

труднений и оптимизации процесса модульного обучения через использование информационно-коммуникационных технологий. Результатом данной работы явилось создание модульно-мультимедийной технологии, которая позволила генерировать содержание, маршрут обучения, автоматизировать все виды контроля и цикл организационного проектирования.

Опыт создания мультимедийных модульных программ показал, что они должны быть ориентированы на использование всего комплекса дидактических средств представления учебной информации, включая новейшие интерактивные технологии с максимальной индивидуализацией и активизацией познавательной деятельности обучаемого. Такие программы позволяют осуществить профессиональное обучение с применением средств мультимедиа. В рамках модульно-мультимедийной технологии разработана автоматизированная система контроля на основе педагогически критериально-ориентированных тестов. Функционирование системы контроля обеспечивается инструментальной компьютерной средой «MediaTog», выполненной на объектно-ориентированном языке Java, что позволяет ей работать на всех современных платформах и операционных системах, а также интегрироваться в компьютерную сеть Internet.

Мультимедийный сценарий, подготавливаемый на основе содержания учебного материала в виде учебных элементов и инструктивных блоков, позволяет оперативно и качественно создавать модульные учебные программы, выполненные как на электронном, так и на бумажном носителях. Демонстрация художественных образов программы предоставляет возможность включаться в технологический процесс. Связи между структурными компонентами учебного процесса формируются автоматически, обеспечивая хранение и обработку материалов, генерацию отчетов. Мультимедийные модульные программы способствуют сохранению и тиражированию уникального опыта и профессионального мастерства, способствуя возрождению и развитию редких профессий, в том числе народных промыслов и ремесел.

Реализация пилотных проектов позволила нам подтвердить перспективность данного направления, определить условия и заложить основы для практической реализации данной технологии в процесс подготовки, переподготовки и повышения квалификации специалистов.

Получено 10.09.2003 г.

ISBN 985-6550-90-4. Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь. Гомель, 2005

УДК 624.05

*А. Я. НАЙЧУК, В. И. ДРАГАН, А. Н. ПЕТРУКОВИЧ*  
*Брестский государственный технический университет*

## **К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ДРЕВЕСИНЫ**

Рассматривается возможность определения несущей способности и надежности прослуживших долгое время элементов деревянных конструкций на основе оценки параметров поля напряжений и деформаций в вершине трещины. Оценку параметров предполагается проводить методом конечных элементов при помощи имеющихся программных комплексов «ANSYS», «MSC/NASTRAN» и «Stizar».

Значительное число деревянных конструкций зданий и сооружений, эксплуатируемых на сегодняшний день, имеют те или иные дефекты. Наличие дефектов, которые чаще всего встречаются в виде трещин, в ряде случаев ставит под угрозу саму возможность дальнейшей безопасной эксплуатации подобных конструкций. Демонтаж и замена таких конструкций повлечет за собой немалые материальные затраты. В связи с этим закономерно встает вопрос о том, какие из подобных конструкций обладают достаточной для нормальной эксплуатации несущей способностью и надежностью. Ответ на этот вопрос можно получить, проведя ряд исследований с использованием методов механики разрушения. И если для изотропных материалов, таких как сталь, выполнено значительное число исследований, то для анизотропных материалов вопрос остается открытым. Одним из самых эффективных строительных материалов, обладающих свойством анизотропии, является древесина.

Действительную несущую способность и надежность эксплуатируемых строительных конструкций с трещинами можно определить, оценив параметры поля напряжений и деформаций в вершине

трещины. Основными характеристиками трещиностойкости материалов в механике разрушения являются: 1) вязкость разрушения, выраженная через предельные значения коэффициентов интенсивности напряжений (КИН); 2) предельные значения контурного J-интеграла Черепанова-Рейса [1].

Напряжения и деформации в непосредственной близости от вершины трещины пропорциональны отношению  $K/r^{1/2}$  [1]. Здесь  $K$  – коэффициент интенсивности напряжений, а  $r$  – расстояние от вершины трещины до рассматриваемой точки. Чтобы определить  $K$ , необходимо верно смоделировать поле напряжений и деформаций у вершины трещины тем или иным методом. На современном этапе наиболее предпочтительным для задач с различными граничными условиями является использование численных методов.

В настоящее время разработано множество программ по определению напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций, в основу которых положен метод конечных элементов (МКЭ), получивший большое распространение во многих странах мира. Следует отметить, что большинство их базируется на использовании треугольных конечных элементов (КЭ) с линейной функцией аппроксимации поля перемещений. Использование таких КЭ не позволяет смоделировать особенности НДС у вершины трещины. Предпочтительней использовать изопараметрические квадратичные элементы, позволяющие моделировать сингулярность поля напряжений у вершины трещины [2].

Одним из средств расчета НДС конструкций, в том числе и имеющих дефекты в виде трещин, являются программно-расчетные комплексы "ANSYS", "MSC/NASTRAN", "Stizar". В частности, в "ANSYS" реализована процедура прямого метода определения величины КИН для изотропных материалов. Что же касается ортотропных и анизотропных материалов, то в "ANSYS" и "Stizar" вычисление КИН реализовано через расчет компонентов векторов потока энергии [3, 4].

