



XVII РОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ СИСТЕМ
ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА MSC SOFTWARE. ФОРУМ MSC 2014

ПРИМЕНЕНИЕ *MSC NASTRAN* ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ В СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТАХ

Дударьков Ю.И., Левченко Е.А., Лимонин М.В.





КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТА

Критерий максимальных деформаций

$$\text{Safety factor} - \eta = \frac{1}{A}, A = \max\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1T}}, \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1C}}, \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_{2T}}, \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_{2C}}, \frac{\varepsilon_{12}}{\varepsilon_{12T}}\right) \geq 1$$

Критерий максимальных напряжений

$$\text{Safety factor} - \eta = \frac{1}{A}, A = \max\left(\frac{\sigma_1}{X_T}, \frac{\sigma_1}{X_C}, \frac{\sigma_2}{Y_T}, \frac{\sigma_2}{Y_C}, \frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right) \geq 1$$

Критерий Хилла

$$\text{Safety factor} - \eta = \frac{1}{\sqrt{A}}, A = \left(\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2}\right) \geq 1$$

Критерий Цзя-Ву

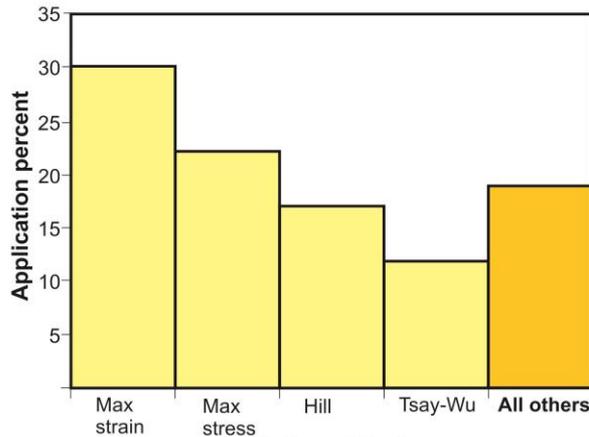
$$A = \left(\frac{\sigma_1^2}{X_T X_C} + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + \frac{\sigma_2^2}{Y_T Y_C} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2} + \sigma_1\left[\frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C}\right] + \sigma_2\left[\frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C}\right]\right) \geq 1$$

$$F_{12} = -0.5 \sqrt{\frac{1}{X_T X_C Y_T Y_C}}$$

Критерий Хофмана

$$\text{Safety factor} - a\eta^2 + b\eta - 1 = 0$$

$$a = \frac{\sigma_1^2}{X_T X_C} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X_T X_C} + \frac{\sigma_2^2}{Y_T Y_C} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2} \quad b = \sigma_1\left[\frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C}\right] + \sigma_2\left[\frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C}\right]$$



Применение критериев разрушения на практике

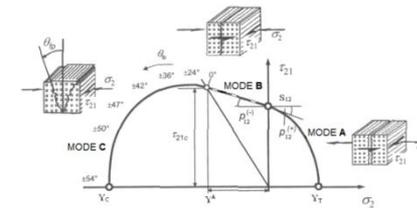
Критерий Хашина

$$\text{Fibre failure} - \sigma_1 > 0 \Rightarrow \left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 = 1, \sigma_1 < 0 \Rightarrow \left(\frac{\sigma_1}{X_C}\right)^2$$

$$\text{Matrix failure} - \sigma_2 > 0 \Rightarrow \left(\frac{\sigma_2}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 = 1, \sigma_1 < 0 \Rightarrow \left(\frac{\sigma_2}{2S_{23}}\right)^2 + \left[\frac{Y_2}{2S_{23}} - 1\right]\frac{\sigma_2}{Y_C} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 = 1$$

$$\text{Interlaminare failure} - \left(\frac{\sigma_3}{Z_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{31}}{S_{31}}\right)^2 = 1$$

Критерий Пака



$$\cos\theta_{fr} = \sqrt{\frac{1}{2(1+p_{22}^{(-)})} \left[\left(\frac{Y^A}{S_{12}}\right)^2 \left(\frac{\tau_{12}}{\sigma_2}\right)^2 + 1 \right]}$$

$$Y^A = \frac{S_{12}}{2p_{12}^{(-)}} \left[\sqrt{1 + 2p_{12}^{(-)} \frac{Y_C}{S_{12}} - 1} \right] \quad p_{22}^{(-)} = p_{12}^{(-)} \frac{Y^A}{S_{12}}$$

Fibre failure -

$$\sigma_1 \geq 0 \Rightarrow A = \frac{\sigma_1}{X_T}, \sigma_1 \leq 0 \Rightarrow A = \frac{|\sigma_1|}{X_C}$$

Моды разрушения матрицы

Matrix failure -

Mode A

$$\sigma_2 \geq 0, \theta_{fr} = 0 \Rightarrow A = \frac{1}{S_{12}} \left[\sqrt{\left(\frac{S_{12}}{Y_T} - p_{12}^{(-)}\right)^2 \sigma_2^2 + \tau_{12}^2} + p_{12}^{(-)} \sigma_2 \right] = 1$$

Mode B

$$\sigma_2 < 0, \theta_{fr} = 0 \Rightarrow A = \frac{1}{S_{12}} \left[\sqrt{\tau_{12}^2 + (p_{12}^{(-)} \sigma_2)^2} + p_{12}^{(-)} \sigma_2 \right] = 1$$

Mode C

$$\sigma_2 < 0, \theta_{fr} \neq 0 \Rightarrow A = \frac{\tau_{12}^2}{4(S_{12} + p_{12}^{(-)} Y^A)^2} \frac{Y_C}{(-\sigma_2)} + \frac{(-\sigma_2)}{Y_C} = 1$$



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ

Вид
разрушения
образцов



Расчетные и экспериментальные данные для материала CYCOM 977-2-IM
(+45/0/-45/0/0/90/0/0/-45/0/+45)₃

