

ПРИМЕНЯЕМОСТЬ ВЕКТОРА ПОТОКА ЭНЕРГИИ В МЕХАНИКЕ РАЗРУШЕНИЯ

APPLICABILITY OF ENERGY FLOW VECTOR IN THE MECHANICS OF DESTRUCTION

А. К. Гумеров

Aidar K. Gumerov

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

А. Г. Гумеров

Asgat G. Gumerov

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

А. Р. Хасанова

Aigul R. Khasanova

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

А. М. Шаммазов

Airat M. Shammazov

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

При исследовании трещиностойкости элементов сварных конструкций часто применяют энергетический критерий разрушения. Энергетический критерий с успехом применяется к трещинам, распространяющимся без излома, но когда трещина страгивается под некоторым углом к своему первоначальному направлению, применение этого критерия сдерживается отсутствием достаточно простого метода для вычисления интенсивности высвобождаемой энергии упругих деформаций. Г.П. Черепанов и другие исследователи предлагают вычислять ее, используя понятие вектора потока энергии. Предлагаемое допущение позволяет правильно вычислить величины его проекции, но фактически после «излома» трещины резко изменяется вид поля напряжений в окрестности вершины, что выражается в изменении коэффициентов интенсивности напряжений. В результате полученные выводы удовлетворительно согласуются с экспериментом и другими критериями разрушения только при небольших значениях. В приведенном в статье примере показывается, что интенсивность высвобождаемой энергии не обладает векторным свойством. Поэтому в общем случае нельзя пользоваться понятием вектора потока энергии.

When studying the crack resistance of elements of welded structures, the energy criterion of failure is often used. The energy criterion is successfully applied to cracks propagating without a break, but when a crack strains at an angle to its original direction, the application of this criterion is constrained by the absence of a sufficiently simple method for calculating the intensity of the released energy of elastic deformations. G.P. Cherepanov and other researchers propose to calculate it using the concept of the energy flux vector. The proposed assumption allows to correctly calculate the values of its projection, but in fact, after the «fracture» of the crack, the form of the stress field in the vicinity of the peak

Ключевые слова

вихревой газосепаратор;
коэффициент сепарации;
оптимизация;
безразмерный параметр

Key words

vortex gas separator;
separation coefficient;
optimization;
dimensionless parameter

sharply changes, which is expressed in a change in the stress intensity factors. As a result, the conclusions obtained are in satisfactory agreement with experiment and other fracture criteria only at small values. The example in the article shows that the intensity of the released energy does not have a vector property. Therefore, in the general case, one cannot use the concept of the energy flux vector.

Введение

При исследовании трещиностойкости элементов сварных конструкций часто применяют энергетический критерий разрушения. Считается, что страгивание трещины происходит в том случае, если интенсивность высвобождаемой энергии упругих деформаций G не меньше энергии разрушения данного материала G_{lc} :

$$G \geq G_{lc}.$$

Эта величина связана с вязкостью разрушения следующим образом:

$$G_{lc} = K_{lc}^2(1-\nu^2)/E.$$

Энергетический критерий с успехом применяется к трещинам, распространяющимся без излома. Когда трещина страгивается под некоторым углом к своему первоначальному направлению, применение этого критерия сдерживается отсутствием достаточно простого метода для вычисления G .

Г.П. Черепанов [1] и другие исследователи [2, 3] предлагают вычислять G , используя понятие вектора потока энергии Γ_θ . По замыслу авторов, интенсивность высвобождаемой энергии $G(\theta)$ при движении трещины в направлении θ равна проекции вектора Γ_θ на это направление:

$$G(\theta) = \Gamma_\theta \cos \theta. \tag{1}$$

Вектор Γ_θ определяют по следующему алгоритму. Продвигая вершину трещины в направлениях x и y , вычисляют соответствующие интенсивности высвобождаемой энергии $G(0)$ и $G(\pi/2)$ как проекции этого вектора на оси координат:

$$\begin{aligned} \Gamma_x = G(0) &= -\frac{1-\nu^2}{E}(K_I^2 + K_{II}^2), \\ \Gamma_y = G(\pi/2) &= 2K_I K_{II} \frac{1-\nu^2}{E}, \end{aligned} \tag{2}$$

$$\Gamma = \sqrt{\Gamma_x^2 + \Gamma_y^2}, \quad \Theta_\Gamma = \arcsin(\Gamma_y / \Gamma).$$

