



2. Kearns M.; Valiant L. (1989). Cryptographic limitations on learning Boolean formulae and finite automata. Symposium on Theory of computing. ACM. – 21. – pp. 433–444.
3. Freund Y., Shapire R. Experiments with a New Boosting Algorithm. – 1996.
4. Investing.com [Электронный ресурс] — <https://www.investing.com>, дата обращения 14.01.2018.
5. Kulikovskikh I.M. (2017). Cognitive validation map for early occupancy detection in environmental sensing // Engineering Applications in Artificial Intelligence – 65. – pp. 330-335.
6. Kulikovskikh I.M., Prokhorov S.A. (2017). Minimizing the effects of floor and ceiling to improve the convergence of log-likelihood // Procedia Engineering. – 201. – pp. 779-788.

А.В. Пулькин

ОЦЕНКА НАПРАВЛЕНИЯ РОСТА ТРЕЩИНЫ В УСЛОВИЯХ  
СМЕШАННОГО НАГРУЖЕНИЯ: КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ,  
ОСНОВАННЫЕ НА МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ ПОЛЯ  
НАПРЯЖЕНИЙ (КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ  
НАПРАВЛЕНИЯ РОСТА) И НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

(Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева)

Одним из важных вопросов современной вычислительной механики разрушения является аккуратная оценка направления распространения трещины в условиях смешанного деформирования, когда в образце одновременно реализуются и нормальный отрыв, и поперечный сдвиг [1-9]. В настоящее время сформулировано три критерия разрушения: критерий максимального тангенциального напряжения, критерий минимума плотности энергии упругой деформации и деформационный критерий разрушений, основанный на максимальном значении окружной деформации [1-9]. Математическая формулировка критерия максимального тангенциального напряжения гласит, что трещина будет расти в направлении, в котором тангенциальное напряжение достигает своего максимального значения:

$$\frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta^2} < 0. \quad (1)$$

В классической механике хрупкого разрушения в критерий (1) подставляют асимптотическое разложение М. Уильямса поля напряжений в окрестности вершины трещины:

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \sum_{m=1}^{m=2} \sum_{k=1}^{\infty} a_k^m r^{k/2-1} f_{m,ij}^{(k)}(\theta), \quad (2)$$



где  $r, \theta$  - полярные координаты с полюсом в окрестности вершины трещины,  $\sigma_{ij}$  - компоненты тензора напряжений,  $a_k^m$  - масштабные (амплитудные) множители,  $f_{m,ij}^{(k)}(\theta)$  - функции полярного угла, описывающие угловые распределения компонент тензора напряжений, константа  $m$  отвечает моде (виду) нагружения:  $m=1$  соответствует нормальному отрыву,  $m=2$  отвечает поперечному сдвигу. Как правило, в инженерных приложениях в полном асимптотическом разложении поля напряжений (2) удерживают лишь одно слагаемое, коэффициент при котором носит название коэффициента интенсивности напряжений:  $a_1^1 = K_I / \sqrt{2\pi}$  для нормального отрыва и  $a_1^2 = K_{II} / \sqrt{2\pi}$ . Это означает, что для асимптотического представления поля напряжений используется зависимость

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{1,ij}^{(1)}(\theta) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{2,ij}^{(1)}(\theta). \quad (3)$$

Следует отметить, что при подстановке одночленного асимптотического разложения (3) в критерий разрушения (1) исчезает зависимость угла направления трещины от расстояния, на котором измеряется тангенциальное напряжение. Однако, в последнее время в механике разрушения сложилось четкое и ясное представление о необходимости удержания в асимптотическом разложении (2) высших приближений. Очевидно, что при сохранении в асимптотическом разложении (2) высших приближений критерий должен применяться на выбранном из физических соображений расстоянии. Для бесконечной пластины с центральным разрезом коэффициенты полного асимптотического разложения известны [1-9], поэтому целью настоящей работы является численное и экспериментальное исследование углов распространения трещины для различных значений параметра смешанности нагружения и различных расстояний от кончика дефекта. В рамках работы создана программа, находящая угол распространения трещины. В программе реализована возможность удержания любого наперед заданного количества слагаемых. Результаты вычислений сведены в таблицы 1,2, где принято обозначения  $\hat{r} = r/a$  - безразмерное расстояние от кончика дефекта,  $a$  - половина длины трещины.

В самое последнее время показано, что высшие приближения в асимптотическом разложении [1] играют существенную роль и ими нельзя пренебрегать при вычислении угла направления роста трещины. Целью настоящей работы является оценка угла направления роста трещины с помощью асимптотического разложения [1], в котором удерживается различное количество слагаемых и анализ влияния высших приближений на угол направления роста трещины. С этой целью в асимптотическом разложении [1] ниже будут удерживаться различное количество слагаемых. Результаты вычислений приведены в таблице 1, в которой сведены результаты расчетов угла направления роста трещины на различных расстояниях от кончика трещины для разных значений параметра смешанности нагружения.



