



делированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика». ИММОД-2015. – Москва: ИПУ РАН, 2015. – Т.2. – С. 391-394.

6. Подьячев И.А., Маликов Р.Ф. Имитационная модель улично-дорожной сети в среде Anylogic /Перспективные информационные технологии (ПИТ 2016): труды Международной научно-технической конференции / под ред. С.А. Прохорова. – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2016. – С.673-676.

7. Маликов, Р. Ф. Практикум по имитационному моделированию сложных систем в среде AnyLogic 6: учеб. пособие. – Уфа: Изд-во БГПУ, 2013. – 296с.

8. Маликов, Р.Ф. Практикум по дискретно-событийному моделированию сложных систем в расширенном редакторе GPSS World: практикум. – Уфа: Изд-во БГПУ, 2017. – 273с.

К.В.Фролов

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕШАННОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПОЛУДИСКА С НАДРЕЗОМ

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

1. Введение. О смешанном нагружении тел с надрезами

Определение направления роста трещины в условиях смешанного нагружения, критерии разрушения, позволяющие найти направление распространения трещины, является одной из широко обсуждаемых проблем современной механики разрушения [1-8]. В настоящее время широко обсуждаются вопросы теоретического, экспериментального и численного определения параметров механики разрушения для смешанного деформирования тел с надрезами и трещинами [1-8]. Одним из важных вопросов является моделирование чистого поперечного сдвига в экспериментальных условиях. Во многих работах предложены специальные образцы и специальные условия нагружения для воспроизведения чистого поперечного сдвига. В настоящее время предложен и широко используется ряд экспериментальных образцов для исследования смешанного нагружения, например, в работах [6,7] рассматривается полудиск с наклонным надрезом. В статьях рассматривается серия вычислительных экспериментов с этим типом образца, в котором варьируется угол наклона надреза. На основе проведенного компьютерного имитационного моделирования авторы показывают, что для определенного значения угла наклона надреза, можно реализовать чистый поперечный сдвиг. Отметим, что чистый нормальный отрыв возникает при действии сосредоточенной силы, симметричного надреза, ортогонального хорде полудиска (рис. 1, слева). Тем не менее, многие вопросы остаются открытыми: экспериментальное исследование полудиска с наклонным



надрезом показывает смешанное нагружение при данном значении угла наклона надреза. Поэтому целью настоящей работы является конечно-элементное решение задачи определения напряженно-деформированного состояния у вершины наклонного надреза в полудиске для различных значений угла наклона дефекта (рис. 1, справа) и вычисление параметров механики разрушения (коэффициентов интенсивности напряжений для нормального отрыва и поперечного сдвига) для нахождения вида смешанного нагружения. Авторы [6] утверждают, что при 49 градусах происходит чистый поперечный сдвиг. Однако настоящее исследование и проведенные расчеты опровергают этот результат. Проведенное конечно-элементное исследование, реализованное в программном комплексе SIMULIA Abaqus, и последующее сравнение полученных результатов и наблюдений в рамках интерференционно-оптических методов механики деформируемого твердого тела (метод цифровой фотоупругости) подтверждают невозможность реализации чистого поперечного сдвига в данном типе образцов с наклонной трещиной.

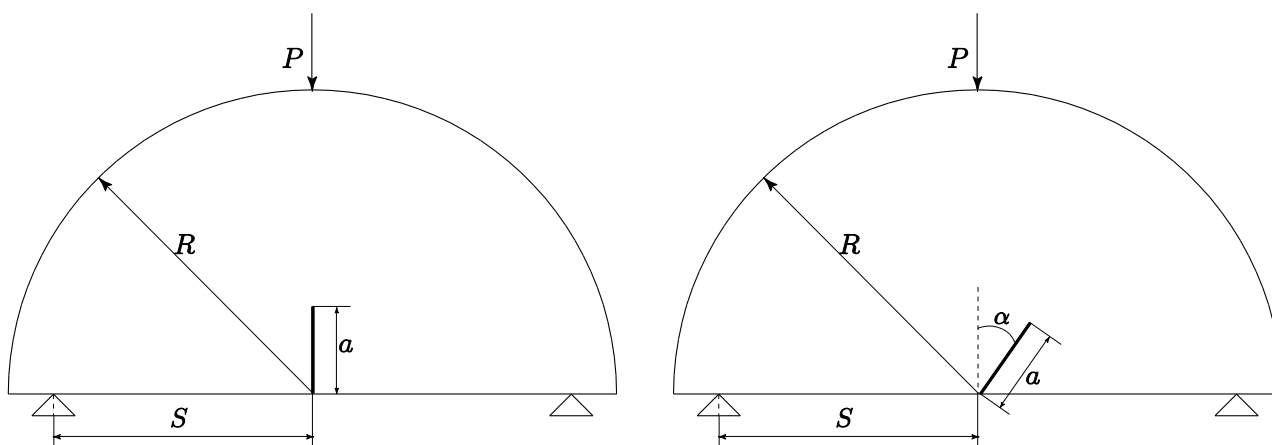


Рис. 1 Схематичное изображение образца и приложенной нагрузки

2. Компьютерное имитационное моделирование роста трещины в условиях смешанного нагружения

