

**Методические указания к  
выполнению лабораторных  
работ по теме “Проектирование  
композитных конструкций”**

# Проектирование КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

NX Laminate composites (NX LC) – это модуль приложения NX Advanced Simulation, позволяющий быстро проектировать и проводить различные виды анализов слоистых композитов. Получаемая в NX LC модель композита и ее расчетная конечно-элементная модель отражают все геометрические и физические особенности композитного изделия.

На стадии начального проектирования в NX LC присутствует возможность локальной и глобальной оптимизации структуры композита для заданных условий нагружения. Также в NX LC реализован обмен данными с FiberSim – ведущим программным обеспечением в области моделирования изделий из композитных материалов. Это позволяет усовершенствовать созданную в NX LC модель средствами FiberSim и провести на ее основе поверочный расчет с помощью решателей NX Nastran, MSC, Nastran, ANSYS, ABAQUS либо LS-Dyna.

Инструменты просмотра и анализа полученных результатов NX LC помогают определять по различным критериям прочности опасные зоны для каждого слоя, а также проводить сравнительный анализ результатов моделирования с экспериментальными данными.

## 1. Особенности работы с композитными конструкциями в NX

Моделирование композитной структуры и расчет конструкции сопровождаются рядом стандартных шагов:

- создать или импортировать геометрию в NX;
- создать КЭ и расчетный файл с выбранным решателем и типом решения;
- при необходимости упростить или изменить геометрию;
- создать КЭ сетку с учетом физических свойств. Создать композитную структуру;
- задать граничные условия;
- решить задачу;
- просмотреть результаты и сделать вывод о работоспособности конструкции.

В зависимости от выбранного решателя и способа создания (пп. 1.1) композитной КЭ модели могут использоваться типы элементов, представленные в следующей таблице:

| Решатель                 | 2D элементы  | 3D элементы                      |
|--------------------------|--|----------------------------------|
| NX Nastran и MSC Nastran | CQUAD4, CQUADR, CQUAD8, CTRIA3, CTRIAR, CTRIA6     | CHEXA, CPENTA                    |
| Abaqus                   | S3, S3R, S4, S4R, S4R5*, S8R, S8R5*, STRI3, STRI65 | SC6R*, SC8R*                     |
| ANSYS                    | SHELL91, SHELL99, SHELL181                         | SOLID186<br>SOLID191*, SOLSH190* |
| LS-DYNA                  | ELEMENT_SHELL                                      | ELEMENT_TSHELL*                  |

\* Доступно только для способа создания на основе физических свойств.

В данной главе создание композитов и особенности работы с ними рассматриваются только с решателем NX Nastran, другие решатели рассматриваться не будут.

## 1.1. Способы создания композитов и их организация в NX

Моделирование композитных конструкций предполагает построение 2D КЭ сетки на поверхности САД-модели или создание 3D элементов. Поверхности, используемые для построения КЭ модели, являются аналогом оснастки, используемой в производстве композитных изделий. На основе созданной КЭ модели проводится предварительная прорисовка композитного изделия – определяются свойства слоев, их местоположения и ориентации.

NX Laminate composites позволяет создавать композитное изделие двумя способами:

1. Задание физических свойств с использованием инструмента **Разработчик композитов (Laminate Modeler)**, которые назначаются соответствующим КЭ сеткам. В этом случае выполняются следующие шаги:

- создание 2D оболочечной или 3D КЭ сетки;
- назначение ориентации материала;
- создание физических свойств композитов для сетки;
- валидация композита.

При данном способе вся информация о созданных композитах находится в таблицах физических свойств (рисунок 1, А), которыми можно управлять: создавать, изменять, копировать, удалять. Также можно изменять свойства материалов после создания композитов.

2. Выполнение процесса драпировки с использованием инструмента **Глобальная компоновка (Global Layup)**. В этом случае на грани геометрии назначаются так называемые глобальные слои с выбранным способом укладки. После чего рассчитываются зоны с уникальными свойствами композитов. Данный процесс создания композитов содержит следующие шаги:

- создание 2D оболочечной КЭ сетки;
- назначение ориентации материала;
- создание физических свойств композитов с указанием на глобальную компоновку;
- задание глобальной укладки с указанием материала;
- выбор способа драпировки;
- создание зон.

Созданным данным способом композитам соответствуют объекты (слои, смещение, ориентация материалов, зоны), которые находятся в дереве модели панели **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)**. Также можно создавать, копировать, изменять и удалять компоновки глобальных слоев (рисунок 1, Б).

## 1.2. Терминология и системы координат

Перед подробным описанием способов создания композитов необходимо определиться с некоторыми терминами и системой координат композитов, которые встречаются при работе в NX Laminate composites.

Приведем основную терминологию, встречающуюся в NX:

- **Композит (Composite)** или **Многослойный материал (Laminate)** – состоит из нескольких тонких слоев материала с разными свойствами;

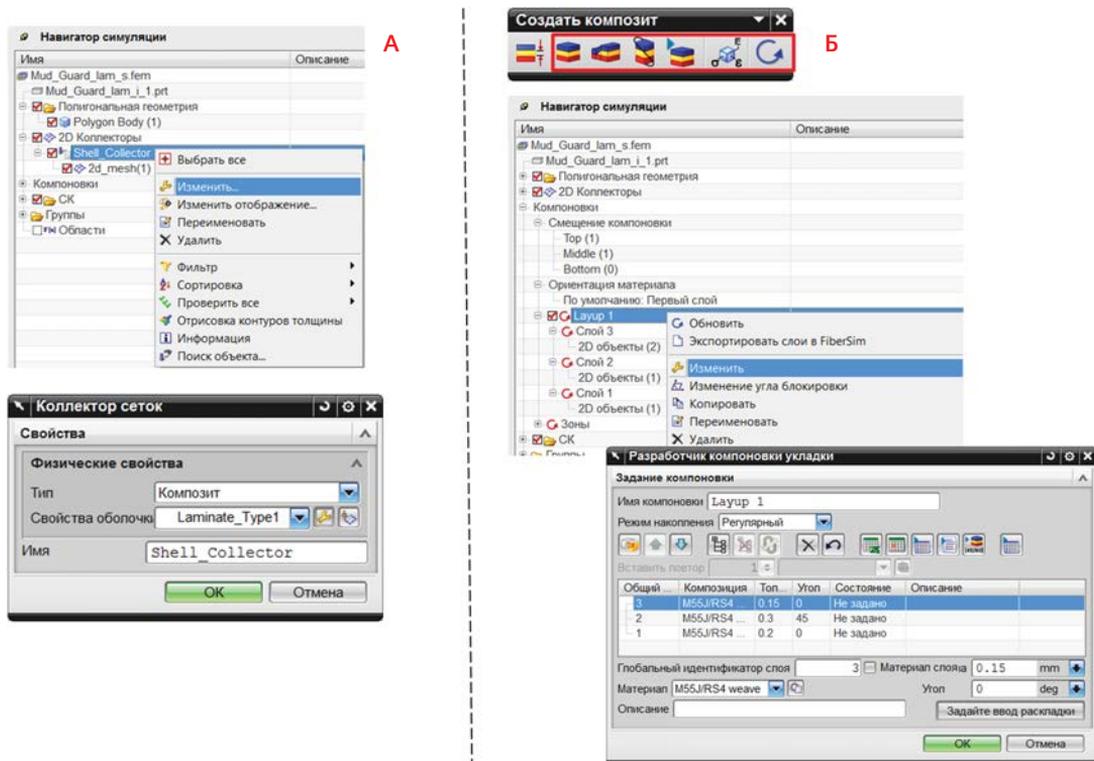


Рисунок 1. Работа с композитами

- *Слой (Ply)* – слой композита из простого или составного материала, в общем случае имеет ортотропные свойства;
- *Заполнитель (Core)* – относительно толстый слой, разделяющий другие слои, служит для улучшения изгибных свойств композита;
- *Глобальный слой (Global Ply)* – слой, управляемый в диалоговом окне **Разработчик компоновки укладки (Lamup Modeler)**;
- *Компоновка слоя (Ply Layup)* – порядок организации слоев в пакете и их ориентация, которые могут меняться в **Разработчике композитов (Laminate Modeler)** или **Разработчике компоновки укладки (Layup Modeler)**;
- *Материал слоя (Ply Material)* – материал с эффективными жесткостными и прочностными свойствами, полученными на основе свойств материала матрицы и волокон с учетом микроструктуры слоя.

При моделировании композитов используются следующие типы систем координат:

- *Система координат элемента (Element coordinate system)* – определяется расположением и нумерацией узлов элемента (рисунок 2, А);
- *Система координат материала (Material coordinate system)* – не зависит от КЭ сетки, используется для ориентации свойств анизотропных и ортотропных материалов, например композиционных материалов (рисунок 2, Б);



Рисунок 2. Системы координат

- Система координат слоя (Ply coordinate system) – определяет ориентацию волокон слоя (рисунок 3) (ось 1).

На рисунке 3 представлен пакет слоев композита. Ссылочная плоскость определяет расположение XY плоскости. Оси X и Y соответствуют системе координат ориентации материала, которая называется Системой координат композита (Laminate coordinate system). Ось Z направлена по нормали композита. Оси 1 и 2 соответствуют системе координат слоя, ось 1 отвечает за направление волокна однонаправленных типов слоев, а для тканевого слоя отвечает за направление волокон основы. Ось 2 нормальна к направлению волокна и соответствует направлению утка в тканевом слое. Угол  $\theta$  определяет угол между осями X и 1. Координата Z отвечает за расположение слоев относительно ссылочной плоскости.

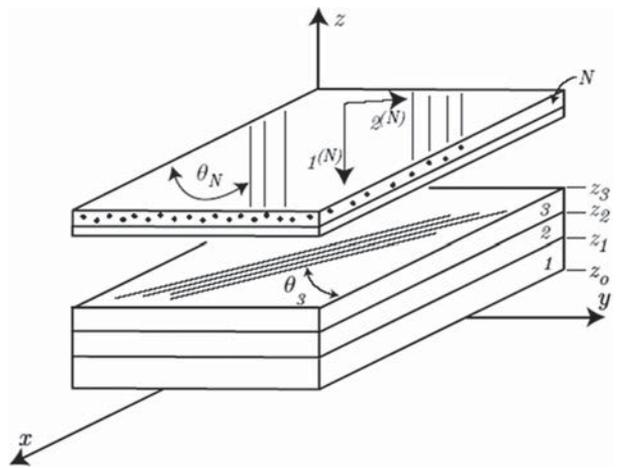


Рисунок 3. Системы координат композита и слоя

## 2. Создание композитов на основе физических свойств

Способ создания композита заданием композитных физических свойств для КЭ сетки является самым простым, но с ограниченными возможностями. При наличии КЭ сетки необходимо задать систему координат материала и с помощью **Разработчика композита (Laminate Modeler)** сформировать пакет слоев с указанием материалов, толщин, углов укладки и прочего.

## 2.1. Ориентация материала

По умолчанию система координат материала совпадает с системой координат элементов, поэтому необходимо переназначить ориентацию материала для определения системы координат композита. Области, которые предполагают разную ориентацию систем координат материалов, должны соответствовать разным КЭ сеткам.

Ориентация материала назначается через диалоговое окно **Ассоциативные данные сетки (Mesh Associated Data)**, которое вызывается нажатием правой клавишей мыши на КЭ сетку в дереве модели (рисунок 4, А). В группе параметров **Ориентация материала (Material Orientation)** выбирается метод ориентации: относительно выбранной системы координат (*MCID*); задание угла между новой и старой осями *OX* (*Угол ориентации*); с помощью указания направления оси *OX* по касательной к кривой (*Касательная кривая*); по вектору (*Вектор*).

Команда **Проверка конечно-элементной модели (Finite Element Model Check)** с проверкой **Ориентация материала элемента (Element Material Orientation)** позволяет визуализировать и контролировать направление оси *X* системы координат материала (рисунок 4, Б).