Таблица 1. Рассчитанные углы направления роста трещины, полученные с помощью критерия максимального тангенциального напряжения, для различных значений параметра смешанности нагружения и различных расстояний

$M^e$	$N = 1$	$\hat{r} = 0.1$	$\hat{r} = 0.2$	$\hat{r} = 0.3$	$\hat{r} = 0.4$	$\hat{r} = 0.5$	$\hat{r} = 0.6$
0,1	-67,53	-75,19	-82,50	-87,22	-47,93	-46,56	-45,60
0,2	-64,47	-70,18	-78,35	-84,22	-44,61	-43,44	-42,64
0,3	-61,18	-63,80	-72,44	-80,02	-41,16	-40,18	-39,52
0,4	-57,48	-55,54	-62,84	-73,12	-37,44	-36,65	-36,13
0,5	-53,13	-45,40	-46,26	-36,19	-33,30	-32,70	-32,31
0,6	-47,72	-34,59	-29,34	-23,48	-28,53	-28,11	-27,85
0,7	-40,61	-24,55	-18,76	-13,87	-22,92	-22,66	-22,52
0,8	-30,81	-15,65	-11,39	-8,24	-16,26	-16,13	-16,08
0,9	-17,19	-7,61	-5,42	-3,89	-8,61	-8,46	-8,45

Таблица 2. Рассчитанные углы направления роста трещины, полученные с помощью критерия максимального тангенциального напряжения, для различных значений параметра смешанности нагружения и различных расстояний

$M^e$	$\hat{r} = 0.7$	$\hat{r} = 0.8$	$\hat{r} = 0.9$	$\hat{r} = 1$	$\hat{r} = 1$	$\hat{r} = 1.25$	$\hat{r} = 1.75$
0,1	-44,91	-44,40	-44,02	-43,73	-43,26	-42,99	-43,06
0,2	-42,06	-41,64	-41,33	-41,09	-40,72	-40,62	-41,04
0,3	-39,05	-38,72	-38,47	-38,30	-38,01	-37,87	-37,76
0,4	-35,77	-35,52	-35,33	-35,20	-35,01	-34,93	-35,53
0,5	-32,05	-31,87	-31,75	-31,67	-31,56	-31,52	-30,90
0,6	-27,69	-27,58	-27,52	-27,48	-27,45	-27,28	-35,69
0,7	-22,44	-22,40	-22,38	-22,38	-22,41	-22,55	-23,71
0,8	-16,06	-16,06	-16,07	-16,09	-16,15	-16,14	-16,12
0,9	-8,46	-8,47	-8,49	-8,51	-8,56	-8,65	-8,67

При вычислении угла на различных расстояниях от кончика трещины удерживалось различное количество слагаемых и фиксировалось значение угла. Если при увеличении количества слагаемых значение угла сохранялось, то считалось, что значение угла стабилизировалось, в противном случае количество слагаемых увеличивалось до стабилизации значения угла.

Из таблицы 1 видно, что высшие приближения играют существенную роль, а именно, значения угла направления роста трещины зависят от высших приближений, особенно для нормального отрыва. График зависимости угла направления роста трещины от расстояния для разных значений параметра смешанности нагружения приведен на рис.1.

Экспериментальная часть работы. Для определения угла направления роста трещины были изготовлены образцы из следующих материалов: текстолит, сплав Д16Т, сталь 30ХГСА, сталь 30ХГСА (в закаленном состоянии НРс=42) с прорезью под углом  $45^\circ$  в центре образца, имитирующей трещину. Представлены фотографии образцов до нагружения на рис. 2, 3, 4.



Фотографии образцов после нагружения и разрыва представлены на рис. 4 и 5.

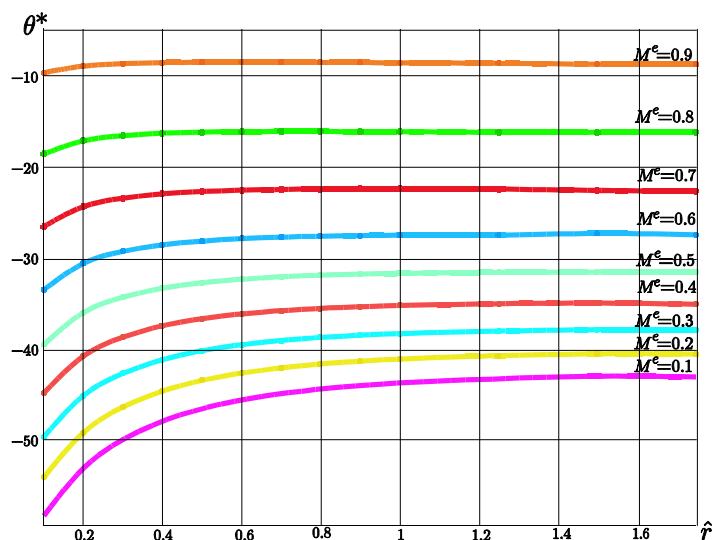


Рис. 1. Зависимость угла распространения трещины от расстояния, на котором измеряется тангенциальное напряжение



