

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТРЕЩИН В ПЛОСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ

В.И. Шабуневич
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Рассмотрено конечно-элементное моделирование плоских образцов разной толщины с различными по длине центральными трещинами. Приведены результаты модального, гармонического и статического анализов моделей этих образцов с помощью комплекса PATRAN-NASTRAN. Методы динамического анализа трещин могут быть применены для оценки работоспособности различных материалов и изделий в условиях, приближающихся к эксплуатационным, а также при проектировании различного рода ответственных конструкций, например, гермоотсеков космических аппаратов.

Ключевые слова: конечные элементы, образцы с центральными трещинами, длина трещины, толщина образца.

Разрушение различных изделий во время эксплуатации по механизму быстрого разрушения почти всегда вызывается приложенными напряжениями, которые меньше по величине, чем заложенные в конструкцию и рассчитанные с учетом соответствующих правил проектирования и коэффициентов безопасности. Разрушение какого-либо элемента конструкции может произойти хрупко (до наступления общего пластического течения), если он содержит концентратор напряжений, локализирующий область образования трещины. Поэтому важно выявить причины зарождения разрушения перед фронтом существующей трещины или другого концентратора напряжений и их связь с системой приложенных напряжений. Существует множество микромеханизмов распространения трещин – от скола или межзеренного разрушения с незначительной деформацией до полностью пластического сдвига (в тонких полосах) [1].

В макроскопических теориях прочности различают два вида разрушения: *отрыв* в результате действия растягивающих напряжений и *срез* под действием касательных напряжений. Считается, что отрыв может произойти без предварительной макропластической деформации, в то время как разрушению путем среза такая деформация всегда предшествует. Поэтому отрыв часто соответствует хрупкому, а срез – вязкому пластическому разрушению. Именно на эти два типа подразделяется большинство случаев разрушения в металловедении. Внешне хрупкое и вязкое разрушения отличаются в первую очередь величиной пластической деформации перед разрушением. К настоящему времени установлено, что любому, в том числе хрупкому разрушению металлов и сплавов, предшествует какая-то пластическая деформация. Перед хрупким разрушением она обычно намного меньше, чем перед вязким, но четкой количественной границы здесь провести нельзя. Оба типа разрушения включают две стадии: зарождение зародышевой трещины и ее распространение. По меха-

низму зарождения трещин хрупкое и вязкое разрушения принципиально не различаются. Качественное различие между ними связано со скоростью распространения трещины. При хрупком разрушении эта скорость очень велика и составляет 0,4 – 0,5 от скорости распространения звука в материале образца. В случае же вязкого разрушения трещина распространяется с относительно малой скоростью, соизмеримой со скоростью деформации образца [2].

В данной работе приведены некоторые результаты динамического анализа конечно-элементных (КЭ) моделей плоских образцов с центральными трещинами различной длины. Рассматриваемые образцы представляли собой пластины из стали длиной 5 м, шириной 4,1 м и толщиной 10 и 500 мм. В них предполагается наличие сквозных узких прорезей шириной 0,5 мм и длиной 0,6, 1,2 и 2,4 м. Расчеты параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) КЭ моделей образцов проводились с помощью комплекса PATRAN-NASTRAN [3, 4]. Вид КЭ моделей представлен на рис. 1.

