

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭВРИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОЛОЖЕНИЯ ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ

Н.А. Гудков^{1,2}

nikita.a.gudkov@gmail.com

А.С. Чернятин^{1,3}

cas@inbox.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация² Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова,
Москва, Российская Федерация³ Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН,
Москва, Российская Федерация

Аннотация

Предложена экспериментально-численная методика определения параметров механики разрушения (коэффициентов интенсивности напряжений и T -напряжений) на основе обработки с помощью метода наименьших квадратов полей тангенциальных перемещений, возникающих на поверхности компактного образца в окрестности вершины трещины. Ключевая особенность методики — эвристический подход к определению локализации вершины трещины, основанный на учете особенностей конфигурации и представления полей перемещений, получаемых преимущественно методом корреляции цифровых изображений. Коэффициент интенсивности напряжений и T -напряжение определены на основе разложения Вильямса по собственным функциям полей тангенциальных перемещений в окрестности вершины трещины. Показана эффективность предлагаемого подхода и выполнена оценка погрешности определения параметров механики разрушения в зависимости от точности определения локализации вершины трещины. Разработана программа, реализующая данный подход, который в перспективе может быть положен в основу методики оценки трещиностойкости натуральных конструкций с поверхностными трещиноподобными дефектами с привлечением двухпараметрической механики разрушения

Ключевые слова

Вершина трещины, метод корреляции цифровых изображений, коэффициент интенсивности напряжений, T -напряжение, метод наименьших квадратов, разложение Вильямса

Поступила в редакцию 12.10.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Определение параметров механики разрушения, таких как коэффициент интенсивности напряжений (КИН) и T -напряжение (несингулярная составляющая поля напряжений в окрестности вершины трещины) — это одна из важнейших задач, обеспечивающих надежную оценку трещиностойкости эксплуатируемых конструкций. Использование T -напряжений наравне с КИН позволяет повысить точность определения наступления критических состояний натуральных объек-

тов с трещиноподобными дефектами за счет учета реальных условий стеснения в вершине трещины [1–3], связанных с образующейся зоной пластичности [4, 5]. Кроме того, многочисленные исследования показывают существенное влияние T -напряжений на устойчивость роста трещины после ее инициирования [6, 7]. Поскольку указанные параметры отражают уровень нагруженности в окрестности вершины трещины, то без информации о ее точном положении нельзя определить значения параметров. Следует отметить, что идентификация трещиноподобного дефекта в реальном объекте, включая определение его локализационных и геометрических параметров с приемлемой точностью, является нетривиальной задачей и предполагает привлечение таких видов неразрушающего контроля, как оптический, магнитный, акустический, капиллярный и др.

В настоящей работе предложен простой по идее, но надежный, по мнению авторов, метод определения положения вершины трещины, основанный на математической обработке экспериментальных данных, полученных с помощью метода корреляции цифровых изображений (КЦИ) с последующим применением метода наименьших квадратов (МНК) для вычисления параметров механики разрушения.

Метод КЦИ [8–10] обеспечивает регистрацию полей тангенциальных и нормальных перемещений точек поверхности натурального объекта в виде большого массива данных, так как плотность точек при должном техническом уровне реализации метода составляет порядка 650 точек на квадратный миллиметр. Кроме того, метод относится к бесконтактным методам экспериментальных измерений и предоставляет возможность получения информации непосредственно в цифровом виде в режиме реального времени. Указанные обстоятельства обуславливают его широкое применение во многих практических исследованиях. В последнее десятилетие наблюдается тенденция к активному применению метода КЦИ для исследования НДС в окрестности вершины трещины [11–13] прежде всего применительно к усталостному росту трещин [14–16]. Однако можно утверждать, что при этом априори предусматривают наличие информации о положении вершины трещины или пред- или постобработки экспериментальной информации, что требует увеличения вычислительных и временных ресурсов.

