

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

УДК 620.179.18:539.42:531.7.08

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ ВДОЛЬ ФРОНТА ТРЕЩИНЫ ПО ДАННЫМ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ¹

© А. С. Чернятин^{2,3}, Ю. Г. Матвиенко³, Р. Lopez-Crespo⁴

Статья поступила 24 февраля 2016 г.

Предложены методика математической обработки и алгоритм численной корректировки экспериментальных полей перемещений на поверхности образца в окрестности вершины трещины, учитывающей смещение тела как жесткого целого при его нагружении, а также фактическое положение вершины трещины. Исходные экспериментальные поля перемещений в окрестности вершины усталостной трещины компактного образца определены с помощью метода корреляции цифровых изображений. На примере компактного образца проиллюстрировано успешное применение данного подхода и показана возможность его расширения с целью получения распределения коэффициентов интенсивности напряжений и несингулярных T -напряжений вдоль фронта пространственной трещины.

Ключевые слова: компактный образец; коэффициент интенсивности напряжений; T -напряжение; экспериментально-численная методика; метод корреляции цифровых изображений; математическая обработка данных; задача минимизации; метод конечных элементов.

Определение сингулярных и несингулярных компонентов поля напряжений в окрестности фронта трещины является основой для применения двухпараметрической механики разрушения [1 – 6]. Параметрами механики разрушения, характеризующими эти компоненты, могут выступать, например, коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) и T -напряжения [7]. Данные параметры могут быть использованы для оценки допустимости безопасных трещиноподобных дефектов и устойчивости рассматриваемой трещины в натурном объекте [8 – 10]. Как правило, оценка параметров двухпараметрической механики разрушения реального технического объекта не может быть выполнена с использованием метода конечных элементов по ряду объективных причин. Среди них, прежде всего, следует отметить отсутствие информации о фактическом состоянии объекта (уровне действующих нагрузок и дополнительных неучтенных факторов), а также об истинной геометрии дефекта, особенно пространственного. Наиболее надежными в таком случае являются экспериментальные и экспериментально-численные методики, основанные на обра-

ботке полей деформационных откликов, получаемых непосредственно на поверхности объекта с помощью таких методов, как электронная цифровая спекл-интерферометрия, корреляция цифровых изображений (КЦИ) и др. [11 – 14]. Однако на данный момент их применение в рамках механики разрушения ограничивается рассмотрением трещин простой конфигурации. Расчет параметров механики разрушения не может быть проведен без предварительного или параллельного определения положения вершины трещины. Кроме того, необходимо учитывать реальные смещения точек, обусловленные не только деформациями в области наблюдения, но и перемещениями объекта. В настоящее время не существует единой экспериментально-численной методики, которая с успехом могла бы быть применена для любых натурных объектов и трещин произвольной конфигурации. При этом если речь идет о пространственных трещиноподобных дефектах, то актуальным становится вопрос определения параметров механики разрушения вдоль фронта трещины, а не только в окрестности вершины трещины на поверхности. Данная работа посвящена разработке универсальной методики оценки параметров двухпараметрической механики разрушения вдоль фронта трещины натурных объектов, основанной лишь на обработке полей перемещений на поверхности объекта.

¹ Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-00383).

² МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия;
e-mail: cas@inbox.ru

³ ИМАШ им. А. А. Благоданова РАН, Москва, Россия.

⁴ University of Malaga, Malaga, Spain.

Предварительный анализ экспериментальных полей перемещений в окрестности вершины трещины

Проанализируем поля перемещений в окрестности вершины усталостной трещины стандартного компактного образца (шириной $W = 50$ мм, толщиной $B = 12$ мм), полученные методом корреляции цифровых изображений [15]. Образец изготовлен из алюминиевого сплава Al 2024 T351, имеющего модуль Юнга $E = 73,4$ ГПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,33$, предел текучести $\sigma_T = 325$ МПа.

Измерение поля перемещений в окрестности вершины трещины различной длины a при действии приложенных нагрузок F показало следующее. На регистрируемых с помощью КЦИ полях тангенциальных перемещений u , v на поверхности образца в окрестности вершины трещины присутствует вклад от смещений образца (линейных и угловых) в его плоскости как жесткого целого. На рис. 1 в качестве примера показаны образец с трещиной длиной $a = 25,5$ мм, к которому приложена сила $F = 4,95$ кН, а также поля перемещений, которые получены с помощью КЦИ при вычитании картины первой экспозиции, зарегистрированной при $F_{\min} = 0,55$ кН, из картины второй экспозиции — при $F_{\max} = 5,5$ кН ($F_{\max} - F_{\min}$ — размах нагрузки при испытаниях на усталость). Начало системы координат, связанной с регистрацией полей перемещений, ориентировочно совпадает с вершиной трещины. Величины $u(0,0) < 0$ мм $v(0,0) < 0$ (см. рис. 1, позиции I) свидетельствуют о смещении образца как жесткого целого в процессе нагружения. Следует отметить, что в точках $y = 0$ перемещение v должно отсутствовать, а поле u — быть симметричным относительно оси x (см. рис. 1, позиции II). Однако из рис. 1 видно, что $v(x, 0) > v(x + dx, 0)$, а $u(x, -y) < u(x, y)$, что свидетельствует о повороте образца относительно оси z (в данном случае по часовой стрелке). Анализ результатов экспериментов при других величинах a и F подтверждает наличие сдвига и поворота образца как жесткого целого в процессе нагружения.