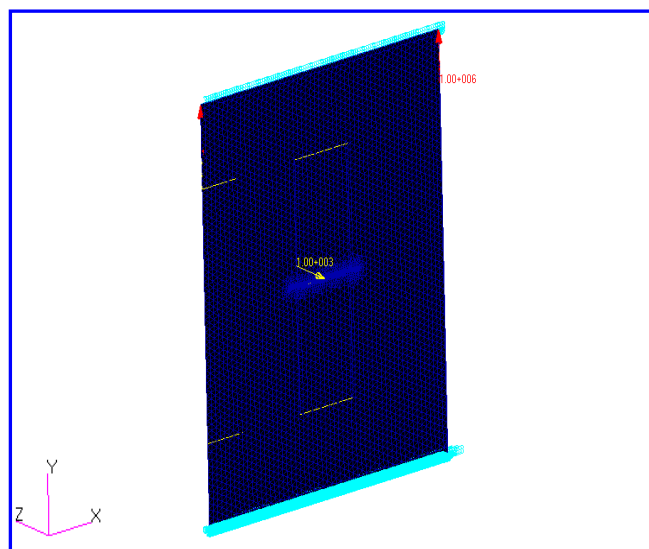
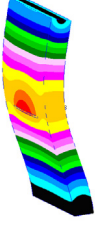
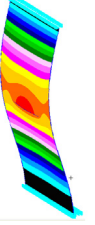


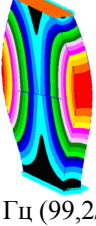

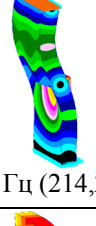
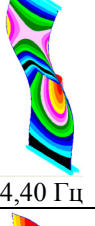
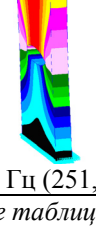
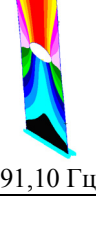


Рис. 1. КЭ модель образца с центральной трещиной

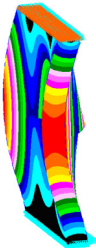








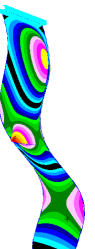
В таблице представлены результаты модального анализа КЭ моделей образцов: формы и частоты их собственных колебаний. В нечетных колонках указаны формы колебаний, в четных – соответствующие им частоты. В колонке 2 в скобках приведены также частоты для образцов без трещин с толщинами соответственно 500 и 100 мм. В колонках 6 и 8 формы частот идентичны, показанным в колонке 4 формам. Видно (колонка 1), что в толстом образце все формы колебаний идут по порядку. В

относительно тонких же образцах между формами колебаний в плоскости образцов добавляется огромное количество изгибных форм. Так, например, в диапазоне частот от 0 до 200 Гц в толстом образце присутствует только 5 собственных частот, а в тонких образцах их количество увеличивается за счет изгибных форм до 130 и более. Существенен также факт равенства собственных частот колебаний в плоскости для тонких и толстых образцов и их слабое отличие для различной длины трещины.

$L_{тр} = 2400 \text{ мм}$		$L_{тр} = 1200 \text{ мм}$		$L_{тр} = 600 \text{ мм}$			
Формы и частоты, $t = 500 \text{ мм}$		Формы и частоты, $t = 10 \text{ мм}$					
1	2	3	4	5	6	7	8
1	 60,6 Гц (70,1/14,6)	1	 1,38 Гц	1	1,42 Гц	1	1,45 Гц
2	 87,79 Гц (95,3/95,2)	78	 87,59 Гц	68	93,33 Гц	66	94,61 Гц
3	 97,64 Гц (99,2/21,8)	2	 2,17 Гц	2	2,19 Гц	2	2,19 Гц
4	 187,18 Гц (214,2/47,5)	3	 4,40 Гц	3	4,71 Гц	3	4,75 Гц
5	 191,47 Гц (251,9/252)	130	 191,10 Гц	165	235,54 Гц	171	247,49 Гц



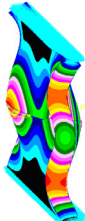
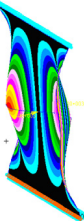
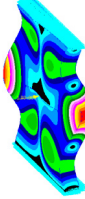
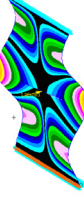
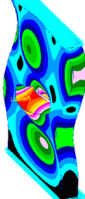
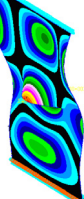
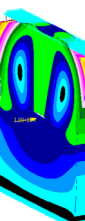
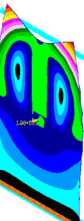

