



ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание академической степени

магистра

Конечно-элементное моделирование разрушения слоистых композитов на основе различных критериев разрушения

Направление: 553300 – Прикладная механика
Магистерская программа: 553303 – Вычислительная механика

Выполнил студент группы 6055/11
Руководитель, к.т.н., проф.
Соруководитель, ассистент

Журавская Е. А.
Боровков А. И.
Немов А. С.

Консультанты:
по истории механики, к.ф-м.н., проф.
по вопросам охраны труда, к. т. н., доцент

Б. А. Смольников
В. В. Монашков



Содержание

➤ **Объект исследования**

- Слоистый композит
- Критерии разрушения монослоя
- Идея моделирования прогрессирующего разрушения
- Кромочные эффекты в слоистых композитах

➤ **Конечно-элементное моделирование прогрессирующего разрушения в слоистых композитах на основе критерия Цай-Ву**

- Статическая оценка прочности композита на основе различных критериев
- Алгоритм моделирования прогрессирующего разрушения на основе критерия Цай-Ву
- Анализ результатов моделирования прогрессирующего разрушения на основе критерия Цай-Ву

➤ **Конечно-элементное моделирование прогрессирующего разрушения в слоистых композитах на основе критерия Хашина**

- Алгоритм моделирования прогрессирующего разрушения на основе критерия Хашина
- Анализ результатов моделирования прогрессирующего разрушения на основе критерия Хашина

➤ **Влияние введения различных моделей деградации свойств материала на разрушающую нагрузку**

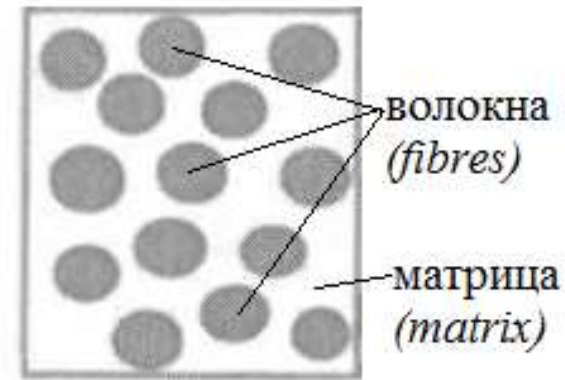
➤ **Выводы**

[1] Технический акт «Результаты испытаний на статическую прочность и усталость образцов углепластика HexPly M21/34%/UD194/IMA», ЦАГИ

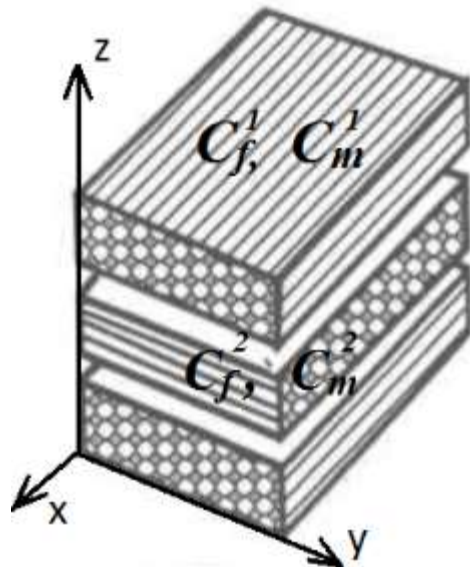
Объект исследования

Композиты:

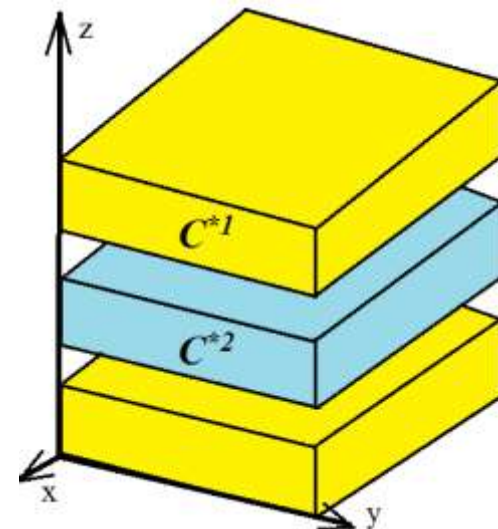
- ВОЛОКНИСТЫЕ
- СЛОИСТЫЕ
- дисперсно-упрочненные
- НАНОКОМПОЗИТЫ



фрагмент поперечного сечения
однонаправленного волокнистого композита



гомогенизация



Критерии разрушения монослоя

Критерии, не ассоциированные с типом разрушения

- Критерий максимальных напряжений:

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

- Критерий Цая-Хилла
- Критерий Хофмана
- Критерий Цай-Ву:

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

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

$\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ – действующие в монослое напряжения

$X_T, X_C, Y_T, Y_C, S_{12}$ – разрушающие напряжения

Критерии разрушения монослоя

Критерии, ассоциированные с типом разрушения

- Критерий Хашина

Прочность волокна:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} = \begin{cases} \geq 1 & \text{failure} \\ < 1 & \text{no failure} \end{cases} \quad \text{при } \sigma_1 > 0$$

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_C}\right)^2 = 1 \quad \text{при } \sigma_1 < 0$$

Прочность матрицы:

$$\frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{Y_T^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} = \begin{cases} \geq 1 & \text{failure} \\ < 1 & \text{no failure} \end{cases} \quad \text{при } \sigma_2 + \sigma_3 > 0$$

$$\left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}}\right)^2 - 1\right] \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_C}\right) + \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{4S_{23}^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} = \begin{cases} \geq 1 & \text{failure} \\ < 1 & \text{no failure} \end{cases} \quad \text{при } \sigma_2 + \sigma_3 < 0$$

Условия межслойного расслоения:

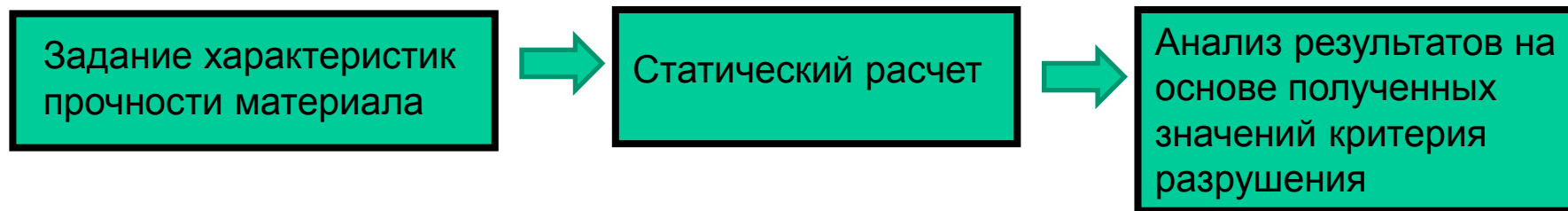
$$\left(\frac{\sigma_3}{Z_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{31}}{S_{31}}\right)^2 = 1 \quad \text{при } \sigma_3 > 0$$

$$\left(\frac{\sigma_3}{Z_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{31}}{S_{31}}\right)^2 = 1 \quad \text{при } \sigma_3 < 0$$

