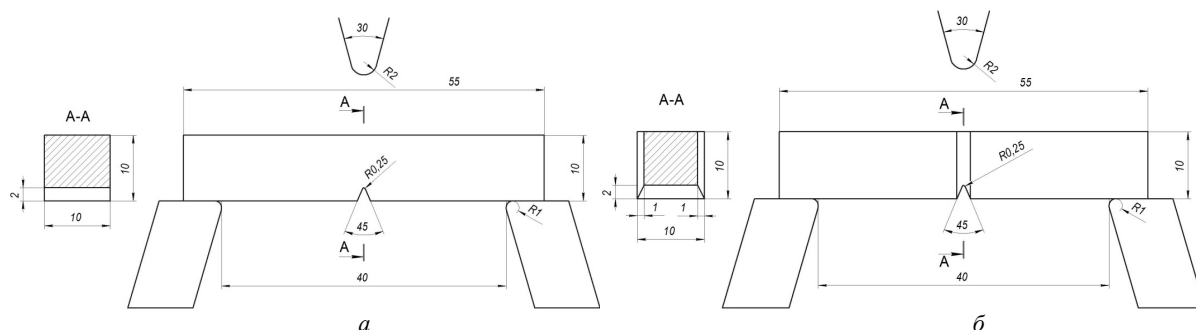


Рис. 1. Геометрические размеры стандартного образца Шарпи а) и образца с боковыми выточками б)

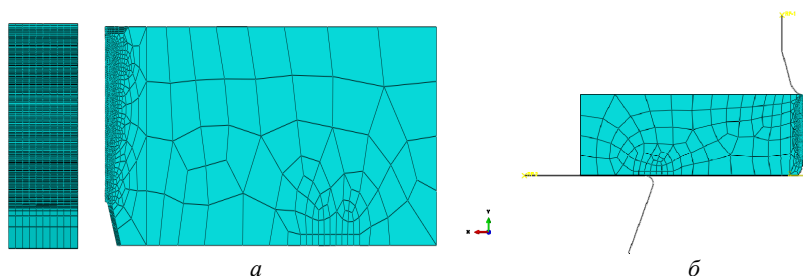


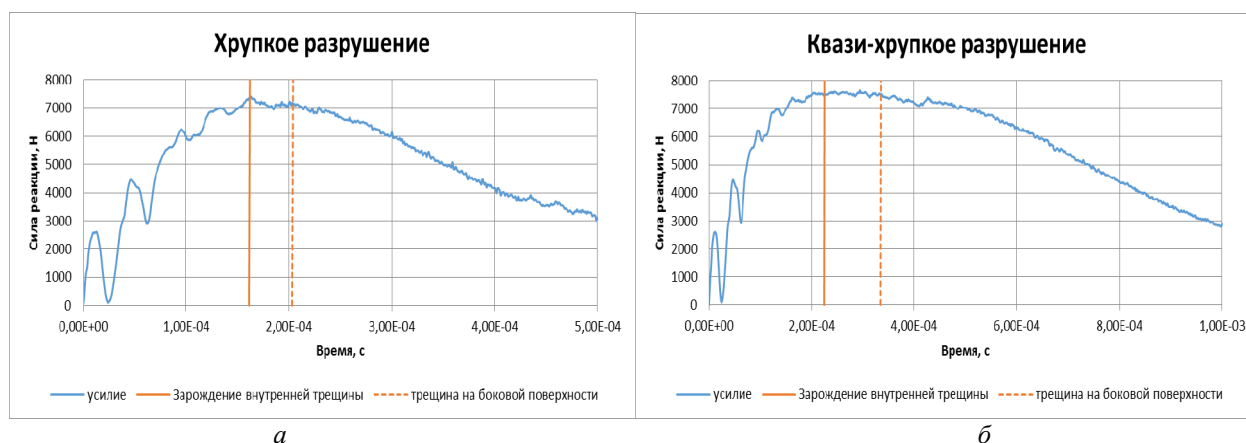
Рис. 2. Конечноэлементные модели стандартного образца Шарпи а) и образца с боковыми выточками б)

При расчетах использовались те же начальные и граничные условия, что и в работе [8]. Истинная диаграмма деформирования стали 15Х2НМФА, используемой в качестве материала образца, была получена из испытаний гладких образцов на одноосное растяжение. Для моделирования разных видов разрушения, соответствующих различным температурам испытаний (хрупкое, квази-хрупкое, вязкое), использовались значения коэффициентов модели GTN, определенные в [8].