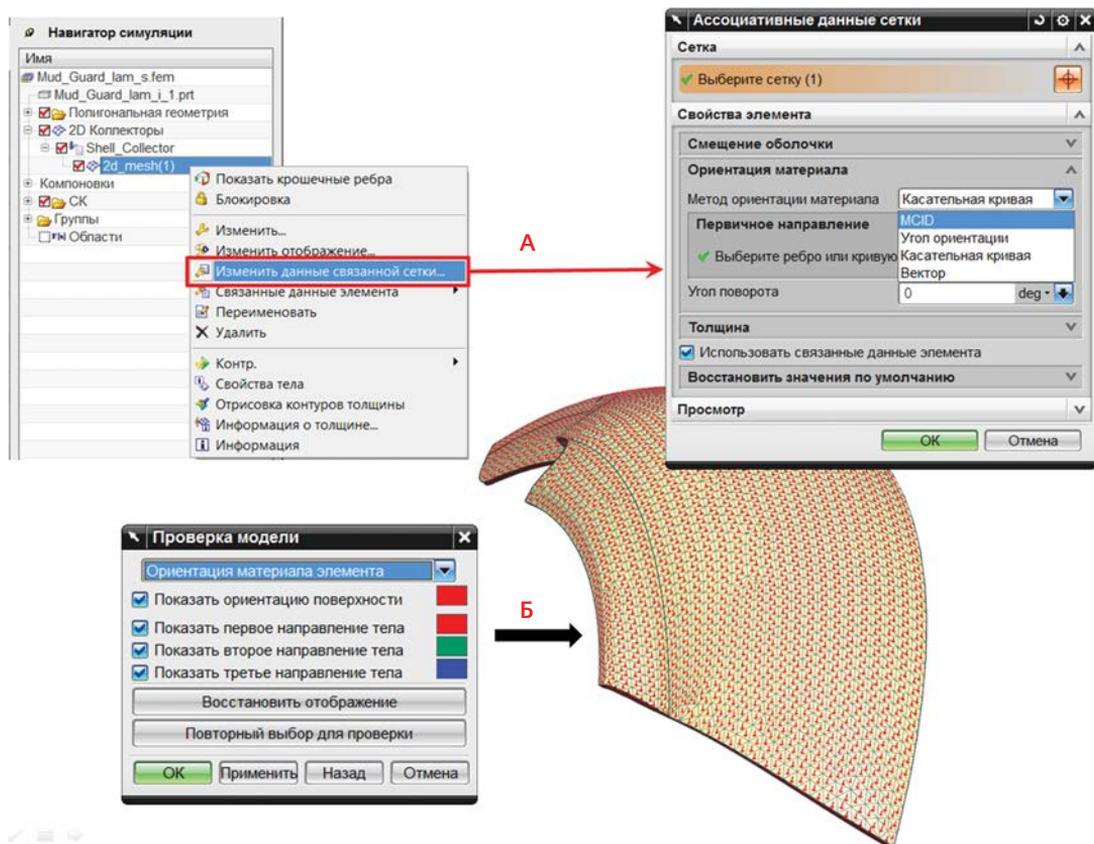


Рисунок 4. Задание ориентации материала и ее отображение

## 2.2. Описание Разработчика композита

При применении данного метода набору конечных элементов, находящихся в одном коллекторе, присваиваются свойства композитного материала. Для этого в контекстном меню коллектора КЭ сетки выбираем **Изменить (Edit)**. В появившемся диалоговом окне **Коллектор сеток (Mesh Collector)** напротив **Тип (Type)** в выпадающем списке надо выбрать **Композит (Laminate)**, в поле напротив **Свойства оболочки (Shell Property)** – выбрать из списка уже созданных свойств композитного материала либо задать новые свойства **Создать физические... (Create Physical...)**. При выполнении вышеуказанных действий появится диалоговое окно **Разработчик композитов (Laminate Modeler)**.

Это диалоговое окно также может быть вызвано из панели инструментов **Создать композит (Laminates)** командой **Физические свойства композита (Laminate Physical Properties)** (рисунок 5).

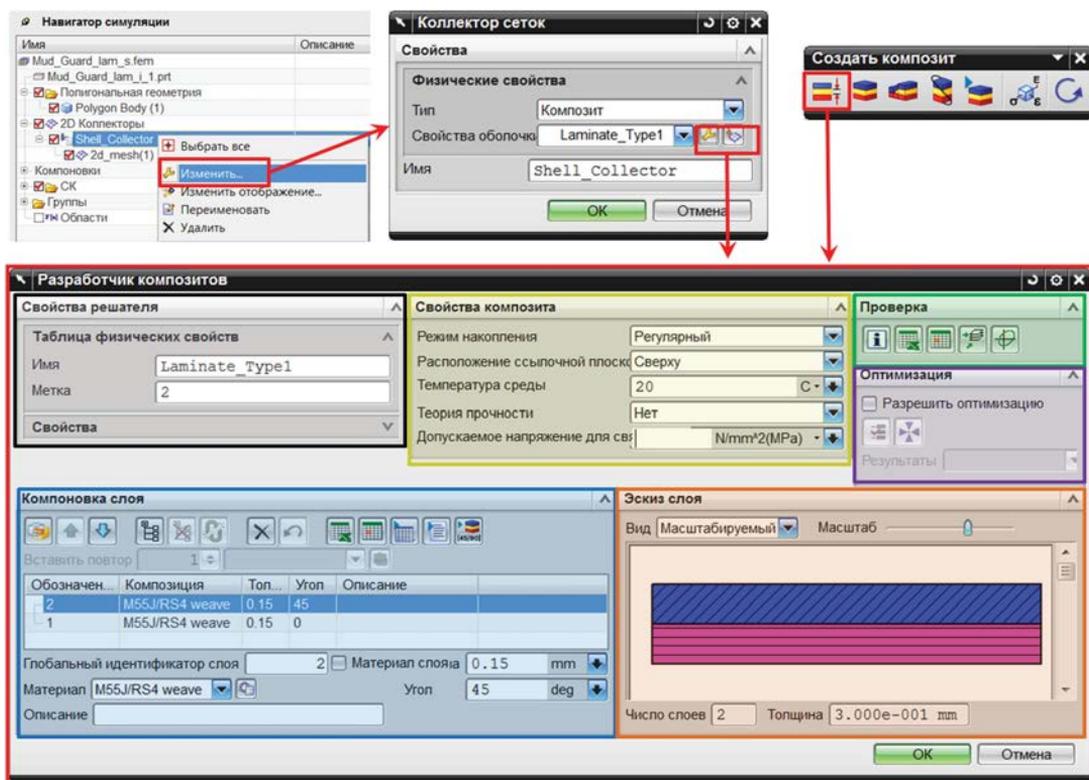


Рисунок 5. Вызов и общий вид диалогового окна Разработчик композитов

**Разработчик композитов (Laminate Modeler)** делится на шесть групп параметров (рисунок 5):

- **Свойства решателя (Solver Properties)** – параметры решения и опции вывода (см. пп. 5);
- **Свойства композита (Laminate Properties)** – свойства композита и способ компоновки пакета слоев;

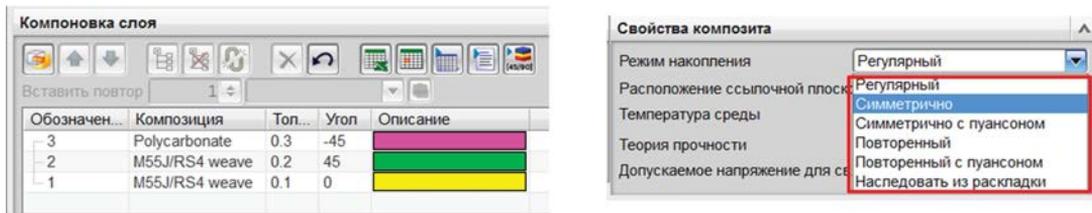
- *Компоновка слоя (Ply Layup)* – создание слоев и групп слоев с указанным способом компоновки;
- *Эскиз слоя (Ply Sketcher)* – визуальное отображение созданного пакета слоев;
- *Проверка (Validation)* – определение жесткостных и прочностных характеристик образца композита;
- *Оптимизация (Optimization)* – нахождение оптимальных свойств композита.

Подробно опишем параметры каждой из групп.

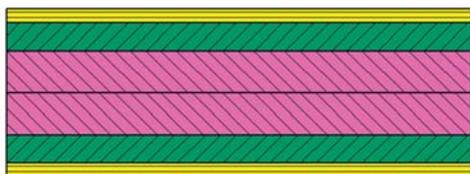
## Группа Свойства композита (Laminate Properties)

Параметр *Режим накопления (Stacking Recipe)* управляет последовательностью укладки слоев (рисунок 6.6), созданных в группе *Компоновка слоя (Ply Layup)*:

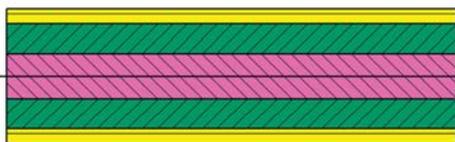
- *Регулярный (Regular)* – сохранение последовательности, указанной в группе *Компоновка слоя (Ply Layup)*;
- *Симметрично (Symmetric)* – создание симметричной укладки, при этом задается последовательность слоев, которая будет симметрично отражена;



**Регулярный (Regular)**



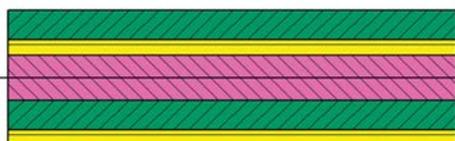
**Симметрично (Symmetric)**



**Симметрично с пуансоном (Symmetric with Core)**



**Повторенный (Repeated)**



**Повторенный с пуансоном (Repeated with Core)**

Рисунок 6. Типы укладок слоев

- *Симметрично с пуансоном (Symmetric with Core)* – создание укладки, симметричной относительно заполнителя, при этом в группе *Компоновка слоя (Ply Layup)* первый слой в списке отвечает за заполнитель;
- *Повторенный (Repeated)* – созданные слои в группе *Компоновка слоя (Ply Layup)* будут один раз повторены;
- *Повторенный с пуансоном (Repeated with Core)* – первый слой отвечает за заполнитель, и относительно него остальные слои будут повторены;
- *Наследовать из раскладки (Inherited from Layup)* – ссылка на глобальную укладку с помощью *Редактора компоновки (Layup Modeler)*.

Параметр *Расположение ссылочной плоскости (Reference Plane Location)* отвечает за расположение пакета слоев относительно плоскости XY системы координат композита (рисунок 6.7):

- *Сверху (Top)* – ссылочная плоскость совпадает с верхней плоскостью композита;
- *Середина (Middle)* – ссылочная плоскость совпадает со средней плоскостью композита;
- *Снизу (Bottom)* – ссылочная плоскость совпадает с нижней плоскостью композита;
- *Задать (Specify)* – ссылочная плоскость и нижняя плоскость композита отстоят на заданное *Расстояние нижнего слоя (Bottom Fiber Distance)*. Отрицательная величина означает смещение композита относительно ссылочной плоскости противоположно направлению нормали.

Параметр *Температура среды (Reference Temperature)* указывает значение температуры, для которой используются значения температурно-зависимых свойств материалов.

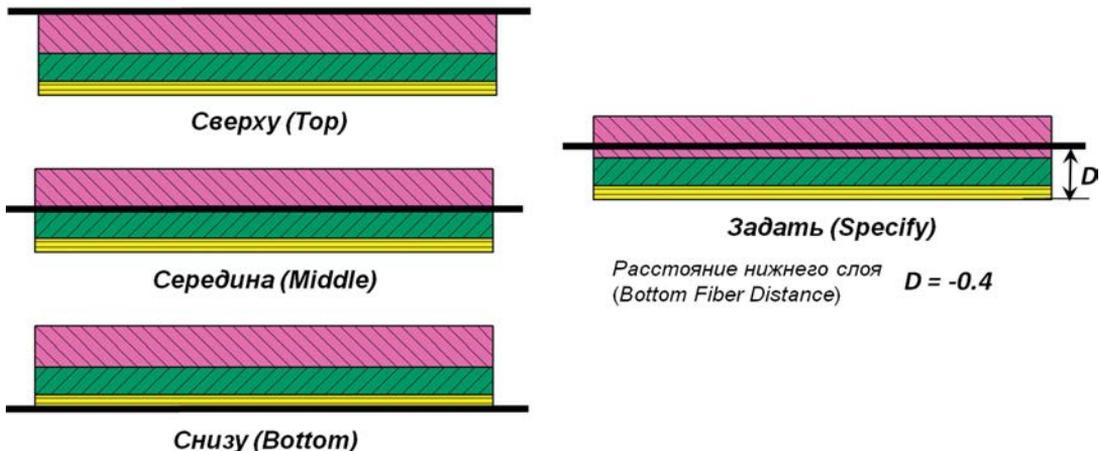
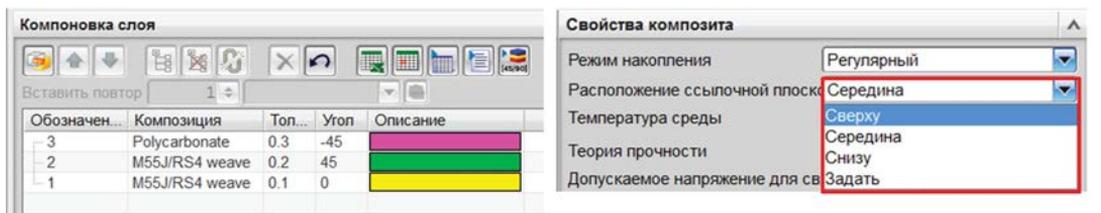


Рисунок 7. Расположения композита относительно ссылочной плоскости

Параметр *Теория прочности (Failure Theory)* отвечает за выбор критерия разрушения для оценки прочностных свойств композита:

- Хилл (Hill);
- Хоффман (Hoffman);
- Цай-Ву (Tsai-Wu);
- Максимальное напряжение (Maximum Stress);
- Максимальная деформация (Maximum Strain);
- Риск;
- LaRC02.

В качестве параметра *Допускаемые напряжения для связывания (Allowable Stress For Bonding)* задается допустимое значение напряжения для оценки расслоения.

### Группа Компоновка слоя (Ply Layout)

Данная группа содержит инструменты для создания и управления слоями композита. Созданные слои и их характеристики (толщина, материал и угол ориентации) отображаются в табличном виде (рисунок 6.8).