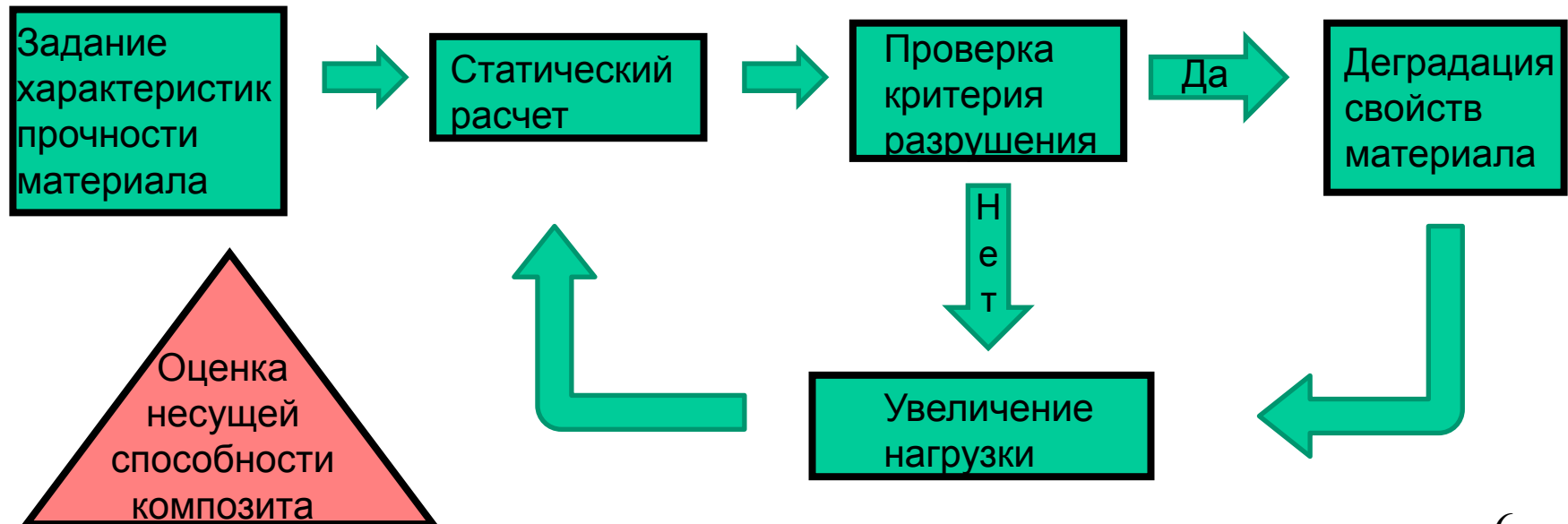
- Критерий Пака

Идея моделирования прогрессирующего разрушения

- Статический анализ прочности композита

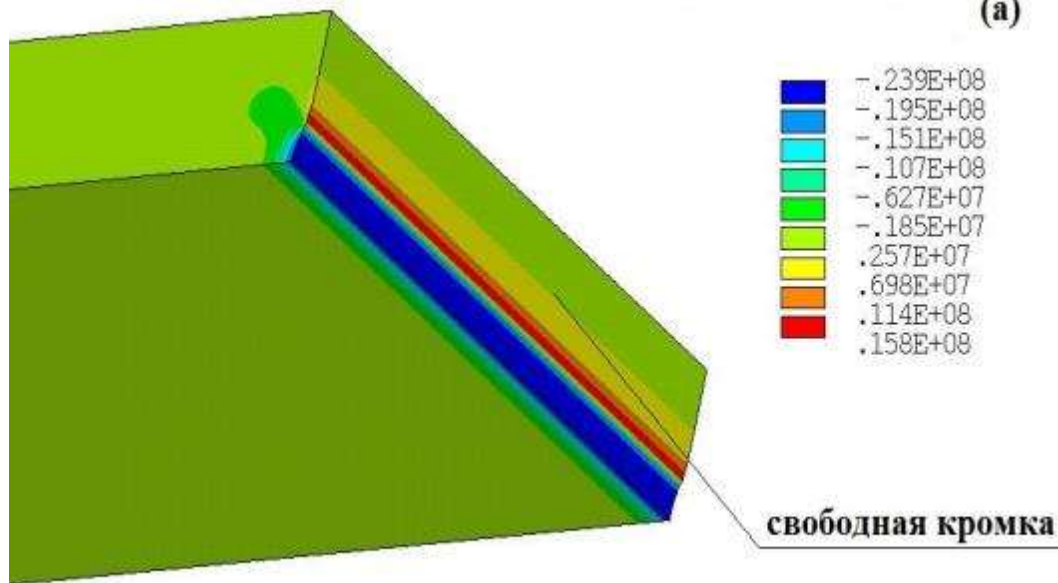


- Моделирование прогрессирующего разрушения

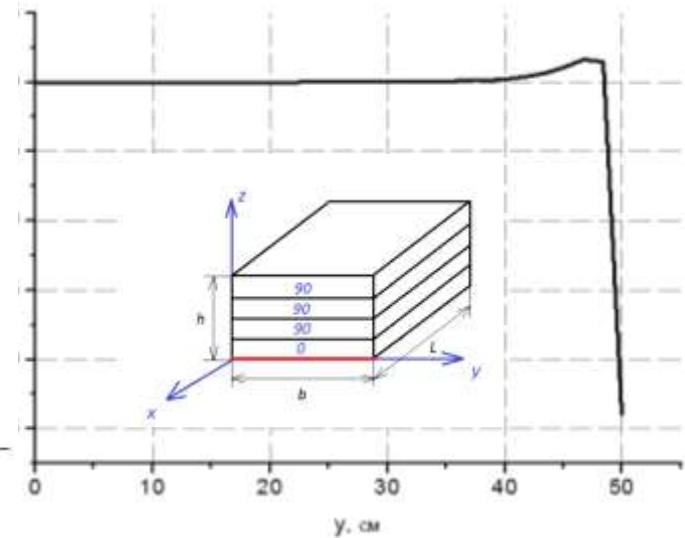
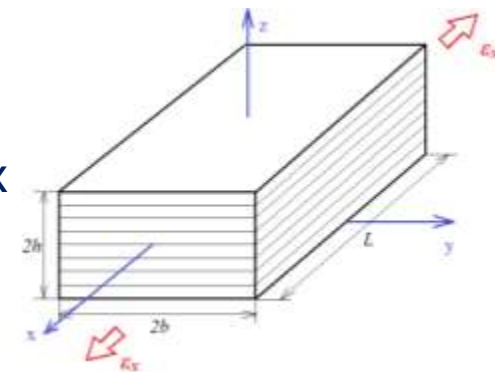


Кромочные эффекты в слоистых композитах

- Сингулярный характер межслойных нормального σ_z и сдвиговых τ_{yz} и τ_{xz} напряжений, возникающих вблизи **свободных кромок** композита
- Основная причина их возникновения - различие упругих свойств материала в смежных совместно



Распределение межслойного нормального напряжения σ_z вблизи свободной кромки для композита с укладкой $[90_3/0]_s$



