XXXI Неделя науки СПбГПУ. Материалы межвузовской научной конференции. Ч. I: С.118-119, 2003.

М.Ю.Горохов (6 курс, каф. МГГУ), Б.Е.Мельников, д.т.н., проф.,
А.С.Семенов, к.ф.-м.н., доц.

ПАРАМЕТРЫ РАЗРУШЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ГРИФФИТСА В УСЛОВИЯХ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ

Целью данной работы являлся анализ влияния геометрической нелинейности на параметры разрушения на примере задачи о растяжении по моде I бесконечной плоскости с трещиной в условиях плоской деформации при использовании различных моделей материалов. Анализировалась возможность с высокой степенью точности вычислять указанные параметры на основе численного решения задачи. В заключение проводился анализ влияния длины трещины на относительные размеры области больших деформаций. Весь анализ выполнен для параметров материала и нагружения типичных для металлов.

В качестве параметров разрушения, по которым производилось сравнение различных моделей материалов, были приняты следующие параметры:

- ♦ показатель сингулярности напряжений $p_{\sigma_{ij}}$ (предполагается, что в окрестности вершины трещины поле напряжений имеет асимптотическое представление вида $\sigma_{ij} \sim A\left(\frac{r^{\circ}}{a}\right)^{p_{\sigma_{ij}}}$),
- ♦ J-интеграл $J = \int\limits_{\Gamma}\left(NW^* - N \cdot P \cdot F\right)d\Gamma$, $W^* = \int P \cdot dF^T$
- ♦ осредненное напряжение $\overline{\sigma} = \frac{1}{d_*}\int\limits_0^{d_*}\sigma_{22}(X_1, 0)dX_1$, где d_* структурный параметр материала ($\overline{\sigma} = \sigma_{22}^{\infty}\sqrt{1+\frac{2a}{d_*}}$ для линейно упругого материала),
- ♦ CTOD (Crack Tip Opening Displacement) - критическое раскрытие в вершине трещины $\delta_t = \Delta u_y\big|_{x=a-r_{pl}}$, где условный радиус пластической зоны r_{pl} принимался на основе решения задачи линейной теории упругости $r_{pl} = \frac{a}{2}\left(\frac{\sigma_{22}^{\infty}}{\sigma_Y}\right)^2(1-2\nu)^2$ для плоского деформированного состояния.
- ♦ Исследовались следующие модели материалов:
- ♦ материал Гука (малые деформации);
- ♦ упруго-пластический материал с линейным кинематическим упрочнением (малые деформации);
- ♦ сжимаемый и несжимаемый гиперупругие неогуковский материал и материал Муни;
- ♦ модель упруго-пластического материала с линейным кинематическим упрочнением основанная на аддитивном разложении тензора скоростей деформаций (большие деформации);
- ♦ модель упруго-пластического материала с линейным кинематическим упрочнением основанная на мультипликативном разложении градиента деформаций (большие деформации).

Решение задачи проводилось методом конечных элементов при помощи системы конечно-элементного анализа MSC.Marc. Характерный размер наименьшего элемента Д в окрестности вершины трещины соотносится с половиной ее длины *a* как 1:4000.

В качестве параметров материала были выбраны следующие значения: модуль Юнга E = 210 ГПа, коэффициент Пуассона ν = 0.3, предел текучести σ_Y = 200 МПа, модуль упрочнения E_T = E/30 = 7 ГПа, для неогуковского материала C_{10} = 0.408 ГПа, для материала Муни C_{10} = 0.3 ГПа и C_{01} = 0.104 ГПа, структурный параметр d_* = 1000 μm = a/100. Константы для материалов Муни-Ривлина и неогуковского подобраны так, чтобы при малых деформациях определяющее соотношение переходило в закон Гука с константами E и ν. Длина трещины была принята равной 0,2 м.

В сравнительной таблице сведены данные о расчете параметров разрушения для различных моделей материала. В таблице имеется ряд незаполненных ячеек для показателя сингулярности интенсивности напряжений. В данном случае не удалось найти стабильное значение показателя сингулярности по результатам аппроксимации решения на различных группах узлов конечно-элементной сетки.

Таблица

Параметры разрушения для различных моделей материала

Модель материала	σ_{22}^{∞}, МПа	Показатель сингулярности				J-интеграл, Н/м	$\bar{\sigma}$, МПа	CTOD, мкм
		σ_{11}	σ_{22}	σ_{33}	σ_{int}			
Линейно упругий	100	-0.51	-0.49	-0.50	-0.49	$1.39 \cdot 10^4$	1367	17.2
	200	-0.51	-0.49	-0.50	-0.49	$5.59 \cdot 10^4$	2734	69.7
Упруго-пластический с кинематическим упрочнением (малые деформации)	100	-0.15	-0.13	-0.37		$1.39 \cdot 10^4$	798	40
	200	-0.46	-0.25	-0.37		$7.89 \cdot 10^4$	1412	204
Неогуковский сжимаемый	100	-0.52	-0.48	-0.50	-0.49	$1.27 \cdot 10^4$	1335	17.1
	200	-0.52	-0.48	-0.50	-0.49	$5.09 \cdot 10^4$	2633	68.2
Муни-Ривлин сжимаемый	100	-0.52	-0.48	-0.50	-0.49	$1.27 \cdot 10^4$	1345	18.2
	200	-0.52	-0.48	-0.50	-0.49	$5.09 \cdot 10^4$	2647	69.5
Упруго-пластический с кинематическим упрочнением (аддитивная декомпозиция)	100	-0.22	-0.16	-0.29	-0.21	$1.08 \cdot 10^4$	728	32.9
	200	-0.47	-0.25	-0.33	-0.31	$7.78 \cdot 10^4$	1315	210
Упруго-пластический с кинематическим упрочнением (мультипликативная декомпозиция)	100	-0.22	-0.17	-0.36	-0.24	$1.19 \cdot 10^4$	709	30.8
	200	-0.34	-0.17	-0.38	-0.26	$7.29 \cdot 10^4$	1280	208

Показатель сингулярности напряжений, осредненные напряжения, CTOD очень чувствительны к качеству конечно-элементной сетки, J-интеграл является стабильным по отношению к качеству конечно-элементной сетки, показывая приемлемую точность даже на грубых сетках. Показатель сингулярности напряжений - наиболее трудно вычисляемый параметр из рассмотренных. Осредненное напряжение $\bar{\sigma}$ чувствительно к выбору размеров зоны осреднения. При уменьшении отношения d_*/a погрешность вычисления $\bar{\sigma}$ резко возрастает. Учет геометрической нелинейности в задаче о растяжении бесконечной плоскости с трещиной для реальных параметров материала (металлические материалы) и нагружения не оказывает существенного влияния на параметры разрушения (J-интеграл, $\bar{\sigma}$, *CTOD).* Причиной этого являются малые размеры области больших деформаций в сравнении с длиной трещины.