Даже с учетом смещений образца как жесткого целого не удастся получить совпадения экспериментальных полей и соответствующих теоретических полей перемещений, рассчитанных на основе разложения Вильямса (рис. 2, а, б). Данное разложение для случая плоского деформированного состояния, реализуемого в точках на поверхности образца, с учетом только двух (основных) членов имеет вид

$$u(r, \theta) = \frac{K}{\sqrt{2\pi G}} \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2} \left(M - 1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) + \frac{T}{4G} r \cos \theta M,$$

$$v(r, \theta) = \frac{K}{\sqrt{2\pi G}} \sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2} \left(M - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) +$$

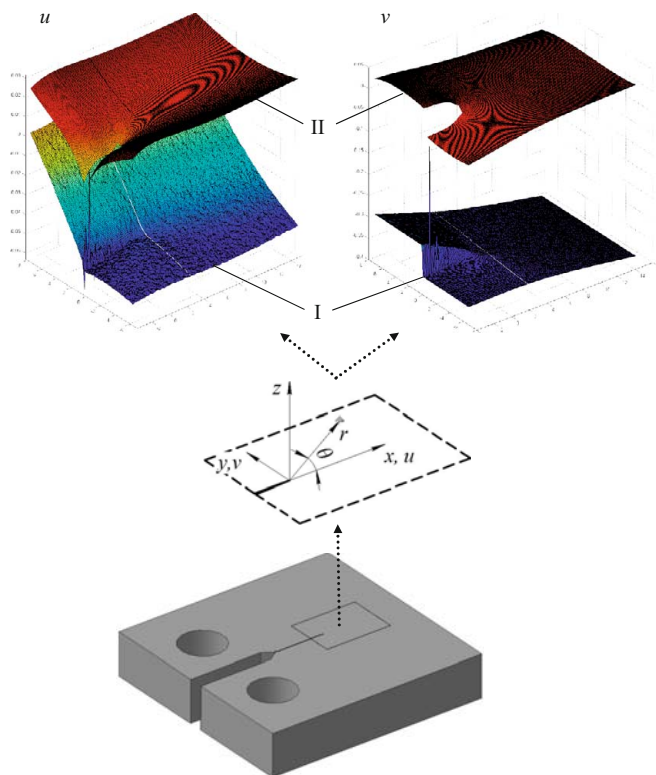


Рис. 1. Компактный образец и поля перемещений u , v , экспериментально полученные (I) и теоретически ожидаемые (II) при отсутствии сдвига и поворота образца

$$+ \frac{T}{4G} r \sin \theta (M - 2), \quad (1)$$

где r , θ — полярные координаты в системе $x\theta y$, связанной с вершиной трещины. Упругие константы определяют по формулам

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \quad M = \frac{2}{1+\mu},$$

где E и μ — модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала; K и T — КИН трещины нормального отрыва и T -напряжение вдоль оси x (часто обозначаемое как T_{xx}). При этом для предварительной оценки КИН в компактном образце воспользуемся формулой, приведенной в стандарте ASTM E-399-90,

$$K = \frac{F}{B\sqrt{W}} Y, \quad (2)$$

$$Y = \frac{2 + a/W}{(1 - a/W)^{3/2}} \left[0,886 + 4,64 \frac{a}{W} - \right.$$

$$\left. -13,32 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 14,72 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 5,60 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right],$$

а T -напряжение положим равным нулю (классические сингулярные формулы). Для рассматриваемого приме-

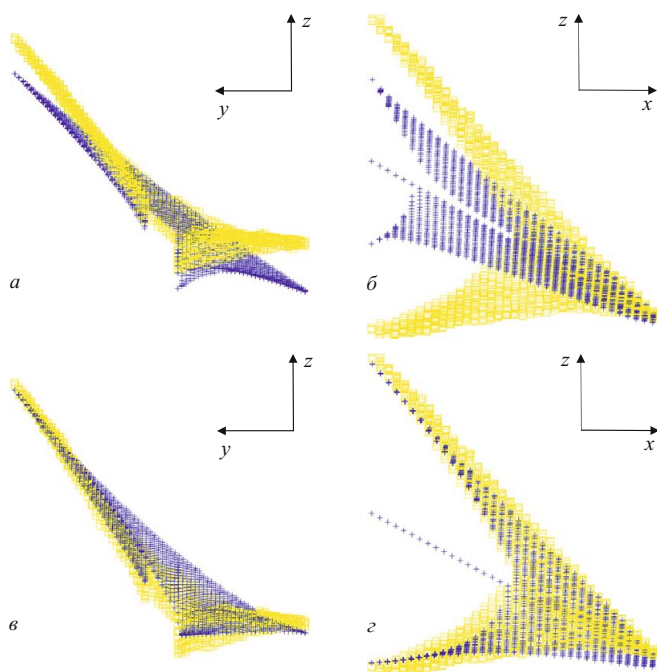


Рис. 2. Поля перемещений u (а, в), v (б, г), полученные экспериментально (■) и рассчитанные (+) без учета реального положения вершины трещины (а, б) и с учетом положения при уточненных других параметрах (в, г)

ра $K = 18,38 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; размер пластической зоны в окрестности вершины меньше 0,05 % от длины трещины и меньше 0,1 % от толщины образца, что подтверждает корректность использования упругого решения через разложение Вильямса.