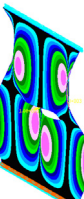
Продолжение таблицы на стр. 13

Продолжение таблицы

$L_{тр} = 2400$ мм		$L_{тр} = 1200$ мм		$L_{тр} = 600$ мм			
Формы и частоты, $t = 500$ мм		Формы и частоты, $t = 10$ мм					
1	2	3	4	5	6	7	8
6	 205,88 Гц (216,2/48,6)	4	 4,73 Гц	4	4,84 Гц	4	4,88 Гц
7	 243,18 Гц (249,1/56,9)	5	 5,71 Гц	5	5,72 Гц	5	5,72 Гц
8	 272,27 Гц (282,0/282)	182	 272,18 Гц	193	280,89 Гц	195	281,76 Гц
9	 291,84 Гц (363,2/87,3)	6	 7,34 Гц	6	8,69 Гц	6	8,79 Гц
10	 363,82 Гц (416,3/99,3)	7	 8,82 Гц	7	9,62 Гц	7	9,87 Гц

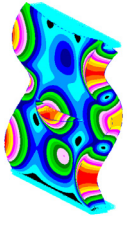
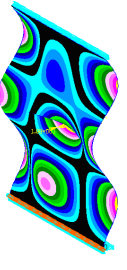
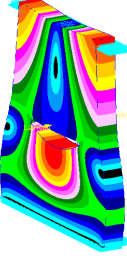
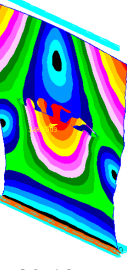
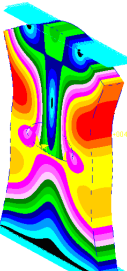

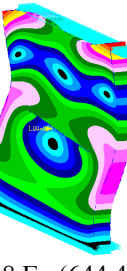
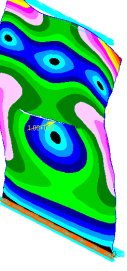
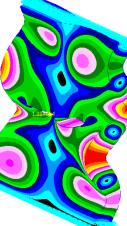
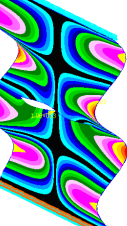
Продолжение таблицы на стр. 14

Продолжение таблицы

$L_{гр} = 2400 \text{ мм}$		$L_{гр} = 1200 \text{ мм}$		$L_{гр} = 600 \text{ мм}$			
Формы и частоты, $t = 500 \text{ мм}$		Формы и частоты, $t = 10 \text{ мм}$					
1	2	3	4	5	6	7	8
11	 406,95 Гц (516,3/516)	261	 406,15 Гц	321	483,02 Гц	345	507,62 Гц
12	 418,40 Гц (432,9/102)	8	 10,16 Гц	8	10,33 Гц	8	10,34 Гц
13	 442,63 Гц (448,9/109)	9	 10,89 Гц	9	11,01 Гц	9	11,01 Гц
14	 455,93 Гц (-/142)	10	 12,20 Гц	10	13,885 Гц	10	14,22 Гц
15	 500,30 Гц (541,4/541)	314	 499,16 Гц	350	528,77 Гц	365	537,79 Гц
16	 522,77 Гц (559,1/141)	12	 13,81 Гц	11	14,31 Гц	11	14,30 Гц

Окончание таблицы на стр. 15

Окончание таблицы

$L_{тр} = 2400$ мм		$L_{тр} = 1200$ мм		$L_{тр} = 600$ мм			
Формы и частоты, $t = 500$ мм		Формы и частоты, $t = 10$ мм					
1	2	3	4	5	6	7	8
17	 528,82 Гц (558,7/170)	11	 13,77 Гц	12	16,75 Гц	12	17,04 Гц
18	 580,99 Гц (598,8/599)	356	 580,19 Гц	392	594,50 Гц	403	597,76 Гц
19	 628,90 Гц (-/-)	383	 628,84 Гц	454	698,57 Гц	487	729,48 Гц
20	 636,18 Гц (644,4/644)	388	 635,97 Гц	419	642,09 Гц	433	643,91 Гц
21	 657,69 Гц (685,1/180)	13	 17,97 Гц	13	18,19 Гц	13	18,16 Гц

Видим, что с увеличением длины трещины частота колебаний в плоскости образцов уменьшается и не зависит от толщины образцов, изгибные же частоты изменяются незначительно. С увеличением толщины изгибные частоты увеличиваются приблизительно пропорционально.