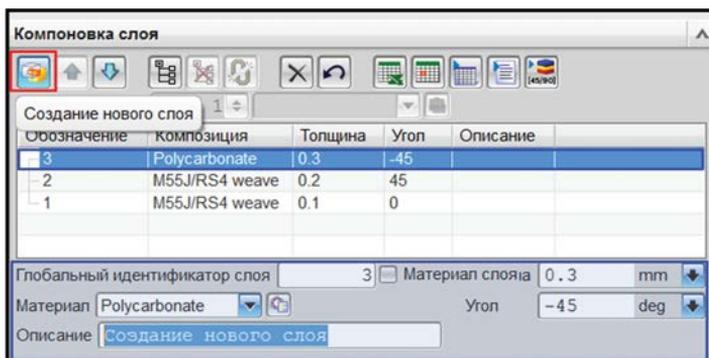


Рисунок 8. Создание слоев

Для создания нового слоя используется команда **Создание нового слоя (Create New Ply)** с указанием:

- *Материала (Material)* из списка доступных материалов, либо из библиотеки материалов NX, либо использовать материал слоя с микроструктурой (пп. 4);
- *Толщины (Thickness)* слоя;
- *Угла (Angle)* ориентации волокон.

Заметим, что слою присваивается порядковый номер (*Глобальный идентификатор слоя/Global ply id*), который можно менять. Слой 1 всегда располагается снизу (*Bottom*) композита, и слой с наибольшим номером располагается сверху (*Top*) композита.

При необходимости создания повторяющейся структуры можно воспользоваться командой **Группировать выбранные слои (Group Selected Plies)**. Созданную группу слоев можно копи-

ровать с помощью контекстного меню и вставлять после/перед указанным слоем различными способами: *Вставить выше (Paste Above)*, *Вставить ниже (Paste Below)*, *Вставить симметрично выше (Paste Symmetric Above)*, *Вставить симметрично ниже (Paste Symmetric Below)*, *Вставить антисимметрично выше (Paste Anti-symmetric Above)*, *Вставить антисимметрично ниже (Paste Anti-symmetric Below)*. Созданные таким образом наборы слоев будут связаны с первоначальным набором, то есть все изменения параметров слоев или их наличие в первоначальном наборе приведут к тем же изменениям в скопированных наборах. При желании данную связь можно разорвать командой **Разорвать выбранную группу слоев (Unlink Selected Ply Group)**.

На рисунке 9 проиллюстрированы шаги для создания группы слоев и создания двух ее копий.

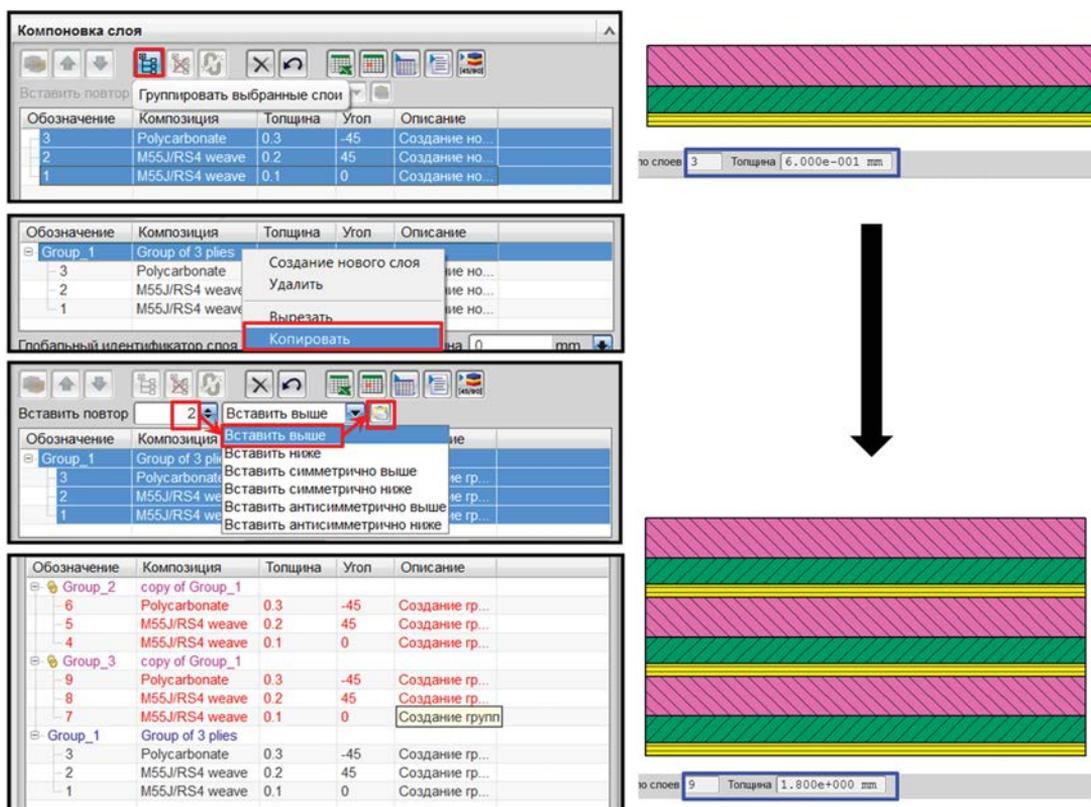


Рисунок 9. Работа с группой слоев

Итак, для полноценного создания и работы с пакетом слоев используются следующие инструменты:

- команда **Создание нового слоя (Create New Ply)**;
- набор команд копирования набора слоев (групп) и вставки относительно указанного слоя;
- команды **Переместить выбранный слой наверх/вниз (Move Selected Ply Up/Down)**;
- команда **Удалить слой (Delete Ply)**.

Помимо представленных возможностей, в группе *Компоновка слоя (Ply Layer)* существуют вспомогательные команды для быстрого создания, экспорта и импорта пакета слоев:

- **Импорт компоновки с применением сокращенного формата (Import Layer Using Shorthand Format)** позволяет быстро создавать слои вводом определенного формата данных в *Сокращенная строка (Shorthand String)* (например, [(0/45/90)\_s]) с одинаковой толщиной и материалом, которые можно изменить для каждого из слоев в таблице слоев;
- команды **Экспорт/Импорт компоновки в/из электронной таблицы (Export/Import Layer to/from Spreadsheet)** помогают эффективно работать с большим числом слоев, редактируя электронную таблицу *Excel*. Также существуют аналогичные команды экспорта и импорта через файл формата *CSV* (данные, разделенные запятой).

### Группа Эскиз слоя (Ply Sketcher)

Данная группа носит информативный характер и служит для схематического отображения укладки слоев с учетом размеров и углов ориентации волокон слоев (рисунок 6.10). Также представлена информация об общей *Толщине (Thickness)* композита и о *Числе слоев (Number of Plies)*.

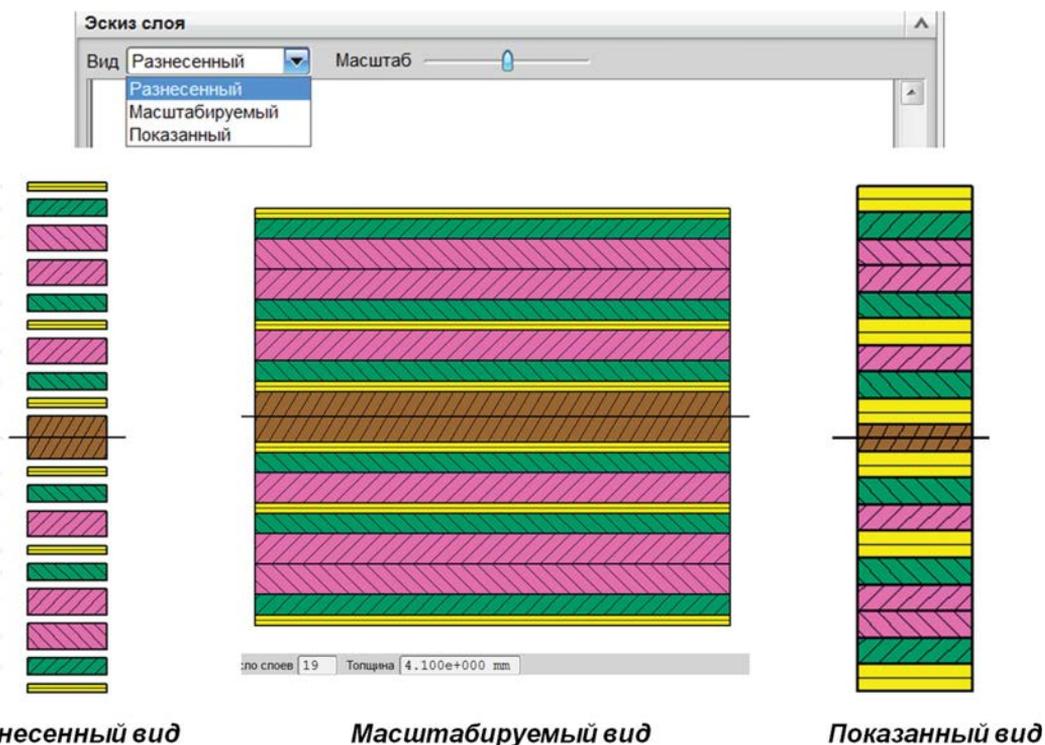


Рисунок 10. Виды схематического отображения пакета слоев

## Группа Проверка (Validation)

Группа условно разделена на две части: валидация свойств и оценка прочности образца композита.

Валидация свойств композита включает в себя расчет эквивалентных свойств материала: плотности, коэффициента линейного температурного расширения, матриц жесткости  $A$ ,  $B$ ,  $D$  и  $S$  (п. 6). Соответствующая информация выводится в табличном или текстовом формате при выполнении команд:

- **Информация о композите в текстовом окне (Laminate Information to Text Windows)** – выдает все данные о композите и его свойствах в информационное окно;
- **Информация о композите в электронную таблицу (Laminate Information to Spreadsheet)** – выдает все данные о композите и его свойствах в электронную таблицу Excel (рисунок 11);
- **Информация о композите в файл CVS (Laminate Information to CVS File)** – выдает все данные о композите и его свойствах в файл формата CSV (данные, разделенные запятой).

|    | A                                | B          | C                | D          | E          | F        | G        | H            | I          | J          |
|----|----------------------------------|------------|------------------|------------|------------|----------|----------|--------------|------------|------------|
| 7  | Матрицы жесткости A,B,D,S        |            |                  |            |            |          |          |              |            |            |
| 8  |                                  |            |                  |            |            |          |          |              |            |            |
| 9  |                                  |            | 99,961E+6        | 32,222E+6  | 31,615E+6  |          |          | 000,000E+0   | 000,000E+0 | 000,000E+0 |
| 10 | A =                              |            | 32,222E+6        | 36,731E+6  | 31,615E+6  |          | B =      | 000,000E+0   | 000,000E+0 | 000,000E+0 |
| 11 |                                  |            | 31,615E+6        | 31,615E+6  | 33,622E+6  |          |          | 000,000E+0   | 000,000E+0 | 000,000E+0 |
| 12 |                                  |            |                  |            |            |          |          |              |            |            |
| 13 |                                  |            | 12,654E+6        | 2,124E+6   | 2,081E+6   |          |          | 1,372E+6     | 000,000E+0 |            |
| 14 | D =                              |            | 2,124E+6         | 2,484E+6   | 2,081E+6   |          | S =      | 000,000E+0   | 902,389E+3 |            |
| 15 |                                  |            | 2,081E+6         | 2,081E+6   | 2,269E+6   |          |          |              |            |            |
| 16 |                                  |            |                  |            |            |          |          |              |            |            |
| 17 |                                  |            |                  |            |            |          |          |              |            |            |
| 18 | Эквивалентные свойства композита |            |                  |            |            |          |          |              |            |            |
| 19 |                                  |            |                  |            |            |          |          |              |            |            |
| 20 | Плотность                        |            | 1,507E-6 kg/mm^3 |            |            |          |          |              |            |            |
| 21 |                                  |            |                  |            |            |          |          |              |            |            |
| 22 |                                  |            |                  |            |            |          |          |              |            |            |
| 23 |                                  | x          | y                | xy         | yx         | xz       | yz       |              |            |            |
| 24 | Модуль Юнга                      | 77,050E+6  | 7,683E+6         |            |            |          |          | mN/mm^2(kPa) |            |            |
| 25 | Модуль Юнга для изгиба           | 175,539E+6 | 9,388E+6         |            |            |          |          | mN/mm^2(kPa) |            |            |
| 26 | Коэффициент Пуассона             |            |                  | 0,356      | 0,036      |          |          | Цельный      |            |            |
| 27 | Коэффициент Пуассона для изгиба  |            |                  | 0,373      | 0,020      |          |          | Цельный      |            |            |
| 28 | Модуль сдвига                    |            |                  | 6,889E+6   |            | 1,525E+6 | 1,003E+6 | mN/mm^2(kPa) |            |            |
| 29 | Модуль сдвига при изгибе         |            |                  | 8,499E+6   |            |          |          | mN/mm^2(kPa) |            |            |
| 30 | Тепловое расширение              | 1,719E-6   | 20,937E-6        |            | -20,649E-6 |          |          | 1/C          |            |            |
| 31 | Теплопроводность                 | 2,243E+12  | 2,243E+12        | 000,000E+0 |            |          |          | microW/mm-C  |            |            |
| 32 |                                  |            |                  |            |            |          |          |              |            |            |

Материал / Материал слоя / **Определение композита** / **Эквивалентны свойства композита**

Рисунок 11. Электронная таблица. Основная информация о композите

Прочность образца композита с заданной укладкой и критерием разрушения оценивается с помощью команд:

- **Анализ прочности композита (Analyze Laminate Strength)** – позволяет оценить прочность образца под воздействием *Нагрузок на единицу длины (Loads per Unit Length)*, заданных в рамках данной команды. Результаты выводятся в электронную таблицу, файл

формата CSV или в виде эпюр компонент напряжений и деформаций по толщине композита (рисунок 12, А), при этом красные точки соответствуют низу каждого слоя, синие – середине, зеленые – верху каждого слоя;

- **Отрисовка огибающей прочности (Plot Failure Envelopes)** – дает оценку несущей способности композитного образца в виде кривой прочности указанного слоя (рисунок 12, Б). Эта кривая отображает предельные напряжения до разрушения образца в соответствии с выбранным критерием разрушения и допускаемыми напряжениями материала.

