



Численное моделирование прогрессирующего разрушения образцов из композиционных материалов

Выполнил студент гр. 63602/1

А.С. Мельников

Руководитель, к.т.н., профессор

А.И. Боровков

Соруководитель, асс.

И.Б. Войнов



Введение

- **Исследуются слоистые композиты, армированные длинными однонаправленными волокнами**
- **Для реализации прогрессирующего разрушения используется модель, учитывающая постепенную деградацию упругих свойств материала**
- **Проводятся испытания на растяжение и сжатие образцов без дефектов и с дефектами**
- **Исследуется изменение значения критических усилий в зависимости от изменения основного параметра модели разрушения**



Критерии разрушения

Теория максимальных напряжений

По волокну: $\sigma_1 \leq F_1^t$ (растяжение) или $|\sigma_1| \leq F_1^c$ (сжатие)

По матрице: $\sigma_2 \leq F_2^t$ или $|\sigma_2| \leq F_2^c$

Сдвиг: $\tau_{12} \leq F_{12}$

Критерий Хилла

$$F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{13}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1$$

Критерий Цая-Ву

$$F_i\sigma_i + F_{ij}\sigma_i\sigma_j = 1 \quad (i, j = 1, 2, \dots, 6) \quad \text{при условии} \quad F_{ii}F_{jj} - F_{ij}^2 \geq 0 \quad (i, j = 1, 2, \dots, 6)$$

Критерий Хашина

$$F_1^t = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_1^{ut}}\right)^2, \quad \text{если } \sigma_1 > 0$$

$$F_1^c = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_1^{uc}}\right)^2, \quad \text{если } \sigma_1 < 0$$

$$F_2^t = \left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_2^{ut}}\right)^2 + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_2\sigma_3}{(\sigma_{23}^u)^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{(\sigma_{12}^u)^2}, \quad \text{если } \sigma_2 + \sigma_3 > 0$$

$$F_2^c = \left[\left(\frac{\sigma_{22}^{uc}}{2\sigma_{23}^u}\right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_2^{uc}} + \left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2\sigma_{23}^u}\right)^2 + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_2\sigma_3}{(\sigma_{23}^u)^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{(\sigma_{12}^u)^2}, \quad \text{если } \sigma_2 + \sigma_3 < 0$$

$$F_3^t = \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_3^{ut}}\right)^2 + \frac{\sigma_{13}^2}{(\sigma_{13}^u)^2} + \frac{\sigma_{23}^2}{(\sigma_{23}^u)^2}, \quad \text{если } \sigma_3 > 0$$

$$F_3^c = \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_3^{uc}}\right)^2 + \frac{\sigma_{13}^2}{(\sigma_{13}^u)^2} + \frac{\sigma_{23}^2}{(\sigma_{23}^u)^2}, \quad \text{если } \sigma_3 < 0$$



Модель материала

Используется критерий Хашина.

Параметры повреждаемости:

$$d_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } F_1^t > 1 \text{ или } F_1^c > 1 \\ 0, & \text{если } F_1^t < 1 \text{ и } F_1^c < 1 \end{cases}$$

$$d_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } F_2^t > 1 \text{ или } F_2^c > 1 \\ 0, & \text{если } F_2^t < 1 \text{ и } F_2^c < 1 \end{cases}$$

$$d_3 = \begin{cases} 1, & \text{если } F_3^t > 1 \text{ или } F_3^c > 1 \\ 0, & \text{если } F_3^t < 1 \text{ и } F_3^c < 1 \end{cases}$$

Коэффициенты релаксации:

$$\alpha_i = (1 - \delta)(1 - d_i e^{-\gamma \varepsilon_i}), \quad i = 1, 2, 3$$

δ – коэффициент деградации жесткости ($\delta=1e-4$)

γ – скорость деградации жесткости

ε_i – деформация материала после инициализации повреждений в направлении i

Матрица жесткости ортотропного материала:

$$\tilde{C}_{ij} = \begin{bmatrix} \tilde{C}_{11} & \tilde{C}_{12} & \tilde{C}_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & \tilde{C}_{22} & \tilde{C}_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & \tilde{C}_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \tilde{C}_{44} & 0 & 0 \\ & & & & \tilde{C}_{55} & 0 \\ & & & & & \tilde{C}_{66} \end{bmatrix}$$

Перерасчет матрицы жесткости с учетом деградации свойств:

