

РАСЧЕТ ТРЕЩИН В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЯХ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В. Л. Ткалич¹, М. Е. Калинкина^{*1}, А. Г. Коробейников^{1,2}, О. И. Пирожникова¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
^{*} mariia_kalinkina@mail.ru

²Санкт-Петербургский филиал

Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлен подход к решению задач теории трещин, относящихся к так называемым „экстремальным задачам механики“. Рассмотрена задача „хрупкого разрушения“ для плоского элемента при наличии в нем прямоугольной трещины. Анализ динамики изменения трещины проведен на базе математической модели в частных производных. При расчете были заданы конкретные параметры материала, в частности алюминия, для упругого элемента и нагрузки. Полученные результаты позволили сделать вывод о значимости геометрического расположения упругих элементов в металлических изделиях объектов мониторинга транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: оценка технического состояния, металлические конструкции, дефектоскопия, липшецевы границы, теория энергии формоизменения

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-5323.2022.4.

Ссылка для цитирования: Ткалич В. Л., Калинкина М. Е., Коробейников А. Г., Пирожникова О. И. Расчет трещин в металлических конструкциях объектов транспортной инфраструктуры // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 451—456. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-451-456.

CALCULATION OF CRACKS IN METAL STRUCTURES OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE FACILITIES

V. L. Tklich¹, M. E. Kalinkina^{*1}, A. G. Korobeynikov^{1,2}, O. I. Pirozhnikova¹

¹ITMO University, St. Petersburg, Russia
mariia_kalinkina@mail.ru

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of the RAS, St. Petersburg Branch,
St. Petersburg, Russia

Abstract. An actual approach to solving problems of the theory of cracks related to the so-called “extremal problems of mechanics” is presented. The problem of “brittle fracture” for a flat element in the presence of a rectangular crack in it, is considered. An analysis of the fracture change dynamics is carried out based on a mathematical model in partial derivatives. The calculations are performed with specific parameters of the material, in particular aluminum, of the elastic element and the load. The obtained results lead to conclusion on importance of geometric arrangement of the elastic elements in metal products of objects of transport infrastructure monitoring.

Keywords: assessment of technical condition, metal structures, flaw detection, Lipschitz boundaries, theory of energy of shape change

Acknowledgments: The work was supported by the grant of the President of the Russian Federation No. МК-5323.2022.4.

For citation: Tklich V. L., Kalinkina M. E., Korobeynikov A. G., Pirozhnikova O. I. Calculation of cracks in metal structures of transport infrastructure facilities. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 6. P. 451—456 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-451-456.

Введение. Задача выявления трещин в металлических конструкциях и их элементах, используемых на объектах транспортной инфраструктуры, не только актуальна, но и требует дальнейшего развития эффективных методов неразрушающей дефектоскопии [1].

В ходе исследований проанализированы теоретические основы дефектообразования на примере ряда задач теории трещин [2—4], а также создана математическая модель (ММ) равновесия упругих тел при наличии трещин и проведены вычислительные эксперименты.

Постановка задачи равновесия упругих тел при наличии трещин. Рассмотрим постановку задачи обеспечения равновесия упругих тел при наличии трещин [5]. При соответствующей формулировке этой задачи можно выявлять критические значения параметров роста трещин в хрупких материалах, для которых имеет место процесс разрушения образца.

Выполним постановку задачи для хрупкого разрушения плоского элемента при наличии в нем прямоугольной трещины. Пусть имеется область $D \in R^2$ с липшицевой границей L . Далее предположим, что кривая γ делит область D на две подобласти D_1 и D_2 , которые также имеют липшицевы границы ∂D_1 и ∂D_2 , причем мера $meas(L \cap \partial D_1) > 0$ и $meas(L \cap \partial D_2) > 0$. Кроме того, кривая γ не выходит за границы области, то есть $\gamma \cap L = \emptyset$. В этом случае γ описывает границы трещины. Введем в рассмотрение нормаль $\nu = (\nu_1, \nu_2)$ к кривой γ . Формулировка задачи о равновесии двумерного упругого тела при наличии трещины может выглядеть следующим образом. В области D/γ найти вектор перемещений $V(u, \nu)$ и тензор напряжений $\sigma = \{\sigma_{ij}\}$, $i, j = 1, 2$, такие, чтоб соблюдались следующие условия:

- 1) $-div \sigma = F$,
- 2) $\sigma - A\varepsilon(V) = 0$,
- 3) на липшицевой границе $V = 0$.