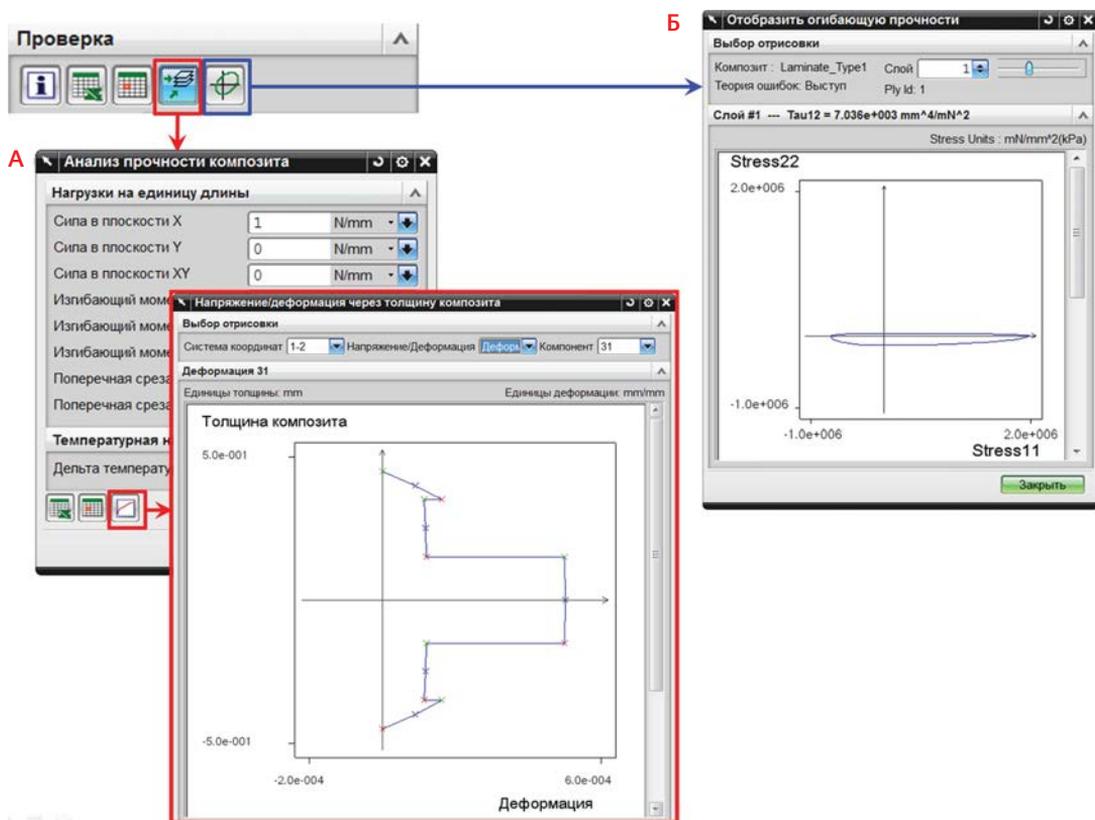


Рисунок 12. Оценка прочности образца композита

## Группа Оптимизация (Optimization)

Группа представляет собой набор инструментов для проведения оптимизации образца композита. Проводится поиск пяти оптимальных вариантов укладки с учетом заданных изменяемых параметров проектирования, целевых функций и проектных ограничений. В основе метода оптимизации, используемого в данном приложении, лежит генетический алгоритм. Примечательно, что оптимизируемые параметры могут быть как непрерывными, так и дискретными. Заранее указанные материалы также могут быть использованы в качестве дискретных значений варьируемого параметра слоя композита. Непрерывные переменные, используемые в данной оптимизации, могут применяться как переменные для оптимизации всей конструкции.

В качестве целевой функции могут быть рассмотрены как механические, так и физические параметры системы, например значение первой собственной частоты, масса изделия, эквивалентные свойства композита.

### 3. Создание композитов с помощью глобальной укладки

Способ **Глобальная компоновка (Global Layup)** основан на определении свойств композита через создание глобальных слоев на полигональной геометрии и способ их драпировки.

#### 3.1. Создание и драпировка

Так же как и в первом способе, соответствующим КЭ сеткам необходимо указать таблицы физических свойств композитного материала. Для этого в контекстном меню коллектора КЭ сетки выбираем **Изменить (Edit)**. В появившемся диалоговом окне **Коллектор сеток (Mesh Collector)** напротив **Тип (Type)** в выпадающем списке надо выбрать **Композит (Laminate)**, в поле напротив **Свойства оболочки (Shell Property)** либо выбрать из списка уже созданных свойств композитного материала, либо задать новые свойства **Создать физические... (Create Physical...)**. При выполнении вышеуказанных действий появится диалоговое окно **Разработчик композитов (Laminate Modeler)**.

В группе **Свойства композита (Laminate Properties)** в качестве параметра **Режим накопления (Stacking Recipe)** в обязательном порядке указать **Наследовать из раскладки (Inherited from Layup)**. Также следует проконтролировать параметр **Угловой допуск зоны (Zone Angle Tolerance)**, отвечающий за точность создания зон с разными физическими свойствами при использовании глобальной укладки. Остальные параметры остаются такими же, как и при использовании способа создания композитов на основе физических свойств (п. 2).

Для дальнейшего задания композита необходимо воспользоваться командой **Глобальная компоновка (Global Layup)** панели инструментов **Создать композит (Laminates)**. Создание глобальных слоев выполняется за два шага (рисунок 13, А):

1. Использование инструментов в группе **Задание компоновки (Layup Definition)** для создания пакета слоев. Этот шаг полностью совпадает с аналогичным при использовании первого способа создания композита (см. п. 2.2).
2. Вызов команды **Задайте ввод раскладки (Define Draping Input)** для назначения выбранному слою набора граней и способа их драпировки.

После выполнения этих шагов в дереве модели вкладки **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)** будут созданы узлы, отвечающие за укладку и глобальные слои (рисунок 13, Б).

Подробно остановимся на втором шаге. В диалоговом окне **Данные раскладки: Слой N... (Draping Data: Ply N)** необходимо выполнить следующие действия.

1. Для параметра **Решатель (Solver)** указать способ драпировки:
  - **Проекция (Projection)** – используется либо для слоев из изотропного материала, либо при расположении слоя без переориентации волокон в процессе выкладки;
  - **Однонаправленный (Unidirectional)** – начало укладки волокон в заданном направлении. Расчет укладки проводится с учетом криволинейности поверхностей;

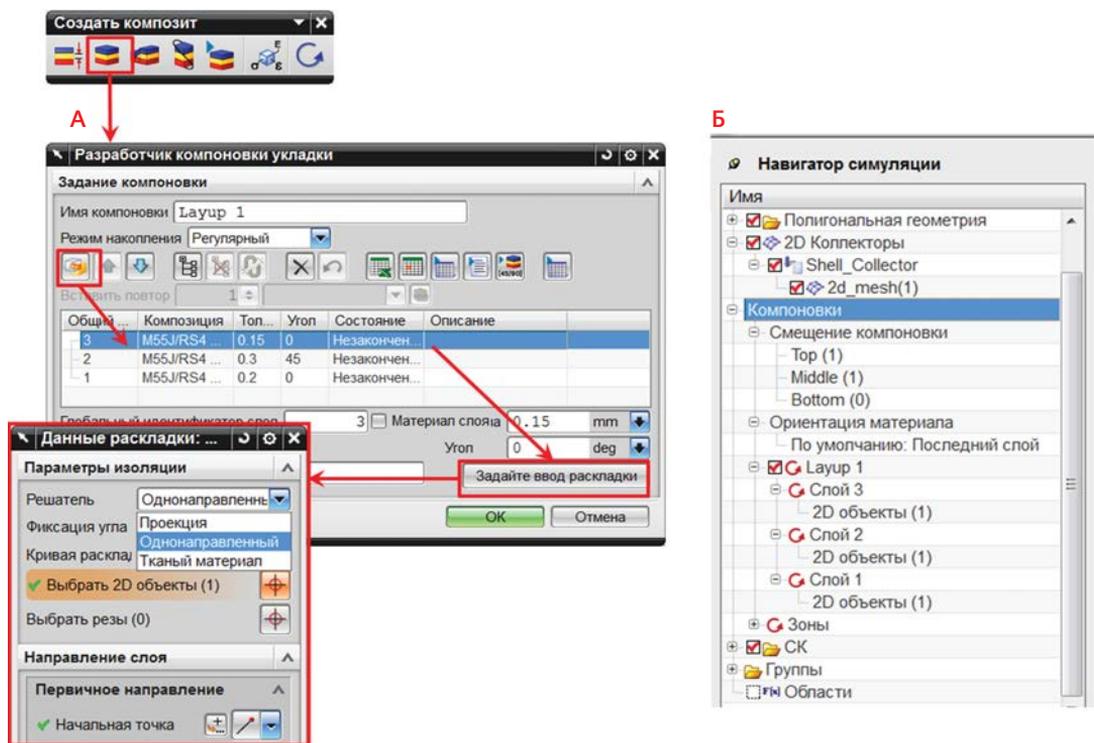


Рисунок 13. Создание глобальных слоев и их драпировка

- *Тканый материал (Woven)* – начало укладки волокон основы указанием *Первичного направления (Primary Direction)*, а волокон утка – *Вторичного направления (Secondary Direction)*. Расчет укладки проводится с учетом переориентации волокон из-за криволинейности поверхностей.
2. Задание значения *Фиксации угла (Lock Angle)*, которое определяет критическое значение искажения угла между волокнами основы и утка в процессе выкладки.
  3. Для параметра *Кривая раскладки (Draping Path)* необходимо определить способ задания направления, вдоль которого будет проводиться драпировка:
    - *Геодезическая линия (Geodesic)* – вектор, определяющий направление укладки;
    - *Выбрать кривую (Seed Curve)* – реальная кривая, на основе которой будет производиться укладка.
  4. *Выбрать 2D объекты (Select 2D Objects)* – в графической области указать полигональные грани, на которые укладывается глобальный слой.
  5. Для уменьшения или исключения эффекта искажения укладки волокон на неразвертываемых поверхностях используют так называемые подрезки, которые указываются параметром *Выбрать разрезы (Select Cuts)*.
  6. В группе параметров *Направление слоя (Ply Direction)* в зависимости от выбранного типа драпировки указываются направления укладки волокон. По умолчанию волокна основы и утка ориентированы под прямым углом.
  7. В группе параметров *Свойства сетки раскладки (Draping Mesh Properties)* задается характерный размер, который соответствует расстоянию между двумя ближайшими волокнами. По умолчанию характерный размер сетки драпировки измеряется в долях от размера

конечных элементов на рассматриваемых гранях и составляет 0.5. Установление флажка *Укажите размер элемента (Specify Element Size)* позволяет задать значение размера сетки в единицах длины.

На рисунке 14 представлена драпировка тканого материала с грубой сеткой (А) и со средней сеткой (Б).

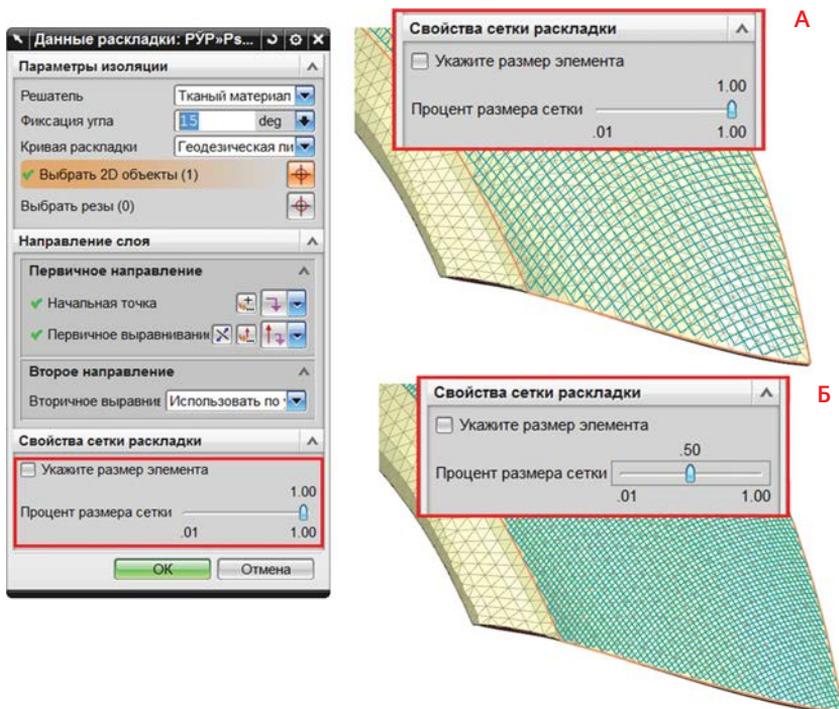


Рисунок 14. Драпировка тканого материала

Стоит обратить внимание, что драпировку необходимо сделать для каждого глобального слоя, созданного в окне *Глобальная компоновка (Global Layout)*.