$$C_{11} = (1 - \alpha_1 d_1) \tilde{C}_{11}$$

$$C_{22} = (1 - \alpha_2 d_2) \tilde{C}_{22}$$

$$C_{33} = (1 - \alpha_3 d_3) \tilde{C}_{33}$$

$$C_{12} = C_{21} = (1 - \alpha_1 d_1)(1 - \alpha_2 d_2) \tilde{C}_{12}$$

$$C_{13} = C_{31} = (1 - \alpha_1 d_1)(1 - \alpha_3 d_3) \tilde{C}_{13}$$

$$C_{23} = C_{32} = (1 - \alpha_2 d_2)(1 - \alpha_3 d_3) \tilde{C}_{23}$$

$$C_{44} = (1 - \alpha_1 d_1)(1 - \alpha_2 d_2) \tilde{G}_{12}$$

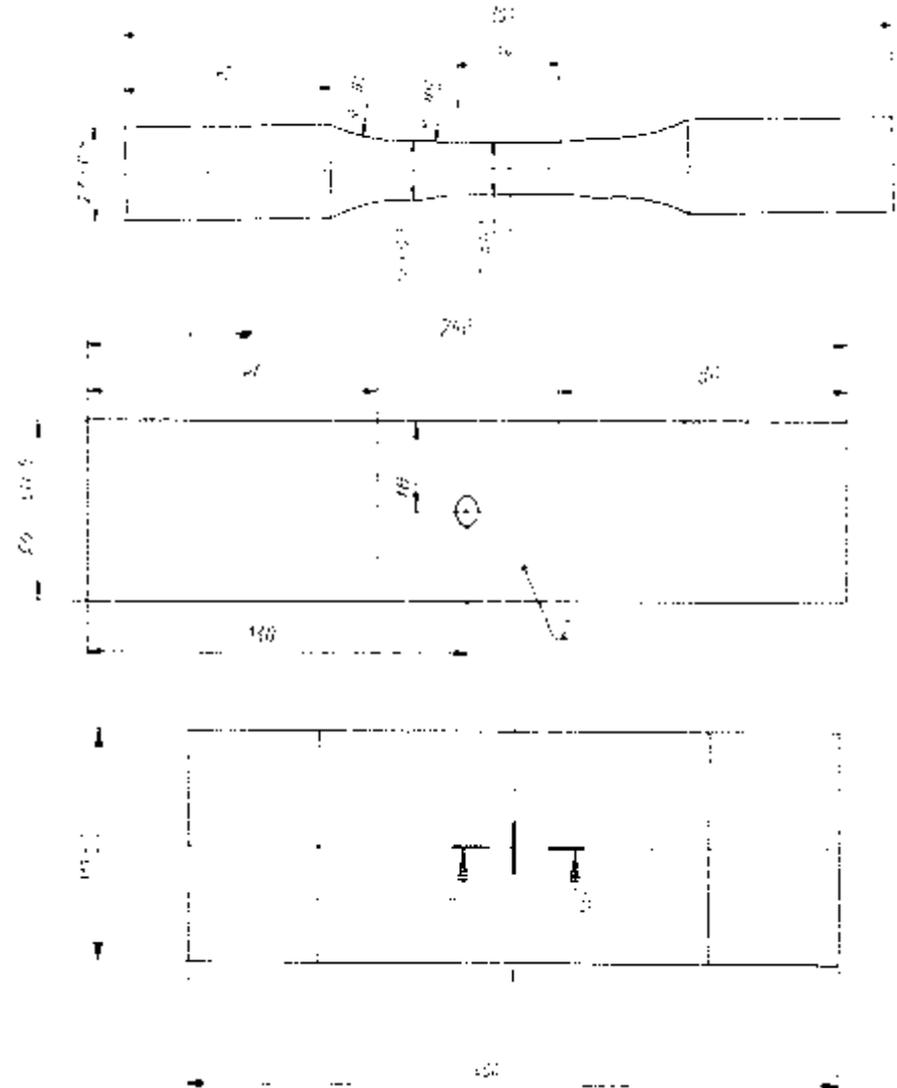
$$C_{55} = (1 - \alpha_2 d_2)(1 - \alpha_3 d_3) \tilde{G}_{23}$$

$$C_{66} = (1 - \alpha_1 d_1)(1 - \alpha_3 d_3) \tilde{G}_{13}$$

Испытания

Образцы:

1. Монолитный образец без дефектов
2. Пластина с дефектом в виде отверстия
3. Пластина с дефектом в виде выреза





Испытания. Общие сведения.

Слой из углепластика
HexPly M21/34%/UD194/IMA
Толщина $\delta_{1H}^y = 0.184$ мм

Модуль при растяжении	E_{11}	ГПа	160.3
	E_{22}		7.7
	E_{33}		7.7
Коэффициент Пуассона	ν_{12}		0.32
	ν_{23}		0.32
	ν_{13}		0.45
Модуль при сдвиге	G_{12}	ГПа	4.8
	G_{13}		4.8
	G_{23}		2.8
Прочность при растяжении	σ_{11}	МПа	2688
	σ_{22}		49.1
	σ_{33}		49.1
Прочность при сжатии	σ_{-11}	МПа	1352
	σ_{-22}		244
	σ_{-33}		244
Прочность при сдвиге	τ_{12}	МПа	88
	τ_{23}		90
	τ_{13}		90
Модуль при сжатии	E_{-11}	ГПа	132.3
	E_{-22}		8.4
	E_{-33}		8.4

Слой из стеклопластика
HexPly M21/37%/7781
Толщина $\delta_{1H}^c = 0.255$ мм

Модуль при растяжении	E_{11}	ГПа	23
	E_{22}		21
	E_{33}		21
Коэффициент Пуассона	ν_{12}		0.16
	ν_{23}		0.16
	ν_{13}		0.16
Модуль при сдвиге	G_{12}	ГПа	4.3
	G_{13}		4.3
	G_{23}		2.5
Прочность при растяжении	σ_{11}	МПа	342
	σ_{22}		338
	σ_{33}		338
Прочность при сжатии	σ_{-11}	МПа	719
	σ_{-22}		568
	σ_{-33}		568
Прочность при сдвиге	τ_{12}	МПа	86
	τ_{23}		62
	τ_{13}		86
Модуль при сжатии	E_{-11}	ГПа	23
	E_{-22}		21
	E_{-33}		21

При 30 слоях толщина $t_H = 5.52$ мм
симметричная укладка имеет вид:
[0^y/±45₂^y/0₂^y/90^y/0₂^y/±45₂^y/0^y]

При 32 слоях толщина $t_H = 6.03$ мм
симметричная укладка имеет вид:
[0^c/0^y/±45₂^y/0₂^y/90^y/0₂^y/±45₂^y/0^y]