Распределение межслойных напряжений σ_z по ширине на срединной плоскости



Содержание

- **Объект исследования**
 - Слоистый композит
 - Критерии разрушения монослоя
 - Идея моделирования прогрессирующего разрушения
 - Кромочные эффекты в слоистых композитах
- **Конечно-элементное моделирование прогрессирующего разрушения в слоистых композитах на основе критерия Цай-Ву**
 - Статическая оценка прочности композита на основе различных критериев
 - Алгоритм моделирования прогрессирующего разрушения на основе критерия Цай-Ву
 - Анализ результатов моделирования прогрессирующего разрушения на основе критерия Цай-Ву
- **Конечно-элементное моделирование прогрессирующего разрушения в слоистых композитах на основе критерия Хашина**
 - Алгоритм моделирования прогрессирующего разрушения на основе критерия Хашина
 - Анализ результатов моделирования прогрессирующего разрушения на основе критерия Хашина
- **Влияние введения различных моделей деградации свойств материала на разрушающую нагрузку**
- **Выводы**

Постановка задачи

- **Объект** - образец углепластика HexPly M21/34%/UD194/IMA с укладкой $[0/\pm 45_2/0_2/90/0_2/\pm 45_2/0]_S$
- **Нагрузка** – приложение растягивающего перемещения к клеммам образца
- **Материал** - однонаправленный эпоксидный углепластик [1]:

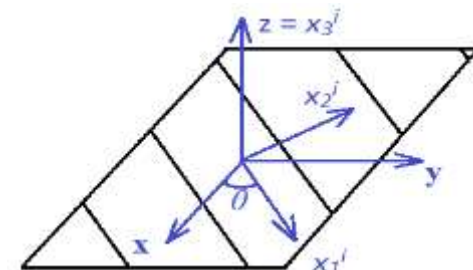
Модуль при растяжении вдоль волокон	E_x	160,3 ГПа
Модуль при сжатии вдоль волокон	E_{-x}	132,3 ГПа
Модуль при растяжении поперек волокон	$E_y = E_z$	7,7 ГПа
Модуль при сжатии поперек волокон	$E_{-y} = E_{-z}$	8,4 ГПа
Модуль при сдвиге	$G_{xy} = G_{yz} = G_{xz}$	4,8 ГПа
Коэффициент Пуассона	$\nu_{xy} = \nu_{yz} = \nu_{xz}$	0,32
Прочность при растяжении вдоль волокон	σ_x	2688 МПа
Прочность при сжатии вдоль волокон	σ_{-x}	1352 МПа
Прочность при растяжении поперек волокон	$\sigma_y = \sigma_z$	49,1 МПа
Прочность при сжатии поперек волокон	$\sigma_{-y} = \sigma_{-z}$	244 МПа
Прочность при межслоевом сдвиге	$\tau_{yz} = \tau_{xz}$	90 МПа
Прочность при сдвиге в плоскости листа	τ_{xy}	88 МПа



