XXXI Неделя науки СПбГПУ. Материалы межвузовской научной конференции. Ч. IV: С.23-25, 2003.

УДК 539.3

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

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ НА ПАРАМЕТРЫ РАЗРУШЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ГРИФФИТСА. ЧАСТЬ 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

В сравнительной таблице сведены данные о расчете параметров разрушения для различных моделей материала.

Таблица. Параметры разрушения для различных моделей материала

Модель материала	σ_{22}^{∞}, ÌÏà	Показатель сингулярности			J-интеграл, Н/м	$\bar{\sigma}$, МПа	CTOD, мкм
		σ_{11}	σ_{22}	σ_{33}			
Линейно упругий	100	-0.51	-0.49	-0.50	$1.39 \cdot 10^4$	1367	17.2
	200	-0.51	-0.49	-0.50	$5.59 \cdot 10^4$	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 несжимаемый	100	-0.55	-0.51	-0.53	$0.992 \cdot 10^4$	1349	12.4
	200	-0.55	-0.51	-0.53	$3.97 \cdot 10^4$	2699	48.7
Неогуковский сжимаемый	100	-0.52	-0.48	-0.50	$1.27 \cdot 10^4$	1335	17.1
	200	-0.52	-0.48	-0.50	$5.09 \cdot 10^4$	2633	68.2
Муни-Ривлин несжимаемый	100	-0.55	-0.51	-0.53	$0.992 \cdot 10^4$	1356	13.1
	200	-0.55	-0.51	-0.53	$3.97 \cdot 10^4$	2708	49.8
Муни-Ривлин сжимаемый	100	-0.52	-0.48	-0.50	$1.27 \cdot 10^4$	1345	18.2
	200	-0.52	-0.48	-0.50	$5.09 \cdot 10^4$	2647	69.5
Упруго-пластический с кинематическим упрочнением (аддитивная декомпозиция)	100	-0.22	-0.16	-0.29	$1.08 \cdot 10^4$	728	32.9
	200	-0.47	-0.25	-0.33	$7.78 \cdot 10^4$	1315	210
Упруго-пластический с кинематическим упрочнением (мультипликативная декомпозиция)	100	-0.22	-0.17	-0.36	$1.19 \cdot 10^4$	709	30.8
	200	-0.34	-0.17	-0.38	$7.29 \cdot 10^4$	1280	208

Основной вывод, который можно сделать на основании приведенной таблицы, – учет геометрической нелинейности в задаче о растяжении бесконечной плоскости с трещиной при реальных параметрах материала (металлические материалы) и нагрузки не оказывает существенного влияния на параметры разрушения: $J-$интеграл, $\bar{\sigma}, CTOD$.

Причиной этого является то, что при данной постановке задачи о трещине область больших деформаций мала в сравнении с длиной трещины, в отличие от зоны пластичности, которая при высоком уровне нагружения ($\sigma_{22}^{\infty} \sim \sigma_Y$) сравнима и даже превосходит длину трещины. При выбранных в данном расчете параметрах материала и длине трещины зона больших деформаций (превосходящих 5%) не превышает уровня примерно 0.5 % от длины трещины. По отношению к выбранному параметру структуры материала $d_* = 1000\text{мкм}$ размер зоны больших деформаций не превышает 25 %.

Здесь стоит сказать, что значение, выбранное в расчете значение d_*, значительно превосходит реальные значения этого параметра для металлических материалов, у которых оно составляет порядка 10 – 100 мкм. Поэтому, если бы в анализе было выбрано реальное значение d_*, то по параметру $\overline{\sigma}$ можно было бы ожидать значительного расхождения между геометрически линейными и геометрически нелинейными моделями материалов. Но в этом случае могли бы возникнуть сомнения о точности полученных результатов. В большинстве конструкций в машиностроении, если и бывают трещины, то они много короче выбранной нами трещины длиной в 20 сантиметров, ну а микротрещины присутствуют всегда. Как будет показано далее на основании численных расчетов, размеры области больших деформаций в сравнении с длиной трещины не зависят от длины трещины. Поэтому если взять трещину хотя бы в 10 раз короче и принять $d_* = 100\text{мкм}$, то учет геометрической нелинейности на параметре $\overline{\sigma}$ опять же не скажется.

Очевидно, что полученный результат о малости зоны больших деформаций в сравнении с длиной трещины является прямым следствием выбранных нами параметров материала, нагружения и геометрии объекта исследования. Был поставлен вопрос о том, при каких нагрузках может наблюдаться существенное отличие геометрически линейных моделей от геометрически нелинейных моделей. В упругости оказалось, что нагрузки для этого должны превосходить величины порядка 1/100 модуля Юнга. Например, различие в раскрытии трещины для линейно упругого материала и для сжимаемого материала Муни-Ривлина при нагрузке $\sigma_{22}^{\infty} = 10\ \text{ГПа} \approx \text{E}/20$ составляет величину порядка 20 %. Ясно, что нагрузки в 1/100 модуля Юнга многократно превосходят известные пределы текучести материалов. Поэтому исследование поведения трещины в упруго-пластическом материале при таких нагрузках несколько теряет смысл.

Другой способ расширить зону больших деформаций – переход к рассмотрению низкомодульных или слабо упрочняющихся материалов. В данной работе этот класс материалов не рассматривался.

На заключительном этапе работы был выполнен анализ влияния длины трещины на размер зоны больших деформаций в сравнении с длиной трещины. Было установлено, что такое влияние отсутствует.

Следствием этого является то, что при данных параметрах материала и нагружения вывод о незначительном влиянии геометрической нелинейности на параметры разрушения, такие как *J*-интеграл и CTOD, можно распространить на любые длины трещин. Что касается осредненного напряжения $\overline{\sigma}$, то здесь все зависит от отношения $\dfrac{d_*}{a}$. Результат о независимости относительных размеров области больших деформаций можно было ожидать заранее, так как решение данной задачи при любом типе материала должно быть функцией отношения $\dfrac{r^\circ}{a}$, где r° – расстояние в полярной системе координат с началом в вершине трещины в недеформированной конфигурации. Это следует из того, что в асимптотике для напряжений

$$\sigma \sim \Sigma \left(\frac{r^\circ}{a} \right)^{p_\sigma}$$

коэффициент Σ по размерности не может зависеть от длины трещины. Если предположить что величина Σ зависит от *a*, то *a* должно входить в эту функцию в отношении с каким либо параметром размерности длины, а такого параметра в данной постановке задачи нет (есть только параметры материала – E, σ_Y, E_T , внешняя нагрузка – σ_{22}^{∞} и половина длины трещины – a).

Выводы. 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 $\overline{\sigma}$ чувствительно к выбору размеров зоны осреднения. При уменьшении отношения d_*/a погрешность вычисления $\overline{\sigma}$ 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, $\overline{\sigma}, CTOD$. Причиной этого являются малые размеры области больших деформаций в сравнении с длиной трещины.