Указанное расхождение между экспериментальными и теоретическими перемещениями (в определенных областях — в несколько раз) обусловлено неточной информацией о расположении вершины трещины, которая в действительности не имеет координат (0,0) в системе регистрации данных. Так, если ввести в рассмотрение отклонение (X_0) вдоль оси x вершины трещины от точки (0,0), то можно получить практически полное совпадение. На рис. 2, в, г показаны поля перемещений u , v , полученные экспериментально и рассчитанные по сингулярным формулам с учетом приближенно определенных смещений вершины трещины A и B (вдоль оси x и y соответственно), угла поворота φ плоскости трещины (после нагружения) и параметра X_0 , которые в рассматриваемом случае равны $-0,0465 \text{ мм}$, $-0,348 \text{ мм}$, $-0,0039 \text{ рад}$, $1,63 \text{ мм}$ (6,4 % от длины трещины!) соответственно. Отметим, что изменение одного параметра непременно приводит к корректировке других.

Таким образом, определение параметров механики разрушения (КИН и T -напряжений) на основе полей перемещений невозможно непосредственно с помощью КЦИ полей. Предварительно следует «вычлени» сдвиг тела и определить реальное положение вершины трещины. Однако каждая такая субзадача не может быть решена самостоятельно, поскольку все

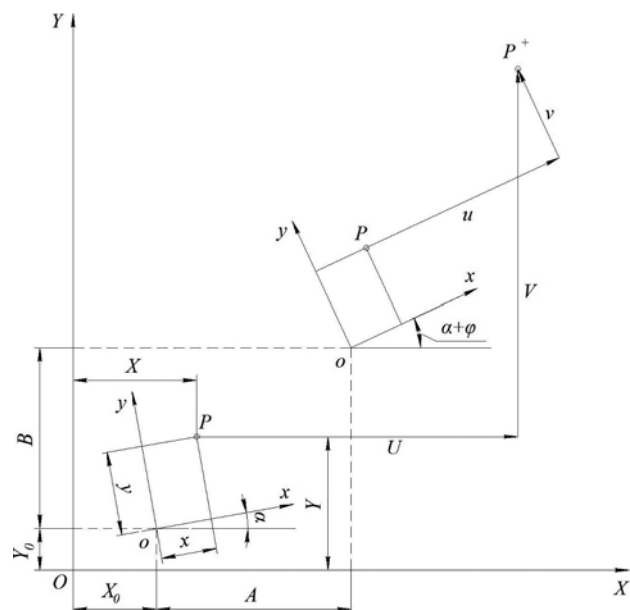


Рис. 3. Геометрическая и кинематическая постановка задачи определения полей перемещений

рассмотренные параметры имеют взаимосвязь через геометрические и кинематические соотношения.

Методика корректировки экспериментальных полей перемещений

В связи с указанными трудностями прямой интерпретации экспериментальных полей перемещений предлагаем следующую методику определения параметров механики разрушения. Расширим количество геометрических и кинематических параметров для получения наилучшего результата и сформулируем задачу в общем виде.

На рис. 3 изображена глобальная система координат (ГСК) XOY , с которой ассоциируются экспериментальные данные, а именно, координаты X , Y точки измерений (P) и перемещения U , V этой точки. Локальная система координат (ЛСК) $xO'y$, «привязанная» к вершине трещины, служит для описания напряженно-деформированного состояния (НДС) в окрестности вершины трещины, в частности, полей перемещений u , v — с помощью формул (1). Здесь x и y — координаты точки измерений P в локальной системе координат. Введенные ранее параметры A , B и φ отражают смещение и поворот ЛСК после нагружения, обусловленные смещением образца как жесткого целого.

ЛСК изначально может не совпадать с ГСК и быть смещена вдоль осей X , Y (координаты вершины трещины в ГСК — до нагружения) на X_0 , Y_0 и повернута относительно оси z на угол α (угол ориентации плоскости трещины — до нагружения). Данное расхождение обусловлено тем, что на практике сложно опреде-

лить точно положение вершины трещины, а следовательно, поместить в вершину ГСК измерений.

Очевидны (см. рис. 3) следующие геометрические соотношения:

$$X = x \cos \alpha - y \sin \alpha + X_0,$$

$$Y = y \cos \alpha + x \sin \alpha + Y_0,$$

или в обратной форме:

$$x = (X - X_0) \cos \alpha + (Y - Y_0) \sin \alpha,$$

$$y = (Y - Y_0) \cos \alpha - (X - X_0) \sin \alpha. \quad (3)$$

Далее можно установить следующие взаимосвязи между геометрическими и кинематическими параметрами:

$$X + U = (x + u) \cos \beta - v \sin \beta - y \sin \beta + A + X_0,$$

$$Y + V = v \cos \beta + (x + u) \sin \alpha + y \cos \alpha + B + Y_0,$$

где $\beta = \alpha + \varphi$.