Тип нагрузки	σ_{test} (kgf/mm ²)	Hill			Tsay			Hashin			Puck		
		σ_1	σ_2	σ_{avg}									
Растяжение	135	108.3	108.3	108.3	97.6	161.8	129.7	125.8	161.8	143.8	125.8	161.8	143.8
Сжатие	83.2	93.8	94.6	94.2	90.9	94.8	92.9	94.8	94.8	94.8	94.8	94.8	94.8



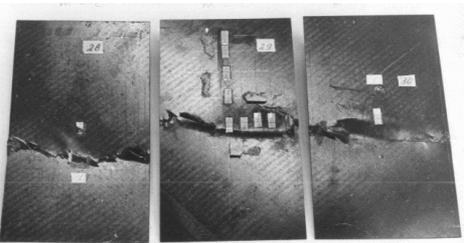
Расчетные и экспериментальные данные для материала КМКУ-2М.120.Э01.45
(0/0/0/45/-45/0/0/0/45/-45/0/0/90)₅

Тип нагрузки	σ_{test} (kgf/mm ²)	Hill			Tsay			Hashin			Puck		
		σ_1	σ_2	σ_{avg}									
Растяжение	50.5	43.0	59.7	51.4	43.1	60.0	51.6	45.5	60.0	52.8	45.3	60.2	52.7
Сжатие	67.2	58.5	60.0	59.3	55.9	60.0	58.0	60.0	60.0	60.0	60.2	60.2	60.2
Сдвиг	14.2	11.7	17.1	14.4	11.0	17.5	14.3	16.1	17.5	16.8	16.1	17.5	16.8

- обработку расчетных данных рекомендуется вести по средним между первичным и вторичным напряжениями разрушения пакета.
- при наличии экспериментальных данных на простые виды нагружения следует выбирать тот критерий, который наиболее полно согласуется имеющимися данными

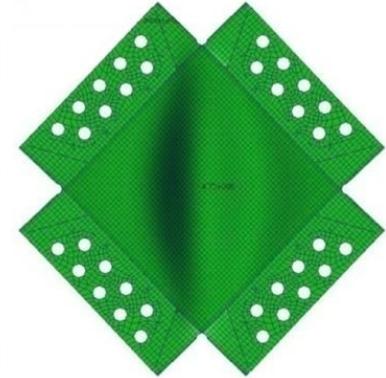
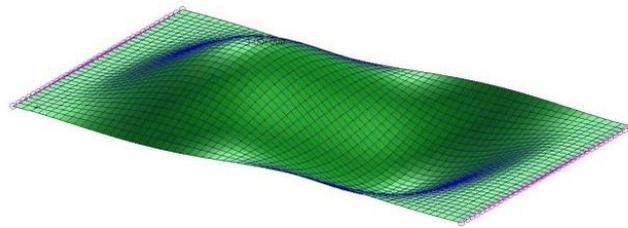


ВАЛИДАЦИЯ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ И НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРУКТУР



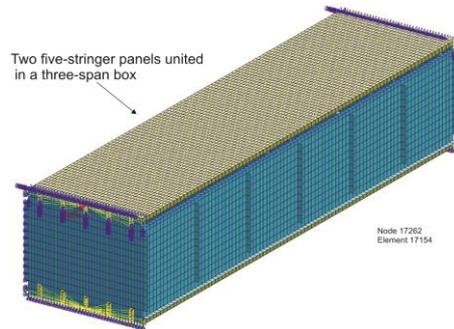
Сжатие композитной пластины

Эксперимент: $R_{кр}=1070$ кгс $R_{разр}=2160$ кгс
Расчет: $R_{кр}=1115$ кгс $R_{разр}=2126$ кгс



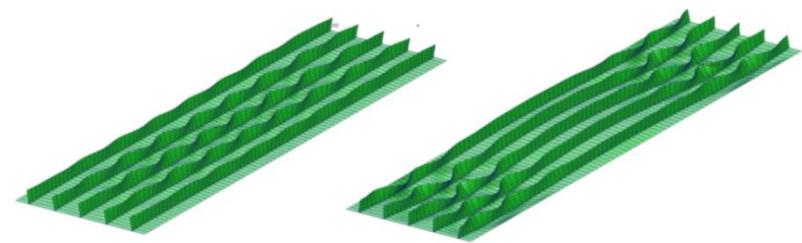
Сдвиг композитной пластины

Эксперимент: $\tau_{кр}=8.5$ кгс/мм² $\tau_{разр}=21.0$ кгс/мм²
Расчет: $\tau_{кр}=8.9$ кгс/мм² $\tau_{разр}=21.7$ кгс/мм²



Сжатие композитной стрингерной панели.

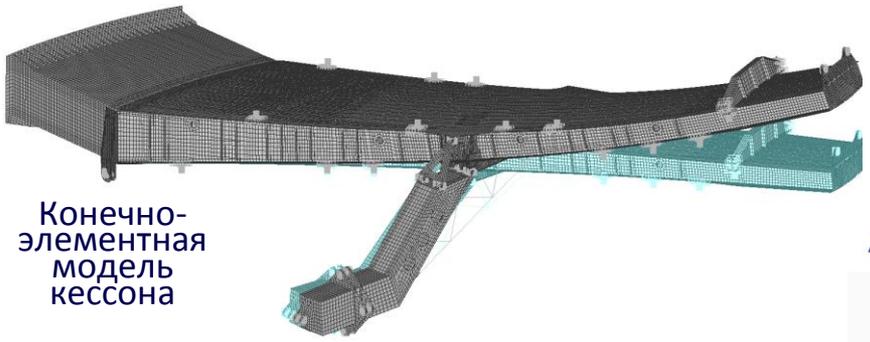
Эксперимент - $\sigma_{разр}=15.3$ кгс/мм²
Расчет - $\sigma_{разр}=15.9$ кгс/мм²