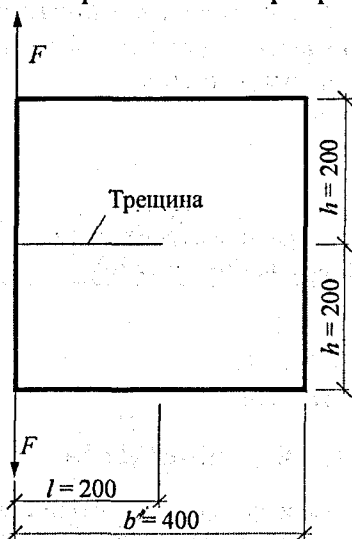


Рисунок 1 – Прямоугольный компактный образец с краевой трещиной

Для сравнения результатов расчета численным методом и полученным по формулам ГОСТ 25.506–85 [2] были определены КИН для прямоугольного компактного образца с краевой трещиной (тип 3 [5]), подвергнутого внецентренному растяжению. Параметры рассчитанного образца, приведенного на рисунке 1: материал – изотропный, модуль упругости  $E = 2,1e + 5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ , прикладываемое усилие  $F = 5000$  Н, толщина – 200 мм.

Для упрощения численной модели трещина была представлена абсолютно тонкой. КИН, рассчитанный по формуле ГОСТа, равен  $381800 \text{ Па}\cdot\text{м}^{1/2}$ , а рассчитанный численным методом –  $403540 \text{ Па}\cdot\text{м}^{1/2}$ . При этом соблюдалось соответствие свойств материала, геометрических параметров модели. Расхождение 5 % является следствием упрощения

формы трещины, а также объясняется размерами сингулярных конечных элементов возле вершины трещины, изменение которых позволяет получить более точный результат.

Наиболее удобным для экспериментальных исследований по определению вязкости разрушения древесины  $K_{IC}$  является образец в виде двухконсольной балки (ДКБ-образец) [6], основными параметрами которого при исследовании характеристик трещиностойкости древесины являются: величина разрушающей нагрузки ( $F$ ), толщина ( $t$ ), длина трещины ( $l$ ) и высота консоли ( $h$ ) (рисунок 2).

Выполненные расчеты, результаты которых приведены ниже, позволяют судить о степени влияния каждого из этих факторов. В таблицах 1–4 представлены результаты расчета изотропного образца (см. рисунок 2) с модулем упругости  $E = 2,1e + 5$  МПа и коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,3$ . Для упрощения расчета использовалась модель в виде половины ДКБ-образца с соответствующими граничными условиями.

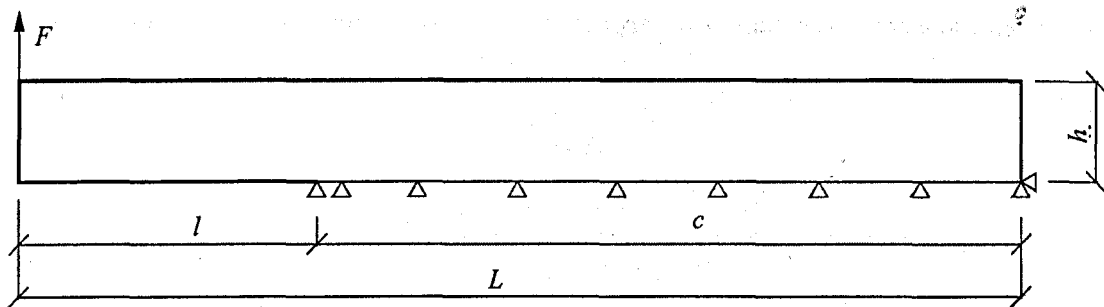


Рисунок 2 – Расчетная схема ДКБ-образца

Образец 1:  $L = 1,05$  м;  $l = 0,18$  м;  $h = 0,06$  м;  $t = 0,01$  м.

Т а б л и ц а 1 – Зависимость КИН от величины растягивающей сосредоточенной нагрузки

Сила, Н	100	200	300	400	500
КИН, Па·м <sup>1/2</sup>	520710	1041400	1562100	2082800	2603500

Значения, приведенные в таблице 1, свидетельствуют о линейной зависимости между сосредоточенной растягивающей нагрузкой и КИН.

Образец 2:  $L = 1,05$  м;  $l = 0,18$  м;  $F = 1000$  Н;  $t = 0,01$  м.

Т а б л и ц а 2 – Зависимость КИН от высоты консоли

Высота, м	0,05	0,055	0,06	0,065	0,07
КИН, Па·м <sup>1/2</sup>	6636100	5847300	5206500	4683400	4257100

Значение КИН пропорционально значению высоты консоли в степени  $-3/2$ .

Образец 3:  $L = 1,05$  м;  $F = 1000$  Н;  $h = 0,06$  м;  $t = 0,01$  м.