На рис. 2 – 5 приведены некоторые характерные результаты гармонического анализа КЭ моделей образцов для двух узлов на противоположных по толщине поверхностях у вершин трещин при гармоническом нагружении верхних торцов моделей по Y давлением 10^6 Па и двумя противоположно направленными сосредоточенными силами 10^3 Н в центре трещин по Z , приложенными к противоположным берегам трещин.

Видим, что с увеличением длины центральной трещины в относительно тонких образцах появляются значительные по величине пики резонансных напряжений на низких частотах колебаний.

Уменьшение давления по Y до 10^5 Па и одновременное увеличение поперечных сил по Z до 10^5 Н приводит к следующим результатам гармонического анализа для относительно толстого образца (рис. 6). Видим, что по сравнению с результатами,

представленными на рис. 5, здесь появляются новые значительные резонансные пики параметров НДС на более низких частотах. Возможно этим объясняется появление наклонных губ среза на прямых изломах при разрушении отрывом. При этом статический анализ дает картину напряжений Мизеса, сравнимую с прежней (см. рис. 7, а и б).

На рис. 7 показаны картины напряжений Мизеса в зонах вершин трещин, полученные при статических расчетах. Явно видно, что в толстом образце по сравнению с тонкими образцами зона концентрации напряжений значительно меньше по размерам в плоскости образцов и имеет другую форму. Учитывая вышеизложенное, рассмотренные в данной работе относительно тонкие стальные образцы по типу возможного развития в них трещин можно отнести к срезу, а толстый образец – к отрыву. В результате проведенной работы можно сделать вывод, что динамический анализ (модальный и гармонический) КЭ моделей плоских образцов разной толщины с центральными трещинами различной длины, также как и статический анализ образцов, позволяет выявить некоторые важные особенности.

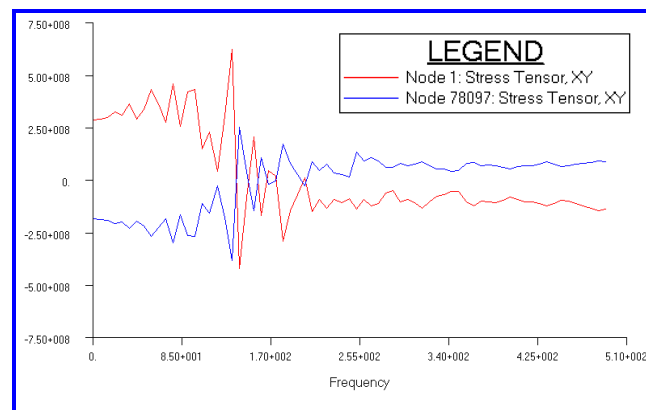
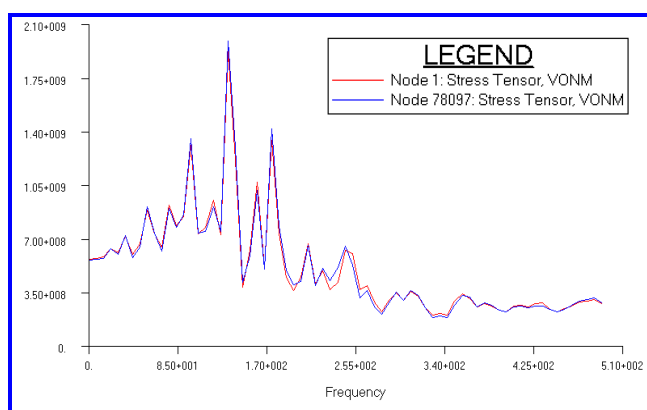