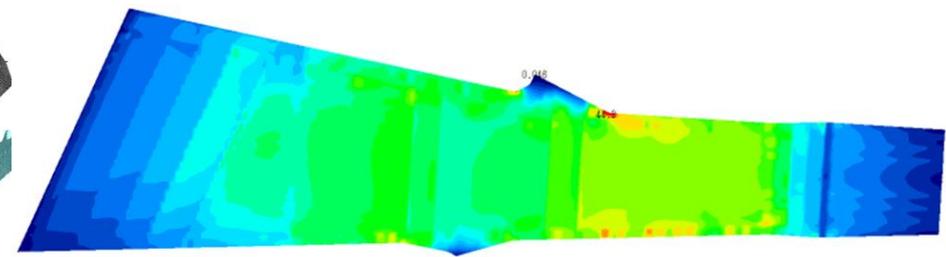
Расхождение расчетных и экспериментальных данных критическим и разрушающим нагрузкам менее 5%



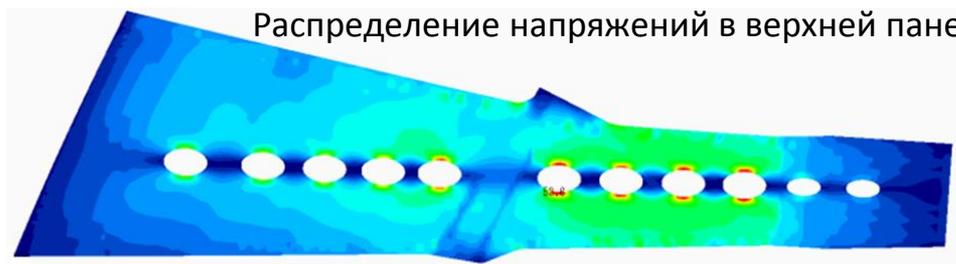
РАСЧЕТНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПРОТОТИПА КЕССОНА КРЫЛА САМОЛЕТА ИЗ КМ



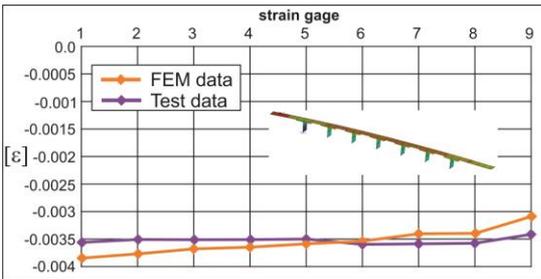
Конечно-элементная модель кессона



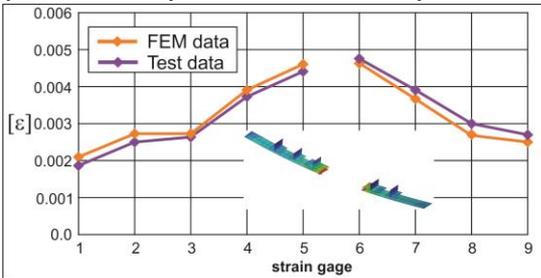
Распределение напряжений в верхней панели



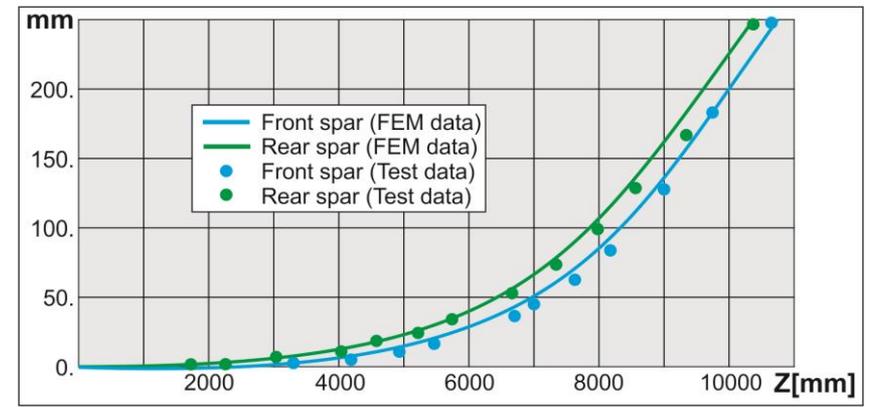
Распределение напряжений в нижней панели



Деформации в верхней панели (сравнение расчета и эксперимента)



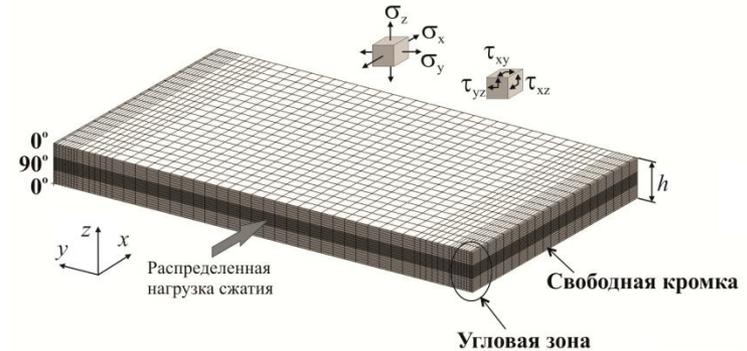
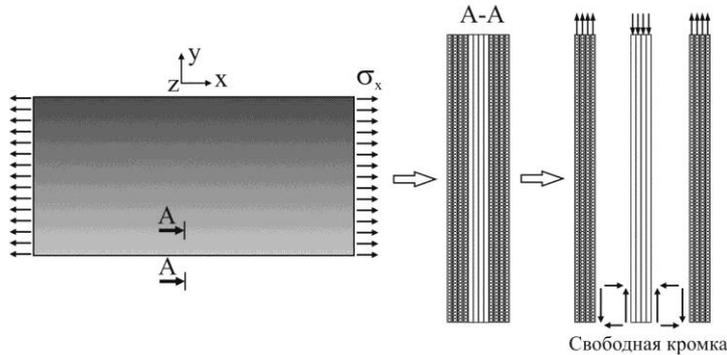
Деформации в верхней панели (сравнение расчета и эксперимента)



Прогибы лонжеронов (сравнение расчета и эксперимента)