Полное разложение поля перемещений в окрестности вершины трещины. Предлагаемая методика определения параметров механики разрушения базируется на сопоставлении полей тангенциальных перемещений $u^*(x, y)$, $v^*(x, y)$ в окрестности вершины трещины нормального отрыва, полученных экспериментально, и полей перемещений $u(x, y)$, $v(x, y)$, описываемых разложением Вильямса [17] — разложением по собственным функциям:

$$u = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{r^{\frac{n}{2}}}{2G} a_n \left[\left(k + \frac{n}{2} + (-1)^n \right) \cos \frac{n}{2} \theta - \frac{n}{2} \cos \left(\frac{n}{2} - 2 \right) \theta \right] + \\ + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{r^{\frac{n}{2}}}{2G} b_n \left[\left(-k - \frac{n}{2} + (-1)^n \right) \sin \frac{n}{2} \theta + \frac{n}{2} \sin \left(\frac{n}{2} - 2 \right) \theta \right]; \quad (1)$$

$$v = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{r^{\frac{n}{2}}}{2G} a_n \left[\left(k - \frac{n}{2} - (-1)^n \right) \sin \frac{n}{2} \theta + \frac{n}{2} \sin \left(\frac{n}{2} - 2 \right) \theta \right] +$$

$$+ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{r^{\frac{n}{2}}}{2G} b_n \left[\left(k - \frac{n}{2} + (-1)^n \right) \cos \frac{n}{2} \theta + \frac{n}{2} \cos \left(\frac{n}{2} - 2 \right) \theta \right], \quad (2)$$

где коэффициент $k = \frac{3-\nu}{1+\nu}$, а взаимосвязь упругих параметров материала определяется соотношением $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$.

Ограничиваясь окрестностью вокруг вершины трещины небольшого размера (~10...20 % длины l трещины), можно учитывать только первые два члена разложения, коэффициенты которых и есть КИН и T -напряжение:

$$u(r, \theta) = \frac{K}{\sqrt{2\pi G}} \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2} \left(M - 1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) + \frac{T}{4G} r \cos \theta^* M + u_0 - r \cos \theta \cos \phi; \quad (3)$$

$$v(r, \theta) = \frac{K}{\sqrt{2\pi G}} \sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2} \left(M - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) + \frac{T}{4G} r \sin \theta (M - 2) + v_0 + r \sin \theta \cos \phi, \quad (4)$$

где константа $M = \frac{2}{1+\nu}$; u_0, v_0 — перемещения образца как жесткого тела, связанные с вершиной трещины; ϕ — угол поворота образца как жесткого тела.

Таким образом, получены аналитические выражения для u и v в полярной системе координат r, θ с началом отсчета в вершине трещины и осью x , проходящей вдоль плоскости трещины по направлению ее роста. Воспользовавшись формулами для перехода из полярной в декартову систему координат, не связанную с вершиной трещины, получим

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad \theta = \arctg \left(\frac{y}{x} \right); \quad (5)$$

$$X = x + x_{tip};$$

$$Y = y + y_{tip},$$

где X, Y — декартовы глобальные координаты; x, y — координаты, связанные с вершиной трещины. Окончательные соотношения запишем в виде

$$u = u(x, x_{tip}, y, y_{tip}); \quad v = v(x, x_{tip}, y, y_{tip}).$$

Особенности полей перемещений в окрестности вершины трещины. На примере компактного образца [18] рассмотрим некоторые особенности распределения тангенциальных перемещений точек на его поверхности в зоне с трещиной. На рис. 1 приведены поля перемещений, рассчитанные по формуле

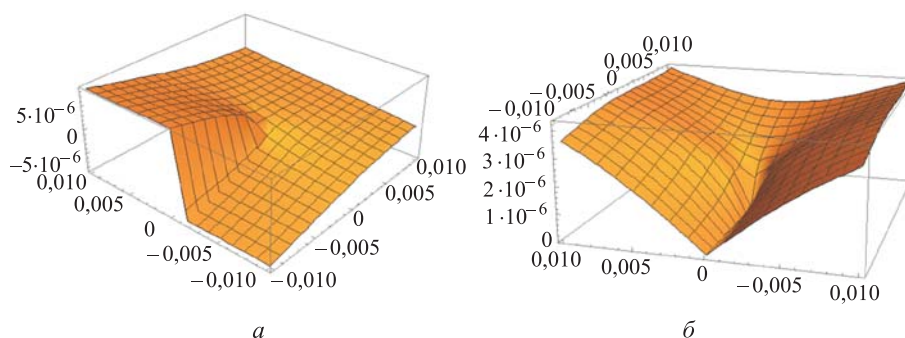


Рис. 1. Поля перемещений u (а), v (б), соответствующие аналитическому решению Вильямса

Вильямса (1), (2) с учетом только сингулярного члена, для компактного образца, имеющего трещину длиной $l = 34,9$ мм, и при действии приложенной к образцу растягивающей силы $F = 1,4$ кН.