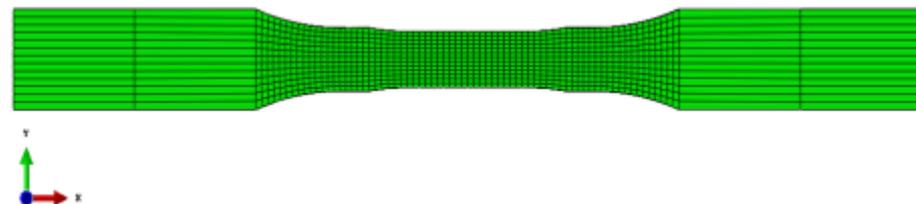


Монолитный образец без дефектов

Параметры КЭ модели:

	Solid 3d (30 слоев)	Solid 3d (32 слоя)	Shell layup	Solid layup
NE (число элементов)	28860	30784	1036	1036
NN (число узлов)	32550	34650	1125	2250

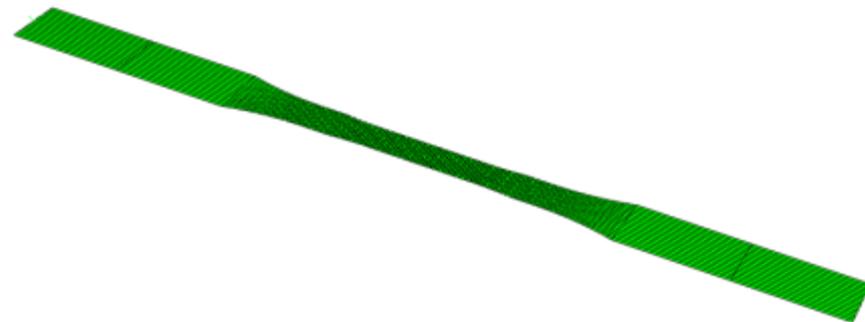
КЭ модель, вид сверху:



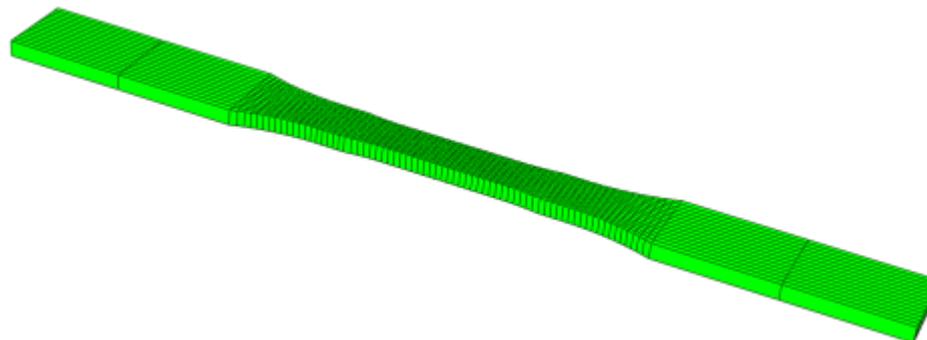
КЭ модель, Solid 3D:



КЭ модель, Shell layup:



КЭ модель, Solid layup:





Монолитный образец без дефектов.

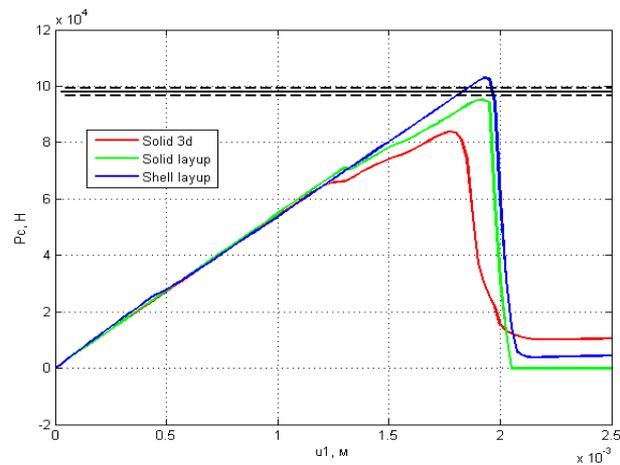
Серия испытаний:

1. Растяжение, 30 слоев, образцы вырезаны вдоль 0° слоев
2. Растяжение, 32 слоя, образцы вырезаны вдоль 0° слоев
3. Растяжение, 30 слоев, образцы вырезаны вдоль 90° слоев
4. Растяжение, 32 слоя, образцы вырезаны вдоль 90° слоев
5. Сжатие, 32 слоя, образцы вырезаны вдоль 0° слоев

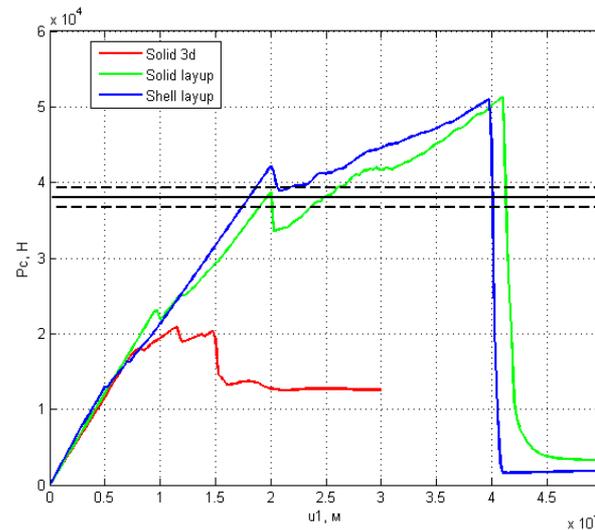
Коэффициент релаксации $\alpha_i = 1$

Для испытаний 2, 4, 5 сравнение зависимостей усилий от удлинения для разных КЭ постановок:

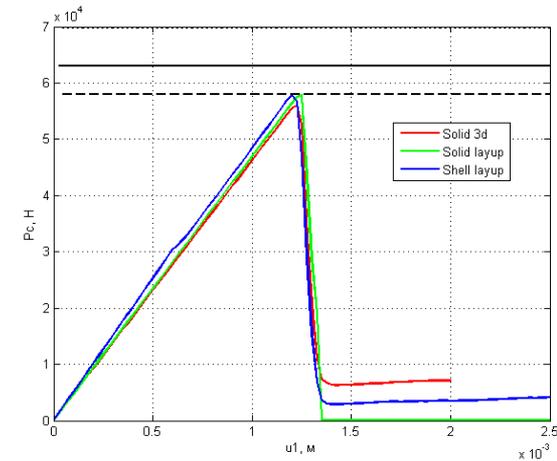
Испытание 2



Испытание 4



Испытание 5



Монолитный образец без дефектов.