Рис. 2. Образцы с трещиной, выполненные из текстолита (слева) и сплава Д16Т (справа)

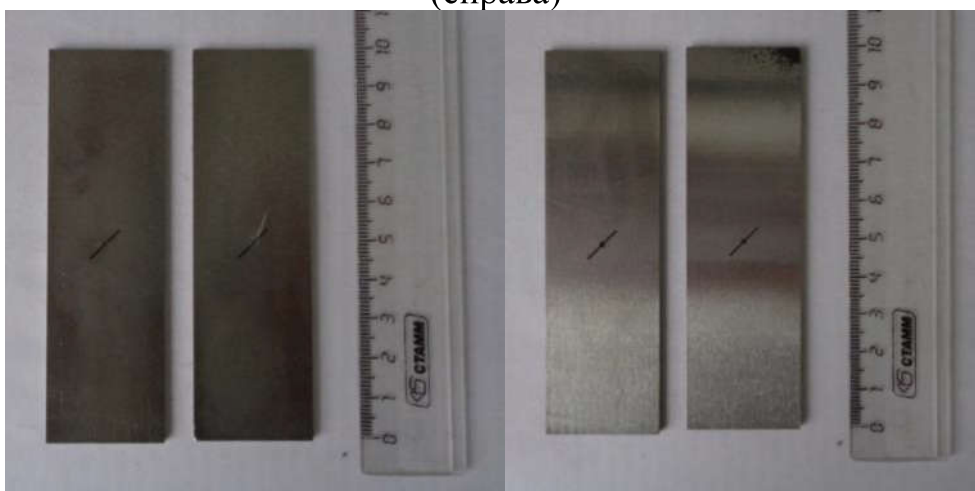


Рис.3. Образцы с трещиной, выполненные из стали 30ХГСА (слева) и . Сталь 30ХГСА (закалка HRC=42) (справа)

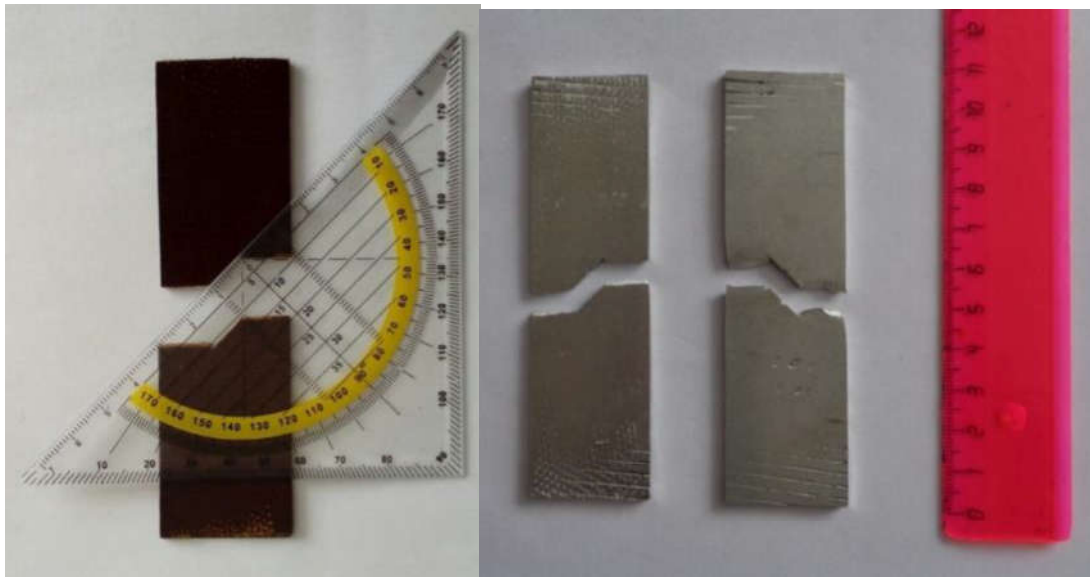


Рис. 4. Образцы с наклонной трещиной после разрушения



Рис. 5. Образцы с наклонной трещиной после разрушения



Рис. 6. Испытательный прибор для испытаний на растяжение DVT GP D NN  
Tensile



## Выводы

Проведенное теоретико-экспериментальное и численное исследование ясно показало, что в асимптотическом разложении поля напряжений у вершины трещины следует удерживать высшие приближения. В этом случае критерий максимального тангенциального напряжения приводит к оценке угла направления роста трещины, полностью совпадающей с натурным экспериментом.