Отметим, что поле перемещений v как функция двух переменных x и y имеет разрыв вдоль берегов трещины, а поле u имеет излом (нарушение гладкости) в том же месте. На основе данных особенностей в рамках настоящей работы был построен метод определения координат вершины трещины. Однако прежде чем перейти к рассмотрению метода, необходимо отметить некоторые особенности, присущие полям перемещений, получаемым экспериментально на натурных образцах. Программное обеспечение метода КЦИ Vic2D представляет экспериментальные данные в виде четырех массивов: координаты точек измерений x , y , перемещения u^* , v^* . На рис. 2 приведены поля перемещений u^* и v^* , полученные для указанного образца, а также видно перемещение и поворот образца, как жесткого целого. В пользу последнего говорит тот факт, что поле u^* несимметрично относительно плоскости xOz , а перемещения v^* точек на оси x не имеют одинаковых значений. Кроме того, экспериментальным данным присущи заметные флуктуации и выбросы значений в непосредственной близости от полости трещины, вследствие этого невозможно точно вычислить производные функций u , v по координатам x , y , т. е. невозможно построить точные аналитические алгоритмы поиска вершины трещины по разрывам полей без предварительной обработки (фильтрации и сглаживания).

Эвристический алгоритм нахождения вершины трещины. Метод, построенный из предположения, что угол поворота образца как жесткого целого в его плоскости мал, использует особенности распределения перемещений $v(x, y)$ в окрестности вершины трещины нормального отрыва, главным образом наличие разрыва поля перемещений в точках, относящихся к разным берегам трещины. На основе обработки экспериментальных данных для образцов с разными длинами трещин и нагрузками предлагается следующий алгоритм, который состоит из двух этапов.

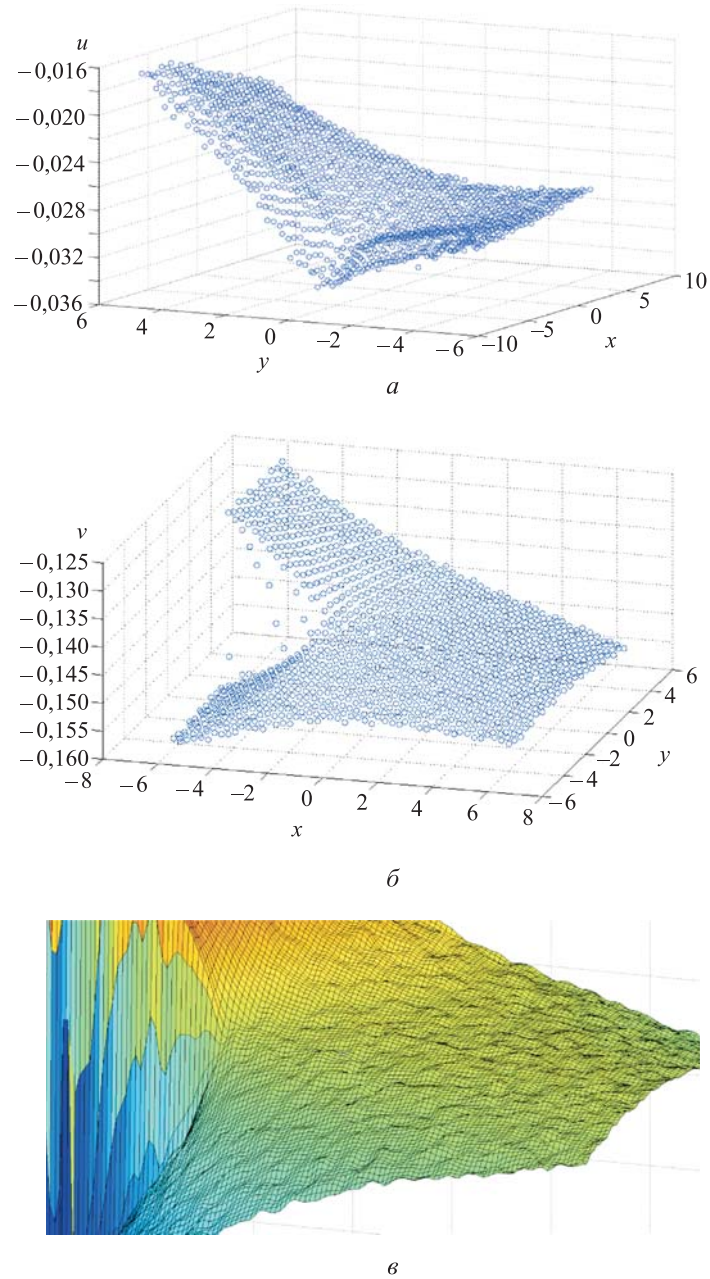


Рис. 2. Поля перемещений u^* и $v^*(a, б)$ в окрестности трещины и в непосредственной близости к ее вершине ($в$)

1. Определение координаты x_{tip} вершины трещины — для каждого значения x в экспериментальных данных поля v вычисляется так называемая кумулятивная разность

$$I(x) = \sum_{i=i_{\min}}^{i_{\max}} \sum_{j=j_{\min}}^{j_{\max}} |v(x, y_i) - v(x, y_j)|^3. \quad (6)$$

Отметим, что именно при показателе степени, равном трем, обеспечивается наилучший результат, а указанные границы для индексов соответствуют выбираемой для анализа зоне.