Конечно-элементные расчеты проводились в программном комплексе SIMULIA Abaqus. При моделировании был выбран классический образец в форме полудиска радиусом $R = 50$ мм с наклонным надрезом длиной $a = 15$ мм (рис. 1). Образец был установлен на две неподвижные опоры и подвергался статической нагрузке $P = 100$ кг на середину пролета на верхней поверхности образца. Наклон надреза варьировался от 0 до 89 градусов с целью достижения различных видов нагружения образца (нормальный отрыв, поперечный сдвиг и смешанное нагружение). Для моделирования условий нагружения были выбраны следующие параметры для образца из эпоксидной смолы: модуль Юнга = 3012 ГПа и коэффициент Пуассона = 0.2. Пример конечно-элементного разбиения приведен на рис. 2. В расчетах использовалось автоматическое разбиение в основной области образца и более частое разбиение в окрестности вершины трещины с использованием сингулярных элементов.

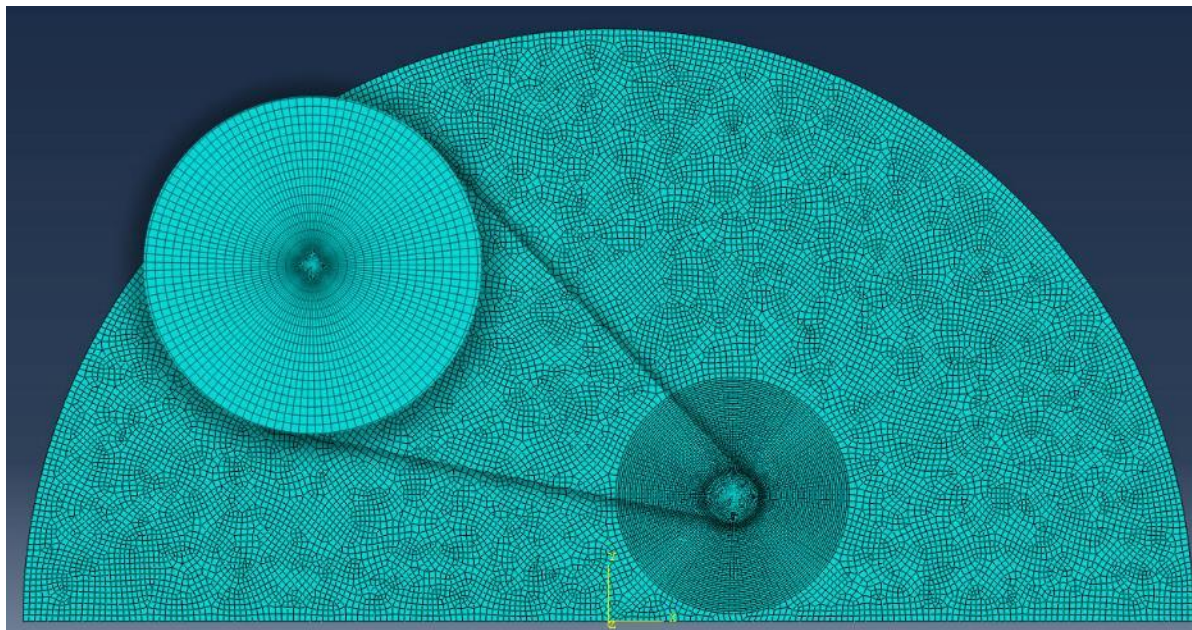


Рис. 2 Конечно-элементное разбиение образца

Коэффициенты интенсивности напряжений для нормального отрыва K_I и для поперечного сдвига K_{II} были получены в результате численного анализа, выполненного в программном комплексе SIMULIA Abaqus с применением метода контурных интегралов. Результаты расчетов сведены в таблицу 1. Коэффициенты интенсивности напряжений описываются известными соотношениями [6]

$$K_i = \frac{P}{2Rt} \sqrt{\pi a} Y_i(a/R, S/R, \alpha), \quad i = I, II$$
$$T = \frac{P}{2Rt} T^*(a/R, S/R, \alpha)$$

где $Y_i(a/R, S/R, \alpha)$, $i = I, II$ - безразмерные функции безразмерных аргументов, которые носят название тарировочных функций, описывающих зависимость коэффициентов интенсивности напряжений от геометрических параметров модели, T - второе слагаемое в асимптотическом разложении М. Уильямса, называемое T -напряжением, а $T^*(a/R, S/R, \alpha)$ - безразмерное T -напряжение – функция, описывающая зависимость T -напряжений от геометрии образца.