Коэффициент релаксации $\alpha_i = (1 - \delta)(1 - d_i e^{-\gamma \varepsilon_i})$

Основным параметром является скорость деградации жесткости γ

Испытание 2.

График зависимости усилий от удлинения для КЭ постановки Solid 3D при разных γ

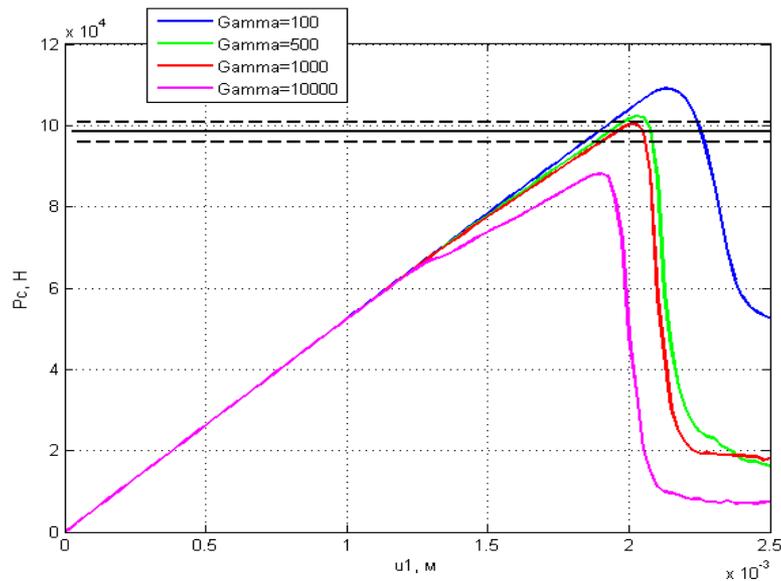
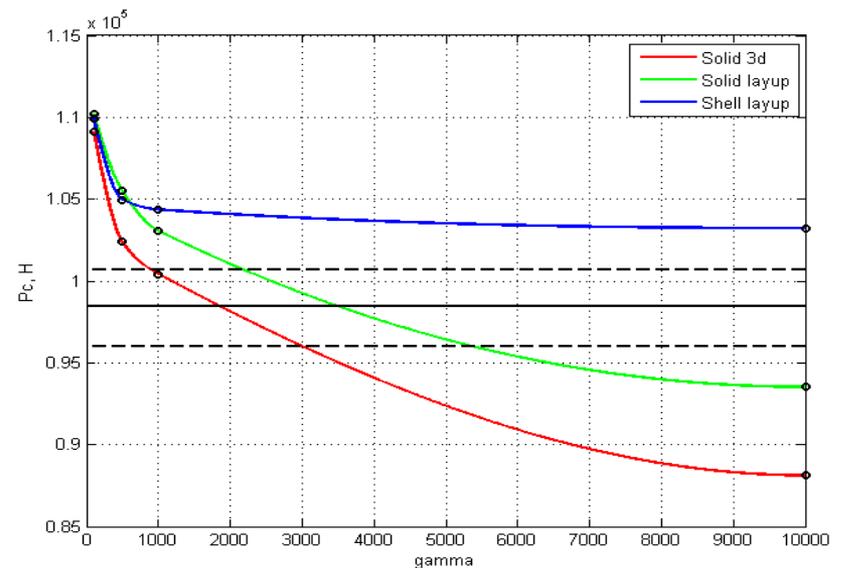