Затем вычисляется относительная производная по x :

$$D_x(x) = \frac{1}{I} \frac{dI}{dx}. \quad (7)$$

Можно предположить, что вершина трещины (координата x_{tip}) располагается там, где находится первый минимум функции D_x (при увеличении x от 0 до конечного значения). Причем данный минимум может быть как глобальным, так и локальным. На рис. 3, а, б показаны типовые распределения $I(x)$, $D(x)$ для указанного образца.

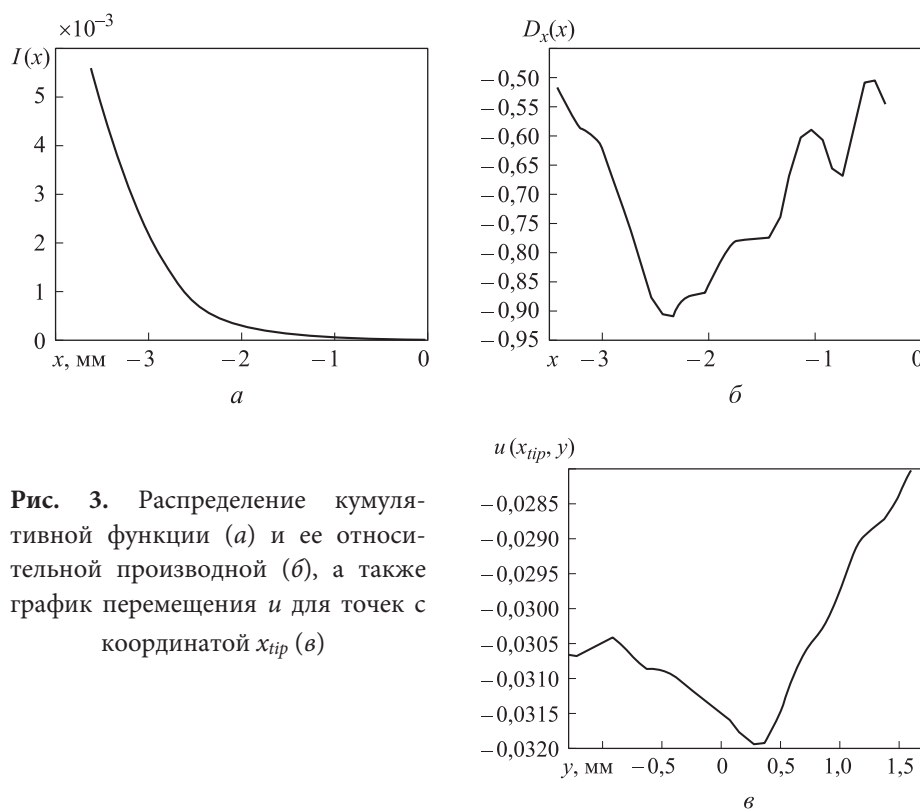


Рис. 3. Распределение кумулятивной функции (а) и ее относительной производной (б), а также график перемещения u для точек с координатой x_{tip} (в)

2. Для определения второй координаты y_{tip} вычисляется функция перемещения u для найденного x_{tip} :

$$u(y) = u(x_{tip}, y), \quad (8)$$

минимум которой соответствует y_{tip} .

Определение параметров механики разрушения. После определения положения вершины трещины можно выполнить расчет параметров механики разрушения на основе сопоставления величин перемещений, полученных экс-

периментально и с привлечением соотношений (3) и (4). Ввиду этого задача определения КИН и T -напряжения может быть представлена как задача минимизации среднеквадратического отклонения:

$$(K, T, u_0, v_0, \cos \phi) = \text{Arg min}(R),$$

$$\text{где } R = \sqrt{\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (u_i^* - u_i)^2 + (v_i^* + v_i)^2}, \quad N \text{ — количество экспериментальных}$$

точек измерений на поверхности тела.