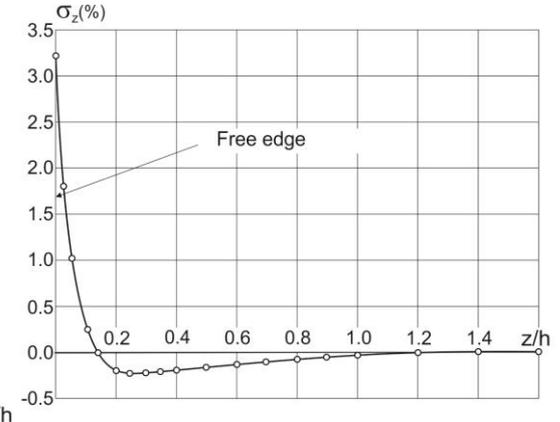
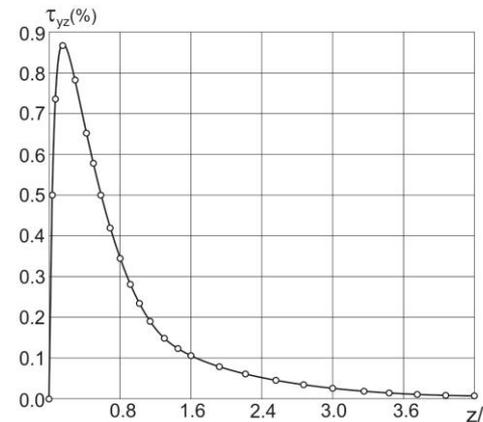
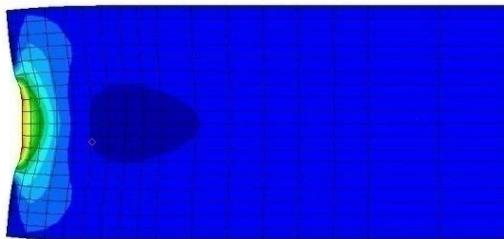
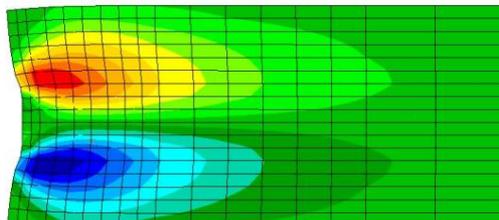


КРАЕВЫЕ ЭФФЕКТЫ В СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТАХ



КЭМ композита для изучения эффекта свободной кромки

Образование эффекта свободной кромки



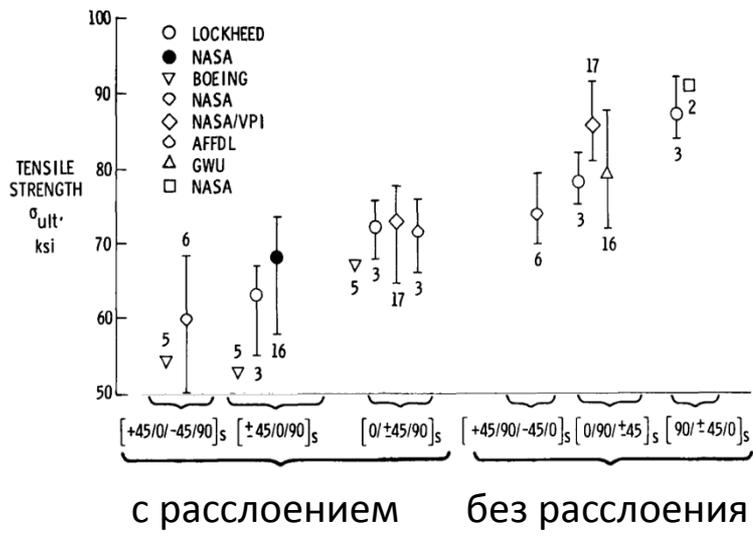
Изменение напряжений τ_{yz} и σ_z по мере удаления от свободной кромки

В области свободных кромок композитных образцов возникают краевые эффекты, которые могут инициировать преждевременное расслоение материала

Распределение напряжений в пакете: τ_{yz} σ_z

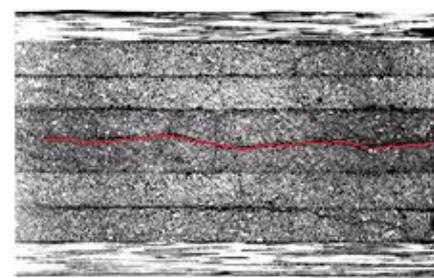
ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ПАКЕТА НА КРАЕВЫЕ ЭФФЕКТЫ

Экспериментальные данные по испытаниям образцов на растяжение
(Crossman, F.W., Analysis of Delamination // Proceedings of a Workshop on "Failure Analysis and Mechanisms of Failure of Fibrous Composite Structures" – 1982 - P. 191-240)

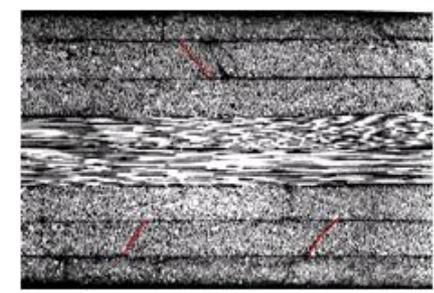


Вид разрушения и значения разрушающих напряжений существенным образом зависят от порядка укладки монослоев