Общий вид образца углепластика

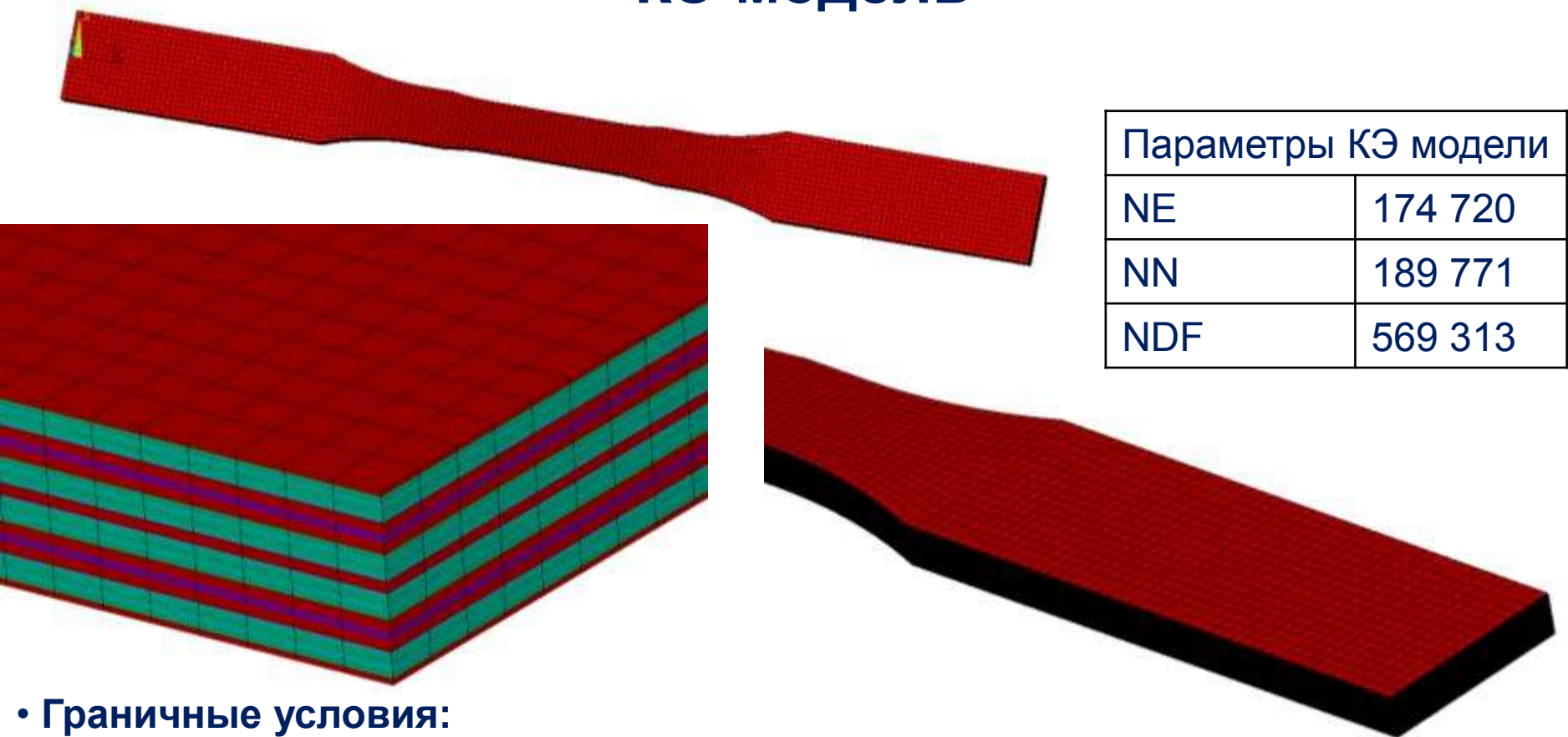


Поперечное сечение образца



Локальная система координат слоя

КЭ модель



- **Граничные условия:**

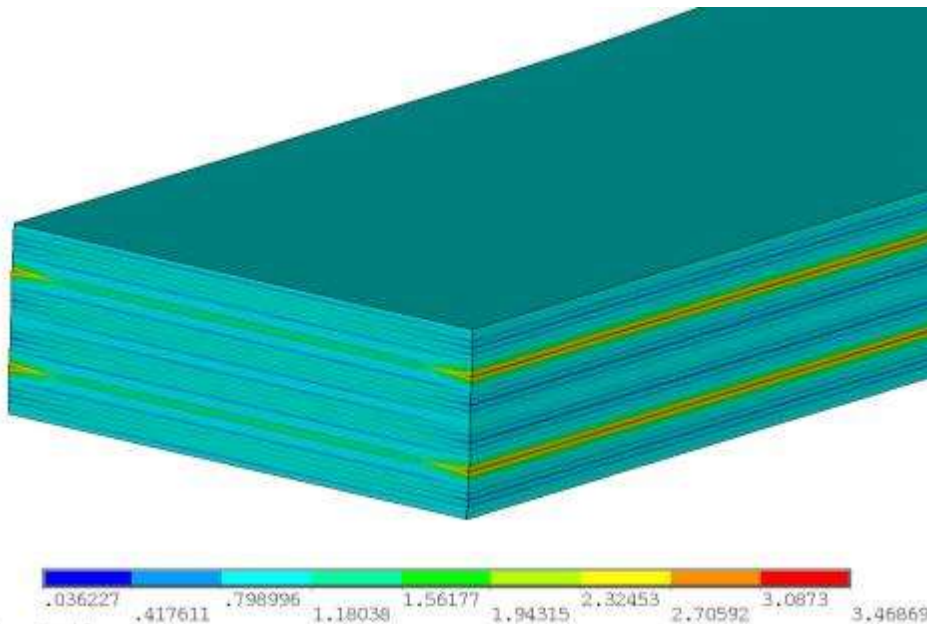
$$\begin{aligned} 0 < x < 80, \quad -13.5 < y < 13.5, \quad 0 < z < 5.52: \quad U_x = -0.1 \text{ мм}, \quad U_y = 0, \quad U_z = 0 \\ 220 < x < 300, \quad -13.5 < y < 13.5, \quad 0 < z < 5.52: \quad U_x = 0.1 \text{ мм}, \quad U_y = 0, \quad U_z = 0 \end{aligned}$$

- **Тип элемента** : твердотельный линейный элемент PLANE185

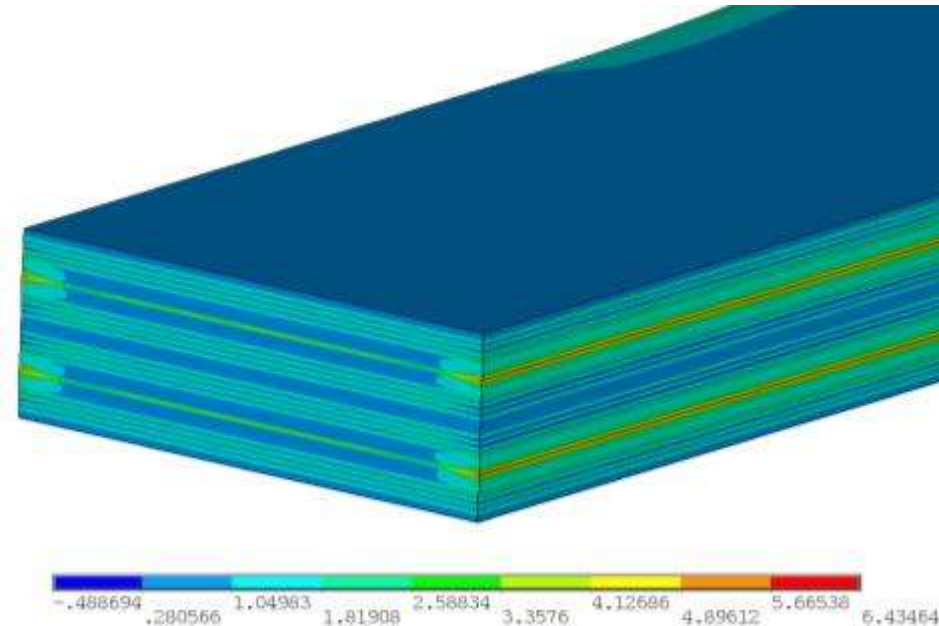
- Число элементов по толщине слоя – 2, толщина слоя – 0.184 мм, количество слоев – 30, общая толщина образца – 5.52 мм

Статическая оценка прочности композита

- Растяжение образца в продольном направлении с нагрузкой равной **103 190 Н**, соответствующей разрушающей нагрузке в [1]
- Анализ прочности образца на основе **методики определения запаса прочности** композиционного пакета
- Использование критериев **максимальных напряжений** и **Цай-Ву**



Распределение критерия максимальных напряжений в правой половине образца



Распределение критерия Цай-Ву в правой половине образца

Статическая оценка прочности композита

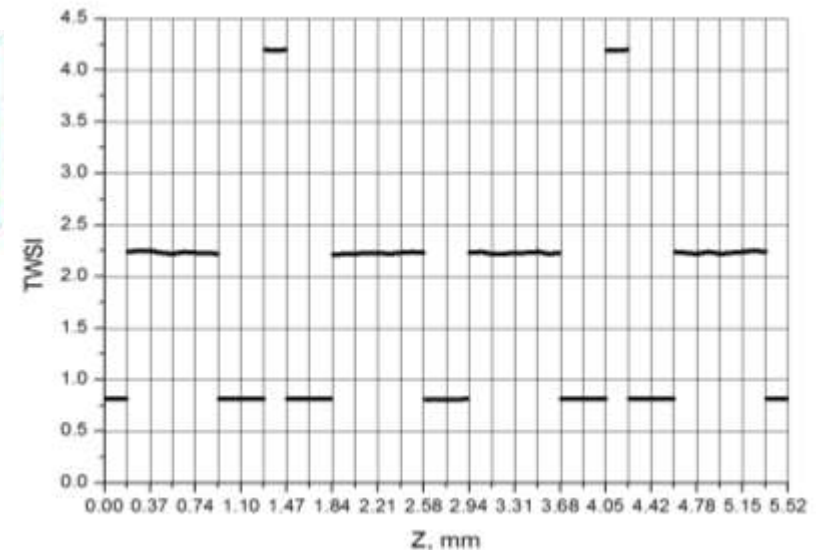
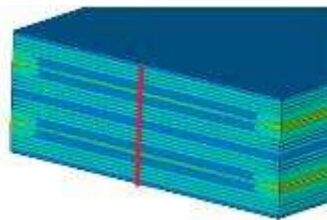
Методика определения запаса прочности композиционного пакета

- Определение коэффициента запаса прочности $\eta = 1/A$
- Минимальный коэффициент определит запас прочности композита в целом
- Распределение критерия Цай-Ву по толщине образца в центральном сечении:

90°-е слои – **4.2**

-45°/45°-е слои – **2.2**

0°-е слои – **0.8**



- Максимальное значение критерия Цай-Ву в 90°-х слоях у свободной кромки – **6.44**
- Минимальный коэффициент запаса прочности – **0.16**
- Критическая нагрузка, при которой критерий Цай-Ву достигает 1 в середине центрального сечения – **39 500 Н**
- Критическая нагрузка, при которой критерий Цай-Ву достигает 1 у свободной кромки в центральном сечении – **20 640 Н**

Алгоритм моделирования прогрессирующего разрушения на основе критерия Цай-Ву

Приложение растягивающего перемещения
вдоль оси образца - 0.1 мм.