Отметим, что если перемещения точек образца и координаты вершины трещины известны на основе обработки экспериментальных данных, то выражения (3), (4) представляют собой переопределенную систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов членов разложения (размер данных о перемещениях значительно больше числа удерживаемых членов). Это позволяет воспользоваться МНК для определения КИН и T -напряжения, а также параметров перемещения образца как жесткого целого. Для реализации описанных процедур в среде MATLAB разработана программа.

Результаты экспериментальных исследований. Предложенные алгоритмы были использованы для обработки экспериментальных данных в виде полей перемещений, полученных для двух компактных образцов с различными геометрическими характеристиками. Исследования показали высокую точность расчета параметров механики разрушения и локализации вершины трещины, о чем свидетельствует практически полное совпадение экспериментальных полей перемещений и полей, рассчитанных при найденных значениях параметров (рис. 4).

Оценка влияния погрешности определения вершины трещины на точность расчета КИН. Зависимости погрешности расчета КИН от величины ошибки определения координат положения вершины трещины, полученные на основе предложенного подхода, приведены на рис. 5. При отклонениях 5 % реальных координат положения вершины трещины погрешность определения параметров механики разрушения достигает порядка 50...60 %, причем существенное влияние оказывает как отклонение по оси x , так и по оси y . Отметим, что на точность расчета T -напряжений влияние также достаточно существенно. Таким образом, можно заключить, что задача определения локализации вершины трещины является важной при вычислении параметров КИН и T -напряжений и должна решаться совместно с определением параметров механики разрушения. Погрешность определения координат вершины трещины составила менее процента. Таким образом, в соответствии с полученными результатами (см. рис. 5) точность определения КИН по предлагаемой методике достаточно высокая.

Заключение. В работе был разработан метод определения коэффициентов сингулярной и несингулярной составляющих поля напряжений, таких как КИН и T -напряжения в окрестности вершины трещины, основанный на математической обработке полей перемещений в окрестности вершины трещины, получаемых с помощью метода КЦИ. Реализация метода базируется на выполнении