Рис. 2. Расчетные магнитуды напряжений Мизеса (а) и компоненты касательных напряжений (б) для образца толщиной $t = 10$ мм с трещиной длиной $L_{тр} = 600$ мм при гармоническом нагружении

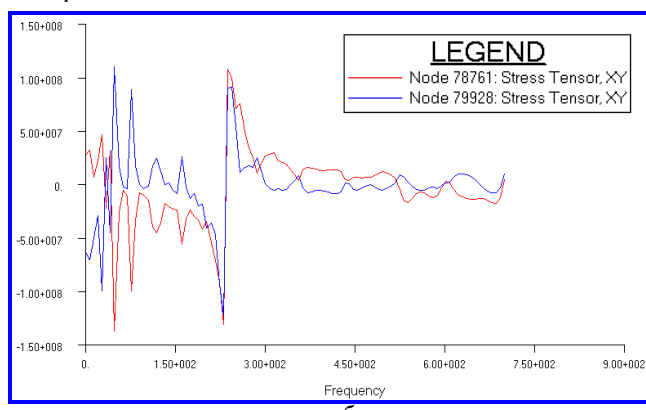
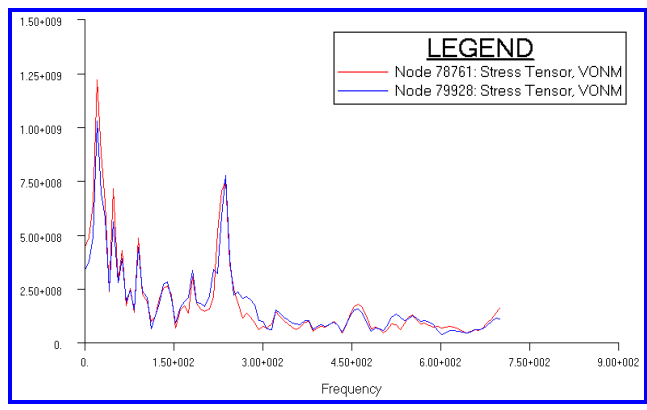
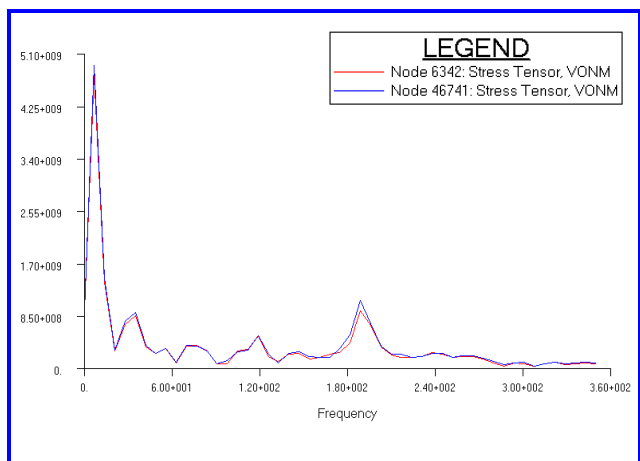
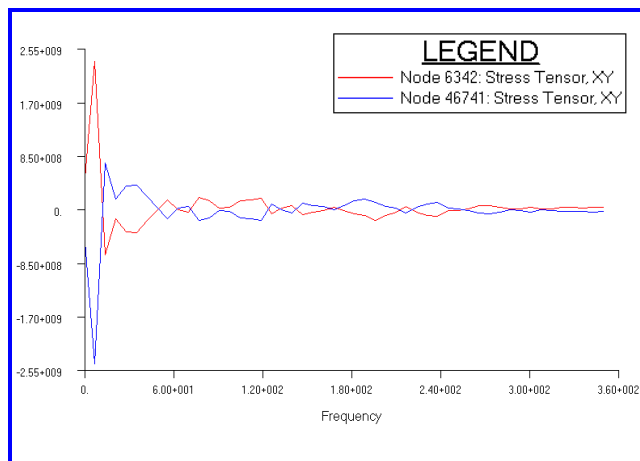