Решение статической задачи МКЭ

Проверка значения критерия в узлах,
запись «разрушенных» узлов в массив

Выделение элементов, к которым
принадлежат записанные в массив узлы

Присвоение выбранным элементам
«разрушенного» материала с очень
маленькими характеристиками прочности

Приложение растягивающего
перемещения, увеличенного на 0.05 мм

Решение новой статической задачи МКЭ

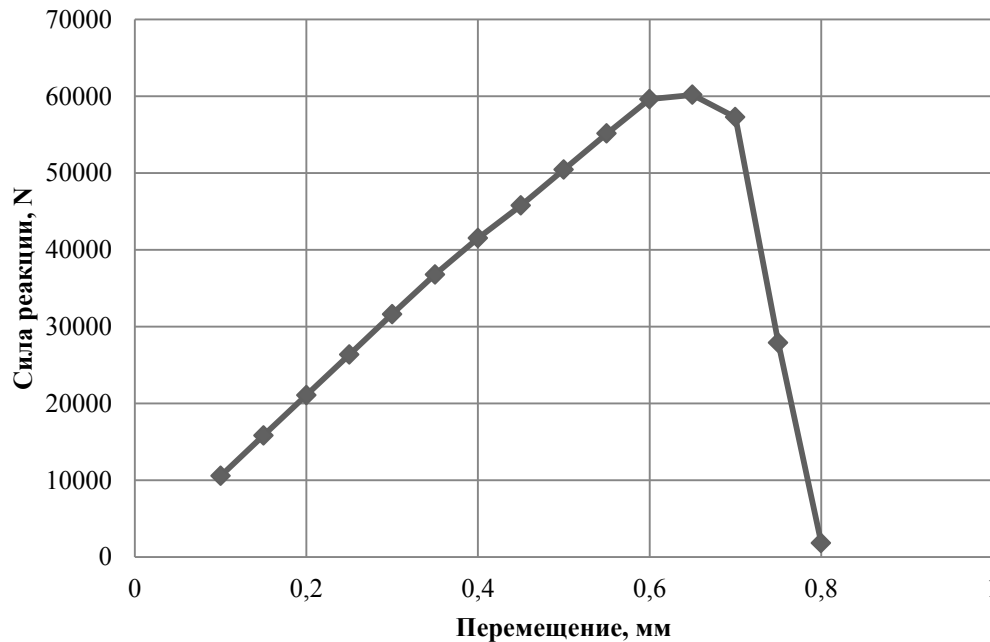
- Использование значения самого критерия разрушения
- Использование встроенного критерия Цай-Ву
- Значение критерия в узлах КЭ модели

Механические свойства «разрушенного» материала

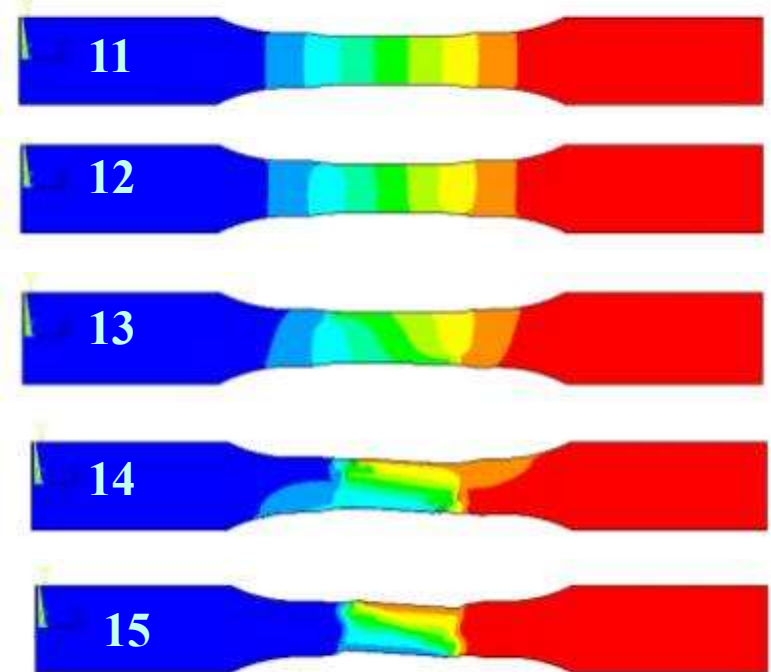
Модуль Юнга E , Па	1
Коэффициент Пуассона ν	1E-5

Анализ полученных результатов

- Решено **15** итераций с конечным перемещением **0.8 мм**
- Разрушение происходит при приложенной нагрузке **60164 N** на **12** итерации при перемещении **0.65 мм**.
- Разрушающая нагрузка, согласно [1] - **103066 N**



Потеря несущей способности образца на основе критерия Цай-Ву



Распределение перемещений U_x для последних 5 итераций

Распространение разрушения в образце

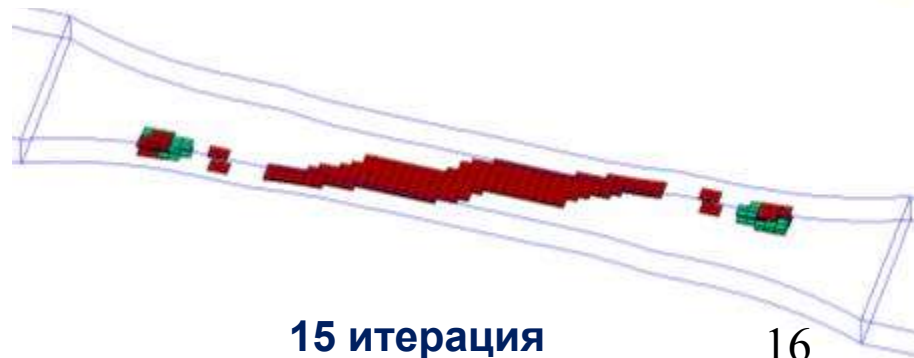
Первоначально критерий превысил значение 1 на **5** итерации при заданном перемещении **0.3 мм**

- разрушение в 90° -х слоях
- разрушение в $-45^\circ/45^\circ$ -х слоях
- разрушение в 0° -х слоях



Распространение разрушения в образце

разрушение в 90° -х слоях разрушение в $-45^\circ/45^\circ$ -х слоях разрушение в 0° -х слоях





Содержание

➤ Объект исследования

- Слоистый композит
- Критерии разрушения монослоя
- Идея моделирования прогрессирующего разрушения
- Кромочные эффекты в слоистых композитах

➤ Конечно-элементное моделирование прогрессирующего разрушения в слоистых композитах на основе критерия Цай-Ву

- Статическая оценка прочности композита на основе различных критериев
- Алгоритм моделирования прогрессирующего разрушения на основе критерия Цай-Ву
- Анализ результатов моделирования прогрессирующего разрушения на основе критерия Цай-Ву

➤ Конечно-элементное моделирование прогрессирующего разрушения в слоистых композитах на основе критерия Хашина

- Алгоритм моделирования прогрессирующего разрушения на основе критерия Хашина
- Анализ результатов моделирования прогрессирующего разрушения на основе критерия Хашина

➤ Влияние введения различных моделей деградации свойств материала на разрушающую нагрузку

➤ Выводы

[1] Технический акт «Результаты испытаний на статическую прочность и усталость образцов углепластика HexPly M21/34%/UD194/IMA», ЦАГИ

Алгоритм моделирования прогрессирующего разрушения на основе критерия Хашина

- Использование значения самого критерия разрушения
- Использование специальной подпрограммы для определения значений критерия в
- Значения критерия в элементах КЭ модели
- 3 типа разрушения