Рис. 3 ясно показывает, что при угле наклона трещины, равном 49° , коэффициент интенсивности напряжений, соответствующий чистому нормальному отрыву, не обращается в нуль, поэтому чистый поперечный сдвиг при данном угле наклона дефекта не осуществляется.

3. XFEM моделирование роста трещины

Моделирование распространения трещины также было проведено с помощью программного обеспечения SIMULIA Abaqus с применением расширенного метода конечных элементов extended finite element method (XFEM).



Таблица 1. Результаты численных исследований, полученные с применением метода контурных интегралов

Угол наклона трещины	Y_I	Y_{II}	T^*
0	39,67	0,00	-4
5	39,39	-2,21	-3
10	38,48	-4,33	-2
15	36,99	-6,25	1
20	35,05	-7,91	4
25	32,74	-9,25	7
30	30,15	-10,26	11
35	27,43	-10,93	14
40	24,61	-11,27	17
45	21,81	-11,31	20
50	19,08	-11,08	22
55	16,47	-10,62	24
60	13,97	-9,96	26
65	11,61	-9,12	28
70	9,39	-8,10	29
75	7,29	-6,90	30
80	5,25	-5,46	30
85	3,19	-3,68	30
89	0,94	-1,75	27

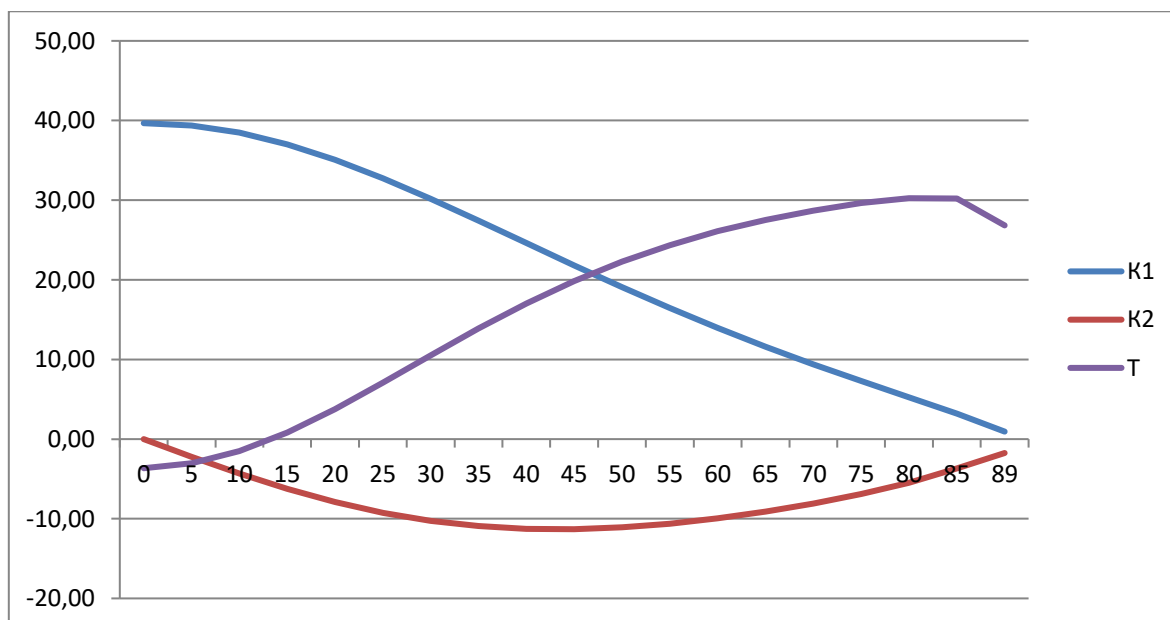


Рис. 3 Зависимость параметров разрушения от угла наклона разреза

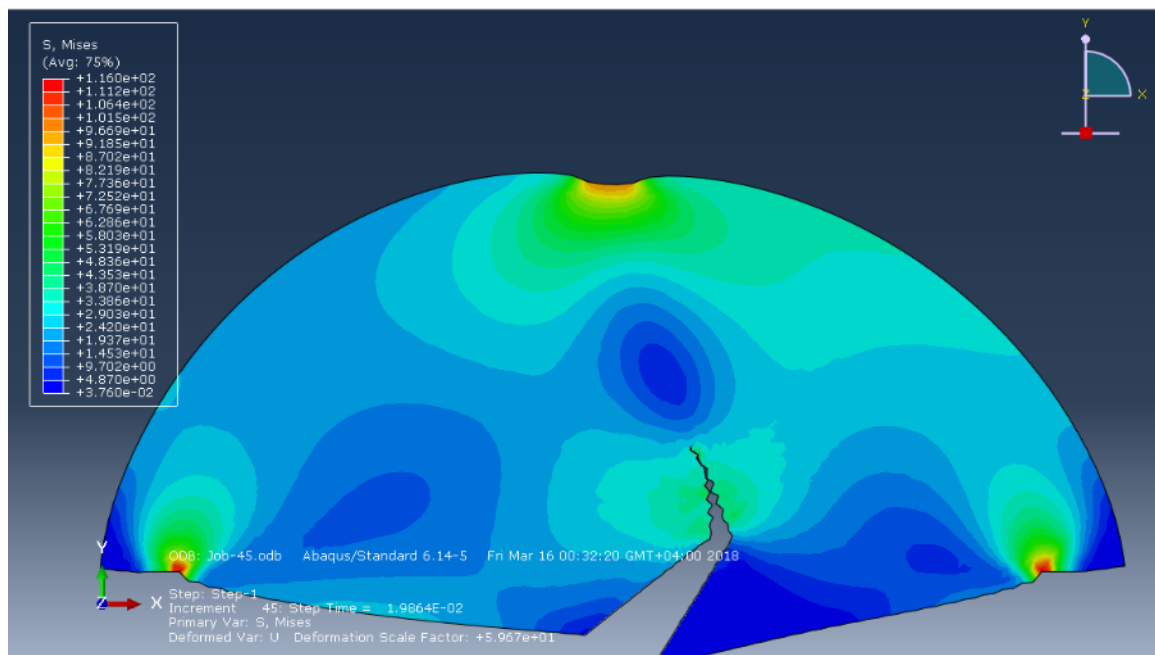


Рис. 4. Моделирование распространения трещины

4. Выводы и анализ численных расчетов

Анализ численных расчетов показывает, что действительно при угле наклона разреза, равном 49° , чистого поперечного сдвига не происходит. Для получения экспериментального образца, в котором реализуется чистый поперечный сдвиг, следует продолжить компьютерное имитационное моделирование для различных типов образцов.

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. – Р. 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. Яко-



влева// Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2014. – Т.3. – С. 129-162.

6. Mirsayar, M.M. Tangential strain-based criteria for mixed-mode I/II fracture toughness of cement concrete/ M.M. Mirsayar, A. Razmi, F. Berto// Fatigue Fracture Engineering Materials Structure. – 2017. – P. 1-9.

7. Fakhri, M. Mixed mode tensile – In plane shear fracture energy determination for hot mix asphalt mixtures under intermediate temperature conditions/ M. Fakhri, E. Haghghat Kharrazi, M.R.M. Aliha// Engineering Fracture Mechanics – 2018. P. 98-113.