Используя полученные соотношения, определим выражения для перемещений u, v в ЛСК по координатам точки измерений X, Y и ее перемещениям U, V в ГСК. После преобразований получим:

$$u = (X - X_0)(\cos \beta - \cos \alpha) + (Y - Y_0)(\sin \beta - \sin \alpha) + (U - A) \cos \beta + (V - B) \sin \beta,$$

$$v = -(X - X_0)(\sin \beta - \sin \alpha) + (Y - Y_0)(\cos \beta - \cos \alpha) - (U - A) \sin \beta + (V - B) \cos \beta.$$

С использованием данной формулы можно пересчитать величины экспериментально полученных пе-

ремещений в перемещения в окрестности вершины трещины, которые присутствуют в сингулярных соотношениях (1). Естественно, возможен и обратный пересчет по следующим формулам:

$$U = u \cos \beta - v \sin \beta + x (\cos \beta - \cos \alpha) -$$

$$- y (\sin \beta - \sin \alpha) + A,$$

$$V = u \sin \beta + v \cos \beta + x (\sin \beta - \sin \alpha) +$$

$$+ y (\cos \beta - \cos \alpha) + B. \quad (4)$$

Используя соотношения (4) совместно с формулами (1) и (3), отражающими зависимость перемещений u, v в ЛСК от величин искоемых параметров механики разрушения, получаем соотношения

$$U = U(x, y, u, v, A, B, \alpha, \beta) =$$

$$= U(X, Y, X_0, Y_0, K, T, A, B, \alpha, \varphi),$$

$$V = V(x, y, u, v, A, B, \alpha, \beta) =$$

$$= V(X, Y, X_0, Y_0, K, T, A, B, \alpha, \varphi).$$

Таким образом, принимая во внимание различные геометрические, кинематические и физические факторы, задачу определения K и T на основе обработки экспериментальных данных следует решать совместно с определением параметров $X_0, Y_0, \alpha, A, B, \varphi$, которые далее (совместно с K и T) будем называть *параметрами состояния*. Очевидно, что решение данной задачи должно быть основано на сопоставлении экспериментальных полей перемещений U^*, V^* точек поверхности компактного образца с координатами X^*, Y^* и соответствующих перемещений, рассчитываемых аналитически, т.е.

$$K^*, T^*, X_0^*, Y_0^*, \alpha^*, A^*, B^*, \varphi^* = \arg_{K \in \tilde{K}, T \in \tilde{T}, \dots, \varphi \in \tilde{\varphi}} \left\{ \begin{aligned} U_i(X_i^*, Y_i^*, X_0, Y_0, K, T, A, B, \alpha, \varphi) &= U_i^*(X_i^*, Y_i^*) \\ V_i(X_i^*, Y_i^*, X_0, Y_0, K, T, A, B, \alpha, \varphi) &= V_i^*(X_i^*, Y_i^*) \end{aligned} \right\},$$

где $i = 1, \dots, N$, N — количество точек регистрации перемещений на поверхности образца; $\tilde{K}, \tilde{T}, \dots, \tilde{\varphi}$ — области допустимых значений соответствующих параметров состояния.

Ввиду того, что КЦИ — очень большой массив данных и обеспечить равенство между U, V и U^*, V^* во всех N точках измерения одновременно невозможно, предлагаем ввести среднеквадратическое или максимальное отклонение I между экспериментальными и расчетными данными:

$$I(K, T, \dots, \varphi) = \sqrt{\frac{1}{2N} \left\{ \sum_{i=1}^N [U_i^*(X_i^*, Y_i^*) - U_i(X_i^*, Y_i^*, \dots, \varphi)]^2 + \sum_{i=1}^N [V_i^*(X_i^*, Y_i^*) - V_i(X_i^*, Y_i^*, \dots, \varphi)]^2 \right\}}$$

или

$$I(K, T, \dots, \varphi) = \max_{i=1, \dots, N} [|U_i^*(X_i^*, Y_i^*) - U_i(X_i^*, Y_i^*, \dots, \varphi)|, |V_i^*(X_i^*, Y_i^*) - V_i(X_i^*, Y_i^*, \dots, \varphi)|].$$

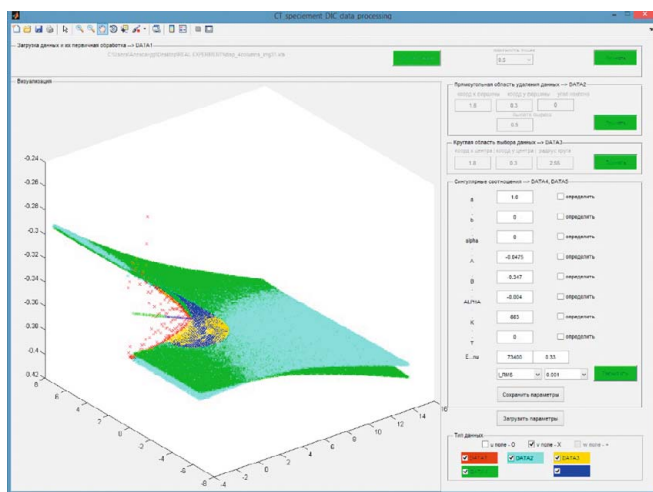


Рис. 4. Интерфейс программы и графические данные на различных этапах обработки

Тогда поиск неизвестных K , T и сопутствующих других параметров состояния можно представить как задачу многопараметрической минимизации целевой функции I , т.е.

$$K^*, T^*, X_0^*, Y_0^*, \alpha^*, A^*, B^*, \varphi^* = \arg \min_{K \in \tilde{K}, T \in \tilde{T}, \dots, \varphi \in \tilde{\varphi}} [I(K, T, \dots, \varphi)].$$

Отметим, что локальная модель перемещений (1) может быть дополнена другими членами разложения Вильямса, однако в этом случае увеличивается количество неизвестных и требуется дополнительно оценивать сходимость разложения.