После создания глобальных слоев с их драпировкой в дереве модели вкладки **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)** появляется узел *Компоновки (Layouts)*, который содержит (рисунок 13, Б):

- *Смещение компоновки (Layout Offset)*;
- *Ориентация материала (Material Orientation)*;
- *Компоновки слоев Layout N и сами слои Слой N (Ply N)*;
- *Зоны (Zones)*, содержимое которых появится после запуска их расчета.

### 3.2. Смещение пакета слоев и ориентация материала

Важными характеристиками при создании композитов являются их смещение относительно граней элементов и начальная ориентация материала.

*Смещение компоновки (Layup Offset)* позволяет сместить пакет слоев относительно ссылочной плоскости, при этом для каждой из полигональных граней смещение может быть разным. Для определения смещения нажатием правой клавиши мыши на каждом из узлов дерева модели *Top*, *Middle* или *Bottom* следует вызвать команду **Изменить (Edit)** и выбрать полигональные грани. При этом для каждого из узла смещения в скобках отображается количество назначенных граней, например *Middle(5)* означает, что для пяти граней поставлено совпадение средней поверхности композита с соответствующими гранями 2D конечных элементов.

Для задания смещения с другим значением необходимо через контекстный список команд узла *Смещение компоновки (Layup Offset)* выбрать команду **Создать правило смещения пользовательской компоновки (Create User Defined layup Offset Rule)**. В появившемся диалоговом окне в качестве параметра *Расстояние нижнего слоя (Bottom Fiber Distance)* следует ввести значение смещения относительно выбранных граней.

Заметим, что одной грани может быть поставлено только одно условие смещения. При необходимости можно использовать дополнительное смещение ассоциативных данных сетки – *Смещение оболочки (Shell Offset)*.

Для контроля смещения можно отобразить толщину 2D КЭ сетки, используя команду **Изменить отображение (Edit Display)** с установленным флажком *Отобразить толщину и смещение 2D элемента (Display 2D Element Thickness and Offset)*.

Ориентация материала определяет нулевой угол ориентации слоев композита. Ориентацию материала можно задавать через ассоциативные данные сетки (см. пп. 2.1), указывая направление первой оси, или *Наследовать из компоновки слоев (Inherited from Layup)*. В последнем случае ориентация волокон при укладке назначается через узел дерева модели *Ориентация материала (Material Orientation)*:

- по умолчанию используется ориентация материала первого слоя, но двойным нажатием левой клавиши мыши на узел *По умолчанию: Первый слой (Default: First Ply)* можно изменить на последний слой;
- для использования ориентации материала промежуточного слоя нажатием правой клавиши мыши на *Ориентация материала (Material Orientation)* вызывается команда **Новая ориентация (New Orientation)** и выбираются грани, на которых необходимо использовать ориентацию материала указанного слоя.

### 3.3. Создание зон и дополнительные инструменты работы с композитами

Обязательным этапом моделирования композитного материала является создание так называемых зон (zone). Зона – это набор элементов, которые:

- соответствуют одной и той же полигональной грани;
- принадлежат одной глобальной компоновке (global layup);
- имеют с заданным допуском одинаковую ориентацию для каждого слоя.

Для создания зон используется либо команда **Обновить глобальную компоновку и зоны (Update Global Layups and Zones)** в панели инструментов **Создание композита (Laminates)**, либо команда **Рассчитать зоны (Compute Zones)** из контекстного списка узла *Зоны (Zones)* (ри-

сунок 15, А). Матрицы жесткости для расчета в решателе NX Nastran формируются именно на основе свойств зон композита.

Результатом команды является появление окна **Информация (Information)**, в котором содержится информация о количестве созданных зон и описание ошибок, возникших при вычислении зон. Каждая зона имеет свои уникальные физические свойства и отображается в дереве модели панели **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)**.

Для зон существуют следующие дополнительные команды, которые вызываются нажатием на зоны правой клавиши мыши (рисунок 15, Б):

- **Вид композита (View Composite)** используется для вывода информации о слоях, их толщине, ориентации, что сопровождается графическим представлением *Эскиз слоя (Ply Sketcher)*;
- **Автоматически создать группы зоны FE (Auto-create Zone FE Groups)** создает новую группу из элементов этой зоны, которая появляется в узле *Группы (Groups)*;
- **Создание физических свойств композита (Create Laminate Physical Properties)** создает набор *Физических свойств (Physical Properties)*, которые могут быть использованы при создании других композитов первым способом (п. 2) или просто проанализированы на прочность в диалоговом окне **Разработчик композитов (Laminate Modeler)**. Отметим, что создаваемые таким образом наборы физических свойств не используются в модели, и поэтому любые их изменения не повлияют на созданный композит;

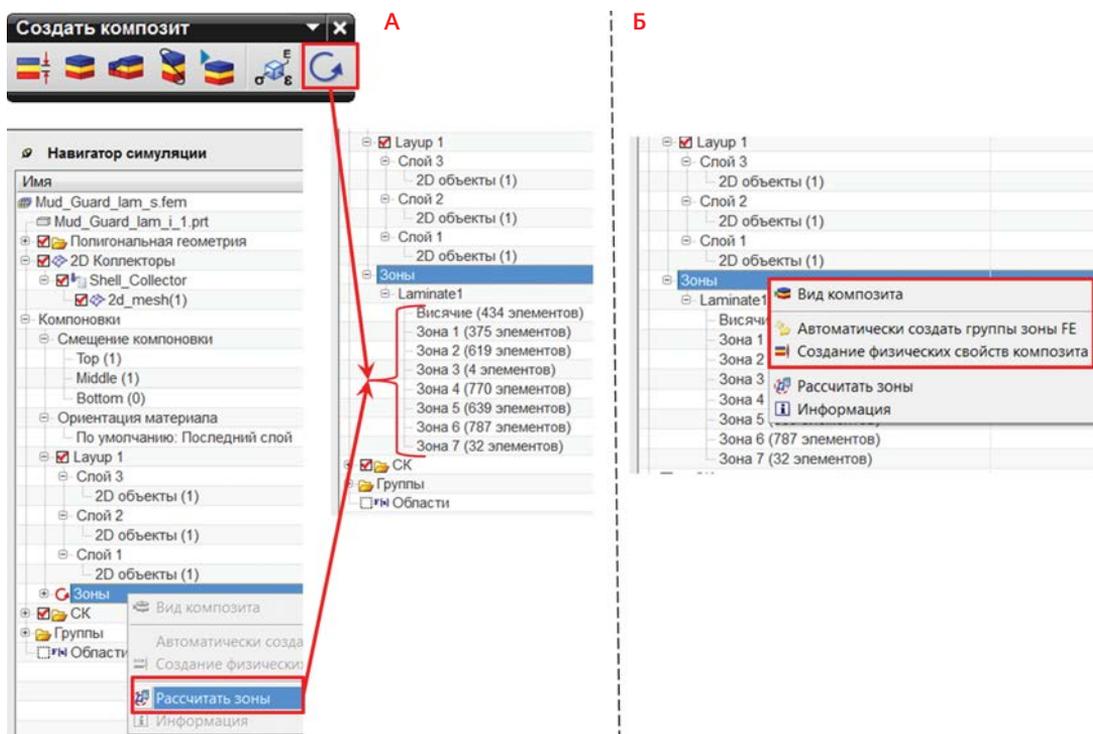


Рисунок 15. Создание и работа с зонами

- **Свойства зоны (Zone Properties)** позволяет отобразить окно информации со всеми параметрами укладки слоев рассматриваемой зоны.

При работе с пакетом слоев и с самими глобальными слоями существуют дополнительные команды, которые вызываются нажатием правой клавиши мыши на соответствующий узел (рисунок 16):

- **Экспортировать слои в FiberSim (Export Plies to FiberSim)** – позволяет сохранить созданную компоновку в файл формата *1h*, который импортируется в FiberSim для детального усовершенствования;
- **Вид красных волокон (View Red Fibers)** – отображение в графической области красным цветом зоны искажения укладки в соответствии со значением угла блокировки (*lock angle*);
- **Список результатов раскладки (List Draping Orientation Options)** – вывод результатов драпирования слоев укладки или слоя в электронную таблицу или в файл формата CSV с указанием объектов вывода: *Угол среза (Shear Angle)*, *Угол волокна (Yarn Angle)*, *Первичное направление (Primary Direction)*, *Второе направление (Secondary Direction)*, *Направление нормали (Normal Direction)*;
- **Информация (Information)** – вызов окна **Информация (Information)**, в котором содержится информация о материалах, начальной ориентации и толщине для каждого слоя укладки;
- **Автоматически создать группу компоновки FE (Auto-create Layup FE Group)** – для выбранной укладки создание группы из соответствующих элементов;
- **Автоматически создать группы слоя FE (Auto-create Ply FE Groups)** – для выбранного слоя создание группы из соответствующих элементов;

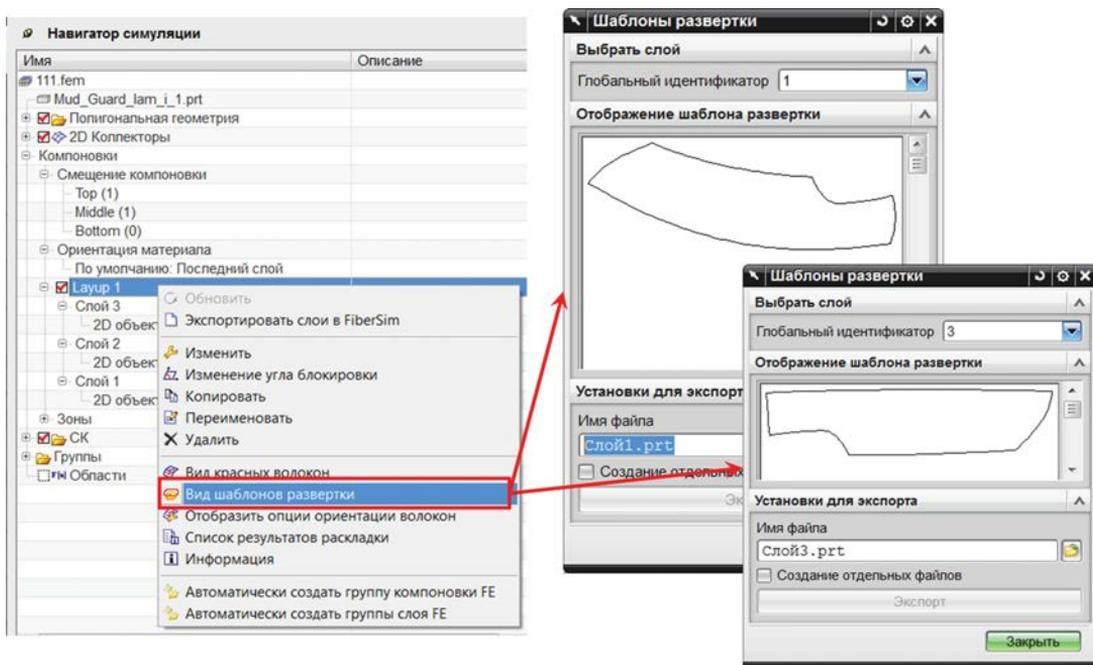


Рисунок 16. Создание разверток для каждого слоя

- **Вид ориентации слоя (View Fiber Orientation)** – отображение ориентации материала для элементов выбранного слоя, при этом в критических зонах, определяемых в соответствии с углом блокировки, направление ориентации выделяется красным;
- **Вид шаблонов развертки (View Flat Patterns)** для пакета слоев и **Вид шаблона развертки (View Flat Pattern)** для одного из слоев – получение разверток слоев как в графическом виде, так и в геометрическом формате (рисунок 16).

Помимо представленных выше команд, можно воспользоваться стандартными командами для копирования, переименования и удаления пакетов слоев.

### 3.4. Создание 3D композитов

Помимо моделирования композитов с помощью 2D конечных элементов, существует возможность использовать 3D конечные элементы с сохранением физических свойств композита. Для создания 3D КЭ модели, основанной на предварительно созданной 2D КЭ модели, при наличии глобальной компоновки слоев используются команды панели инструментов **Создать композит (Laminates)**:

- **Вытянуть композит (Extrude Laminate)** – в появившемся диалоговом окне необходимо выбрать все полигональные грани, 2D элементы которых будут преобразованы в 3D элементы (рисунок 6.17). Для изменения направления создания 3D элементов необходимо установить флажок *Поменять нормали элемента (Flip Element Normals)*;
- **Заполнить композит (Fill Laminate)** – создание 3D элементов между двумя наборами граней. Наличие 2D зависимой сетки у одного из используемого набора граней относительно второго является необходимым условием для использования данной команды. В появившемся диалоговом окне необходимо выбрать набор граней с независимой сеткой.

