

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРАЕВОГО ЭФФЕКТА ПРИ ОЦЕНКЕ ЖЕСТКОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ

Прокопьев Л.А., Семенов С.О., Максимова Е.М.

*Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук,
Якутск*

Ключевые слова: жесткость напряженного состояния, коэффициент триаксиальности, плоское напряженное состояние, Т-напряжения, зона пластичности, вершина трещины.

Аннотация. Показано, что классические двухпараметрические подходы механики разрушения могут быть дополнены анализом коэффициента жесткости, распределенного вдоль фронта трещины. Предложен вывод аналитических соотношений, связывающих коэффициент жесткости с Т-напряжениями и радиусом зоны пластичности для условий плоского напряженного и плоского деформированного состояний. Рассмотрено влияние краевого эффекта: у свободной поверхности, где реализуется плоское напряженное состояние и одна из компонент тензора напряжений обращается в нуль, жесткость напряженного состояния существенно снижается. Это создает условия для развития пластического течения в приповерхностных слоях. Разработанный подход позволяет объяснить природу масштабного эффекта и может быть использован при оценке хладостойкости тонкостенных конструкций.

MATHEMATICAL MODELING OF THE EDGE EFFECT IN ASSESSING THE STRESS TRIAXIALITY AT THE CRACK TIP

Prokopyev L.A., Semenov S.O., Maksimova E.M.

*The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk*

Keywords: stress triaxiality, plane stress, T-stresses, plastic zone, crack tip.

Abstract. It is shown that classical two-parameter approaches of fracture mechanics can be supplemented by an analysis of the stress triaxiality parameter distributed along the crack front. Analytical relationships are derived that connect the triaxiality coefficient with T-stresses and the radius of the plastic zone for plane stress and plane strain conditions. The influence of the edge effect is considered: near the free surface, where a plane stress state occurs and one of the components of the stress tensor vanishes, the stress triaxiality significantly decreases. This creates conditions for the development of plastic flow in the near-surface layers. The developed approach allows explaining the nature of the scale effect and can be used in assessing the cold resistance of thin-walled structures.

Введение. В инженерной практике оценки надежности конструкций часто используются однопараметрические критерии разрушения. Однако, напряженное состояние у вершины трещины характеризуется не только интенсивностью напряжений, но и степенью стеснения деформации, которая описывается параметрами жесткости напряженного состояния. Вблизи свободной поверхности образца условия нагружения переходят от объемного напряженного состояния к плоскому. В этой области одна из компонент напряжений становится равной нулю, что существенно влияет на способность материала к пластической деформации. В центральных сечениях массивных тел реализуются условия плоской деформации с высоким уровнем гидростатического растяжения и повышенной склонностью к

хрупкому разрушению. По мере приближения к свободной поверхности напряженное состояние переходит в плоское напряженное состояние. Это приводит к снижению жесткости напряженного состояния, что выражается в уменьшении отношения среднего нормального напряжения к интенсивности напряжений. Данный краевой эффект существенно влияет на результаты испытаний материалов, особенно при оценке ударной вязкости и хладостойкости [1]. Целью настоящей работы является разработка математической модели, позволяющей оценить влияние краевого эффекта на распределение коэффициента триаксиальности напряженного состояния вдоль фронта трещины.

Теоретические основы моделирования. Для описания жесткости напряженного состояния применяется коэффициент триаксиальности η , представляющий собой отношение суммы главных напряжений к интенсивности напряжений [2, 3]. В механике разрушения поля напряжений у вершины трещины описываются асимптотическими разложениями, включающими сингулярную составляющую с коэффициентом интенсивности напряжений K и несингулярное Т-напряжение. Для трещины нормального отрыва на линии продолжения трещины выражения для напряжений упрощаются: касательные напряжения отсутствуют, и компоненты σ_x и σ_y совпадают с главными напряжениями. Третье главное напряжение σ_2 для плоского напряженного состояния равно нулю, для плоской деформации выражается через σ_x и σ_y [1-3]. Подстановка этих выражений в формулу для коэффициента триаксиальности позволяет получить аналитические зависимости. Оценка производится на границе зоны пластичности, размер которой зависит от коэффициента интенсивности напряжений и предела текучести. Полученные выражения показывают, что коэффициент триаксиальности может быть рассчитан для любой точки вдоль фронта трещины.