Здесь $F(F_x, F_y) \in L^2(D)$ — заданный вектор внешних поверхностных сил; $\xi(V) = \{\xi_{ij}(V)\}$ — тензор малых деформаций; $A = \{a_{ijkl}\}$, $i, j, k, l = 1, 2$ — тензор, обладающий свойствами симметрии и положительной определенности:

$$a_{ijkl} = a_{jikl} = a_{klij}, a_{ijkl} \in L^\infty(D), a_{ijkl} \xi_{kl} \xi_{ij} \geq c_0 |\xi|^2 \quad \forall \xi_{ij} = \xi_{ji}, c_0 = \text{const} \geq 0.$$

В дальнейшем будем считать, что $a_{ijkl} = \text{const}$, $i, j, k, l = 1, 2$.

В основу поиска решения положим справедливость гипотезы о прямолинейном распространении трещин в ходе нагружения элемента. Это возможно при наличии симметрии образца, а также приложенных сил на D/γ , относительно трещины длиной l . При этом считаем, что силы не прикладываются непосредственно к зоне возникновения трещины. Это позволяет считать, что в этой зоне выполняется равенство $F_x = F_y = 0$. В такой дифференциальной постановке условие 1) описывается уравнением равновесия, 2) — линейным законом Гука, 3) — условие закрепления элемента на границе.

Результаты вычислительных экспериментов. В ходе исследований в среде MATLAB R2021b, которая позволяет решать задачи в различных предметных областях [6—11], реализована ММ равновесия упругих тел при наличии трещин.

При моделировании были заданы параметры, представленные в таблице, о ширине и высоте пластины, начальном размере трещины, приложенной нагрузке, коэффициенте интенсивности напряжений, углах, под которым расположена трещина (для расчета разных вариантов).

Параметр	Значение	Представление величины в СИ	
Полуширина пластины, b	50 мм	0,05 м	
Полувысота пластины, h_0	$1,25b$	0,0625 м	
Полудлина пластины, a	$0,5b$	0,025 м	
Давление, load	100 МПа	10^8 Па	
Коэффициент интенсивности воздействия, K_0	$load/1[\text{Н/м}^2] \cdot \sqrt{p_i \cdot a/1[\text{м}]}$	$2,8025 \cdot 10^7$	
Расположение трещины, угол	β	120°	2,0944 рад
	β_0	45°	0,7854 рад
	β_1	$15,5^\circ$	0,27053 рад
	β_2	100°	1,7453 рад

Ниже представлены данные о свойствах упругого элемента:

- плотность — 8000 кг/м^3 ;
- модуль Юнга — 190 ГПа ;
- коэффициент Пуассона — $0,45$.

На рис. 1 приведена начальная геометрия для расчета трещины под углом к длинной стороне пластины в $15,5^\circ$.

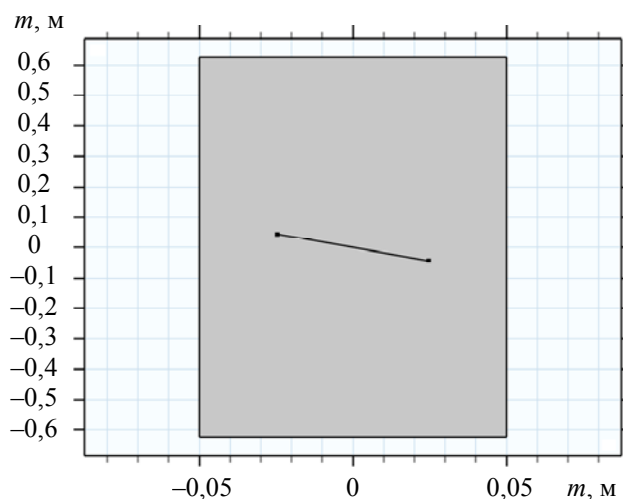


Рис. 1

На рис. 2 представлена расчетная сетка, полученная согласно условиям 1)–3), с трещиной под углом в $15,5^\circ$.

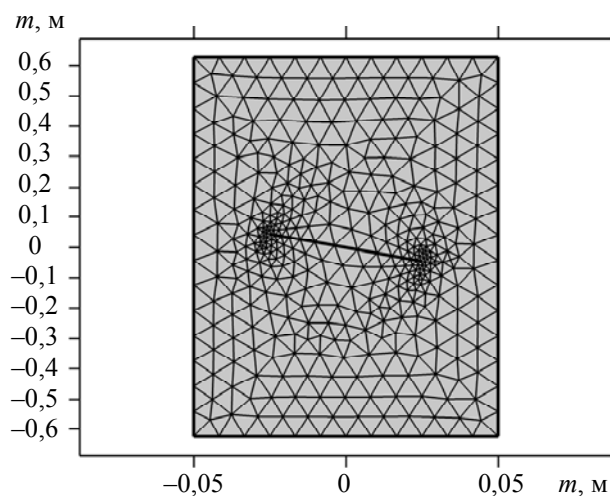


Рис. 2

На рис. 3 и 4 представлены результаты компьютерного моделирования для напряжений по Мизесу (в русскоязычной литературе — интенсивности напряжений).