Поскольку экспериментальное поле U^* , V^* не является гладким (ввиду процедуры их получения с помощью КЦИ) и может содержать погрешности измерений, то и целевая функция I , отражающая указанное расхождение, в общем случае не будет гладкой. Поэтому для ее минимизации предлагается использовать метод 0-го порядка — метод Нелдера — Мида [16], который обладает надежностью определения искомых величин, несмотря на сублинейную скорость сходимости. Кроме того, представленная задача минимизации должна являться унимодальной и безуслов-

Таблица 1. Результаты математической обработки экспериментальных данных

Параметры состояния	a , мм; F , кН	
	25,5; -4,95	34,9; 1,26
K , МПа · м ^{0,5}	19,5548	10,5161
T , Н	-37,1146	-22,7962
X_0 , мм	1,7178	-2,5832
Y_0 , мм	0,17944	0,30981
α , град	-4,9010	-5,6679
A , мм	-0,046775	-0,033254
B , мм	-0,34749	-0,14536
φ , град	-0,2132	-0,0337

ной, поскольку решение ищется на основе большого массива информации, отражающего реальное физическое поведение тела в достаточно большой (сравнимой с размерами трещины) области, и каких-либо дополнительных (кроме физически адекватных) ограничений на величины искомых параметров состояния не имеется.

Программа определения параметров состояния

В среде MATLAB разработана программа с графическим интерфейсом (рис. 4), позволяющая реализовать вышеописанную процедуру и поэтапно производить следующие действия:

импортировать результаты эксперимента, т.е. координаты X^* , Y^* и перемещения U^* , V^* , а также «разрезать» эти данные для ускорения предварительной обработки (поочередное исключение из рассмотрения некоторых точек измерения);

удалять прямоугольную область вокруг «полости» трещины, чтобы исключить из рассмотрения множественные «выбросы», имеющие место в данной зоне образца;

назначать круговую область вокруг предположительной вершины трещины, из которой будут использоваться точки (X^*, Y^*) для расчета параметров состояния;

строить при заданных (найденных) величинах параметров состояния поля перемещений u , v , пересчитанные в ГСК по соотношениям (4) соответственно в U , V — для сравнения с исходными экспериментальными данными или предварительного поиска величин параметров (первичная оценка);

рассчитывать величины параметров состояния на основе минимизации расхождения I между экспериментальными U^* , V^* и рассчитанными U , V перемещениями — при уточнении (вариации) величин параметров состояния на каждом шаге минимизации; контролировать процесс решения;

сохранять и загружать сессии работы в программе.

Чтобы обеспечить устойчивость процесса определения искомых параметров состояния, необходимо предварительно получить первоначальные их оценки посредством подбора. Для этих целей программа обладает развитым функционалом отображения данных на различных этапах обработки: подбирая первичные оценки искомых параметров вручную, всегда можно сопоставить рассчитываемые для них поля перемещений с исходными экспериментальными. Кроме того, эффективной (с точки зрения устойчивости, скорости и точности процедуры) является тактика последовательного определения параметров в таком порядке:

1) подбираются приближенные значения параметров состояния на основе сопоставления экспериментальных и расчетных данных (используются разреженные данные);

- 2) на основе минимизации I уточняются X_0 , A , B , φ и K ;
- 3) на основе минимизации I уточняются K , T и Y_0 ;
- 4) на основе минимизации I окончательно уточняются X_0 , Y_0 , A , B , φ , K , T , а также определяется φ ;
- 5) на основе полных (не разреженных) данных уточняются значения всех параметров.

Результаты обработки экспериментальных данных

В табл. 1 приведены результаты расчетов параметров состояния с помощью разработанной программы для различных длин трещин и нагрузок.

Сопоставление полей перемещений U , V и U^* , V^* в области обработки (рис. 5) для образцов с трещинами и нагрузками, представленными в табл. 1, позволяет говорить о достоверности полученных величин параметров состояния.

В табл. 2 приведены значения КИН, рассчитанные по стандартной (ASTM) формуле (2) при заданных нагрузках и длинах трещин (K_{ASTM}) и полученные в результате математической обработки экспериментальных данных (K_{sol}); наибольшее их отклонение $\varepsilon = |K_{sol} - K_{ASTM}|/K_{ASTM}$ и наименьшее — $\varepsilon = |K_{sol} - K_{ASTM}|/K_{sol}$ (указано в скобках).

В табл. 3 приведены значения координат вершины трещины в ГСК, полученные из эксперимента и расчета; в % дано их отклонение — наибольшее и наименьшее (в скобках).

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод об эффективности предложенной методики математической обработки данных, главным преимуществом которой является учет различных геометрических, кинематических и физических факторов, связанных с деформированием натурного тела (компактного образца).