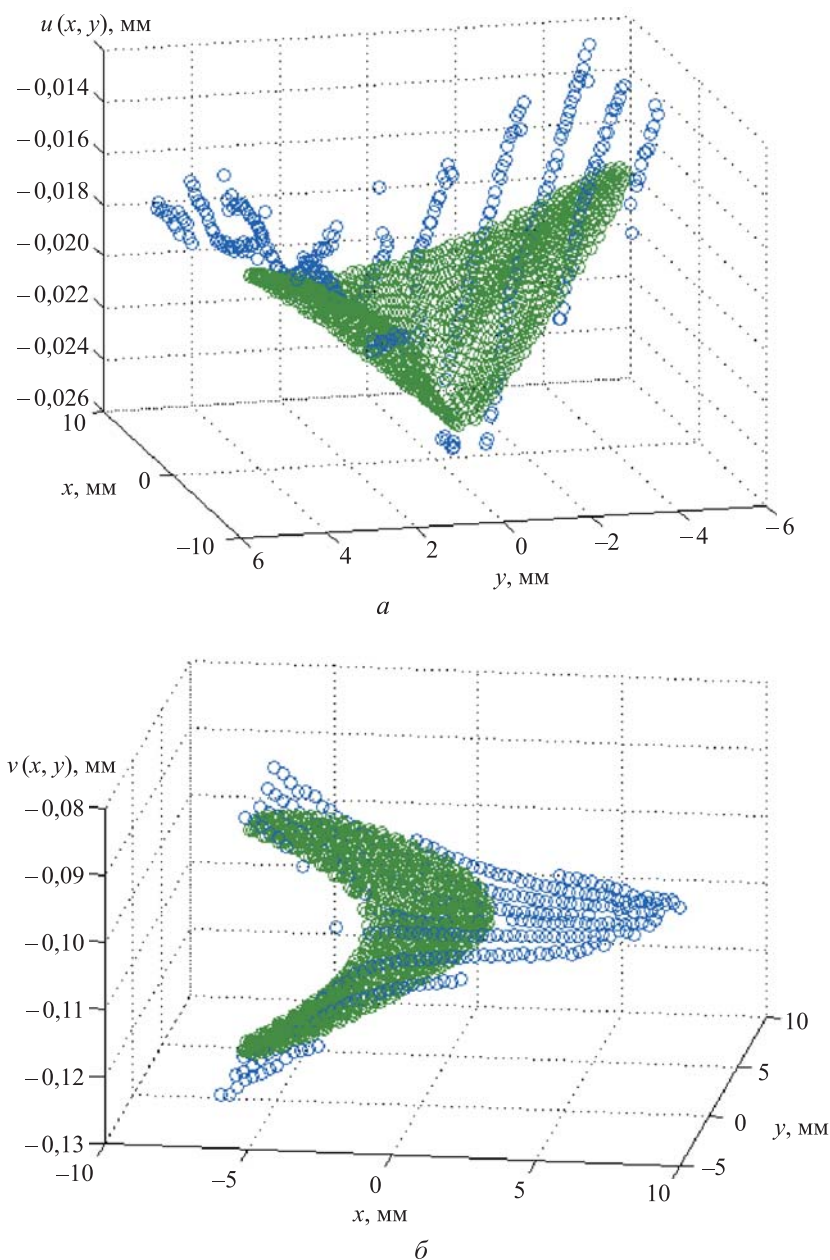


Рис. 4. Сопоставление полей перемещений u и v (а, б) в окрестности вершин трещин, экспериментально полученных с помощью КЦИ (○), восстановленных по найденным значениям параметров (●) для компактного образца

двух процедур: первая связана с установлением положения вершины трещины, а вторая — с непосредственным расчетом параметров механики разрушения. На основе полей перемещений, полученных для компактного образца с различными длинами трещин, была показана эффективность предложенного метода, а также необходимость точного определения координат положения вершины

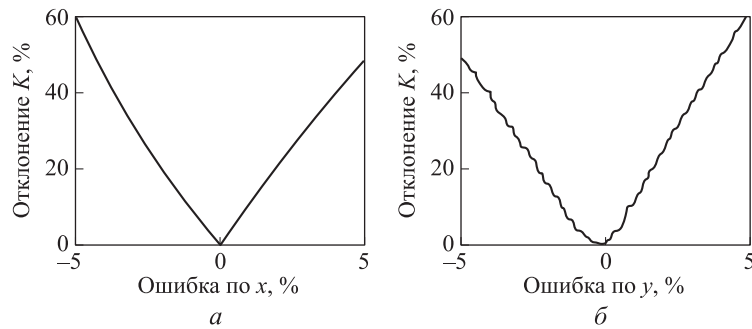


Рис. 5. Оценка влияния ошибки определения вершины трещины по осям X (a) и Y (b) на величину КИН

трещины для надежного расчета КИН и T -напряжений. Предлагаемый метод требует меньших вычислительных ресурсов по сравнению с решением задачи, сформулированной как многопараметрическая задача оптимизации, что позволяет использовать данный подход для быстрого анализа роста усталостных трещин в элементах технических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Sumpter J.D.G.* An experimental investigation of the T-stress approach // Constraint effects in fracture. ASTM STP 1171, 1993. P. 492–502.
2. *Chao Y.J., Lam P.S., Zhang L.* Effect of constraint on fracture controlled by stress or strain // Theoretical and applied fracture mechanics. 1998. Vol. 30. No. 1. P. 75–86.
DOI: 10.1016/S0167-8442(98)00043-3
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844298000433>
3. *Hancock J.W., Reuter W.G., Parks D.M.* Constraint and toughness parameterized by T // Constraint effects in fracture. ASTM STP 1171, 1993. P. 21–40.
4. *Rice J.R.* Limitations to the small scale yielding approximation for crack tip plasticity // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1974. Vol. 22. No. 1. P. 17–26.
DOI: 10.1016/0022-5096(74)90010-6
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022509674900106>
5. *Larsson S.G., Carlsson A.J.* Influence of non-singular stress terms and specimen geometry on small-scale yielding at crack tips in elastic-plastic materials // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1973. Vol. 21. No. 4. P. 263–277. DOI: 10.1016/0022-5096(73)90024-0
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022509673900240>
6. *Leevers P.S., Radon J.C.* Inherent stress biaxiality in various fracture specimen geometries // International Journal of Fracture. 1982. Vol. 19. No. 4. P. 311–325. DOI: 10.1007/BF00012486
URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00012486>
7. *Meliani M.H., Azari Z., Pluvinage G., Matvienko Yu.G.* New approach for the T-stress estimation for specimens with a U-notch // CP2009. 2009. P. 203–214.
8. *Hild F., Roux S.* Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties — a review // Strain. 2006. Vol. 42. No. 2. P. 69–80.
DOI: 10.1111/j.1475-1305.2006.00258.x
URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1475-1305.2006.00258.x/abstract>