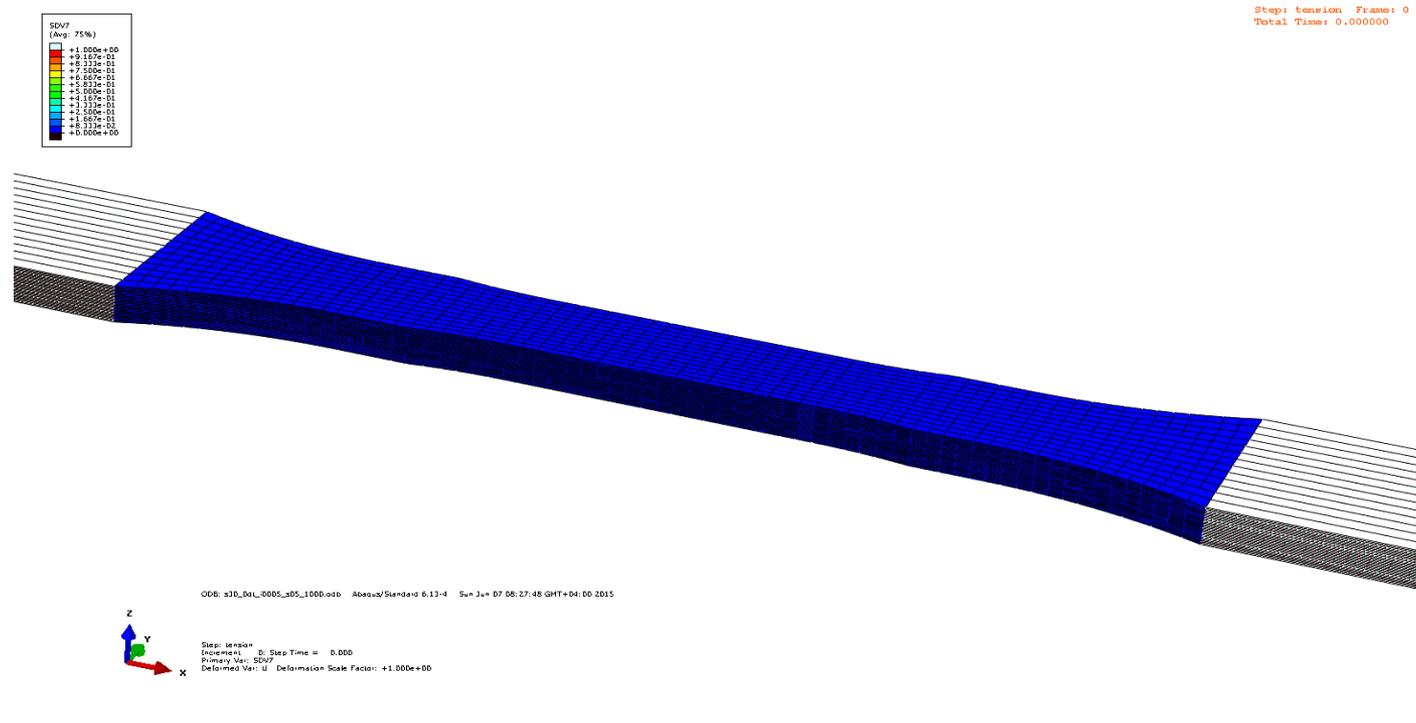
График зависимости критических усилий от γ для разных КЭ постановок



Монолитный образец без дефектов.

Испытание 2.

Разрушение по волокнам для КЭ постановки Solid 3D при $\gamma = 1000$



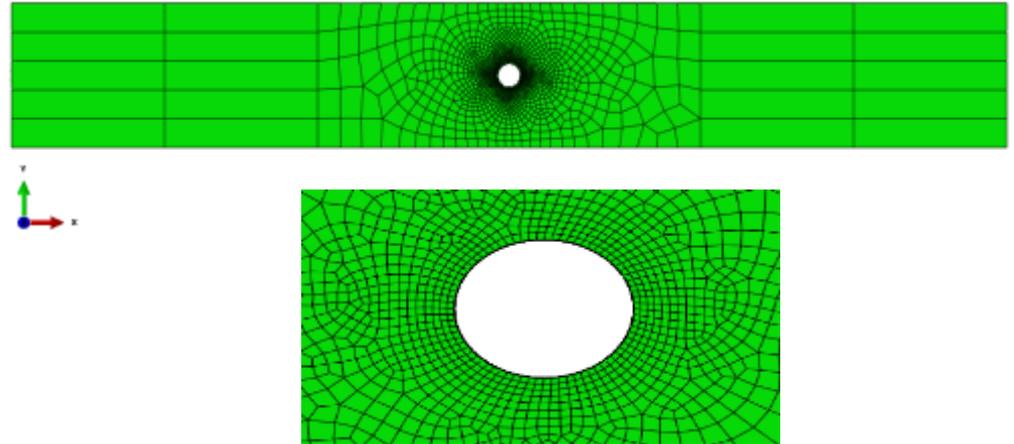
Выбираются оптимальные скорости деградации жесткости $\gamma_t = 1000$ для растягивающих усилий и $\gamma_c = 10000$ для сжимающих.

Образец с дефектом в виде отверстия.

Параметры КЭ модели:

	Solid 3d	Shell layup	Solid layup
NE (число элементов)	54656	1840	1737
NN (число узлов)	58807	1918	3623

КЭ модель, вид сверху:



Серия испытаний:

1. Растяжение, 32 слоя, образцы вырезаны вдоль 0° слоев
2. Растяжение, 32 слоя, образцы вырезаны вдоль 90° слоев
3. Сжатие, 32 слоя, образцы вырезаны вдоль 90° слоев

Образец с дефектом в виде отверстия.

Коэффициент релаксации $\alpha_i = (1 - \delta)(1 - d_i e^{-\gamma \varepsilon_i})$

Основным параметром является скорость деградации жесткости $\gamma_{1,2}$, берущаяся различной по разным направлениям в плоскости слоя

Испытание 2.

График зависимости усилий от удлинения для разных КЭ постановок при $\gamma_1 = \gamma_2 = 1000$