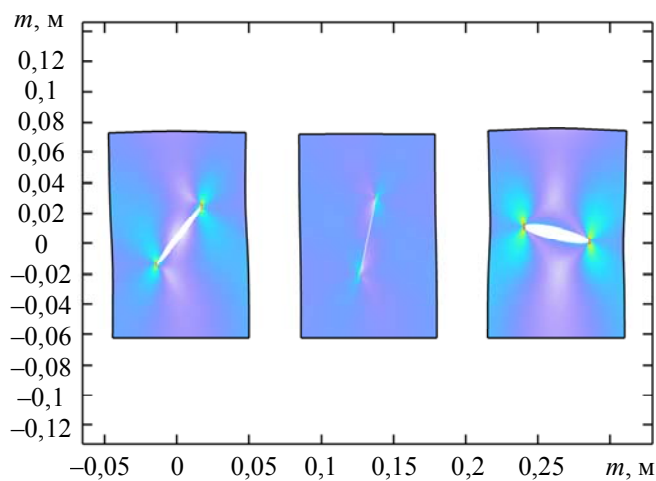


Рис. 3

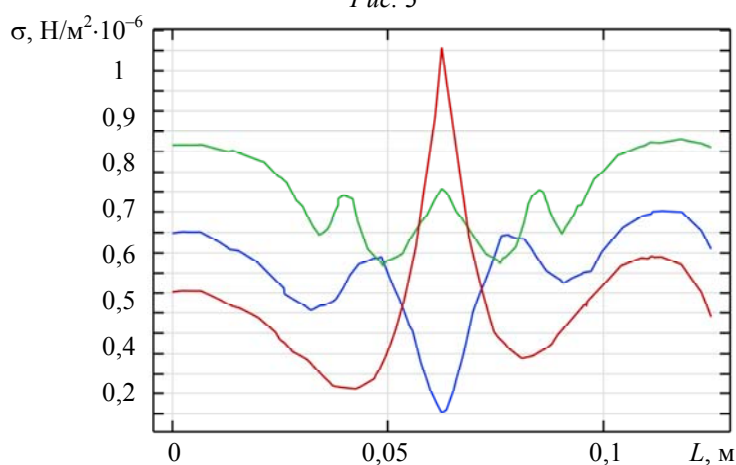


Рис. 4

На рис. 5 представлены результаты компьютерного моделирования динамики трещин — расширения, смещения раскрытия (s — ширина раскрытия трещины), расположенных изначально под разными углами.

