

ВЛИЯНИЕ Т-НАПРЯЖЕНИЙ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРИАКСИАЛЬНОСТИ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ

Прокопьев Л.А., Андреев Я.М.

Якутский научный центр СО РАН, Якутск.

Ключевые слова: коэффициент триаксальности, Т-напряжения, эквивалентные напряжения, гидростатическое напряжение, компоненты напряжений, трещина.

Аннотация. В работе исследовано влияние Т-напряжений на коэффициент триаксальности напряженного состояния в окрестности вершины трещины. Показано, что при $T = 0$ коэффициент триаксальности остается постоянным вдоль линии продолжения трещины, что свидетельствует о самоподобии поля напряжений. Положительные Т-напряжения существенно повышают триаксальность, способствуя хрупкому разрушению, тогда как отрицательные Т-напряжения снижают триаксальность и повышают пластичность материала.

THE INFLUENCE OF T-STRESSES ON THE TRIAXIALITY COEFFICIENT AT THE CRACK TIP

Prokopyev L.A., Andreev Ya.M.

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

Keywords: triaxiality coefficient, T-stresses, equivalent stresses, hydrostatic stress, stress components, crack.

Abstract. This article investigates the influence of T-stresses on the triaxiality coefficient of the stress state at the crack tip. It is shown that at $T = 0$, the triaxiality coefficient remains constant along the crack extension line, indicating self-similarity of the stress field. Positive T-stresses significantly increase triaxiality, promoting brittle fracture, while negative T-stresses decrease triaxiality and increase the ductility of the material.

Введение

Асимптотическое поле напряжений вблизи вершины трещины в линейно-упругой механике разрушения описывается решениями Уильямса в виде ряда, который включает как сингулярные члены, соответствующие коэффициентам интенсивности напряжений K_1 , так и несингулярные составляющие – Т-напряжения (T_x), действующие параллельно плоскости трещины [1]:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + T_x, \\ \sigma_y = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right), \\ \tau_{xy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}, \end{cases} \quad (1)$$

где σ_x , σ_y , τ_{xy} – компоненты напряжений; r , θ – полярные координаты.

Коэффициент триаксальности η , определяемый как отношение гидростатического напряжения σ_m к эквивалентному напряжению по Мизесу $\sigma_{э\kappa\text{в}}$,

является ключевым параметром, определяющим склонность материала к хрупкому разрушению. Высокие значения η способствуют зарождению пор и хрупкому разрушению, тогда как низкие значения благоприятствуют пластическому течению [1-3]:

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{\text{экв}}} = \frac{\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}}{\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}}}, \quad (2)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные компоненты напряжений.

Целью настоящей работы является анализ влияния Т-напряжений на коэффициент триаксиальности в окрестности вершины трещины.

Методика исследования

Исследование проводилось численными методами с использованием специализированного программного обеспечения. Рассматривались следующие параметры: Коэффициент интенсивности напряжений: $KI = 45 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; коэффициент Пуассона: $\nu = 0.3$; Т-напряжения: $T = -100, 0, +100 \text{ МПа}$ (рис. 1, 2); угол от плоскости трещины: $\theta = 0^\circ$; диапазон расстояний: $r = 0,001\text{-}0,1 \text{ м}$.