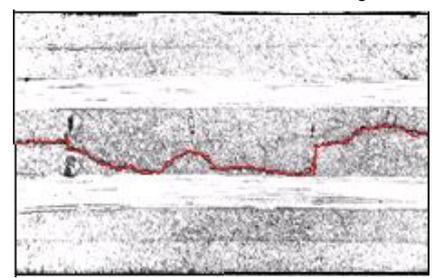
Эксперимент



[0; +45; -45; 90]_s - с расслоением



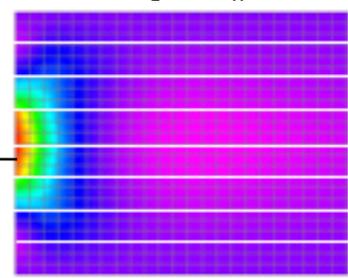
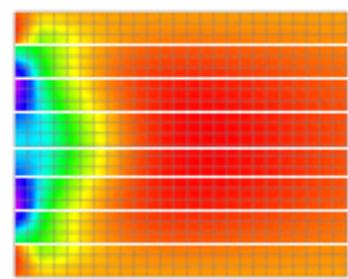
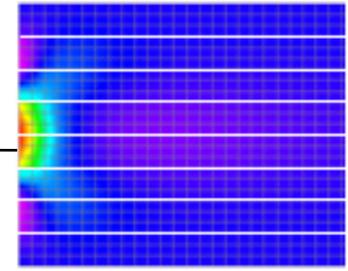
[90; +45; -45; 0]_s – без расслоения ($\sigma_z \ll \sigma_x$)



[+45; -45; 0; 90]_s – с расслоением

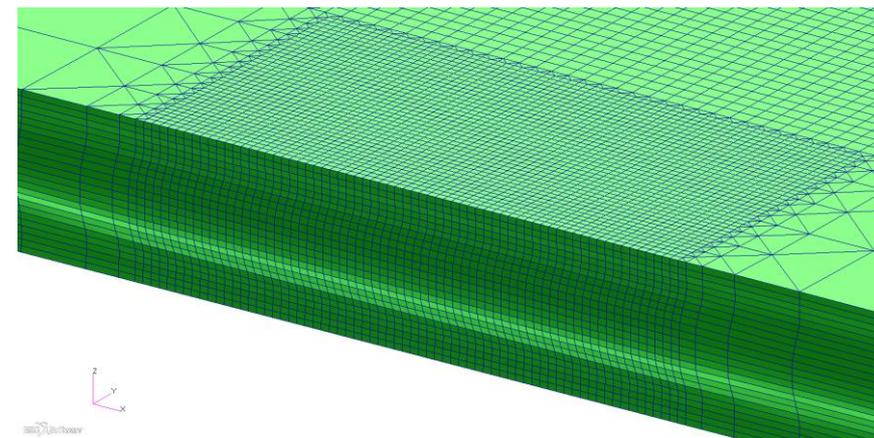
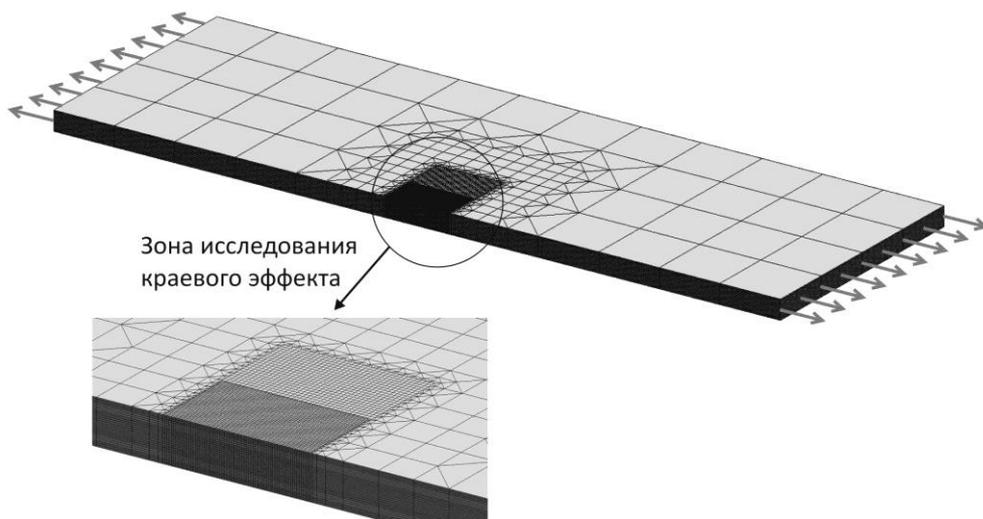
МКЭ расчет

(расслаивающие напряжения σ_z)