Распределение параметров двухпараметрической механики разрушения вдоль фронта трещины

Имея информацию о КИН и T -напряжениях на поверхности объекта (образца), можно получить распределение данных величин вдоль фронта трещины. В связи с этим предлагается следующая методика. Определяются КИН K_I^* и T -напряжения T_{xx}^* в окрестности вершины трещины (точка выхода фронта на поверхность) по предложенной методике математической обработки экспериментальных полей перемещений. Рассчитывается конечно-элементная модель объекта при единичном параметре нагружения (в рассматриваемом случае — растягивающая образец сила F). Строится распределение КИН $K_I^1(s)$ и T -напряжений $T_{xx}^1(s)$ вдоль фронта трещины (s — безразмерная локальная координата вдоль фронта трещины; $s = 0$ соответствует центру фронта, а $s = 1$ — точке выхода фронта на

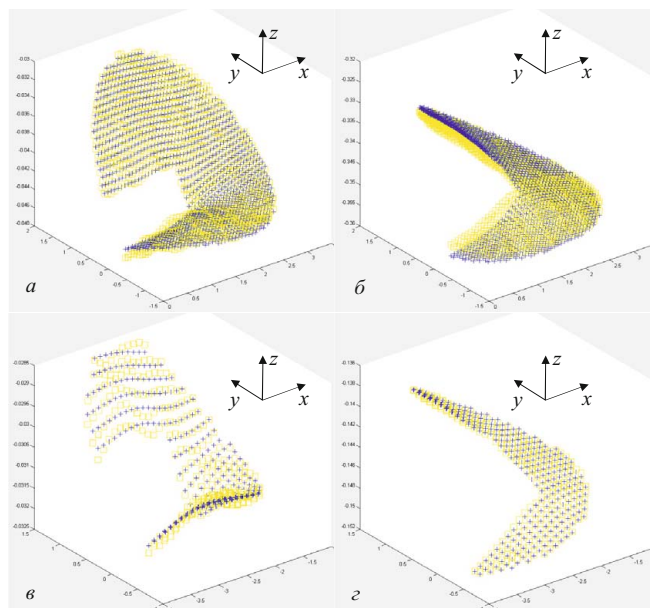


Рис. 5. Поля перемещений u (а, в), v (б, г), экспериментально полученные (■) и рассчитанные (+) при найденных значениях параметров состояния для трещины длиной 25,5 (а, б) и 34,9 мм (в, г)

свободную поверхность тела). Данные распределения масштабируются на постоянный множитель Q , величина которого определяется из условия

$$Q^* = \arg \left\{ \frac{QK_I^1(1) = K_I^*}{QT_{xx}^1(1) = T_{xx}^*} \right\}.$$

Следует отметить, что также может быть поставлена задача об определении геометрии фронта трещины, поскольку КЦИ предоставляет большой объем информации. Задача об одновременном определении параметров нагружения и параметров геометрии фронта трещины решена ранее [17]. Поэтому, помимо параметров состояния, в качестве дополнительных неизвестных можно включить геометрические параметры

Таблица 2. Сравнительные значения КИН

КИН и их отклонения	a , мм; F , кН	
	25,5; 4,95	34,9; 1,26
K_{ASTM}/K_{sol} (МПа · м ^{0,5})	18,38/19,55	10,01/10,52
ε , %	6,4 (6,0)	5,1 (4,8)

Таблица 3. Сопоставление результатов

Координаты и их отклонения	a , мм			
	25,5		34,9	
	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
X_0 , мм	—	1,7178	−2,65594	−2,5832
Отклонение	—		2,7 %	
Y_0 , мм	—	0,17944	0,268579	0,30981
Отклонение	—		15,4 % (13,3 %)	

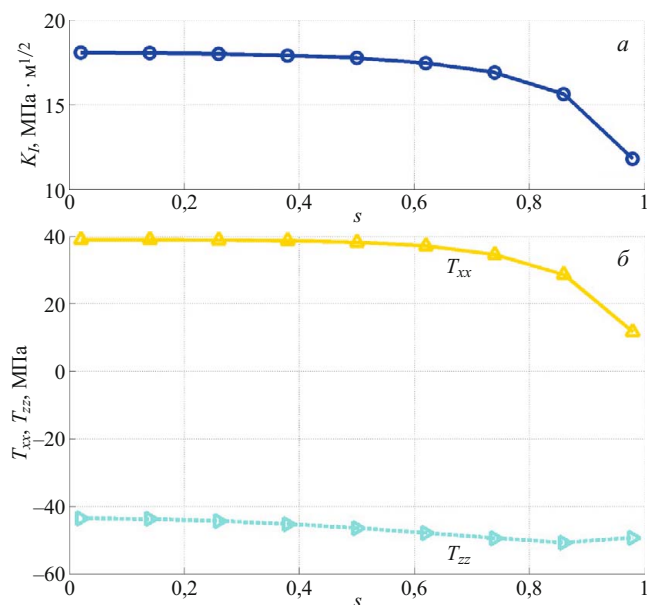


Рис. 6. Распределение КИН (а) и T -напряжений (б) вдоль фронта трещины

фронта и использовать для этого уже хорошо отработанную методику [18]. При этом возможна реализация пошаговой процедуры определения этих параметров.