Рис. 3. Расчетные магнитуды напряжений Мизеса (а) и компоненты касательных напряжений (б) для образца толщиной $t = 10$ мм с трещиной длиной $L_{тр} = 1200$ мм при гармоническом нагружении

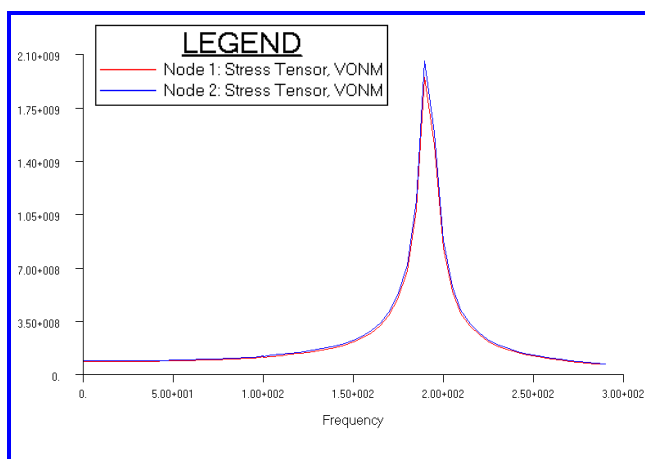


a

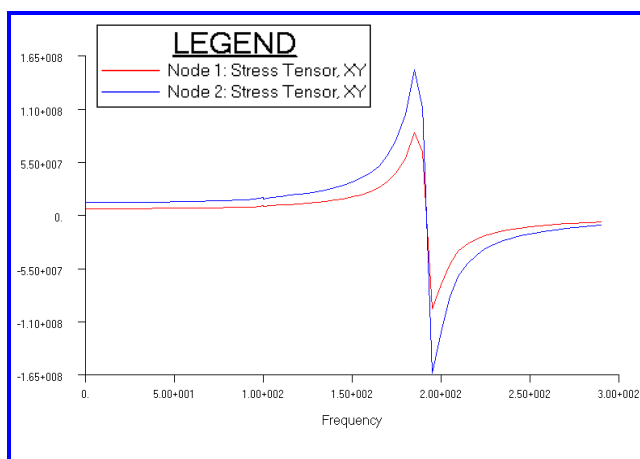


б

Рис. 4. Расчетные магнитуды напряжений Мизеса (*a*) и компоненты касательных напряжений (*б*) для образца толщиной $t = 10$ мм с трещиной длиной $L_{тр} = 2400$ мм при гармоническом нагружении