Разрушение матрицы:

$$E_y = \nu_{xy} = \nu_{yz} = 0$$

Разрушение волокна:

$$E_x = E_y = E_z = 0$$

$$G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = 0$$

$$\nu_{xy} = \nu_{yz} = \nu_{xz} = 0$$

Расслоение:

$$E_z = G_{xz} = G_{yz} = \nu_{xz} = \nu_{yz} = 0$$

- Учет одновременного разрушения нескольких типов

«Разрушенный» материал	Material Fiber	Material Matrix	Material Delamination	Matrix+ Delamination
E_x	1 Па	160.3 ГПа	160.3 ГПа	160.3 ГПа
E_y	1 Па	1 Па	7.7 ГПа	1 Па
E_z	1 Па	7.7 ГПа	1 Па	1 Па
ν_{xy}	1E-5	1E-5	0.32	1E-5
ν_{yz}	1E-5	1E-5	1E-5	1E-5
ν_{xz}	1E-5	0.32	1E-5	1E-5
G_{xy}	1 Па	4.8 ГПа	4.8 ГПа	4.8 ГПа
G_{yz}	1 Па	4.8 ГПа	1 Па	1 Па
G_{xz}	1 Па	4.8 ГПа	1 Па	1 Па

Алгоритм моделирования прогрессирующего разрушения на основе критерия Хашина

Приложение растягивающего перемещения
вдоль оси образца - 0.1 мм.

Решение статической задачи МКЭ

Проверка прочности волокна, матрицы и
условия расслоения в каждом элементе,
запись «разрушенных» элементов в
соответствующие компоненты

Элементам из каждого компонента
присваивается «разрушенный» материал в
соответствии с типом разрушения

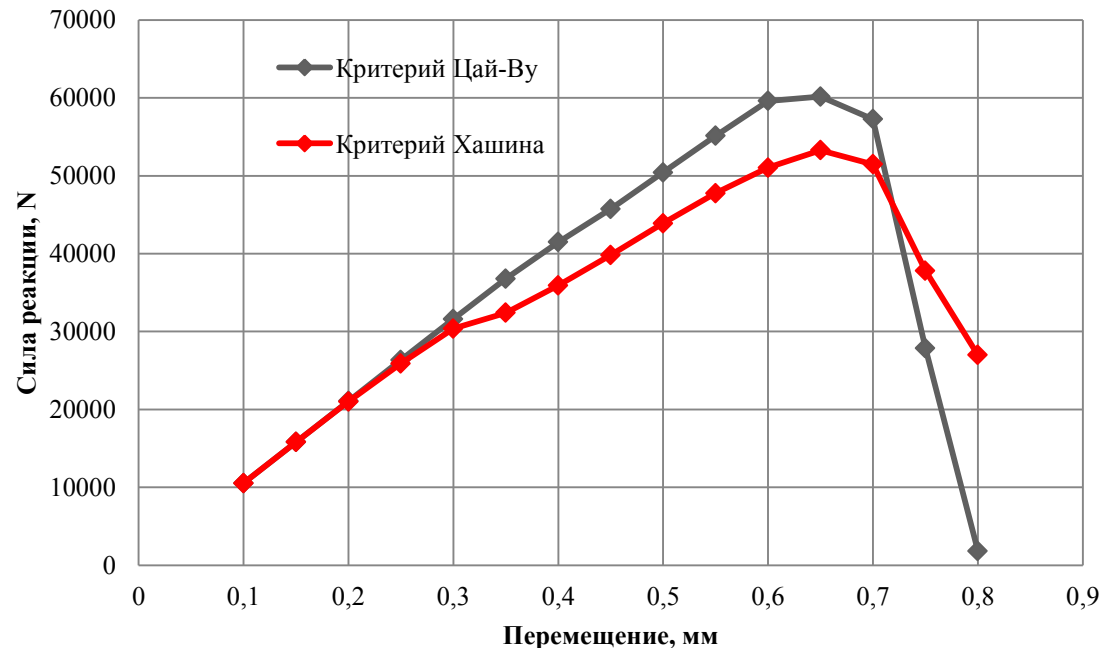
Приложение растягивающего
перемещения, увеличенного на 0.05 мм

Решение новой статической задачи МКЭ

Анализ полученных результатов

- Решено **15** итераций с конечным перемещением **0.8 мм**
- Разрушение происходит при приложенной нагрузке **53 274 Н** на **12** итерации при перемещении **0.65 мм**.
- Разрушающая нагрузка на основе критерия Цай-Бу - **60164 Н**
- Разрушающая нагрузка, согласно [1] - **103066 Н**

Потеря несущей способности образца

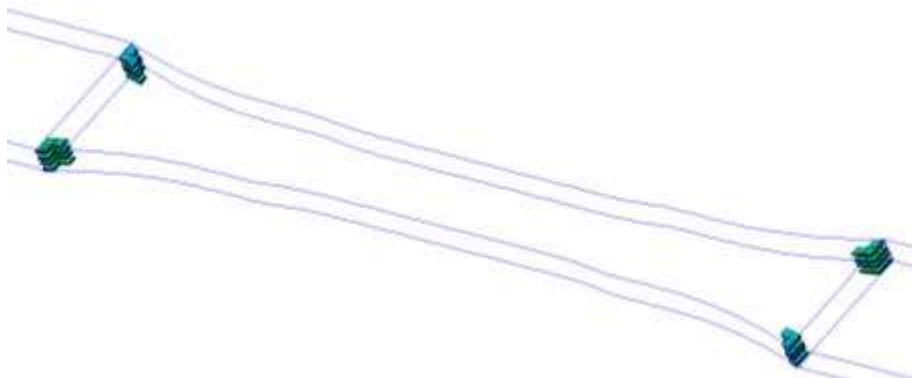


Потеря несущей способности образца на основе критериев
Цай-Бу и Хашина

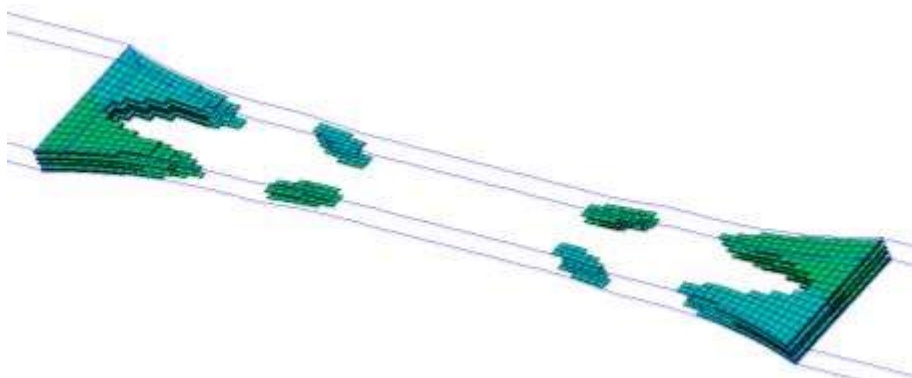
Распространение разрушения в образце

разрушение в 90° -х слоях разрушение в $-45^\circ/45^\circ$ -х слоях разрушение в 0° -х слоях