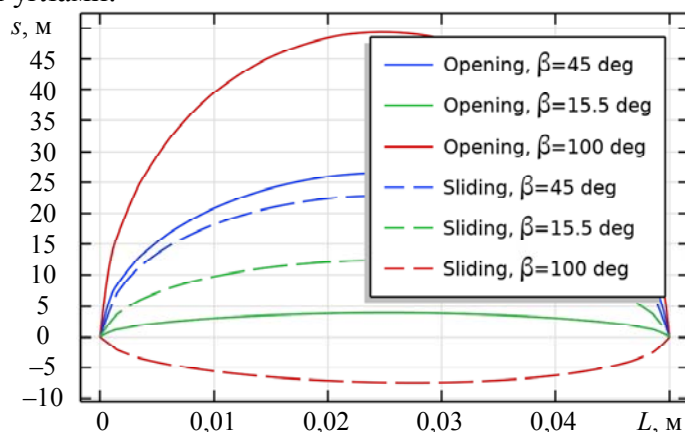


Рис. 5

Заключение. Анализ результатов компьютерного моделирования показывает, что изначальное физическое расположение трещин играет большую роль. Поэтому элементы, в которых при помощи каких-либо методов дефектоскопии обнаружены зоны с наличием трещин, необходимо устанавливать соответствующим образом. Это позволит продлевать срок службы упругих элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. BSI. Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures. British Standards Institute, Tech. Rep. BS 7910:2013+A1:2015, 2015 [Электронный ресурс]: <doi.org/10.3403/30241230>.
2. Лурье А. И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 940 с.
3. Newman J. C. and Raju I. S. An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack // Engineering Fracture Mechanics. 1981. Vol. 15, N 1. P. 185—192 [Электронный ресурс]: <https://doi.org/10.1016/0013-7944(81)90116-8>.
4. Bowness D. and Lee M. M. K. Prediction of weld toe magnification factors for semi-elliptical cracks in Tbutt joints // Intern. J. of Fatigue. 2000. Vol. 22, N 5. P. 369—387 [Электронный ресурс]: < https://doi.org/10.1016/S0142-1123(00)00012-8>.
5. Морозов Н. Ф. Математические вопросы теории трещин. М.: Наука, 1984.
6. Korobeynikov A. G., Fedosovsky M. E., Maltseva N. K., Baranova O. V., Zharinov I. O., Gurjanov A. V., Zharinov O. O. Use of information technologies in design and production activities of instrument-making plants // Indian J. of Science and Technology. 2016. Vol. 9, N 44. P. 104708.
7. Korobeynikov A. G., Grishentsev A. Y., Velichko E. N., Aleksanin S. A., Fedosovskii M. E., Bondarenko I. B., Korikov C. C. Calculation of Regularization Parameter in The Problem of Blur Removal in Digital Image // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). 2016. Vol. 25, N 3. P. 184—191.
8. Гришенцев А. Ю., Коробейников А. Г. Средства интероперабельности в распределенных геоинформационных системах // Журнал Радиоэлектроники. 2015. № 3 [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/download/elibrary_23327290_33687569.pdf>.
9. Богатырев В. А., Богатырев С. В. Своевременность обслуживания в многоуровневых кластерных системах с поэтапным уничтожением просроченных запросов // Вестн. компьютерных и информационных технологий. 2018. № 2(164). С. 28—35.
10. Мунтян Е. Р. Использование нечетких ГН-моделей для представления сложных технических систем // Информатизация и связь. 2021. № 3. С. 55—60. DOI: 10.34219/2078-8320-2021-12-3-55-60.
11. Колоденкова А. Е., Верещагина С. С., Мунтян Е. Р. Разработка единой интеллектуальной системы поддержки принятия решений для диагностирования электротехнического оборудования промышленности // Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. СПб: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. С. 1874—1878. DOI: 10.25728/vspru.2019.1874.

Сведения об авторах

- Вера Леонидовна Ткалич** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий;
E-mail: vera_leonidovna_tkalich@mail.ru
- Мария Евгеньевна Калинин** — магистрант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: mariia_kalinkina@mail.ru
- Анатолий Григорьевич Коробейников** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН им. Н. В. Пушкова;
E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru
- Ольга Игоревна Пирожникова** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; E-mail: cheesecake@mail.ru

Поступила в редакцию 02.03.22; одобрена после рецензирования 22.03.22; принята к публикации 25.04.22.

REFERENCES

1. BSI, *Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures*, British Standards Institute, Tech. Rep. BS 7910:2013+A1:2015, 2015, <https://doi.org/10.3403/30241230>.
2. Lurie A.I. *Teoriya uprugosti* (Theory of Elasticity), Moscow, 1970, 940 p. (in Russ.)
3. Newman J.C. and Raju I.S. *Engineering Fracture Mechanics*, 1981, no. 1(15), pp. 185—192, [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(81\)90116-8](https://doi.org/10.1016/0013-7944(81)90116-8).
4. Bowness D. and Lee M.M.K. *International Journal of Fatigue*, 2000, no. 5(22), pp. 369—387, [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(00\)00012-8](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(00)00012-8).

5. Morozov N.F. *Matematicheskiye voprosy teorii treshchin* (Mathematical Problems of the Theory of Cracks), Moscow, 1984. (in Russ.)
6. Korobeynikov A.G., Fedosovsky M.E., Maltseva N.K., Baranova O.V., Zharinov I.O., Gurjanov A.V., Zharinov O.O. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, no. 44(9), pp. 104708.
7. Korobeynikov A.G., Grishentsev A.Y., Velichko E.N., Aleksanin S.A., Fedosovskii M.E., Bondarenko I.B., Korikov C.C. *Optical Memory & Neural Networks* (Information Optics), 2016, no. 3(25), pp. 184–191.
8. Grishentsev A.U., Korobeynikov A.G. *Zhurnal Radioelektroniki* (Journal of Radio Electronics), 2015, no. 3, https://elibrary.ru/download/elibrary_23327290_33687569.pdf.
9. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii* (Herald of Computer and Information Technologies), 2018, no. 2(164), pp. 28–35. (in Russ.)
10. Muntyan E.R. *Informatizatsiya i svyaz*, 2021, no. 3, pp. 55–60, DOI: 10.34219/2078-8320-2021-12-3-55-60. (in Russ.)
11. Kolodenkova A.E., Vereshchagina S.S., Muntyan E.R. *Sbornik trudov XIII Vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya VSPU-2019* (Proceedings of the XIII All-Russian Conference on Management Problems of the VSPU-2019), 2019, pp. 1874–1878, DOI: 10.25728/vspu.2019.1874. (in Russ.)

Data on authors

- Vera L. Tklich** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: vera_leonidovna_tklich@mail.ru
- Maria E. Kalinkina** — M. Sc.; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: mariia_kalinkina@mail.ru
- Anatoly G. Korobeynikov** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of the RAS, St. Petersburg Branch; E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru
- Olga I. Pirozhnikova** — PhD; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: cheesecake@mail.ru

Received 02.03.22; approved after reviewing 22.03.22; accepted for publication 25.04.22.