Т а б л и ц а 3 – Зависимость КИН от длины трещины

Длина, м	0,18	0,3	0,42	0,54	0,66
КИН, Па·м <sup>1/2</sup>	5206500	8031900	10864000	13686000	16515000

КИН прямо пропорционален длине трещины. Причем следует заметить, что такая пропорциональность характерна для образцов с трещиной, длина которой больше  $2,2h$  и меньше, чем  $c = L - 2,5h$ , где  $L$  – длина образца, м;  $h$  – высота консоли, м.

Образец 4:  $L = 1,05$  м;  $F = 1000$  Н;  $h = 0,06$  м;  $l = 0,18$  м.

Т а б л и ц а 4 – Зависимость КИН от толщины образца

Толщина, м	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
КИН, Па·м <sup>1/2</sup>	5207100	2603500	1735700	1301800	1041400

КИН обратно пропорционален толщине образца.

С учетом приведенных данных общий вид функциональной зависимости между КИН и указанными выше факторами

$$K_1 = f_K \left( \frac{Fl}{th^{3/2}} \right), \quad (1)$$

где  $F$  – растягивающая сосредоточенная сила, Н;  $l$  – длина трещины, м;  $t$  – толщина образца, м;  $h$  – высота консоли (полувысота образца), м.

Указанный общий вид функциональной зависимости аналогичен зависимостям, приведенным в работах Г. С. Волкова [7], Г. П. Никишкова и А. Г. Краева [6].

Для ортотропной модели был рассчитан такой же образец (см. рисунок 2) со следующими характеристиками материала:  $E_x = 10e + 9$  Па;  $E_y = E_z = 4e + 8$  Па;  $G_{xy} = 5e + 8$  Па;  $u_{xy} = 0,02$ ;  $u_{yx} = u_{yz} = 0,5$ , где  $E_x, E_y, E_z$  – модули упругости;  $G_{xy}$  – модуль сдвига;  $u_{yx}, u_{xy}, u_{yz}$  – коэффициенты поперечной деформации.

Для него определялось значение  $J$ -интеграла, переход от которого к КИН осуществлялся по формуле [1]:

$$K_1 = \sqrt{\frac{J_1}{c_1}}, \quad (2)$$

где

$$c_1 = \left( \frac{a_{11}a_{22}}{2} \right)^{1/2} \left[ \left( \frac{a_{22}}{a_{11}} \right)^{1/2} + \frac{2a_{12} + a_{66}}{2a_{11}} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

$$a_{11} = \frac{1}{E_x}; \quad a_{22} = \frac{1}{E_y}; \quad a_{12} = -\frac{\nu_{xy}}{E_y} = -\frac{\nu_{yx}}{E_x}; \quad a_{66} = \frac{1}{G_{xy}}. \quad (4)$$

Результаты расчета ортотропной модели показывают, что между значениями  $J$ -интеграла и вышеуказанных ключевых параметров ( $F, l, h, t$ ) наблюдается закономерная связь, как и для КИН, т. е. общий вид функциональной зависимости значений  $J$ -интеграла может быть представлен в виде

$$J_1 = f_J \left( \frac{F^2 l^2}{t^2 h^3} \right). \quad (5)$$

На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

1 Использование численных методов, реализованных в программно-расчетных комплексах "ANSYS", "MSC/NASTRAN" и "Stizar", для моделирования и расчета образцов с трещиной позволяет получить достоверные результаты, которые могут быть использованы для анализа НДС строительных конструкций.

2 Полученные решением методом конечных элементов значения основных характеристик трещиностойкости материалов по своей функциональной зависимости от некоторых ключевых параметров в достаточной степени адекватны имеющимся на сегодняшний день эмпирическим зависимостям и решениям теории упругости. Это позволяет надеяться на успешную их экстраполяцию на мало изученные материалы с последующей экспериментальной проверкой.

3 Для оптимизации экспериментальных исследований таких материалов, как древесина, целесообразно использовать принцип "герменевтического круга": сначала провести исследование числовой модели, полученные результаты применить к проведению натуральных испытаний, по итогам которых скорректировать первоначальную числовую модель и т. д., пока не будет получена заданная точность результатов.

Полученную числовую модель можно будет применить на практике, отказавшись от дорогостоящих испытаний эксплуатируемых конструкций, имеющих дефекты в виде трещин.

#### Список литературы

- 1 Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
- 2 Найчук А. Я., Холодарь Б. Г. Сингулярные нелинейные элементы в плоской задаче ортотропных тел с трещинами // Материалы II Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике: Тез. докл. – Мн., 1999. – 97 с.
- 3 <http://www.cadfem.ru/>
- 4 Шимкович Д. Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 448 с.
- 5 ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985 – 61 с.
- 6 Никшиков Г. П., Краев А. Г. Коэффициенты интенсивности напряжений для ДКБ-образца при нагружении силой и моментом // Физика и механика деформации и разрушения: Сб. статей. Вып. 4. – М.: Атомиздат, 1977. – 92 с.
- 7 Волков Г. С. Методика определения трещиностойкости хрупких материалов на стадии остановки трещины // Проблемы прочности. – 1989. – № 9. – С. 22.

Получено 08.07.2003 г.