Для рассматриваемого компактного образца с длиной трещины $a = 25,5$ мм, нагруженного растягивающей нагрузкой $P = 1$ кН проведено конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния в окрестности трещины и рассчитаны величины КИН и T -напряжений (как T_{xx} , так и T_{zz} [19]) вдоль фронта трещины. Их распределения для найденного коэффициента Q представлены на рис. 6.

Таким образом, разработана методика математической обработки тангенциальных полей перемещений, возникающих в зоне выхода фронта трещины на поверхность натурального объекта, с целью определения сингулярных и несингулярных составляющих поля напряжений в окрестности вершины трещины. Методика позволяет в качестве определяемых параметров учитывать смещение тела как жесткого целого (в плоскости поверхности около точки выхода фронта), а также находить положение вершины трещины и ее ориентацию (наклон плоскости).

В среде Matlab разработана интерактивная программа с графическим интерфейсом, обеспечивающая визуализацию полей перемещений, получаемых КЦИ (и не только), а также поэтапную обработку данных полей. Процедура определения параметров основана на решении задачи минимизации расхождения экспериментальных и расчетных данных (перемещений точек) — при варьировании величин искомых параметров.

Предложенные методика и программы апробированы на компактных образцах различной длины. Полученные в результате обработки экспериментальных данных величины КИН и параметры положения

вершины трещины хорошо согласуются с известными справочными и экспериментальными данными, что позволяет сделать вывод о корректности предложенного математического подхода.

На конкретном примере показана возможность расширения предложенного подхода с целью получения распределения КИН и T -напряжений вдоль фронта пространственной трещины на основе обработки полей перемещений только на поверхности объекта.

Полученные результаты, подтверждающие эффективность предложенного метода на компактных образцах, позволяют говорить о возможности практического его применения на натуральных объектах. Определение параметров реальной локализации вершины трещины и ее ориентации позволяет без каких-либо дополнительных экспериментальных затрат использовать данный метод (программу) для автоматического отслеживания траектории продвижения усталостной трещины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвиенко Ю. Г. Модели и критерии механики разрушения. — М.: Физматлит, 2006. — 328 с.
2. Матвиенко Ю. Г. Тенденции нелинейной механики разрушения в проблемах машиностроения. — М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. — 56 с.
3. Матвиенко Ю. Г. Двухпараметрическая механика разрушения в современных проблемах прочности / Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 5. С. 37 – 46.
4. Матвиенко Ю. Г. Несингулярные T -напряжения в проблемах двухпараметрической механики разрушения / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 2. С. 51 – 58.
5. Matvienko Yu. G. Maximum average tangential stress criterion for prediction of the crack path / International Journal of Fracture. 2012. Vol. 176. P. 113 – 118.
6. Матвиенко Ю. Г. Имитационное моделирование для анализа параметров механики разрушения нестандартных образцов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 10. С. 50 – 56.
7. Gupta M., Alderliesten R. C., Benedictus R. A review of T -stress and its effects in fracture mechanics / Engineering Fracture Mechanics. 2015. Vol. 134. P. 218 – 241.
8. Матвиенко Ю. Г. Анализ допустимых размеров трещиноподобных дефектов на основе диаграмм трещиностойкости / Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 2. С. 110 – 115.
9. Matvienko Yu. G. Safety factors in structural integrity assessment of components with defects / International Journal of Structural Integrity. 2013. Vol. 4. N 4. P. 457 – 476.
10. SINTAP. Structural Integrity Assessment Procedure for European Industry. Project BE95-1426. Final Procedure, British Steel Report, Rotherham, 1999.
11. Писарев В. С., Матвиенко Ю. Г., Одинцев И. Н. Определение параметров механики разрушения при малом приращении длины трещины / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 4. С. 45 – 51.
12. Matvienko Yu. G., Pisarev V. S., Eleonsky S. I., Chernov A. V. Determination of fracture mechanics parameters by measurements of local displacements due to crack length increment / Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. 2014. Vol. 37. P. 1306 – 1318.
13. Yates J. R., Zanganeh M., Tai Y. H. Quantifying crack tip displacement fields with DIC / Engineering Fracture Mechanics. 2010. Vol. 77. P. 2063 – 2076.
14. Hadj Meliani M., Matvienko Yu. G., Pluinage G. Two-parameter fracture criterion (K_{Ic} -Tef,c) based on notch fracture mechanics / International Journal of Fracture. 2011. Vol. 167. P. 173 – 182.
15. Zanganeh M., Lopez-Crespo P., Ta Y. H., Yates J. R. Locating the crack tip using displacement field data: a comparative study. Strain. 2013. Vol. 49. P. 102 – 115.

16. **Nelder J. A., Mead R.** A Simplex Method for Function Minimization / *Computer Journal*. 1965. N 7. P. 308 – 313.
17. **Chernyatin A. S., Matvienko Y. G., Razumovsky I. A.** A computational tool for estimating stress fields along a surface crack front / *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2015. Vol. 38. P. 180 – 189.
18. **Чернятин А. С., Разумовский И. А.** Методика и программный комплекс для оценки параметров напряженно-деформированного состояния натурных конструкций и их применение к исследованию нагруженности, дефектности и остаточных напряжений в элементах оборудования АЭС / *Проблемы прочности*. 2013. № 4(424). С. 158 – 165.
19. **Nakamura T., Parks D. M.** Determination of elastic T stress along three dimensional crack fronts using an interaction integral / *Int. J. Solids Struct.* 1992. Vol. 29. P. 1597 – 1611.