Анализ результатов

Полученные в работе [5] результаты испытаний показали, что зарождение трещины происходит внутри стандартного образца Шарпи раньше, чем на боковой поверхности, вследствие образования боковых утяжек, поэтому экспериментальное определение точного момента срагивания трещины затруднительно.

По результатам численного моделирования ударных испытаний стандартных образцов Шарпи для трех типов разрушения были отдельно определены моменты зарождения трещины внутри образца (в плоскости симметрии) и на боковой поверхности. Результаты показаны на рис. 3.





б

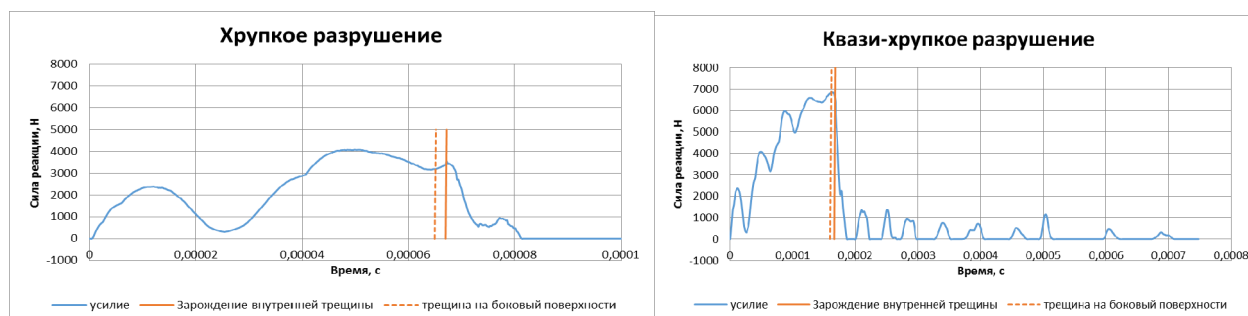
Рис. 3. Моменти зародження тріщини в стандартних образцах Шарпи на диаграммах усилие-время для случаев: а) – хрупкого разрушения, б) – квази-хрупкого разрушения, в) вязкого разрушения

Полученные результаты показывают, что зарождение трещины внутри образца происходит значительно раньше, чем на боковой поверхности. Соответственно, усилие на диаграмме $P(t)$ в момент зарождения трещины внутри образца меньше, чем P_{max} . На рис. 4 показаны аналогичные результаты, полученные для образца с боковыми надрезами.

Полученные результаты показали, что для образца с надрезом и без него, интервал времени между зарождением трещины внутри образца и на боковой грани существенно отличаются. Для образцов с надрезом этот интервал значительно меньше. Таким образом, исключается влияние утяжки боковой кромки. Трещина растет более равномерно по толщине образца и появляется возможность более точно определить скорость ее распространения, что затруднительно в случае её неравномерного подрастания.

На рис. 5 показана разница между моментами зарождения трещины внутри образца и её выходом на боковую поверхность для стандартных образцов Шарпи и образцов с боковыми надрезами при различных типах разрушения. Видно, что при вязком разрушении эта разница намного больше, чем при хрупком разрушении, что напрямую связано с величиной «губ среза».

Анализ кинетики распространения трещины показал, что в стандартных образцах Шарпи трещина зарождается внутри образца, а на боковой поверхности образуются «губы среза». В образцах с боковыми надрезами фронт трещины более равномерный и деформация на боковых гранях значительно меньше.



а

б



в

Рис. 4. Моменты зарождения трещины в образцах с боковыми надрезами на диаграммах усилие-время для случаев: а) – хрупкого разрушения, б) – квази-хрупкого разрушения, в) вязкого разрушения



Рис. 5. Разница по времени между моментами зарождения трещины внутри образца и на боковой поверхности для стандартных образцов Шарпи и образцов с боковыми надрезами

Выводы

- Проведено численное моделирование ударных испытаний стандартных образцов Шарпи и образцов с боковыми надрезами из стали 15Х2НМФА в 3D постановке с использованием модели повреждаемости материала GTN.
- Определены моменты зарождения трещины в стандартных образцах Шарпи и в образцах с боковыми надрезами
- Показано, что образование боковых утяжек влияет на момент страгивания трещины

Таким образом, в стандартных образцах Шарпи зарождение трещины происходит внутри образца значительно раньше, чем на боковой поверхности, особенно при вязком разрушении, что связано с образованием боковых утяжек. Для более точного определения момента зарождения трещины целесообразно использовать образцы с боковыми надрезами, в которых фронт распространения трещины более равномерный и исключается влияние «губ среза».