2 итерация

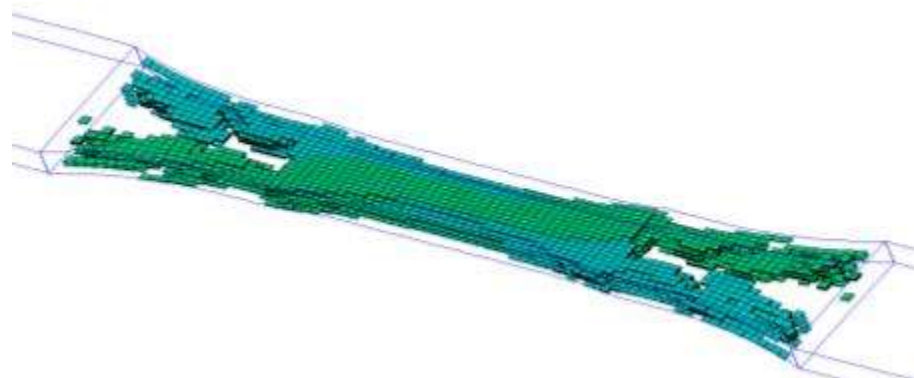


Разрушение волокна



Разрушение матрицы

5 итерация



Разрушение волокна

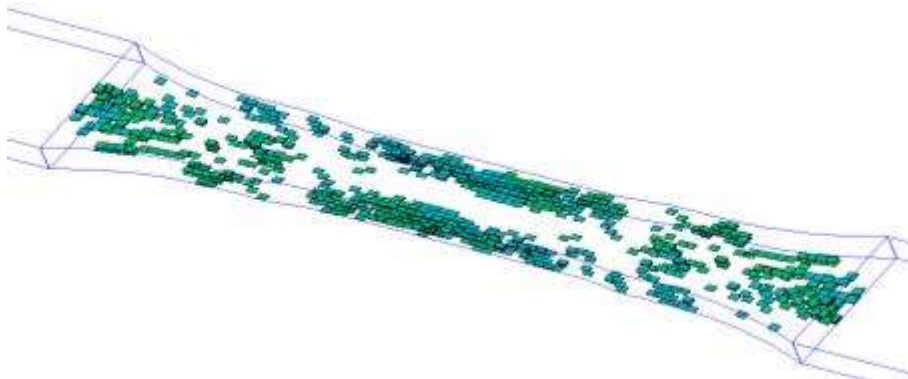


Разрушение матрицы

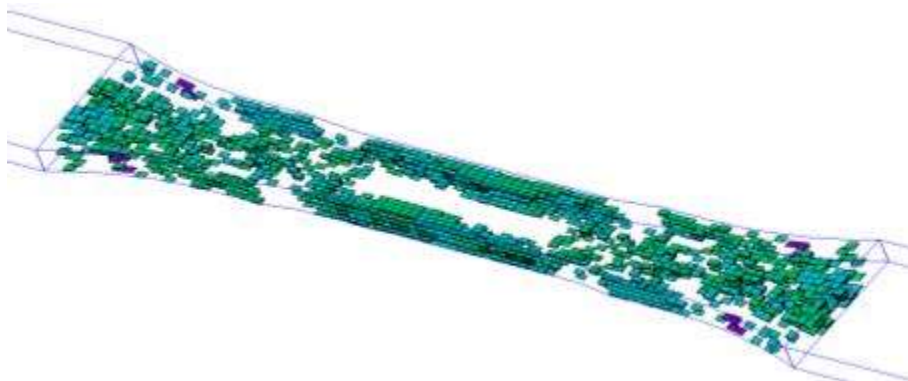
Распространение разрушения в образце

разрушение в 90° -х слоях разрушение в $-45^\circ/45^\circ$ -х слоях разрушение в 0° -х слоях

8 итерация



Разрушение волокна

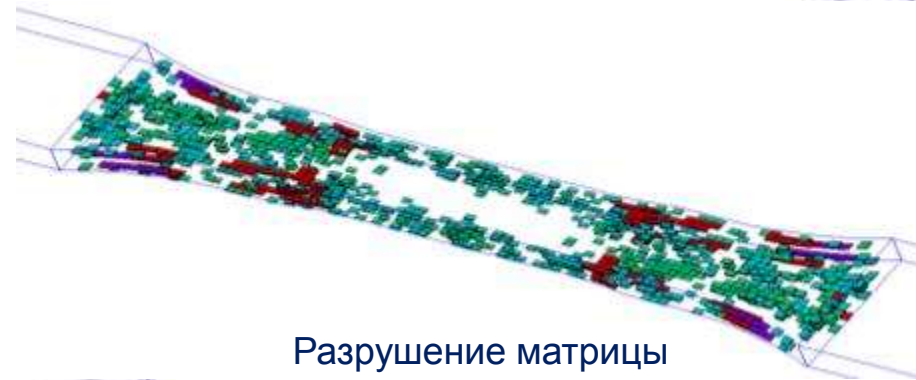


Разрушение матрицы



11 итерация

Разрушение волокна



Разрушение матрицы

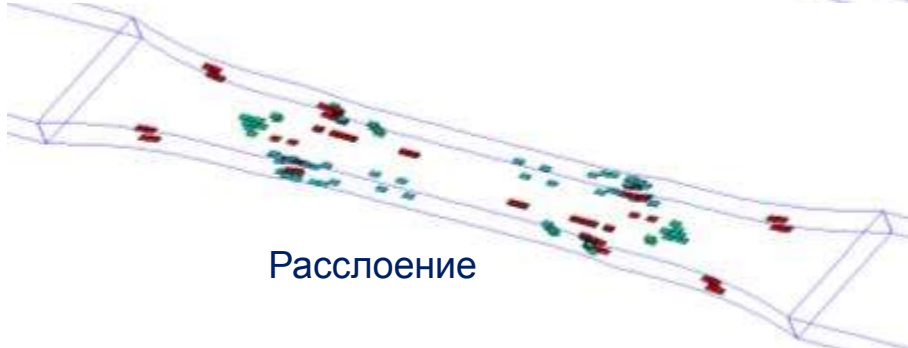
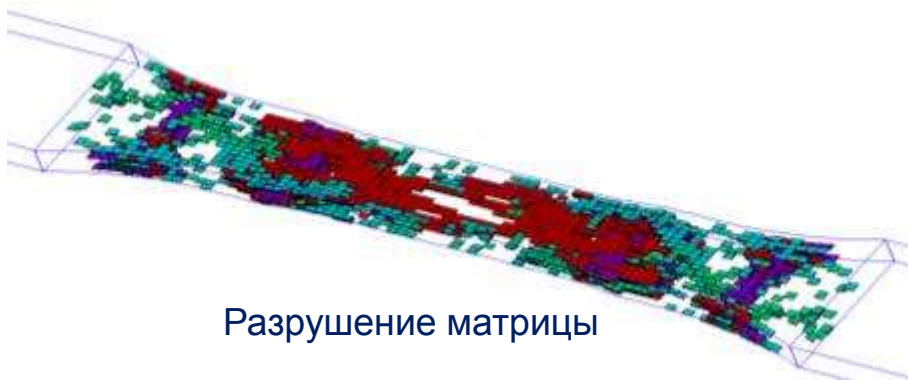
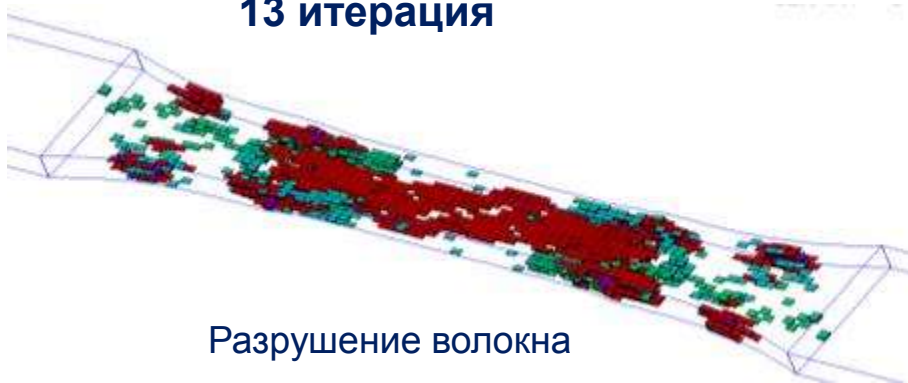