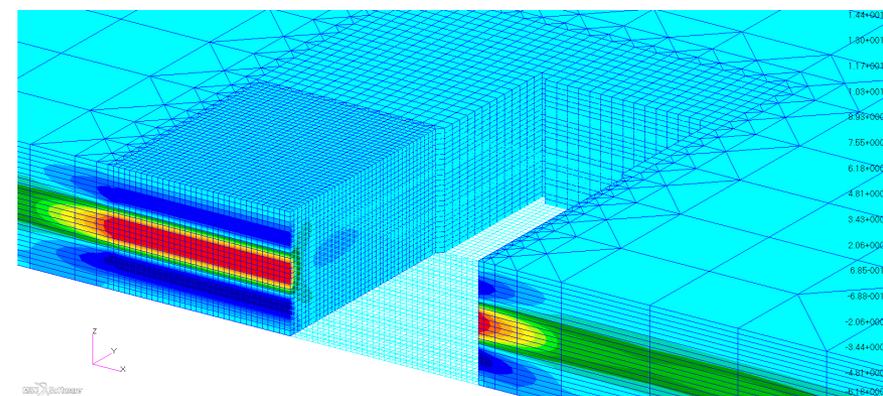


РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ



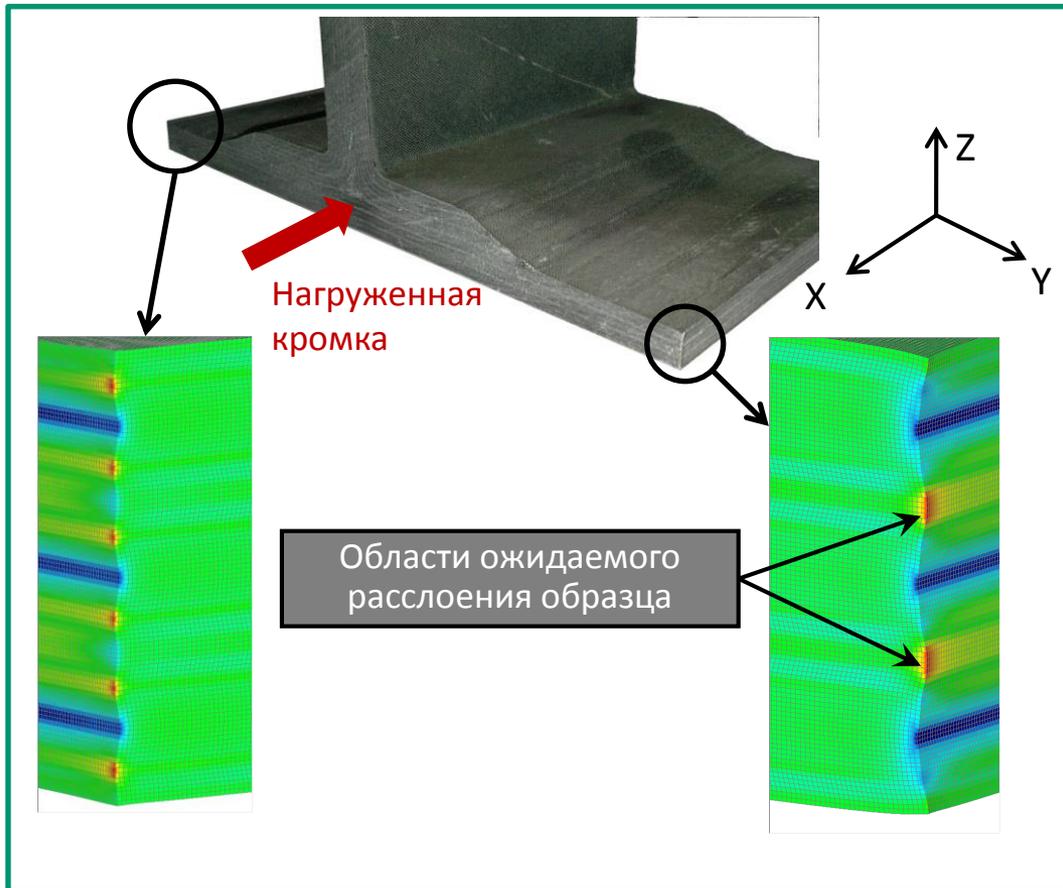
Деформированное состояние КЭМ

- материал - углепластик СУСОМ
- толщина монослоя – 0.2 мм
- пакет состоит из 8 монослоев
- характерный размер элементов целевой зоны 0.066 мм
- элементы типа HEX8
- размерность модели $\approx 100\ 000$ узлов расчетной сетки