Анализ краевого эффекта

Для реализации предложенного подхода разработана программа, выполняющая численное моделирование продвижения фронта трещины и вычисляющая распределение коэффициента триаксиальности в сечении образца с использованием параметров механики разрушения. Расчеты выполнены для образцов на трехточечный изгиб толщиной 4 мм и 8 мм при идентичных условиях нагружения. На рисунке 1 представлены поля распределения коэффициента триаксиальности в сечении образцов, полученные в результате моделирования.

В центральной части образца коэффициент η соответствует высокой степени стеснения, а в приповерхностном слое его величина снижается до уровня, характерного для плоского напряженного состояния. В этой области облегчаются условия для пластического течения, что способствует вязкому разрушению даже при общей склонности материала к хрупкому разрушению. Для тонких образцов разрушение быстро переходит в вязкий режим, несмотря на низкие значения температуры.

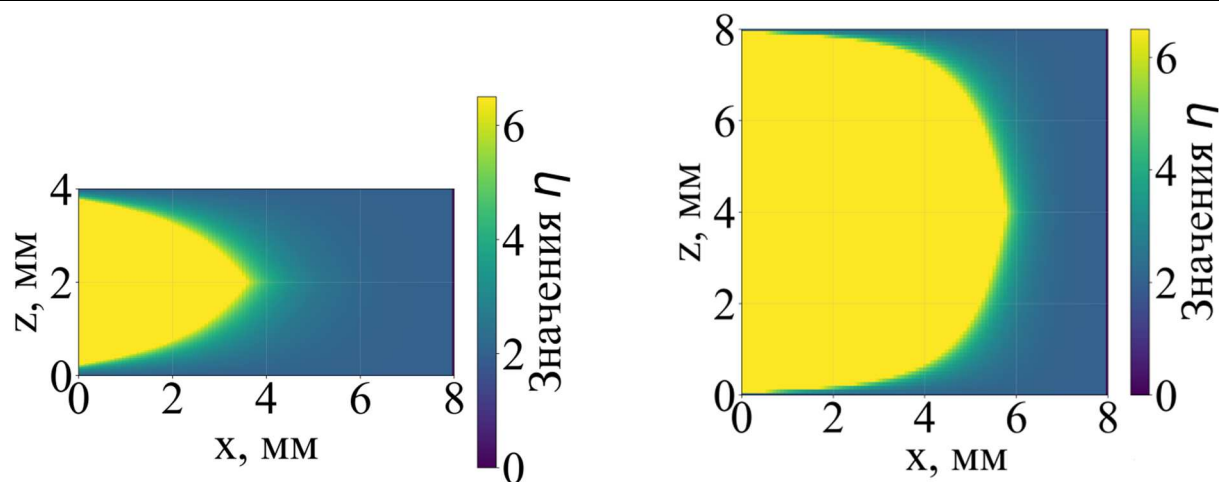


Рис. 1. Результаты численного моделирования коэффициента триаксальности в окрестности вершины трещины для тонкого (4 мм – слева) и толстого (8 мм – справа) образцов

Заключение. Разработана математическая модель, описывающая распределение коэффициента триаксальности вдоль фронта трещины. У свободной поверхности образца жесткость существенно снижается, создавая предпосылки для пластического течения в приповерхностных слоях. Подход может использоваться при расчетах тонкостенных конструкций и оценке влияния масштабного фактора на характер разрушения.

Список литературы

1. Wang P., Hao W., Xie J., He F., Wang F., Huo C. Stress triaxial constraint and fracture toughness properties of x90 pipeline steel // *Metals*. 2022, vol. 12, p. 72.
2. Sartor T., Silva J., Guan Zh., Santiago R. Influence of stress triaxiality on the fracture behaviour of Ti6Al4V alloy manufactured by electron beam melting // *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2022, vol. 19(8), pp. 1-19.
3. Букатый А.С., Букатый С.А. Расчёты деталей на прочность с учётом жёсткости напряжённого состояния // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. – 2022. – Т. 21, №1. – С. 34-41.

Сведения об авторах:

Прокопьев Леонид Александрович – научный сотрудник;

Семенов Семен Осипович – младший научный сотрудник;

Максимова Екатерина Михайловна – научный сотрудник.