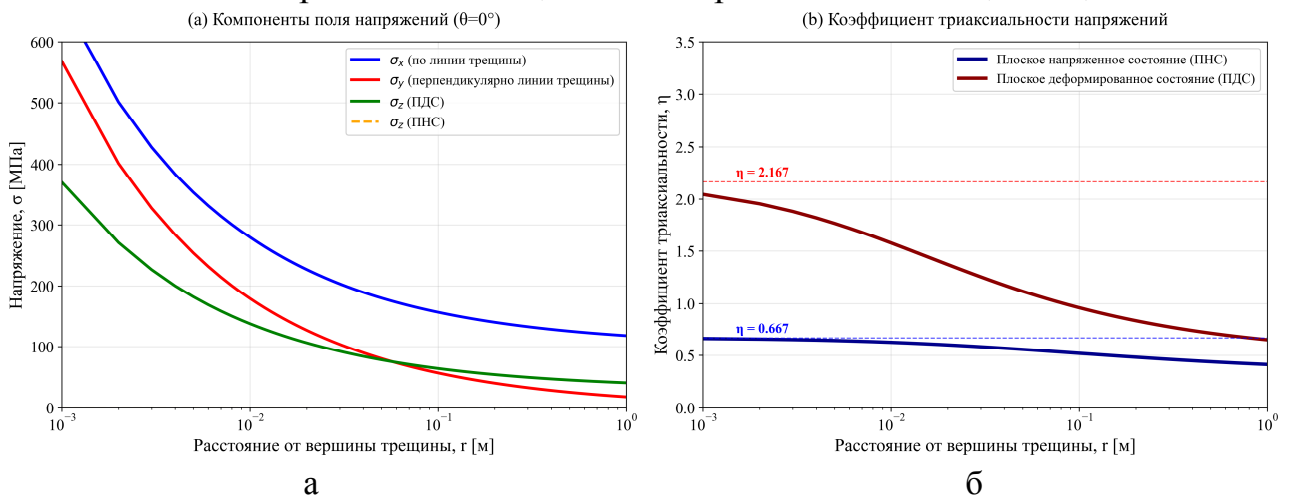


Рис. 1. Распределение компонент поля напряжений (а) и коэффициента триаксиальности напряжений (б) от расстояния от вершины трещины при $T = 100 \text{ МПа}$

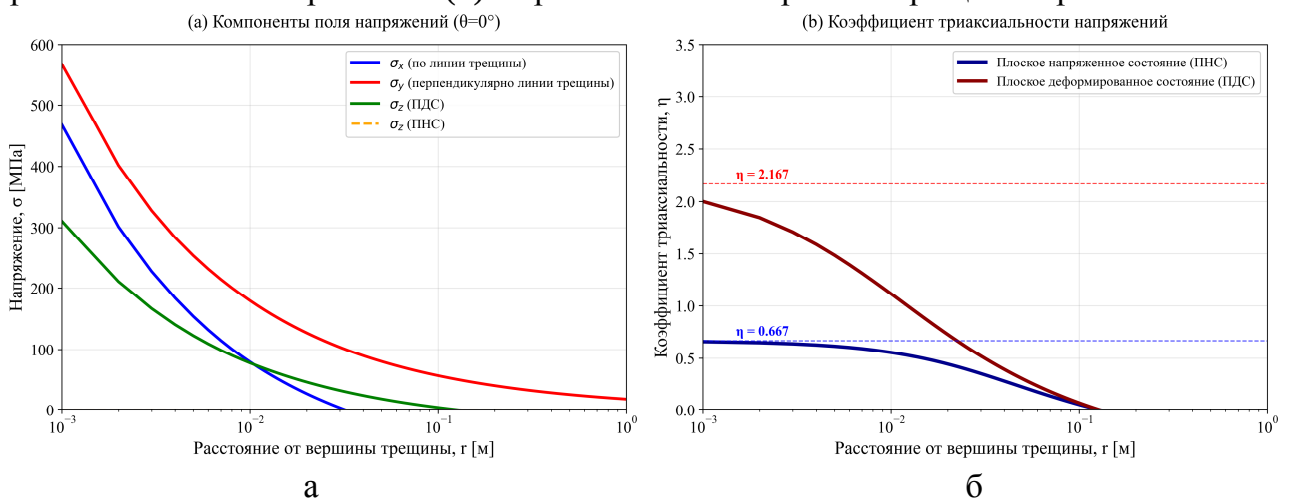


Рис. 2. Распределение компонент поля напряжений (а) и коэффициента триаксиальности напряжений (б) от расстояния от вершины трещины при $T = -100 \text{ МПа}$

Результаты и обсуждение

При $T = 0$ обнаружено следующее свойство поля напряжений (рис. 3) у вершины трещины – коэффициент триаксальности остается постоянным вдоль линии продолжения трещины ($\theta = 0$).