Расслоение

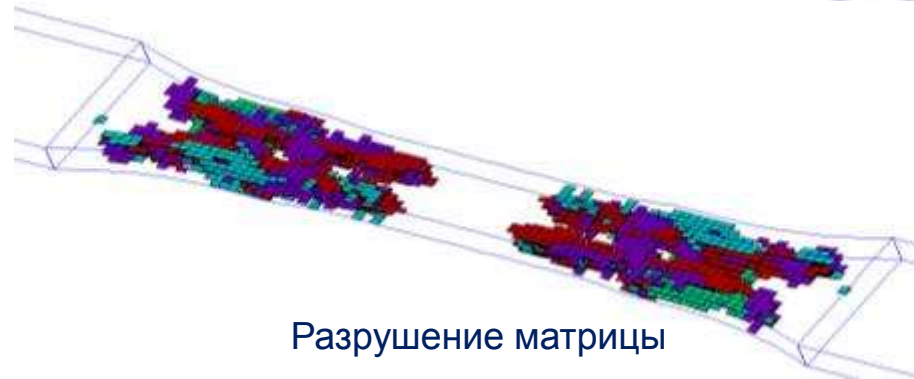
Распространение разрушения в образце

разрушение в 90° -х слоях разрушение в $-45^\circ/45^\circ$ -х слоях разрушение в 0° -х слоях

13 итерация



15 итерация





Содержание

➤ Объект исследования

- Слоистый композит
- Критерии разрушения монослоя
- Идея моделирования прогрессирующего разрушения
- Кромочные эффекты в слоистых композитах

➤ Конечно-элементное моделирование прогрессирующего разрушения в слоистых композитах на основе критерия Цай-Бу

- Статическая оценка прочности композита на основе различных критериев
- Алгоритм моделирования прогрессирующего разрушения на основе критерия Цай-Бу
- Анализ результатов моделирования прогрессирующего разрушения на основе критерия Цай-Бу

➤ Конечно-элементное моделирование прогрессирующего разрушения в слоистых композитах на основе критерия Хашина

- Алгоритм моделирования прогрессирующего разрушения на основе критерия Хашина
- Анализ результатов моделирования прогрессирующего разрушения на основе критерия Хашина

➤ Влияние введения различных моделей деградации свойств материала на разрушающую нагрузку

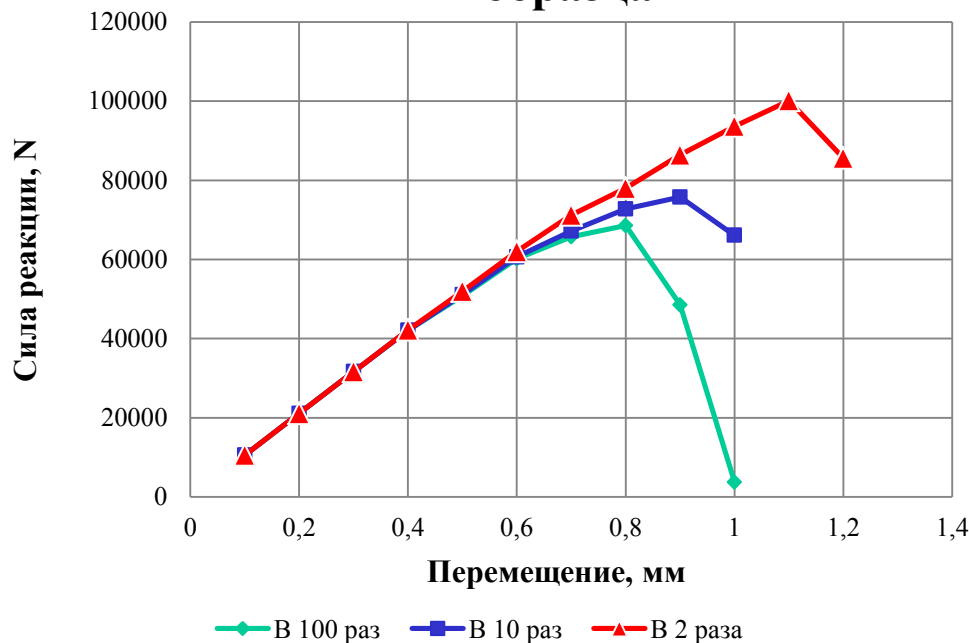
➤ Выводы

[1] Технический акт «Результаты испытаний на статическую прочность и усталость образцов углепластика HexPly M21/34%/UD194/IMA», ЦАГИ

Влияние введения различных моделей деградации свойств материала на разрушающую нагрузку

- Критерий Цай-Бу
- Уменьшение свойств материала в 2, 10 и 100 раз
- При уменьшении свойств материала в 2 раза значение разрушающей нагрузки - **100150 Н** (экспериментальное значение **103066 Н**)

Потеря несущей способности
образца



«Разрушенный» материал	В 2 раза	В 10 раз	В 100 раз
E_x , ГПа	80.15	16.03	1.603
E_y , ГПа	3.85	0.77	0.077
E_z , ГПа	3.85	0.77	0.077
ν_{xy}	0.16	0.032	0.0032
ν_{yz}	0.16	0.032	0.0032
ν_{xz}	0.16	0.032	0.0032
G_{xy} , ГПа	2.4	0.48	0.048
G_{yz} , ГПа	2.4	0.48	0.048
G_{xz} , ГПа	2.4	0.48	0.048



Выводы

- Смоделирован процесс разрушения образца углепластика **HexPly M21/34%/UD194/IMA**, нагруженного одноосным растяжением
- Произведен обзор используемых в литературе критериев разрушения и методик моделирования **прогрессирующего разрушения**
- Рассмотрен **статический подход** оценки прочности образца
- Выполнено моделирование прогрессирующего разрушения материала на основе критериев **Цай-Ву** и **Хашина**
- Для обоих критериев получена кривая **потери несущей способности** образца
- Произведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными [1]
- Изучена последовательность и характер разрушения на основе критерия Хашина: в каких слоях и какого типа разрушение произошло
- Для критерия Цай-Ву изучено влияние применения наиболее простых моделей деградации свойств материала на значение разрушающей нагрузки

[1] Технический акт «Результаты испытаний на статическую прочность и усталость образцов углепластика HexPly M21/34%/UD194/IMA», ЦАГИ



Спасибо за внимание!