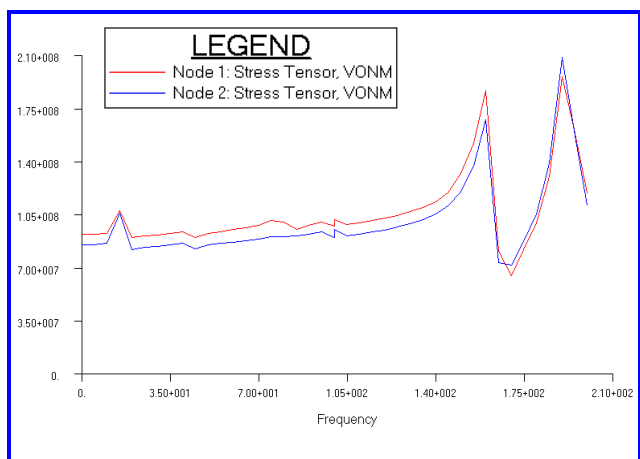


a

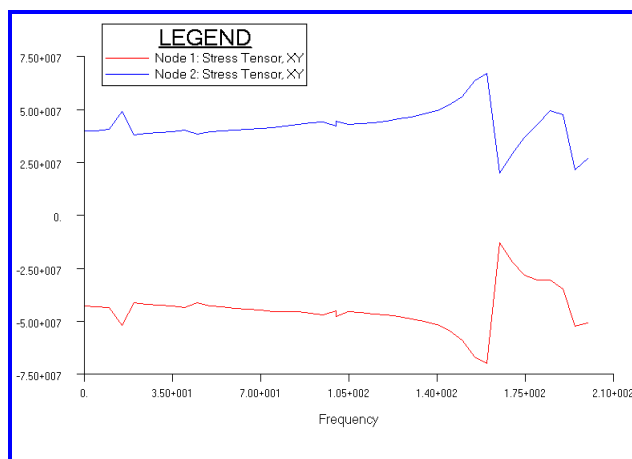


б

Рис. 5. Расчетные магнитуды напряжений Мизеса (*a*) и компоненты касательных напряжений (*б*) для образца толщиной $t = 100$ мм с трещиной длиной $L_{тр} = 2400$ мм при гармоническом нагружении



a



б

Рис. 6. Расчетные магнитуды напряжений Мизеса (*a*) и компоненты касательных напряжений (*б*) для образца толщиной $t = 100$ мм с трещиной длиной $L_{тр} = 2400$ мм при гармоническом нагружении по Y давлением 10^5 Па и по Z силами 10^5 Н