Анотація. Було проведено чисельне моделювання ударних випробувань зразків Шарпі та зразків з бічними надрізами у тривимірній постановці методом скінченних елементів з використанням моделі пошкоджуваності матеріалу Гарсона-Твергарда-Нідлмана (GTN). Визначено моменти зародження тріщини всередині зразка та на їх бічній поверхні. Проведено чисельне моделювання розповсюдження тріщини при різних механізмах руйнування (крихке, квазі-крихке, в'язке) що відповідають різним температурам випробування. Проведено аналіз впливу бічних витяжок на кінетику розповсюдження тріщини у зразках.

Ключові слова: зразок Шарпі, зразок з бічними надрізами, метод скінченних елементів, модель пошкоджуваності Гарсона-Твергарда-Нідлмана, момент ініціації тріщини, механізм руйнування.

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. Local approach to fracture allows to obtain crack initiation point data inside the specimen and on an edge side of the specimen. Using variable parameters of GTN model one can simulate crack initiation and propagation under different fracture mechanism. Present work describes an estimation of the crack initiation point under brittle, ductile, quasi-brittle fracture mechanisms using GTN model.

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, edge notch specimen, finite element method, Gurson–Tvergaard–Needleman damage material model, crack initiation point, fracture mechanism.

Библиографический список использованной литературы

1. *ASTM E1820-01 Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*. In: Annual Book of ASTM Standards.
2. *Proposed standard methods for instrumented pre-cracked Charpy impact testing of steels and other metallic materials // ESIS Procedure P7-00, Draft 25.4: December 2005.*
3. *Schindler H.J.* Estimation of the dynamic J-R-curve from a single impact bending test / Schindler H.J. // 11th European Conf. on Fracture, 3-6 September 1996. - Poitiers, France, 1996. - P. 2007-2012.
4. *Chaouadi R.* Crack resistance determination from the Charpy impact test / Chaouadi R., Puzzolante J.L. // 16th European Conference of Fracture, 3-7 July 2006. - Alexandroupolis, Greece, 2006. – 13 p.
5. *В. В. Харченко, С. О. Кондряков, А.В. Панасенко* Визначення моменту зародження тріщини в зразках Шарпі при ударному навантаженні // Ж-л «Вісник тернопільського національного технічного університету». - ISSN 1727-7108 ТНТ Університет імені Івана Пулюя. - № 3(71), 2013. - с.16-21.
6. *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.
7. *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.
8. *Кондряков Е.А.* Численное моделирование ударных испытаний образцов шарпи в двухмерной и трехмерной постановке // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. - №2(71), 2014. – с. 110-113.

References

1. *ASTM E1820-01 Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*. In: Annual Book of ASTM Standards.
2. *Proposed standard methods for instrumented pre-cracked Charpy impact testing of steels and other metallic materials*. ESIS Procedure P7-00, Draft 25.4: December 2005.
3. *Schindler H.J.* Estimation of the dynamic J-R-curve from a single impact bending test. Schindler H.J. 11th European Conf. on Fracture, 3-6 September 1996. Poitiers, France, 1996. P. 2007-2012.
4. *Chaouadi R.* Crack resistance determination from the Charpy impact test. Chaouadi R., Puzzolante J.L. 16th European Conference of Fracture, 3-7 July 2006. Alexandroupolis, Greece, 2006. 13 p.
5. *V.V. Kharchenko, E.A. Kondryakov, A.V. Panasenko* Vznachennya momenty zarozhennya trishyny v zrazkah Sharpy pry udarnomu navantazhenny (Determination of crack initiation moment in Charpy specimens under impact loading). Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. ISSN 1727-7108 Ternopil Ivan Puluj National Technical University no 3(71), 2013. P.16-21.
6. *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, no 1. P. 2–15.
7. *Tvergaard V., Needleman A.* Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. Acta Metall. 1984. Vol. 32, no 1. P. 157–169.
8. *E.A. Kondryakov* Chislennoe modelirovanie udarnykh ispytaniy obrazcov Sharpy v dvumernoy i trehmernoy postanovke (Numerical simulation of charpy specimens impact tests in the two-dimensional and three-dimensional formulation). Journal of mechanical engineering ntuu «Kyiv Polytechnic Institute», no 2(71), 2014. P. 110-113.

Подана до редакції 27.02.2015