При вычислении значений Γ_x и Γ_y полагают, что бесконечно малое движение трещины в любом направлении несущественно изменяет поле напряжений вокруг ее вершины. Поэтому коэффициенты K_I и K_{II} оставляют неизменными. Такое допущение позволяет правильно вычислить величины Γ_x ,

но фактически после «излома» трещины, т.е. при движении ее в направлении y , резко изменяется вид поля напряжений в окрестности вершины, что выражается в изменении K_I и K_{II} . В результате полученные выводы удовлетворительно согласуются с экспериментом и другими критериями разрушения только при небольших значениях $\xi = K_{II} / K_I$. При $\xi \rightarrow \infty$ результаты, видимо, принципиально не верны.

В подтверждение сказанного рассмотрим случай поперечного сдвига ($K_I = 0, K_{II} \neq 0$). Из выражения (2) следует, что при $K_I = 0$ проекция $\Gamma_y = 0$, т.е. при продвижении трещины в направлении y энергия не высвобождается. Фактически при таком движении трещины энергия не может не высвободиться (рисунок 1, б). Это видно из распределения напряжений σ_θ по оси y ($\Theta = \pi/2$):

$$\sigma_\theta = \sigma_x = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\Theta}{2} (2 - \cos \frac{\Theta}{2} \cos \frac{3\Theta}{2}) \approx 1.06 \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \neq 0.$$

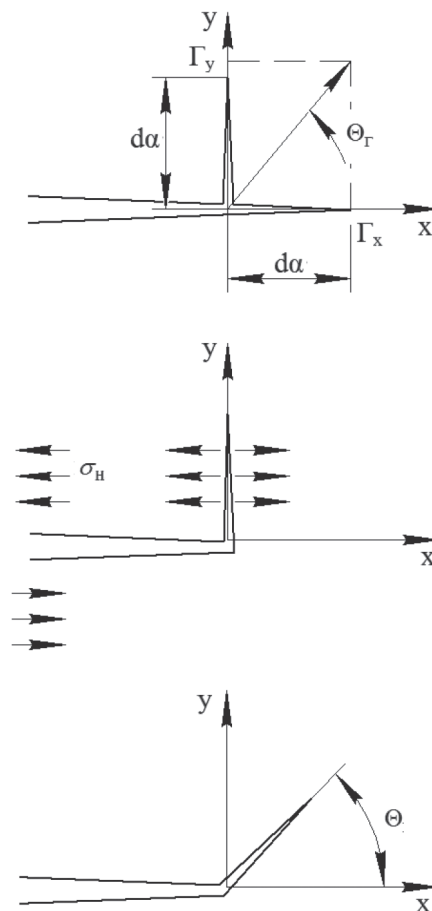


Рисунок 1. Проекция вектора потока энергии

Напряжения σ_Θ раскрывают растущую трещину: при движении трещины напряжения σ_Θ обязательно совершают работу, на что идет часть накопленной энергии упругого деформированного тела (энергия высвобождается). Следовательно, $G_y = G(\pi/2) \neq 0$.

Таким образом, выражение (2) нельзя считать правильным. Найти точную аналитическую зависимость G_y от K_I и K_{II} не позволяют трудности математического характера. Однако если бы даже удалось найти правильное выражение для G_y , по нему нельзя было бы найти вектор G_Θ , удовлетворяющий условию (1). Покажем это на втором примере.

Пусть в окрестности трещины напряженное состояние соответствует нормальному отрыву ($K_I \neq 0, K_{II} = 0$). Продвинем трещину по оси y ($\Theta = \pi/2$). В этом направлении

$$\sigma_\Theta = \sigma_x = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\Theta}{2} \left(2 - \cos \frac{\Theta}{2} \cos \frac{3\Theta}{2} \right) \cong 0.35 \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \neq 0.$$

Эти напряжения совершают работу при продвижении трещины. Следовательно, $G_y = G(\pi/2) > 0$. Пусть теперь трещина движется обратно оси y $\Theta = -\pi/2$. В этом направлении значения σ_Θ такие же, как и на положительной полуоси y . Следовательно, при движении трещины в обратном направлении высвобождается столько же энергии, сколько и в прямом направлении:

$$G(-\pi/2) = G(\pi/2).$$

Это естественно, так как поля напряжений и деформаций симметричны относительно оси x . Чтобы удовлетворить последнему равенству, вектор G должен обладать одинаковыми положительными проекциями в двух противоположных направлениях: $\Theta = -\pi/2$ и

$\Theta = \pi/2$. Такому требованию не может удовлетворить ни один вектор.