## Литература

1 Степанова, Л.В. Полное асимптотическое разложение М. Уильямса у вершин двух коллинеарных трещин конечной длины в бесконечной пластине [Текст]/ Л.В. Степанова, П.С. Росляков// Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 4. – Р. 188-225.

2 Stepanova, L.V. Multi-parameter description of the crack-tip stress field: analytic determination of coefficients of crack-tip stress expansions in the vicinity of the crack tips of two finite cracks in an infinite plane medium [Текст]/ L.V. Stepanova, P.S. Roslyakov// International Journal of Solids and Structures. – 2016. – V. 100-101. – P. 11-28.

3 Степанова, Л.В. Смешанное деформирование пластины с трещиной в условиях плоского напряженного состояния [Текст]/ Л.В. Степанова, Е.М. Яковлева// Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2014. – Т.3. – С. 129-162.

4 Степанова, Л.В. Асимптотика поля напряжений у вершины усталостной трещины в среде с поврежденностью: вычислительный эксперимент и аналитическое решение [Текст]/ Л.В. Степанова, С.А. Игонин// Сибирский журнал вычислительной математики. – 2015.- Т.8. № 2. – С. 201-217.

5 Степанова, Л.В. Смешанное деформирование пластины с трещиной в условиях плоского напряженного состояния [Текст]/ Л.В. Степанова, Е.М. Яковлева// Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2014. – Т.3. – С. 129-162.

6 Астафьев, В.И. Асимптотика напряженно-деформированного состояния в окрестности вершины трещины в условиях ползучести/ В.И. Астафьев, Л.В. Степанова, С.А. Шестериков// Вестник Самарского государственного университета. – 1995. № 5. С. 59-64.

7 Krepl, O. The influence of non-singular terms on the precision of stress description near a sharp material inclusion tip [Текст]/ O. Krepl, J. Klusak// Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2017. – V. 90. – P. 85-99.

8 Hello, G. Analytical determination of coefficients in crack-tip stress expansions for a finite crack in an infinite plane medium [Текст]/ G. Hello, M.B. Tahar, J.-M. Roelandt// International Journal of Solids and Structures. – 2012. – V. 49. – P. 556-566.

9 Seitzl, S. Williams expansion-based approximation of the stress field in an Al 2024 body with a crack from optical measurements Williams expansion-based approximation of the stress field in an Al 2024 body [Текст]/ S. Seitzl, L. Malikova// Frattura ed Integrita Strutturale. – 2017. – № 41. – P. 323-331.



10 Malikova, L. Influence of the elastic mismatch on crack propagation in a silicate-based composite [Текст]/L. Malikova, V. Vesely// Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2017. – V. 91. – P. 25-30.

11 Crack propagation in non-homogenous materials: Evaluation of mixed-mode SIFs, T-stress and kinking angle using a variant of EFG Method[Текст]/ N. Muthu, S.K. Maiti, B.G. Falzon, W. Yan // Engineering Analysis with Boundary Elements. – 2016. – V. 72. – P. 11-26.

К.В. Пензин

## РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОТЧЕТОВ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «МОНИТОРИНГ ГОТОВНОСТИ»

(Самарский университет)

В электроэнергетической отрасли России существует множество компаний, осуществляющих выработку электроэнергии. От них требуется поддержание необходимых объемов поставки энергии и мощности потребителям. Для достижения этой цели необходима организация совместной деятельности компаний посредством введения требований к производству.

Все компании-производители электроэнергии получают статус участников ОРЭМ (оптовый рынок электрической энергии и мощности), это влечет за собой возникновение обязательств по поддержанию принадлежащего им на праве собственности или на ином законном основании генерирующего оборудования в состоянии готовности к выработке электроэнергии [1].

Процесс планирования и контроля исполнения готовности энергетического оборудования является частью деятельности по управлению выработкой электроэнергии и мощности. В настоящее время он не автоматизирован, это снижает эффективность обеспечения оптимального соотношения готовности и ремонтного простоя оборудования при выполнении требований надежной и безопасной эксплуатации.

Кроме того, в настоящее время не автоматизирован и процесс расчета показателей, характеризующих возможность работы генерирующих объектов в соответствии с технологическим режимом, заданным системным оператором, и готовность генерирующего оборудования к участию в регулировании частоты электрического тока и перетоков активной электрической мощности.

Регулирование ОРЭМ является одной из основных задач системного оператора единой энергетической системы России (СО ЕЭС). Выполняется оно методами экономического воздействия: при отклонении энергетических параметров от запланированных СО по инициативе участника ОРЭМ влечет к его штрафование и наоборот [2]. Из этого следует, что организация контроля за значениями показателей и его автоматизация являются первостепенными задачами для участников ОРЭМ.