9. *Rastogi P.K., ed.* Digital speckle pattern interferometry and related techniques. Wiley, 2000. 368 p.
10. *Schreier H., Orteu J.J., Sutton M.A.* Image correlation for shape, motion and deformation measurements. Springer, 2009. 88 p.
11. *McNeill S.R., Peters W.H., Sutton M.A.* Estimation of stress intensity factor by digital image correlation // *Engineering Fracture Mechanics*. 1987. Vol. 28. No. 1. P. 101–112.
DOI: 10.1016/0013-7944(87)90124-X
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001379448790124X>
12. *Roux S., Hild F.* Stress intensity factor measurements from digital image correlation: post-processing and integrated approaches // *International Journal of Fracture*. 2006. Vol. 140. No. 1. P. 141–157. DOI: 10.1007/s10704-006-6631-2
URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10704-006-6631-2>
13. *Lopez-Crespo P., et al.* The stress intensity of mixed mode cracks determined by digital image correlation // *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2008. Vol. 43. No. 8. P. 769–780. DOI: 10.1243/03093247JSA419
URL: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1243/03093247jsa419>
14. *Investigation of fatigue crack closure using multiscale image correlation experiments / P. Lopez-Crespo, A. Shterenlikht, E.A. Patterson, J.R. Yates, P.J. Withers* // *Engineering Fracture Mechanics*. 2009. Vol. 76. No. 15. P. 2384–2398.
15. *Mathieu F., Hild F., Roux S.* Image-based identification procedure of a crack propagation law // *Engineering Fracture Mechanics*. 2013. Vol. 103. P. 48–59.
DOI: 10.1016/j.engfracmech.2012.05.007
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794412002020>
16. *Lopez-Crespo P., Morena B., Lopez-Moreno A., Zapatero J.* Characterisation of crack-tip fields in biaxial fatigue based on high-magnification image correlation and electro-spray technique // *International Journal of Fatigue*. 2015. Vol. 71. P. 17–25. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.02.016
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112314000759>
17. *Williams M.L.* The bending stress distribution at the base of a stationary crack // *J. Appl. Mech.* 1961. Vol. 28. No. 1. P. 78–82. DOI: 10.1115/1.3640470
URL: <http://appliedmechanics.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1394385>
18. *ГОСТ 25.506–85.* Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. М.: Стандартинформ, 2005. 61 с.

Гудков Никита Александрович — студент кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); инженер Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (Российская Федерация, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, д. 2).

Чернятин Александр Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); научный сотрудник лаборатории «Механика разрушения и живучести» Института машиноведения имени А.А. Благодрава РАН (Российская Федерация, 101990, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гудков Н.А., Чернятин А.С. Расчет параметров механики разрушения на основе эвристического подхода к определению положения вершины трещины // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 2. С. 4–16. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-2-4-16

COMPUTING PARAMETERS OF FRACTURE MECHANICS BASED ON A HEURISTIC APPROACH TO DETERMINING THE LOCATION OF THE CRACK TIP

N.A. Gudkov^{1,2}

nikita.a.gudkov@gmail.com

A.S. Chernyatin^{1,3}

cas@inbox.ru

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development, Moscow, Russian Federation

³ Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Abstract

We suggest a combined experimental and numerical technique for determining such parameters of fracture mechanics as stress intensity factor and *T*-stress, based on using the least-squares method to process tangential displacement fields occurring on the surface of a compact tension specimen in the vicinity of the crack tip. The key feature of the technique is a heuristic approach to locating the crack tip based on taking into account the specifics of configuration and representation of displacement fields, obtained generally by means of digital image correlation techniques. Williams expansion in eigenfunctions of the tangential displacement fields in the vicinity of the crack tip is the basis for determining the stress intensity factor and *T*-stress. We demonstrated the efficiency of the approach suggested and estimated the error of determining parameters of fracture mechanics depending on the accuracy of locating the crack tip. We developed an application implementing this approach, which in the future may become the foundation for a method of assessing crack resistance of full-scale structures featuring fracture-like surface defects

Keywords

Crack tip, digital image correlation technique, stress intensity factor, T-stress, least-squares method, Williams expansion

Received 12.10.2017

© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Sumpter J.D.G. An experimental investigation of the T-stress approach. In: Constraint effects in fracture. ASTM STP 1171, 1993, pp. 492–502.
- [2] Chao Y.J., Lam P.S., Zhang L. Effect of constraint on fracture controlled by stress or strain. Theoretical and applied fracture mechanics, 1998, vol. 30, no. 1, pp. 75–86. DOI: 10.1016/S0167-8442(98)00043-3 Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844298000433>