Данный пример показывает, что интенсивность высвобождаемой энергии не обладает векторным свойством, т.е. не всегда удовлетворяет требованию (1). Поэтому в общем случае при вычислении величины G нельзя пользоваться понятием вектора потока энергии [4, 5].

Зависимость $G(\theta)$ можно определить методом податливости, непосредственно измеряя высвобождаемую энергию при продвижении трещины (пропила) в различных направлениях Θ от оси x (рисунок 1, в). Для расчетной оценки зависимости $G(\theta)$ необходимо решить задачу о перемещении берегов вновь образуемой трещины длиной da в произвольном направлении при известных заданных коэффициентах интенсивности напряжений K_I и K_{II} в окрестности первоначальной трещины. Умножив эти перемещения на напряжения σ_Θ и $\tau_{\Theta\Theta}$, соответствующие начальной трещине и взятые в направлении продвижения трещины Θ , можно рассчитать совершенную работу (т.е. высвобожденную энергию). Если эти исследования не удастся выполнить с достаточной точностью, то лучше применить другой критерий механики разрушения, например критерий обобщенно нормального разрыва.

Вывод

Полученные выводы удовлетворительно согласуются с экспериментом и другими критериями разрушения только при небольших значениях. В приведенном примере показано, что интенсивность высвобождаемой энергии не обладает векторным свойством. Поэтому в общем случае нельзя пользоваться понятием вектора потока энергии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
2. Брок Д. Основы механики разрушения. М.: Высшая школа, 1980. 368 с.
3. Морозов Н.Ф. Математические вопросы теории трещин. М.: Наука, 1984. 256 с.
4. Сунагатов М.Ф., Гумеров А.К., Хакимов Д.Л. Развитие методов механики разрушения в нефтегазовом комплексе. СПб.: Недра, 2010. 280 с.
5. Зайнуллин Р.С., Гумеров К.М., Герасимов А.В., Кантемиров А.И. Оценка характеристик трещиностойкости элементов трубопроводов с острыми V-образными концентраторами // Нефтегазовое дело. 2015. Т. 13. № 3. С. 136-139.

REFERENCES

1. Cherepanov G.P. *Mekhanika khрупкого razrusheniya* [Mechanics of Brittle Fracture]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 640 p. [in Russian].
2. Broek D. *Osnovy mekhaniki razrusheniya* [Fundamentals of Fracture Mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 368 p. [in Russian].
3. Morozov N.F. *Matematicheskie voprosy teorii treshchin* [Mathematical Questions of Crack Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 256 p. [in Russian].
4. Sunagatov M.F., Gumerov A.K., Khakimov D.L. *Razvitie metodov mekhaniki razrusheniya v neftegazovom komplekse* [Development of Methods of Fracture Mechanics in the Oil and Gas Industry]. Saint-Petersburg, Nedra Publ., 2010. 280 p. [in Russian].

5. Zainullin R.S., Gumerov K.M., Gerasimov A.V., Kantemirov A.I. Otsenka kharakteristik treshchinostoikosti elementov truboprovodov s ostrymi V-obraznymi kontsentratorami [Performance Evaluation of the Fracture

Toughness Elements Pipeline with Acute V-Shaped Concentrator]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2015, Vol. 13, No. 3, pp. 136-139. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Гумеров Айдар Кабирович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Aidar K. Gumerov, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Oil and Gas Transportation and Storage Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: gumerov@list.ru

Хасанова Айгуль Ринатовна, инженер-эколог, УГНТУ, филиал, г. Октябрьский, Российская Федерация

Aigul R. Khasanova, Environmental Engineer, USPTU, Branch, Oktyabrskiy, Russian Federation

Гумеров Асгат Галимьянович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Asgat G. Gumerov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Gas and Oil Pipelines and Storages Facilities Construction and Repair Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: gumerov@anrb.ru

Шаммазов Айрат Мингазович, д-р техн. наук, профессор, президент УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Airat M. Shammazov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, President of USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: ashammazov@mail.ru