Заметим, что для создания 3D КЭ сетки могут использоваться только 2D конечные элементы с промежуточными узлами.

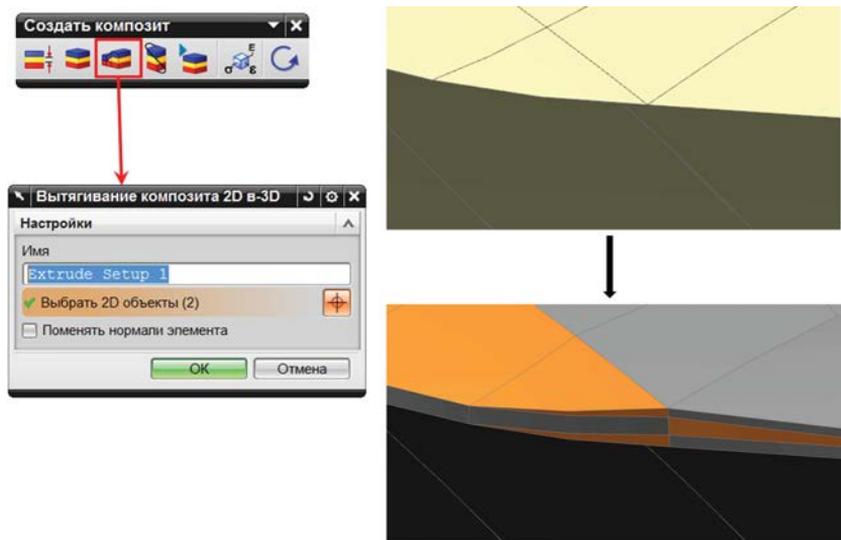


Рисунок 17. Создание 3D композитов

В результате операций создания 3D элементов на основе данных глобальной компоновки для каждого слоя композита создается 3D конечно-элементный слой толщиной в один элемент. В зависимости от используемой команды толщина создаваемой 3D КЭ модели определяется по-разному:

- при использовании команды **Вытянуть композит (Extrude Laminate)** толщина каждого 3D КЭ слоя соответствует толщине, задаваемым при укладке;
- при использовании команды **Заполнить композит (Fill Laminate)** толщина всей создаваемой 3D КЭ модели определяется расстояниями между двумя наборами граней. Толщина каждого слоя при этом пропорциональна толщине, указанной в укладке композита.

Результатом данных команд, помимо создания 3D конечных элементов, являются:

- появление в дереве модели узла **3D коллекторы (3D Collectors)** с новыми 3D КЭ сетками. При этом исходные 2D сетки автоматически становятся вспомогательными, то есть не участвующими в расчете;
- создание новых таблиц физических свойств для 3D элементов в соответствии с физическими свойствами исходных 2D элементов;
- создание 3D пирамидальных элементов, которые служат для моделирования перехода между зонами с разными наборами укладок, при этом по умолчанию им назначаются физические свойства связующего.

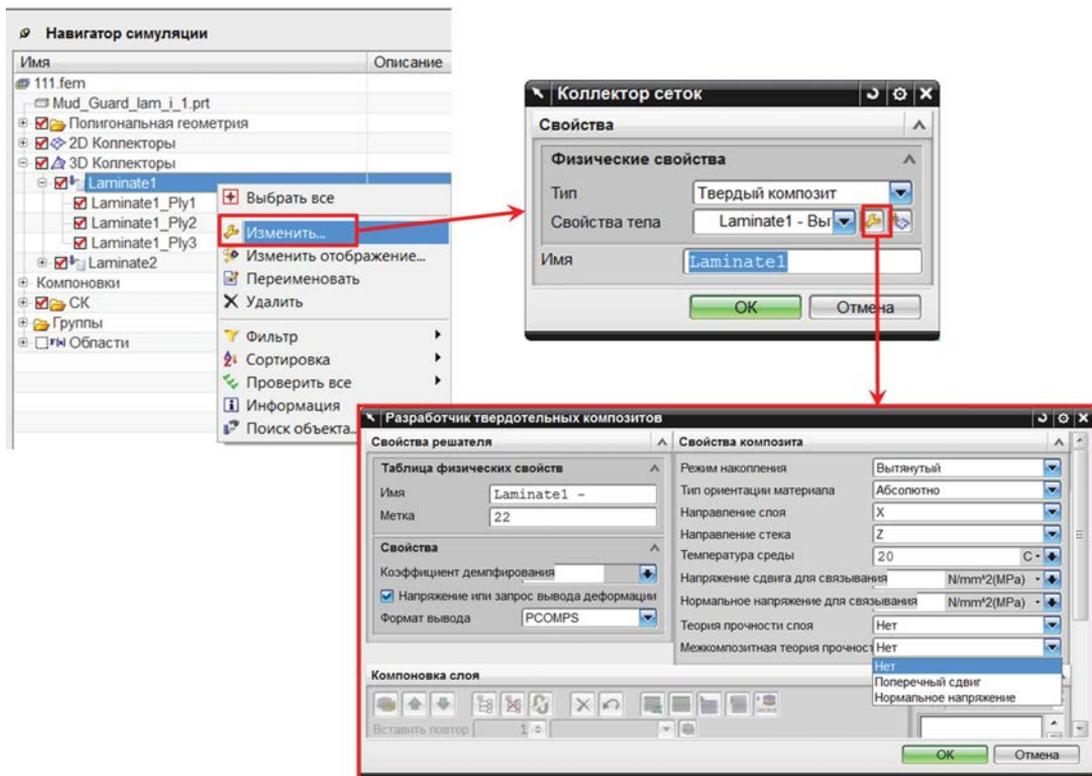


Рисунок 18. Изменение свойств 3D композитов

Для просмотра и изменения новых физических свойств 3D композитов (рисунок 18) необходимо вызвать команду **Изменить (Edit)** через контекстное меню 3D коллектора, перейти в диалоговое окно команды **Изменить (Edit)** для физических свойств *Laminate N – вытягивание (Laminate N – Extrusion)*. В появившемся окне **Разработчик твердотельных композитов (Solid Laminate Modeler)** в качестве параметров *Теория прочности слоя (Failure Theory)* и *Межкомпозитная теория прочности (Inter-Laminar Failure Theory)* можно выбрать критерии разрушения слоев и межслойных связей. Заметим, что, помимо критериев, доступных для исходных 2D элементов, появился критерий *Максимальное напряжение поперечного сдвига (Max Transverse Shear Stress)*, а для анализа межслойной прочности стали доступны критерии:

- *Поперечный сдвиг (Transverse Shear)*;
- *Нормальное напряжение (Normal Stress)*.

## 4. Типы материалов и материалы с микроструктурой

В качестве материала слоев композитных структур могут использоваться:

- изотропный материал (Isotropic material);
- ортотропный материал (Orthotropic material);
- материал слоя (Ply material), который не является общепринятым материалом и встречается только в композитных слоях. Он комбинирует в себе свойства материалов волокон и матрицы (связующего), на основе которых определяются его эквивалентные жесткостные и прочностные свойства.

### 6.4.1. Создание материала слоя

*Материал слоя (Ply Material)* указывается во время создания слоев композита (рисунок 19). Его свойства задаются либо с помощью команды **Материал слоя (Ply Material)** панели инструментов **Создать композит (Laminates)**, либо непосредственно при его указании для слоя.

После вызова команды **Материал слоя (Ply Material)** в открывшемся диалоговом окне **Управление материалом слоя композита (Laminate Ply Material Manager)** в таблице *Список материала слоя (Ply Material List)* перечислены созданные материалы слоя. Для создания нового материала слоя необходимо для параметра *Тип (Type)* в выпадающем списке выбрать один из типов материала слоя:

- *Однонаправленный (Unidirectional)*;
- *Тканый (Woven)*;
- *Particulate* (гранулированный);
- *RandomShotFiber* (со случайным образом ориентированными короткими волокнами).

После этого перейти к диалоговому окну **Материал слоя композита (Composite Material Ply)** нажатием на **Создать (Create)** и указать следующие параметры (рисунок 19):

- в группе *Базовая информация (Basic Information)* необходимо указать изотропный материал матрицы и его объемную долю, материал другой компоненты (волокна или частиц) и их объемную долю. Для тканого типа следует задать *Коэффициент равновесия (Balance Coefficient)*, который определяет соотношение количества волокон основы и утка и указать *Угол ткани слоя (Weft Fiber Angle)* для назначения угла между волокнами основы и утка;

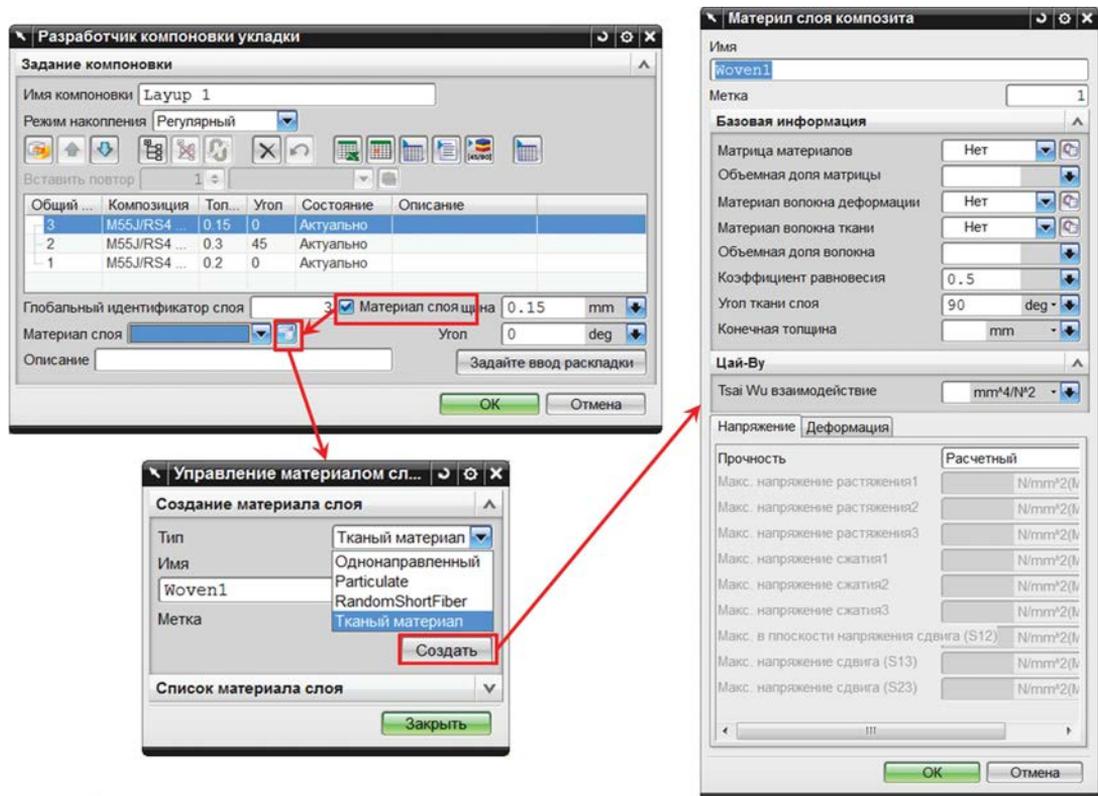


Рисунок 19. Задание свойств материала слоя с микроструктурой

- при задании материала слоев, где могут присутствовать волокна с определенным размером сечения, для всех типов, кроме *Particulate*, можно задать *Конечную толщину* (*Finished Thickness*);
- во вкладках *Напряжение* (*Stress*) и *Деформации* (*Strain*) параметр *Прочность* (*Strength*) может быть *Расчетный* (*Calculated*), в этом случае допустимые напряжения/деформации рассчитываются на основе заданных пользователем допустимых напряжений/деформаций каждой из компонент неоднородного материала слоя. Если этот параметр выбирается как *Задаваемый пользователем* (*User defined*), то для оценки конструкции на основе критериев разрушения необходимо ввести значения допустимых напряжений/деформаций эквивалентного материала слоя;
- в группах параметров *Цай-Ву* (*Tsai-Wu*) и *Puck* задаются коэффициенты соответствующих критериев разрушения.

## 4.2. Микромеханика материалов слоя

Опишем особенности каждого из типов неоднородного материала и способы вычисления их эффективных характеристик.

В представленной таблице указаны разрешенные типы материалов (изотропный/ортотропный), используемые при задании материалов волокон и матрицы, и типы эквивалентных свойств материалов в зависимости от его микроструктуры.

| Тип микроструктуры                | Тип материала волокон | Тип материала матрицы | Тип эквивалентного материала |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|
| Однонаправленная (Unidirectional) | Ортотропный           | Изотропный            | Изотропный или ортотропный   |
| Тканый (Woven)                    | Ортотропный           |                       | Изотропный или ортотропный   |
| Particulate (гранулированная)     | Изотропный            |                       | Изотропный                   |
| RandomShotFiber                   | Изотропный            |                       | Изотропный или ортотропный   |

Эквивалентные свойства материала слоя определяются на основе свойств материалов его компонент, при этом в зависимости от типа микроструктуры материала используются разные соотношения.