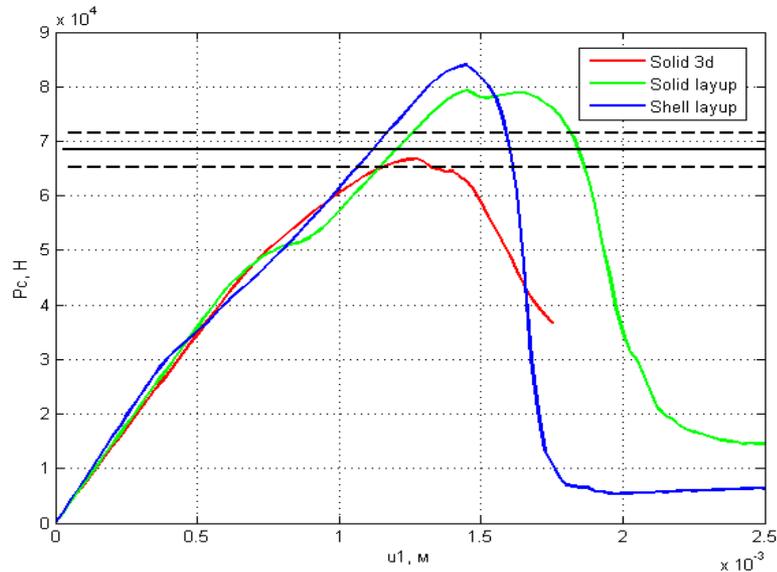
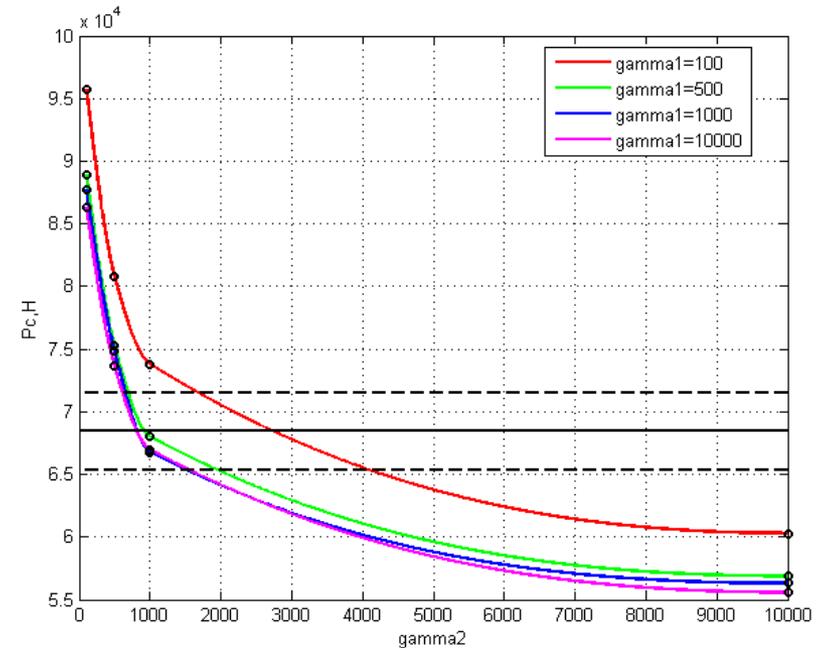


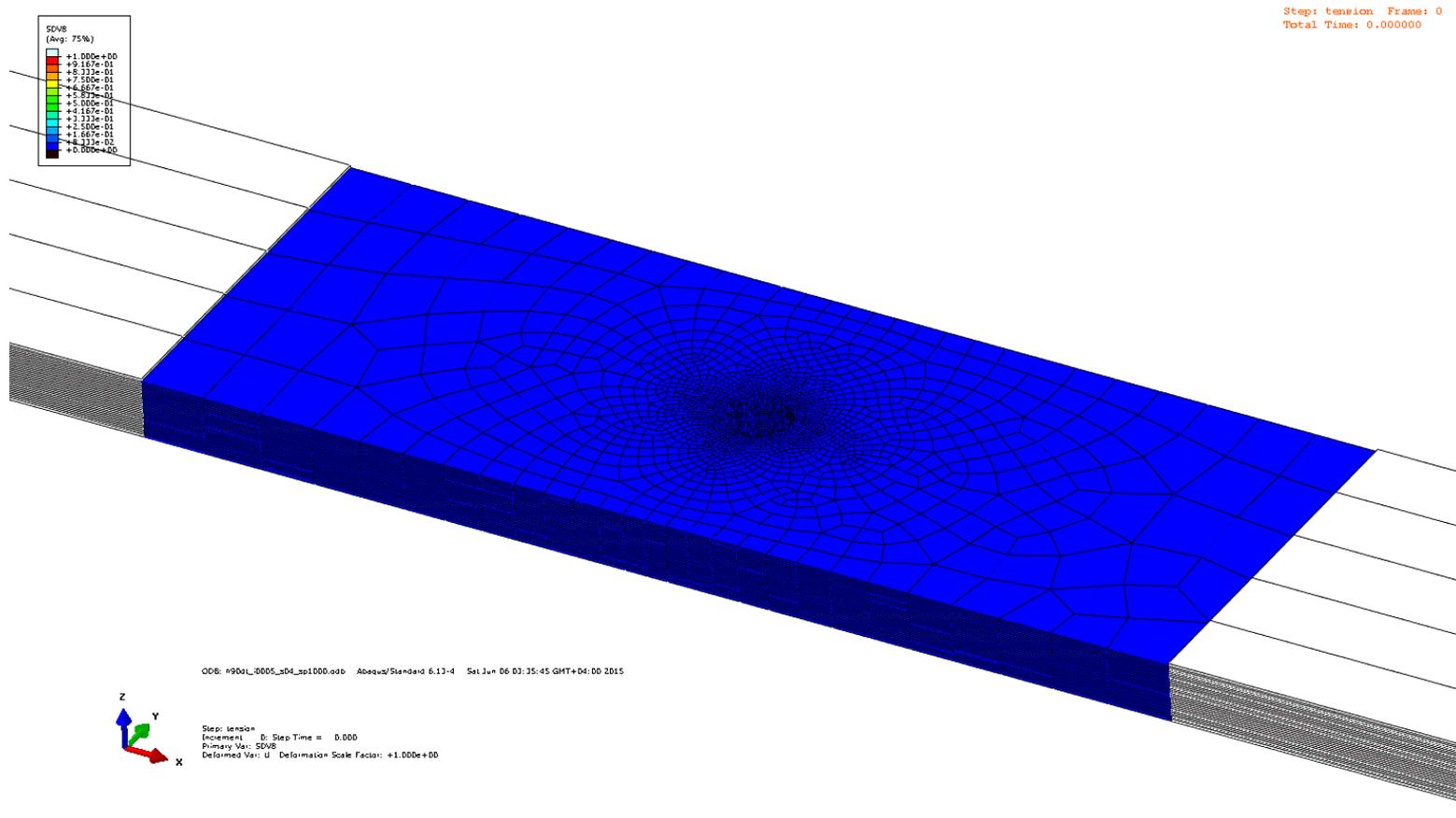
График зависимости критических усилий от γ_2 При фиксированных γ_1 для КЭ постановки Solid 3D



Образец с дефектом в виде отверстия.