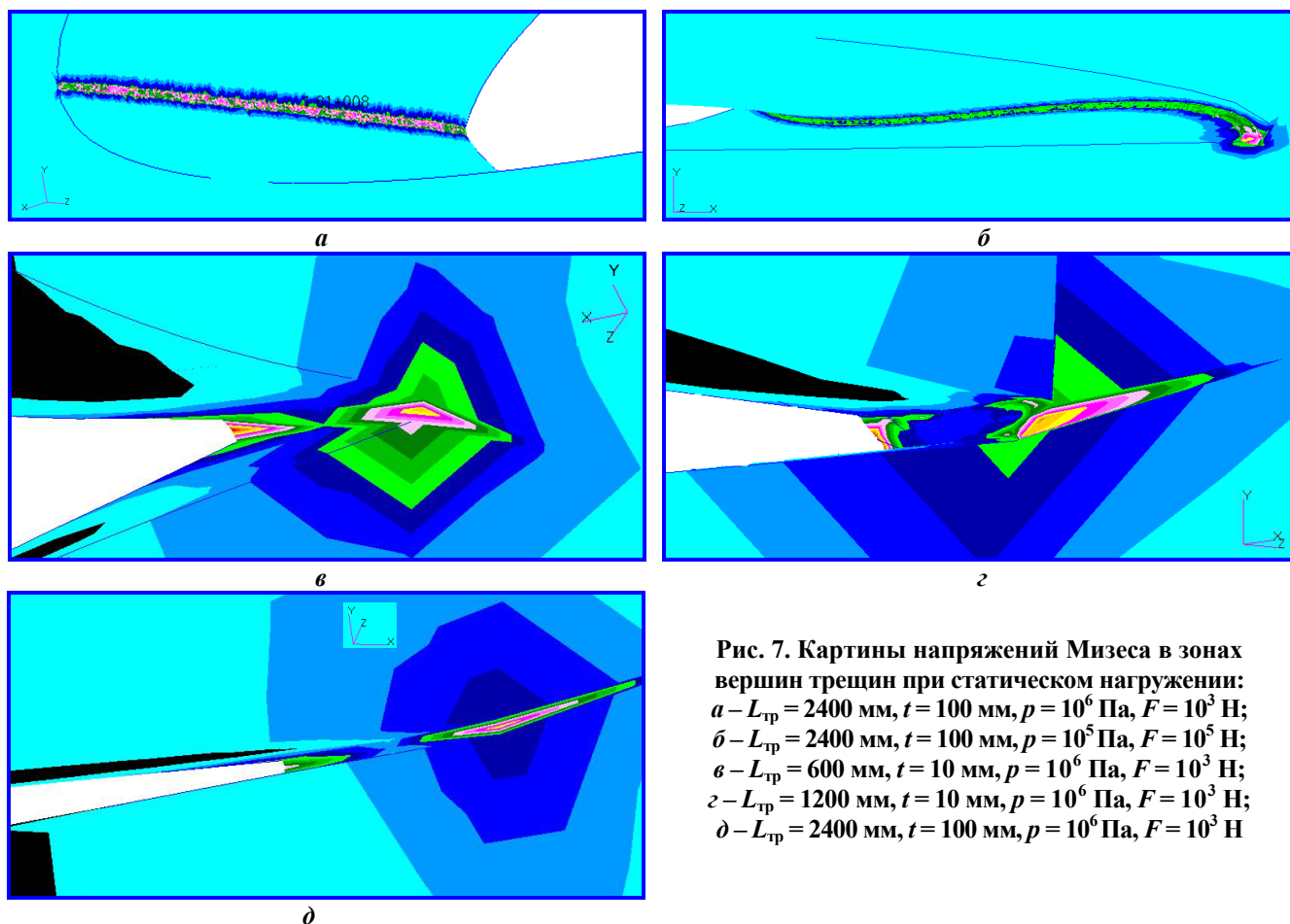


Рис. 7. Картины напряжений Мизеса в зонах вершин трещин при статическом нагружении:
a – $L_{тр} = 2400$ мм, $t = 100$ мм, $p = 10^6$ Па, $F = 10^3$ Н;
б – $L_{тр} = 2400$ мм, $t = 100$ мм, $p = 10^5$ Па, $F = 10^5$ Н;
в – $L_{тр} = 600$ мм, $t = 10$ мм, $p = 10^6$ Па, $F = 10^3$ Н;
г – $L_{тр} = 1200$ мм, $t = 10$ мм, $p = 10^6$ Па, $F = 10^3$ Н;
д – $L_{тр} = 2400$ мм, $t = 100$ мм, $p = 10^6$ Па, $F = 10^3$ Н

Эти особенности заключаются в следующем:

- 1) в одинаковых диапазонах частот относительно тонкие образцы с трещинами по сравнению с толстыми имеют значительно больше изгибных собственных частот колебаний;
- 2) с увеличением длины трещины частота колебаний в плоскости образцов уменьшается и не зависит от толщины образцов, изгибные частоты при этом изменяются незначительно. С увеличением толщины изгибные частоты увеличиваются приблизительно пропорционально;
- 3) увеличение длины центральной трещины в относительно тонких образцах приводит к появлению значительных по величине пиков резонансных напряжений на низких частотах колебаний;
- 4) рассмотренные в данной работе относительно тонкие стальные образцы по типу возможного развития в них трещин можно отнести к срезу, а толстый образец – к отрыву.

Поступила в редакцию 18.11.2010

Рассмотренные в работе методы динамического анализа трещин могут быть применены для оценки работоспособности различных материалов и изделий в условиях, приближающихся к эксплуатационным, а также при проектировании различного рода ответственных конструкций, например, гермоотсеков космических аппаратов.

Литература

1. Нотт Дж.Ф. Основы механики разрушения / Дж.Ф. Нотт. – М.: Металлургия, 1978. – 256 с.
2. Шпорт В.И. Пластическая деформация и разрушение металлических материалов авиационной техники / Шпорт В.И. – М.: Машиностроение, Машиностроение-1, 2004. – 252 с.
3. MSC. Nastran 2005 Quick Reference Guide // MSC. Software Corporation. – 2004. – 2159 с.
4. MSC. Patran 2005 Quick Reference Guide // MSC. Software Corporation. – 2004. – 1560 с.

Виктор Иванович Шабуневич, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник,
 т. 366-27-55, e-mail: vniiem@vniiem.ru.