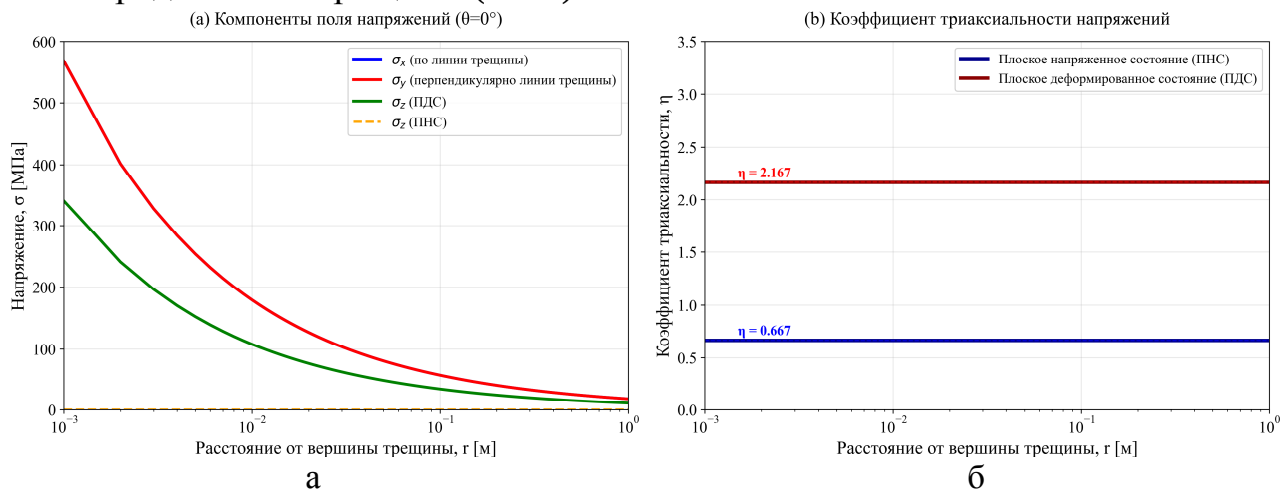


Рис. 3. Распределение компонент поля напряжений (а) и коэффициента триаксальности напряжений (б) от расстояния от вершины трещины при $T = 0$ МПа

Этот результат имеет следующий физический смысл: при $T = 0$ поле напряжений является самоподобным. Все компоненты напряжений пропорциональны $K_I/\sqrt{(2\pi r)}$, поэтому их отношение (коэффициент триаксальности) не зависит от расстояния r (рис. 3).

Выводы

При значениях Т-напряжений, равных нулю, поле напряжений самоподобно, коэффициент триаксальности остается постоянным вдоль линии продолжения трещины (рис. 3). Отклонение Т-напряжений от нуля снижает значение коэффициента триаксальности, что, соответственно снижает склонность материала к хрупкому разрушению. Влияние Т-напряжений более выражено в плоском деформированном состоянии при отрицательных значениях Т-напряжений.

Список литературы

1. Kazutake Komori. Chapter 2 – Macroscopic ductile fracture criteria // Ductile Fracture in Metal Forming. Modeling and Simulation. 2020, p. 49-94. doi.org/10.1016/B978-0-12-814772-6.00002-3.
2. A. Amine Benzerga, Jean-Baptiste Leblond. Ductile Fracture by Void Growth to Coalescence // Advances in Applied Mechanics. 2010, vol. 44, pp. 169-305. doi.org/10.1016/S0065-2156(10)44003-X.
3. Shrivastava, Suresh & Ghosh, Chiradeep & Jonas, John. A comparison of the von Mises and Hencky equivalent strains for use in simple shear experiments // Philosophical Magazine. 2011, vol. 92, pp. 779-786. doi.org/10.1080/14786435.2011.634848.

Сведения об авторах:

Прокопьев Леонид Александрович – научный сотрудник;

Андреев Яков Михайлович – к.т.н., старший научный сотрудник.