Испытание 2.

Разрушение по матрице для КЭ постановки Solid 3D при $\gamma_1 = \gamma_2 = 1000$

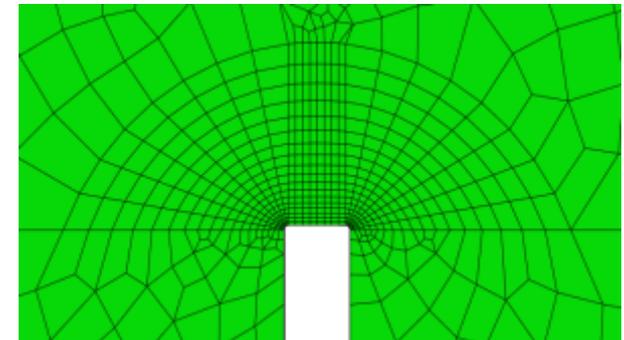
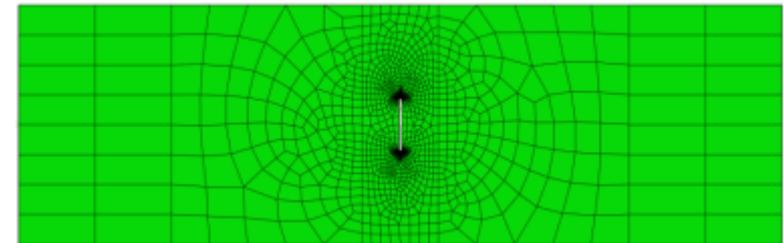


Образец с дефектом в виде выреза.

Параметры КЭ модели:

	Solid 3d		Shell layup		Solid layup	
	B=75	B=115	B=75	B=115	B=75	B=115
NE (число элементов)	61504	66048	2036	2682	2051	2741
NN (число узлов)	66067	70489	2113	2736	4263	5651

КЭ модель, вид сверху:



Серия испытаний:

1. Растяжение, 32 слоя, образцы вырезаны вдоль 0° слоев
2. Растяжение, 32 слоя, образцы вырезаны вдоль 90° слоев
3. Сжатие, 32 слоя, образцы вырезаны вдоль 0° слоев
4. Сжатие, 32 слоя, образцы вырезаны вдоль 90° слоев

Образец с дефектом в виде выреза.

Коэффициент релаксации $\alpha_i = (1 - \delta)(1 - d_i e^{-\gamma \varepsilon_i})$

Основным параметром является скорость деградации жесткости $\gamma_{1,2}$, берущаяся различной по разным направлениям в плоскости слоя

Испытание 3.

График зависимости усилий от удлинения для разных КЭ постановок при $\gamma_1 = \gamma_2 = 10000$

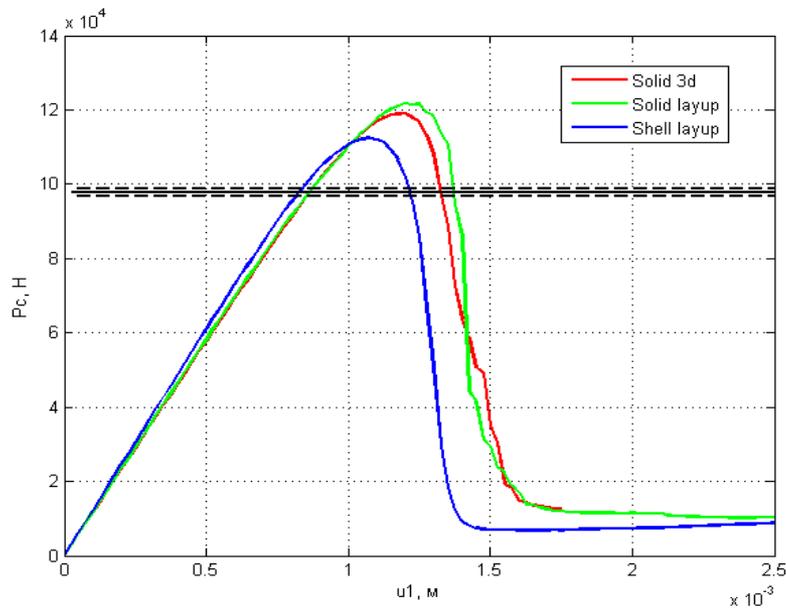
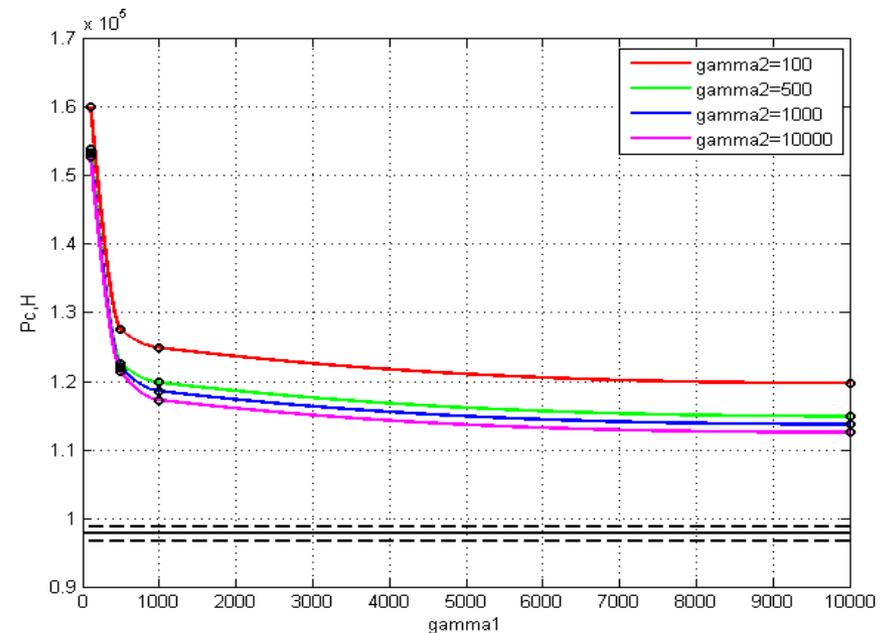