- [3] Hancock J.W., Reuter W.G., Parks D.M. Constraint and toughness parameterized by T. In: Constraint effects in fracture. ASTM STP 1171, 1993, pp. 21–40.
- [4] Rice J.R. Limitations to the small scale yielding approximation for crack tip plasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1974, vol. 22, no. 1, pp. 17–26.
DOI: 10.1016/0022-5096(74)90010-6
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022509674900106>
- [5] Larsson S.G., Carlsson A.J. Influence of non-singular stress terms and specimen geometry on small-scale yielding at crack tips in elastic-plastic materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1973, vol. 21, no. 4, pp. 263–277. DOI: 10.1016/0022-5096(73)90024-0
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022509673900240>
- [6] Leevers P.S., Radon J.C. Inherent stress biaxiality in various fracture specimen geometries. *International Journal of Fracture*, 1982, vol. 19, no. 4, pp. 311–325. DOI: 10.1007/BF00012486
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00012486>
- [7] Meliani M.H., Azari Z., Pluvinaige G., Matvienko Yu.G. New approach for the T-stress estimation for specimens with a U-notch. CP2009. 2009, pp. 203–214.
- [8] Hild F., Roux S. Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties — a review. *Strain*, 2006, vol. 42, no. 2, pp. 69–80.
DOI: 10.1111/j.1475-1305.2006.00258.x
Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1475-1305.2006.00258.x/abstract>
- [9] Rastogi P.K., ed. Digital speckle pattern interferometry and related techniques. Wiley, 2000. 368 p.
- [10] Schreier H., Orteu J.J., Sutton M.A. Image correlation for shape, motion and deformation measurements. Springer, 2009. 88 p.
- [11] McNeill S.R., Peters W.H., Sutton M.A. Estimation of stress intensity factor by digital image correlation. *Engineering Fracture Mechanics*, 1987, vol. 28, no. 1, pp. 101–112.
DOI: 10.1016/0013-7944(87)90124-X
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001379448790124X>
- [12] Roux S., Hild F. Stress intensity factor measurements from digital image correlation: post-processing and integrated approaches. *International Journal of Fracture*. 2006, vol. 140, no. 1, pp. 141–157. DOI: 10.1007/s10704-006-6631-2
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10704-006-6631-2>
- [13] Lopez-Crespo P., et al. The stress intensity of mixed mode cracks determined by digital image correlation. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2008, vol. 43, no. 8, pp. 769–780. DOI: 10.1243/03093247JSA419
Available at: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1243/03093247jsa419>
- [14] Lopez-Crespo P., Shterenlikht A., Patterson E.A., Yates J.R., Withers P.J. Investigation of fatigue crack closure using multiscale image correlation experiments. *Engineering Fracture Mechanics*, 2009, vol. 76, no. 15, pp. 2384–2398.
- [15] Mathieu F., Hild F., Roux S. Image-based identification procedure of a crack propagation law. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, vol. 103, pp. 48–59.
DOI: 10.1016/j.engfracmech.2012.05.007
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794412002020>
- [16] Lopez-Crespo P., Morenoa B., Lopez-Moreno A., Zapatero J. Characterisation of crack-tip fields in biaxial fatigue based on high-magnification image correlation and electro-spray technique. *International Journal of Fatigue*, 2015, vol. 71, pp. 17–25.
DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.02.016
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112314000759>

- [17] Williams M.L. The bending stress distribution at the base of a stationary crack. *J. Appl. Mech.*, 1961, vol. 28, no. 1, pp. 78–82. DOI: 10.1115/1.3640470
Available at: <http://appliedmechanics.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1394385>
- [18] GOST 25.506–85. Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Opredelenie kharakteristik treshchinostoykosti (vyazkosti razrusheniya) pri staticheskom nagruzhении [State standard 25.506–85. Design, calculation and strength testing. Methods of mechanical testing of metals. Determination of fracture toughness characteristics under the static loading]. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 61 p.

Gudkov N.A. — student, Department of Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Engineer, P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (Aviamotornaya ul. 2, Moscow, 111116 Russian Federation).

Chernyatin A.S. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Research Fellow, Laboratory of Fracture Mechanics and Durability, Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Malyy Kharitonevskiy per. 4, Moscow, 101990 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Gudkov N.A., Chernyatin A.S. Computing Parameters of Fracture Mechanics Based on a Heuristic Approach to Determining the Location of the Crack Tip. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2018, no. 2, pp. 4–16 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2018-2-4-16