Далее используем следующие обозначения:

- верхний индекс  $f$  относится к свойствам волокон (*fiber*);
- верхний индекс  $m$  относится к свойствам матрицы (*matrix*).

Для всех рассматриваемых типов микроструктуры материалов при создании материала слоя вводятся значения объемных долей материала волокна и матрицы:

- $V^f$ : объемная доля волокна ( $0 < V^f < 1$ );
- $V^m$ : объемная доля матрицы ( $0 < V^m < 1$ );
- $V^f + V^m \leq 1$ .

Приведем основные соотношения, используемые для вычисления эквивалентных свойств материала в системе координат слоя (см. пп. 6.1.2)

### Однонаправленный (Unidirectional) волокнистый материал

Однонаправленные волокнистые композиты состоят из прочных однонаправленных волокон, погруженных в относительно непрочную матрицу.

Эквивалентные свойства материала вычисляются следующим образом [19]:

| Модули Юнга   | Коэффициент Пуассона  | Модули сдвига   |
|---|---|---|
| $E_1 = V^f E_1^f + V^m E^m$ $\frac{1}{E_2} = \frac{V^m}{E^m} + \frac{V^f}{E_2^f}$ $E_3 = E_2$ | $\nu_{12} = V^f \nu_{12}^f + V^m \nu^m$ $\nu_{13} = \nu_{12}$ $\nu_{23} = \nu^m$        | $\frac{1}{G_{13}} = \frac{V^m}{G_{12}} + \frac{V^f}{G_{12}^f}$ $G_{23} = G^m$ |
| <p><b>Плотность</b></p> $\rho = V^f \rho^f + V^m \rho^m$                                      | <p><b>Теплоемкость</b></p> $c_p = \frac{1}{\rho} (V^f \rho^f c_p^f + V^m \rho^m c_p^m)$ |   |

| Коэффициенты теплопроводности   | Коэффициенты темп. линейного расширения   |
|---|---|
| $K_1 = V^f K_1^f + V^m K^m$ $\zeta = \frac{1}{4 - 3V^m}$ $K_3 = K_2$ $\eta = \frac{\frac{K_1^f}{K^m} - 1}{\frac{K_1^f}{K^m} + \zeta}$ $K_2 = K^m \frac{1 + \zeta \eta V^f}{1 - \eta V^f}$ | $\alpha_1 = \frac{(\alpha_1^f E_1^f - \alpha^m E^m) V^f + \alpha^m E^m}{(E_1^f - E^m) V^f + E^m}$ $\alpha_2 = \alpha^m + (\alpha_2^f - \alpha^m) V^f + \left( \frac{E_1^f V^m - E^m V_{12}^f}{E_1} \right) (\alpha^m - \alpha_1^f) V^m V^f$ $\alpha_3 = \alpha_2$ |

### Тканый материал (Woven)

Тканый волокнистый композит состоит из расположенных под углом волокон основы (warp) и утка (weft), которые погружены в матрицу.

При задании материала указывается Коэффициент равновесия (Balance Coefficient)  $k$  для указания соотношения количеств волокон основы и утка.

Эквивалентные свойства материала вычисляются следующим образом:

1. Тканый слой представляется в виде трех слоев (рисунок 6.20): двух внешних однонаправленных слоев толщины  $k/2$  с углом  $0^\circ$  (направление волокон основы) и одного внутреннего однонаправленного слоя толщины  $(1 - k)$  с углом  $90^\circ$  (направление волокон утка).
2. Для каждого нового однонаправленного слоя вычисляются эквивалентные свойства материала, как показано выше.
3. Используя найденные свойства каждого слоя и их углы укладки, определяются эффективные свойства этого композита для 1–2 системы координат (рисунок 6.20), где 1 – направление волокон основы. Вычисление этих свойств аналогично вычислению эффективных свойств композита в **Разработчик композитов (Laminate Modeler)**, включая трансверсальные модули сдвига.



Рисунок 6.20. Представление слоя в виде пакета из трех слоев

Остальные эквивалентные свойства материала вычисляются следующим образом [20]:

|   |  |
|---|--|
| <b>Модуль Юнга</b><br>$E_3 = E_m$   | <b>Коэффициенты Пуассона</b><br>$\nu_{13} = k\nu_{12}^{\text{warp ply}} + (1-k)\nu$<br>$\nu_{23} = (1-k)\nu_{12}^{\text{warp ply}} + k\nu$ |
| <b>Коэффициенты теплопроводности</b><br>$\frac{1}{K_3} = \frac{k}{K_2^{\text{warp ply}}} + \frac{1-k}{K_2^{\text{weft ply}}}$ | <b>Коэффициенты темп. линейного расширения</b><br>$\alpha_3 = k\alpha_2^{\text{warp ply}} + (1-k)\alpha_2^{\text{weft ply}}$               |

### Гранулированный (Particulate) материал

Гранулированный материал состоит из твердых частиц, погруженных в матрицу.

При вычислении эквивалентных свойств материала предполагается, что свойства всех составных частей – изотропные и свойства полученного материала также изотропные.

Эквивалентные свойства материала вычисляются следующим образом [21]:

|   |  |
|---|--|
| <b>Модуль Юнга</b><br>$E^{pc} = \frac{(V^f)^{2/3} E^m}{1 - (V^f)^{1/3} (1 - E^m/E^p)} + (1 - (V^f)^{2/3}) E^m$                  | <b>Коэффициент Пуассона</b><br>$\nu^{pc} = \frac{E^{pc} - 2G^{pc}}{2G^{pc}}$ |
| <b>Модуль сдвига</b><br>$G^{pc} = \frac{(V^f)^{2/3} G^m}{1 - (V^f)^{1/3} (1 - G^m/G^p)} + (1 - (V^f)^{2/3}) G^m$                | <b>Плотность</b><br>$\rho = V^f \rho^f + V^m \rho^m$                         |
| <b>Коэффициент теплопроводности</b><br>$K^{pc} = \frac{(V^f)^{2/3} K^m}{1 - (V^f)^{1/3} (1 - K^m/K^p)} + (1 - (V^f)^{2/3}) K^m$ |  |
| <b>Коэффициент темп. линейного расширения</b><br>$\tilde{\alpha} = \alpha^m - (V^f)^{1/3} (\alpha^m - \alpha^p)$                |  |
| <b>Теплоемкость</b><br>$c_p = \frac{1}{\rho} (V^f \rho^f c_p^f + V^m \rho^m c_p^m)$   |  |

Где верхний индекс *f* относится к свойствам частиц, верхний индекс *m* относится к свойствам связующего, верхний индекс *pc* обозначает свойства гранулированного материала.

### Материал со случайным распределением волокон (RandomShotFiber)

Материал RandomShotFiber представляет собой случайным образом ориентированные короткие волокна, погруженные в матрицу. Предполагается, что длина волокон больше толщины слоя и они лежат в плоскости слоя. Используется тот же подход, что и для тканых материалов [20], за исключением того, что слой представляется сбалансированным пакетом однонаправленных

слоев: слои с углами 0° и 90°, остальные с углами, равномерно меняющимися от 0° до 90°. Количество этих слоев зависит от выполнения условия, представленного на рисунке 6.21, но не больше 512 штук.



Рисунок 6.21. Представление слоя в виде пакета из множества слоев

## 5. Параметры решения и просмотр результатов

### 5.1. Параметры решения

Перед проведением анализа конструкции с композитными материалами необходимо проконтролировать параметры решения, которые находятся в группе *Свойства решателя (Solver Properties)* диалогового окна **Разработчик композитов (Laminate Modeler)** (см. пп. 6.2) таблицы физических свойств соответствующей КЭ сетки. Опишем основные параметры, отвечающие за особенности решения и вывода результатов композитов:

- *Формат вывода (Output Format)* – выбор формата записи (карты) свойств композита (*PCOMP*, *PCOMPG*, *PSHELL* или *PCOMPS*) при экспорте КЭ модели во входной файл решателя NX Nastran. Каждый из форматов имеет свои особенности, например *PCOMPG* позволяет отображать результаты для глобальных слоев, *PSHELL* поддерживает вывод только результирующих результатов оболочки (результаты по слоям не доступны), *PCOMPS* отвечает за свойства 3D композита;
- *Погонная масса (Nonstructural Mass)* – добавление значения массы на единицу площади рассматриваемого набора элементов только для *PCOMP*, *PCOMPG* и *PSHELL* карт;
- *Коэффициент демпфирования (Damping Coefficient)* – ввод и учет коэффициента демпфирования материала (структурное/гистерезисное демпфирование) для *PCOMP*, *PCOMPG* и *PCOMPG*;
- *Напряжение или запрос вывода деформации (Stress or Strain Output Request)* – при установке флажка результаты выводятся также в текстовый файл \*.f06;
- *Опции композита (Laminate Options)* – управление записью определенных жесткостных свойств, определяющих поведение композита для *PCOMP* и *PCOMPG* карт:
  - *Нет (None)* – полный набор свойств;
  - *MEMbrane* – только мембранные свойства;
  - *BENDING* – только изгибные свойства;
  - *Пятно (SMEAR)* – игнорирование укладки слоев с отсутствием сдвиговых и изгибно-мембранных свойств;
  - *SMCORE* – аналогично *SWEAR*, но используется только для симметричной укладки с заполнителем, не используется с картой *PCOMPG*;
  - *SMCORE+поперечный сдвиг (transverse shear)* – аналогично *SMCORE*, но в этом случае также будут учтены сдвиговые свойства, используется только с картой *PSHELL*.

## 5.2. Особенности просмотра результатов

Тип и наличие данных, записываемых в файл результатов выполненного решения, зависят от параметров группы *Свойства решателя (Solver Properties)* диалогового окна **Разработчик композитов (Laminate Modeler)** (пп. 6.5.1).

Приведем соответствие между форматами вывода и величинами, которые записываются в файл результатов.

| Величина   | Формат вывода         | Тип результата   |
|------------|-----------------------|--|
| Сила       | PCOMP, PCOMPG, PSHELL | Результирующие усилия оболочечных элементов  |
|            | PCOMPS                | Результирующие усилия твердотельных элементов  |
| Напряжение | PCOMP<br>PCOMPG       | Напряжения в слоях<br>Индексы разрушения и коэффициенты прочности в слоях<br>Индексы разрушения и коэффициенты прочности сцепления слоев |
|            | PCOMP, PCOMPG, PSHELL | Напряжения в элементах оболочечных элементов   |
|            | PCOMPS                | Напряжения в слоях<br>Индексы разрушения и коэффициенты прочности в слоях  |
| Деформация | PCOMP<br>PCOMPG       | Деформация в слоях<br>Индексы разрушения и коэффициенты прочности в слоях<br>Индексы разрушения и коэффициенты прочности сцепления слоев |
|            | PCOMP, PCOMPG, PSHELL | Деформация в элементах оболочечных элементов   |
|            | PCOMPS                | Деформация в слоях<br>Индексы разрушения и коэффициенты прочности в слоях  |

Для просмотра и анализа результатов необходимо перейти во вкладку панели ресурсов **Навигатор постпроцессора (Post Processing Navigator)** и загрузить файл результатов. Помимо стандартных инструментов просмотра результатов (рисунок 6.22, А), описанных в предыдущей главе, для подробного анализа поведения композитных структур и оценки их прочности существует так называемый **Расширенный отчет постпроцессора (Advanced Post Report)**.

Вызов данной команды осуществляется через панель инструментов **Постпроцессор (PostProcessing)**. В появившемся диалоговом окне необходимо выбрать нужное решение, шаг и итерацию. После нажатия **ОК** или **Применить (Apply)** во вкладке **Навигатор постпроцессора (Post Processing Navigator)** создается узел *Отчет постпроцессора композита N (Laminate Post Report N)*. Для формирования результатов указанного решения необходимо во вкладке **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)** расчетной модели нажать правой клавишей мыши на узел результатов. Тогда в контекстном меню доступны следующие команды (рисунок 6.22, Б):

- **Создать отчет в виде электронной таблицы (Create Spreadsheet Report);**
- **Создать графический отчет (Create Graphical Report);**
- **Создать краткий отчет (Create Quick Report).**

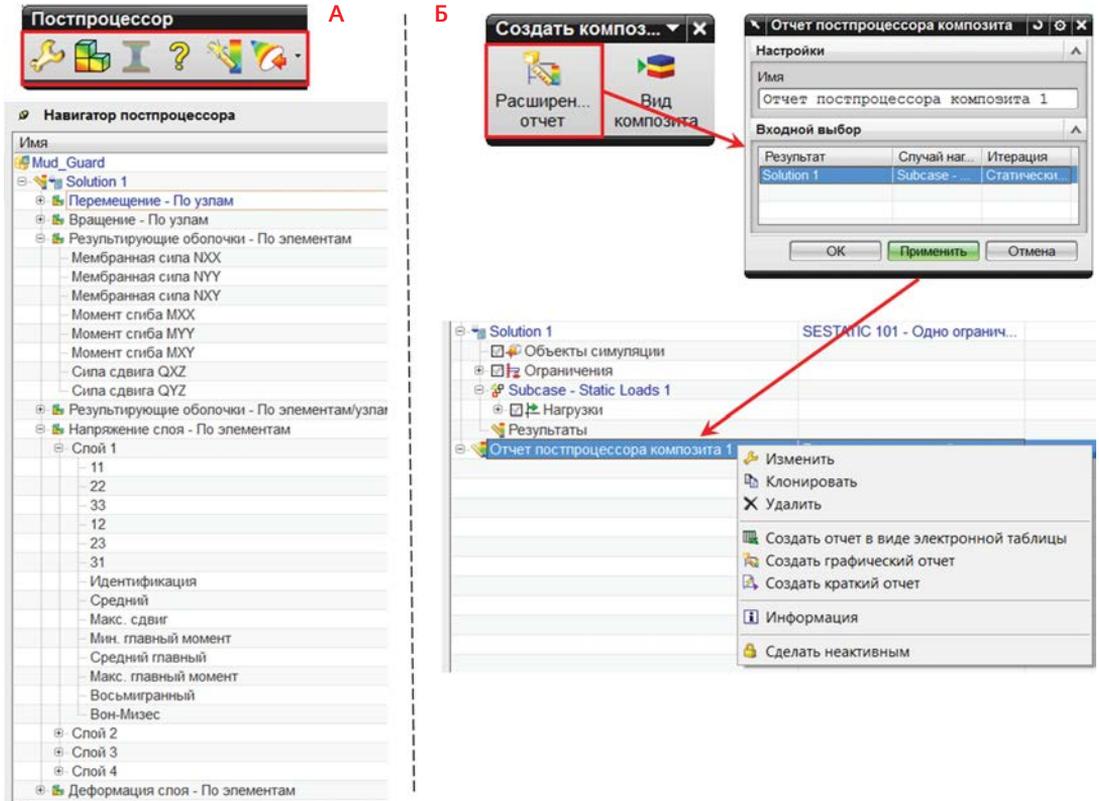


Рисунок 6.22. Команды просмотра результатов для композитов

После выполнения этих команд создаются новые узлы дерева расчетной модели во вкладке **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)**. Для просмотра результатов как в графическом виде, так и в виде электронной таблицы или текстовом формате необходимо выбрать соответствующую команду нажатием правой клавиши мыши на эти узлы.