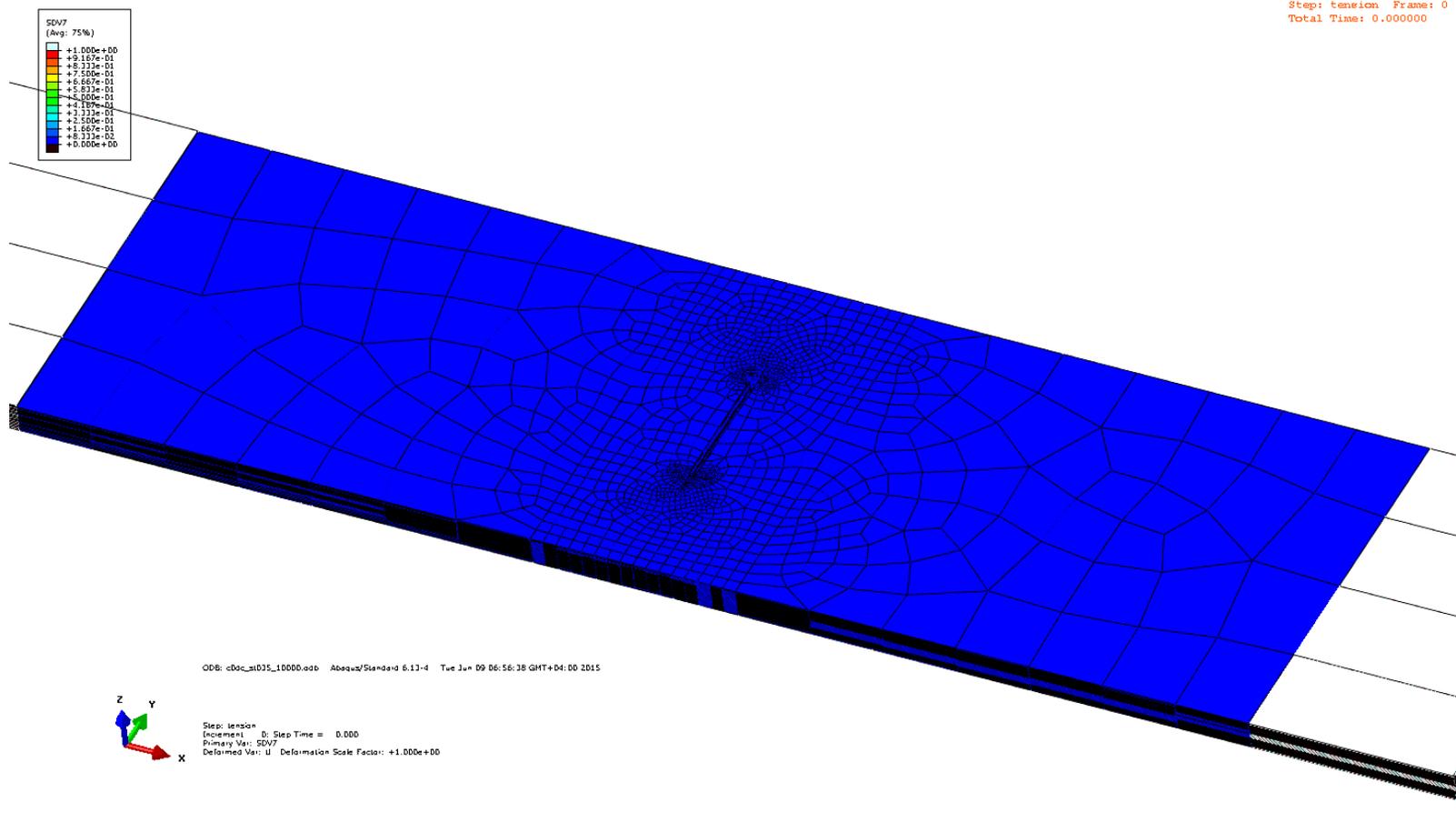
График зависимости критических усилий от γ_1 При фиксированных γ_2 для КЭ постановки Shell layup



Образец с дефектом в виде выреза.

Испытание 3.

Разрушение по волокну для КЭ постановки Solid 3D при $\gamma_1 = \gamma_2 = 10000$





Заключение

- Очевидна необходимость моделирования деградации жесткости материала при разрушении
- Предложенная модель разрушения материала дает хорошие результаты
- Выбранные скорости деградации жесткости являются оптимальными
- Метод КЭ моделирования Shell layer дает относительно хорошие результаты при быстроедействии и простоте, но может использоваться не для всех типов задач
- Рекомендуется использовать данную модель материала для моделирования разрушения слоистых композитов