8. Ayatollahi, M.R. Experimental Determination of Mode II Fracture Resistance in Asphalt Concretes/ M.R. Ayatollahi, Sadjad Pirmohammad// 13th International Conference on Fracture – 2013.

В.С. Фетисов, И.В. Мирская, Р.А. Кильметов

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ ВИНТОМОТОРНЫХ ГРУПП МАЛЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

(Уфимский государственный авиационный технический университет)

В 2006 г. в Германии был изобретен мультикоптер – беспилотный летательный аппарат (БПЛА) вертолетного типа с несколькими несущими винтами. С тех пор во всем мире стали появляться многочисленные разработки различных разновидностей этих аппаратов. Основу силовой установки мультикоптера составляют бесколлекторные электродвигатели – достаточно дешевые и надежные двигатели, которые питаются от так называемых ESC (Engine Speed Control) – специальных преобразователей постоянного напряжения в трехфазное напряжение регулируемой частоты. Винтомоторная группа (ВМГ) – это совокупность электродвигателя и закрепленного на его валу воздушного винта.

Эффективность мультикоптера (а также связанные с этим грузоподъемность и время полета) зависят от того, насколько правильно подобраны его ВМГ. Другими словами, для определенной задачи должны быть правильно выбраны тип двигателя, диаметр и шаг винта, а также ESC и источник питания (которым является, как правило, аккумуляторная батарея со свойственными ей параметрами - напряжением, энергоемкостью и предельным током).

Большую помощь при разработке мультикоптеров оказывают различные устройства для испытания ВМГ (впрочем, не только мультикоптеров – при разработке аппаратов самолетного типа характеристики ВМГ не менее важны). В простейшем случае это динамометры для измерения тяги, развиваемой ВМГ (как правило, до 5 кгс). Несколько фирм выпускают различные испытательные стенды для измерения тяги и других параметров ВМГ. На этом рынке известны бренды Turnigy, Racerstar [1, 2] и др. (рис.1).