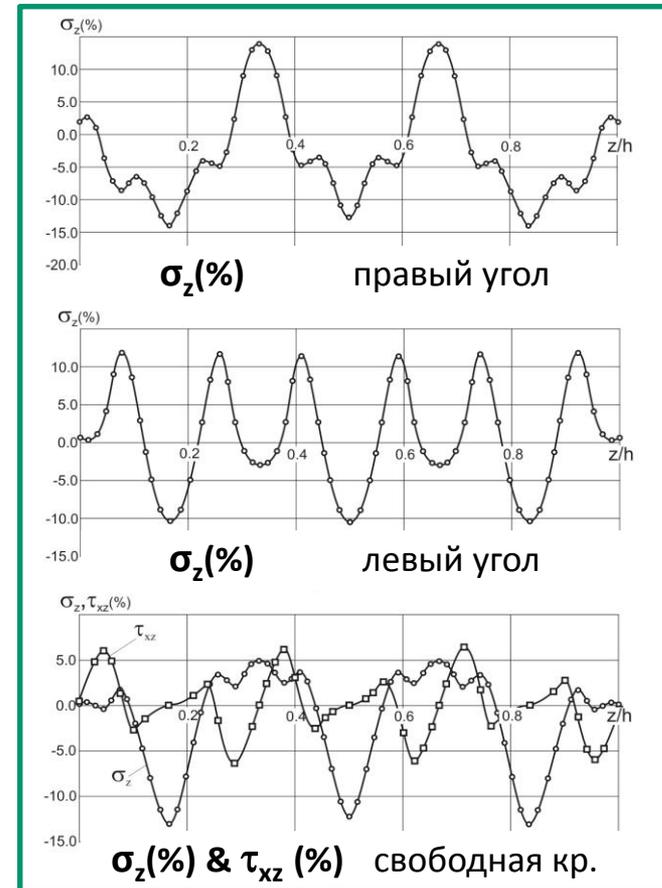


Распределение расслаивающих напряжений σ_z

КРАЕВОЙ ЭФФЕКТ В ПАНЕЛИ С УКЛАДКОЙ МОНОСЛОЕВ (45/0/-45/0/0/90/0/0/-45/0/45)₃



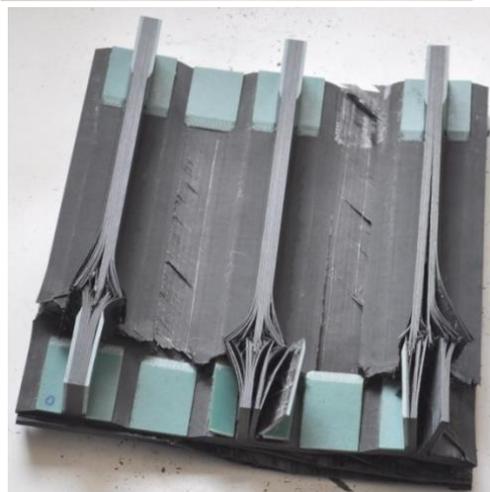
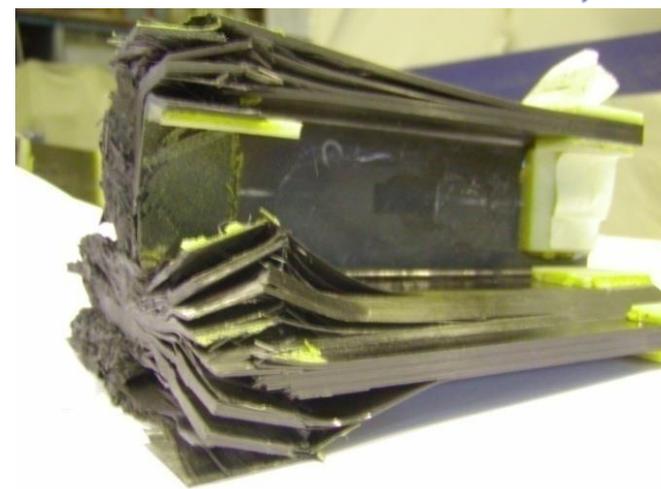
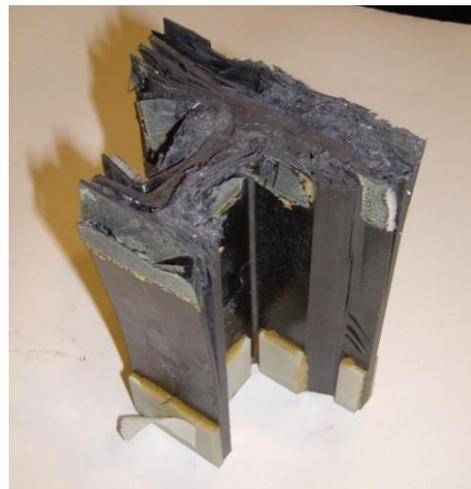
Распределение напряжений σ_z в области углов образца



Распределение напряжений по кромкам

Максимальный уровень расслаивающих напряжений достигается в углах панели: $\sigma_z \approx 14\%(\sigma_x)$

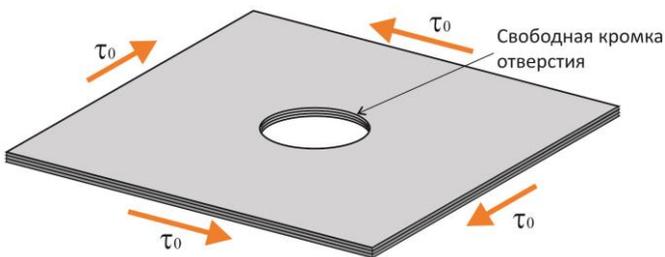
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНОЙ РАБОТЫ



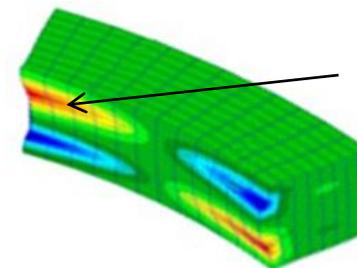
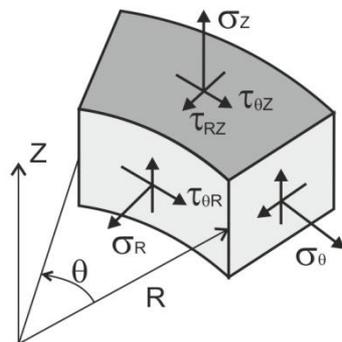
среднее экспериментальное напряжение разрушения- 59 кгс/мм²
расчетное напряжение разрушения- 63 кгс/мм²