REFERENCES

1. **Matvienko Yu. G.** Modeli i kriterii mekhaniki razrusheniya [The models and criteria of fracture mechanics]. — Moscow: Fizmatlit, 2006. — 328 p. [in Russian].
2. **Matvienko Yu. G.** Tendentsii nelineinoi mekhaniki razrusheniya v problemakh mashinostroeniya [The tendency of nonlinear fracture mechanics in the problems of mechanical engineering]. — Moscow – Izhevsk: Izd. Inst. komp'yuternykh issledovaniy, 2015. — 56 p. [in Russian].
3. **Matvienko Yu. G.** Dvukhparametricheskaya mekhanika razrusheniya v sovremennykh problemakh prochnosti [Two-parameter fracture mechanics in the modern problems of strength] / *Probl. Mashinostr. Nadezhn. Mashin.* 2013. N 5. P. 37 – 46 [in Russian].
4. **Matvienko Yu. G.** Nesingulyarnye T -napryazheniya v problemakh dvukhparametricheskoi mekhaniki razrusheniya [Nonsingular T -stress in problems of two-parameter fracture mechanics] / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2012. Vol. 78, N 2. P. 51 – 58.
5. **Matvienko Yu. G.** Maximum average tangential stress criterion for prediction of the crack path / *International Journal of Fracture*. 2012. Vol. 176. P. 113 – 118.
6. **Matvienko Yu. G.** Imitatsionnoe modelirovanie dlya analiza parametrov mekhaniki razrusheniya nestandartnykh obraztsov [Simulation Modeling for the Analysis of Fracture Mechanics Parameters of Non-Standard Samples] / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2013. Vol. 79. N 10. P. 50 – 56 [in Russian].
7. **Gupta M., Alderliesten R. C., Benedictus R.** A review of T -stress and its effects in fracture mechanics / *Engineering Fracture Mechanics*. 2015. Vol. 134. P. 218 – 241.
8. **Matvienko Yu. G.** Analiz dopustimyykh razmerov treshchinopodobnykh defektov na osnove diagramm treshchinostoikosti [Analysis of permissible sizes of the crack-like defects on basis of the fracture strength diagram] / *Probl. Mashinostr. Nadezhn. Mashin.* 2007. N 2. P. 110 – 115 [in Russian].
9. **Matvienko Yu. G.** Safety factors in structural integrity assessment of components with defects / *International Journal of Structural Integrity*. 2013. Vol. 4. N 4. P. 457 – 476.
10. **SINTAP.** Structural Integrity Assessment Procedure for European Industry. Project BE95-1426. Final Procedure, British Steel Report, Rotherham, 1999.
11. **Pisarev V. S., Matvienko Yu. G., Odintsev I. N.** Opredelenie parametrov mekhaniki razrusheniya pri malom prirashchenii dliny treshchiny [Determination of fracture mechanics parameters at a small increment of the crack length] / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2012. Vol. 78. N 4. P. 45 – 51 [in Russian].
12. **Matvienko Yu. G., Pisarev V. S., Eleonsky S. I., Chernov A. V.** Determination of fracture mechanics parameters by measurements of local displacements due to crack length increment / *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2014. Vol. 37. P. 1306 – 1318.
13. **Yates J. R., Zanganeh M., Tai Y. H.** Quantifying crack tip displacement fields with DIC / *Engineering Fracture Mechanics*. 2010. Vol. 77. P. 2063 – 2076.
14. **Hadj Meliani M., Matvienko Yu. G., Pluinage G.** Two-parameter fracture criterion ($K_{I,c}$ -Tef,c) based on notch fracture mechanics / *International Journal of Fracture*. 2011. Vol. 167. P. 173 – 182.
15. **Zanganeh M., Lopez-Crespo P., Ta Y. H., Yates J. R.** Locating the crack tip using displacement field data: a comparative study. *Strain*. 2013. Vol. 49. P. 102 – 115.
16. **Nelder J. A., Mead R.** A Simplex Method for Function Minimization / *Computer Journal*. 1965. N 7. P. 308 – 313.
17. **Chernyatin A. S., Matvienko Y. G., Razumovsky I. A.** A computational tool for estimating stress fields along a surface crack front / *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2015. Vol. 38. P. 180 – 189.
18. **Chernyatin A. S., Razumovskii I. A.** Metodika i programnyi kompleks dlya otsenki parametrov napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya naturnykh konstruksii i ikh primenenie k issledovaniyu nagruzhennosti, defektnosti i ostatochnykh napryazhenii v elementakh oborudovaniya AES [The method and software package for assessment of the stress-strain state parameters of full-scale structures and its application for analysis of loading and defects condition and residual stress in the elements of APP equipment] / *Probl. Prochn.* 2013. N 4(424). P. 158 – 165 [in Russian].
19. **Nakamura T., Parks D. M.** Determination of elastic T stress along three dimensional crack fronts using an interaction integral / *Int. J. Solids Struct.* 1992. Vol. 29. P. 1597 – 1611.