КРАЕВОЙ ЭФФЕКТ НА СВОБОДНОЙ КРОМКЕ ОТВЕРСТИЯ

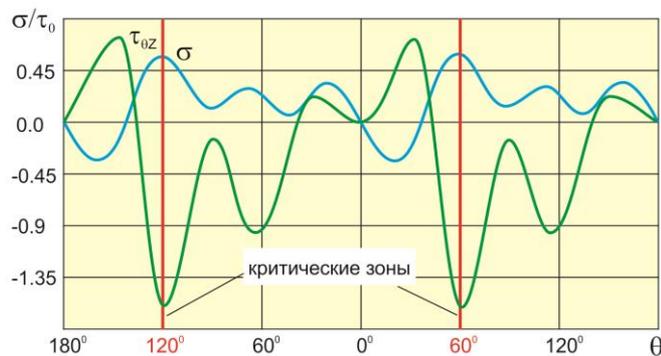


Расчетная модель

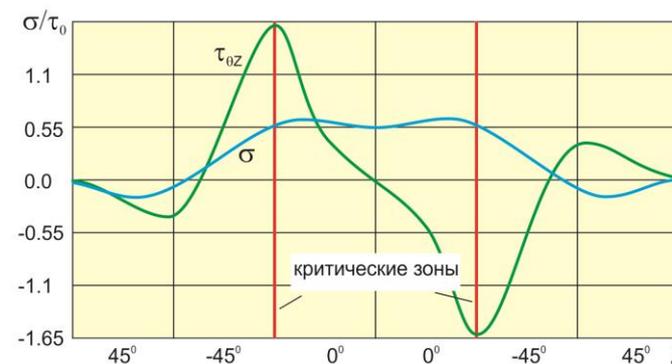


Зона
возможного
расслоения
композита

Напряжения поперечного сдвига



Распределение расслаивающих напряжений по контуру отверстия



Распределение расслаивающих напряжений по толщине пакета [45/-45/0]s

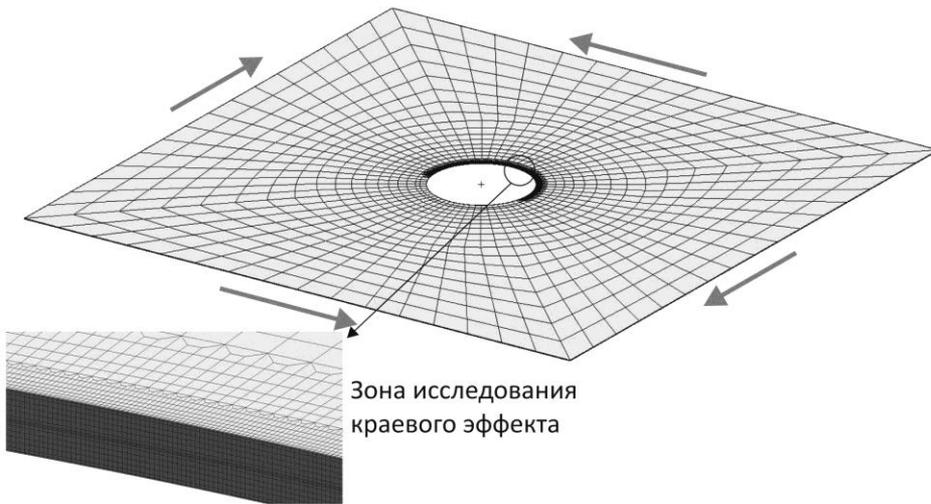
Критерий расслоения Хашина-Ротема

$$\left(\frac{\sigma_3}{Z_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{31}}{S_{31}}\right)^2 = 1$$

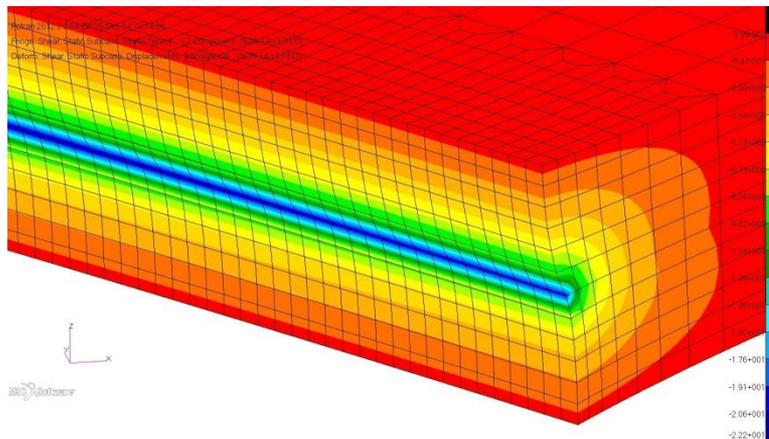
**прочность панели без учета краевого эффекта: $\tau_0 = 14 \text{ кгс/мм}^2$
прочность панели с учетом краевого эффекта: $\tau_0 = 5.5 \text{ кгс/мм}^2$**



РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ НА СВОБОДНОЙ КРОМКЕ ОТВЕРСТИЯ



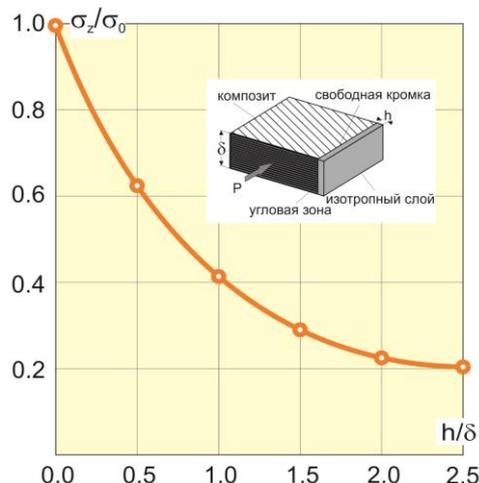
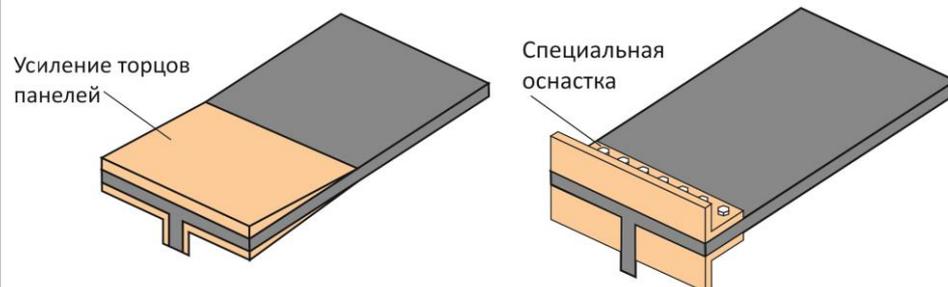
- материал - углепластик CYCOM
- толщина монослоя – 0.2 мм
- пакет состоит из 4 монослоев (45/-45)s
- характерный размер элементов целевой зоны 0.035 мм
- элементы типа HEX8 и WEDGE6
- размерность модели $\approx 500\ 000$ узлов расчетной сетки



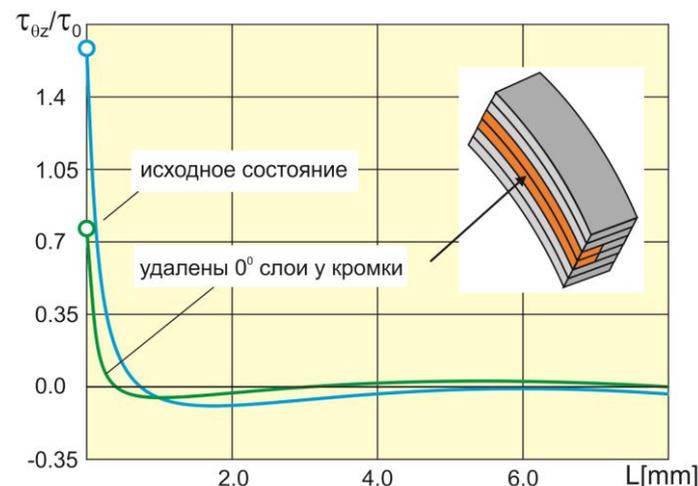
Распределение расслаивающих напряжений $\tau_{\theta z}$

СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ

- усиление торцов экспериментальных панелей
- применение специальной оснастки, препятствующей расслоению торцов
- нанесение дополнительного изотропного слоя на свободные кромки
- локальное изменение структуры пакета в зоне свободных кромок



Влияние толщины изотропного слоя на нормальные напряжения расслоения



Влияние локального изменения структуры пакета [45/-45/0]s на краевой эффект