Поскольку эти команды основаны только на свойствах композитов КЭ модели, то можно, меняя критерий разрушения или даже изменив свойства композитов, получить новые результаты без повторного запуска задачи на расчет.

Команда **Создать отчет в виде электронной таблицы (Create Spreadsheet Report)** создает отчет по результатам расчета в виде электронной таблицы Excel или текстового файла и содержит информацию о напряжениях и деформациях в слоях, индексы разрушения и коэффициенты прочности (рисунок 6.23, А). Также она позволяет:

- создать отчет отдельных компонент напряжений и деформаций слоев в системе координат композита или слоя;
- выдать информацию о максимальных и минимальных значениях;
- настроить фильтрацию вывода по результатам, по элементам, по слоям;
- настроить сортировку результатов для вывода;
- создать отчет для результирующих результатов оболочки.

Созданный отчет соответствует новому узлу дерева расчетной модели, который можно экспортировать в файлы форматов *Excel* и *CSV*.

Команда **Создать графический отчет (Create Graphical Report)** на основе одного или нескольких результатов вычисляет огибающие величин, которые просматриваются во вкладке **Навигатор постпроцессора (Post Processing Navigator)** (рисунок 6.23, Б):

- напряжения и деформации в слоях;
- индекс разрушения (*Failure Index*);
- коэффициент прочности (*Strength Ration*);
- коэффициент безопасности (*Margin of Safety*), запас прочности.

Все вышеописанные коэффициенты взаимозаменяемы и могут быть выражены друг через друга, их отличает диапазон безопасных значений. Например, все элементы, индекс разрушения которых больше 1, указывают на возможность разрушения в этих зонах.

Для получения огибающих результатов после выполнения команды **Создать графический отчет (Create Graphical Report)** необходимо для нового узла *Графический отчет N (Graphical*

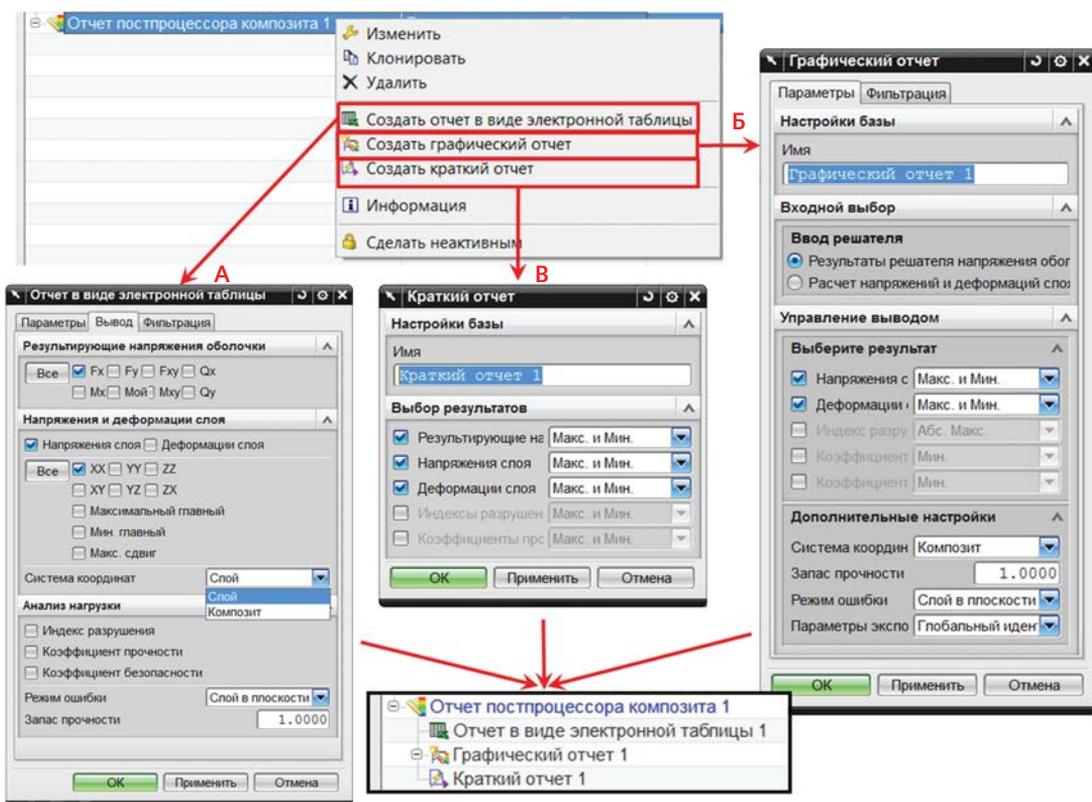


Рисунок 6.23. Возможности команды Расширенный отчет постпроцессора

Report N) нажатием правой клавиши мыши вызвать команду **Сгенерировать файл результатов (Generate Result File)**. После этого создается бинарный файл результатов, который содержит наилучшие результаты среди выбранных решений, шагов, итераций и слоев.

Заметим, что представленные результаты соответствуют только срединной поверхности слоя.

Инструмент **Создать краткий отчет (Create Quick Report)** позволяет вывести данные в форматах электронной таблицы *Excel* и текстового файла *CSV*, содержащие информацию о максимальных и минимальных значениях и слоях, элементах и узлах, где они возникают (рисунок 6.23, В).

Одним из преимуществ данной команды является то, что для ее выполнения достаточно наличия файла результатов и, соответственно, нет необходимости в загрузке КЭ модели.

## 6. Краткий обзор теории композитов

Работа в модуле NX Laminate Composites основана на теории сдвиговых деформаций *First-order Shear Deformation Theory (FSDT)* [22]. Эта теория похожа на классическую теорию многослойных оболочек *Classical Lamination Theory (CLT)*, их основными отличиями являются:

- предполагается, что в *CLT* отсутствуют сдвиговые деформации, тогда как в *FSDT* по толщине композита вычисляются сдвиговые деформации и усилия;
- *FSDT* требует непрерывности поперечного перемещения и поворотных степеней свободы в плоскости. С другой стороны, *CLT* требует непрерывности поперечного перемещения и его первой производной по двум координатам плоскости.

Поэтому *FSDT* хорошо приспособлена к конечно-элементной дискретизации.

Приведем ниже допущения *FSDT*:

- при деформации сечения, перпендикулярные к ссылочной плоскости, остаются плоскими;
- каждый слой рассматривается в предположении плоско-напряженного состояния;
- слои идеально склеены;
- деформации и перемещения малы.

Для получения результатов при моделировании композитов в NX Laminate Composites выполняются следующие шаги:

1. Разрешение определяющих соотношений слоев.
2. Преобразование соотношений для слоев из системы координат слоев в систему координат композита.
3. Вычисление матриц жесткости для композита.
4. Вычисление кривизны и деформаций в срединной плоскости для композита на основе результирующих напряжений оболочек.
5. Вычисление деформаций для каждого слоя.
6. Вычисление напряжений для каждого слоя.

Подробное описание теории *FSDT* и все соотношения можно найти в [22]. Здесь приведем только описание матриц жесткости композита.

Матрица жесткости композита  $[ABD]$  (6×6) служит для вычисления деформаций по результирующим напряжениям оболочки и имеет вид:

$$[ABD] = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix}$$

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N Q_{ij}^{-(k)} (z_k - z_{k-1});$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N Q_{ij}^{-(k)} (z_k^2 - z_{k-1}^2);$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N Q_{ij}^{-(k)} (z_k^3 - z_{k-1}^3),$$

где  $[A]$  – мембранная матрица жесткости;

$[B]$  – изгибно-мембранная матрица жесткости;

$[D]$  – изгибная матрица жесткости;

$i, j$  – оси системы координат слоя;

$N$  – число слоев композита;

$k$  – номер слоя;

$z$  – отвечает за местоположение слоя относительно ссылочной плоскости.

Трансверсальная сдвиговая матрица  $[S]$  (2×2) определяет соответствие энергии деформации композита энергии деформации, связанной с распределением сдвиговых напряжений, обусловленных изгибом и сдвигом в плоскости  $XY$  системы координат композита.

## 7. Лабораторная работа . Статический анализ изделия из композитного материала

В данном примере на основе подготовленной расчетной КЭ модели гофрированной панели (рисунок 6.24) задаются свойства композитного материала, выполняется статический анализ и проводится анализ полученных результатов.

Для демонстрации возможностей NX Laminate Composite при задании композита используются два способа создания композитных свойств слоя и проводится проверка прочностных характеристик создаваемой структуры композита. Решение предложенной задачи состоит из нескольких этапов:

1. Открытие файлов КЭ и расчетной модели.
2. Задание композитного материала с помощью инструмента **Разработчик композитов (Laminate Modeler)**.
3. Создание драпировки композита.
4. Выполнение статического анализа.
5. Просмотр результатов статического анализа для композитного изделия.

Исходная КЭ модель представляет собой совокупность оболочечных элементов, описывающих тонкостенную часть конструкции. Конструкция находится под давлением, на верхнем ребре конструкции задано условие симметрии, снизу на двух ребрах задано условие опирания.

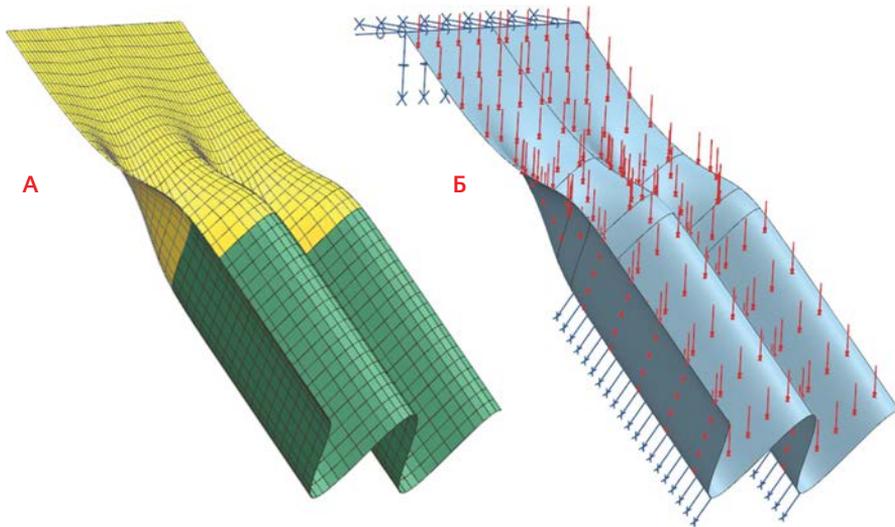


Рисунок 6.24. Элемент кровельной конструкции:  
А – КЭ модель, Б – граничные условия

## 7.1. Открытие файлов КЭ и расчетной модели

Запустите NX и откройте файл *Gofra\_sim.sim*.

Задайте все настройки диалоговых окон по умолчанию, выберите через главное меню: **Настройки** → **Интерфейс пользователя** → **Общий** → **Сбросить настройки меню (Preferences** → **User Interface** → **General** → **Reset Dialog Box Settings**), нажмите **OK**.

В окне **Вид файла симуляции (Simulation File View)** активным является файл расчетной модели. Перейдите двойным нажатием левой клавиши в файл КЭ модели.

Обратите внимание, что в дереве модели **Навигатора симуляции (Simulation Navigator)** в узле **2D** коллекторы присутствуют два набора физических свойств – *Comp\_Modeler* и *Layup\_Modeler*.

## 7.2. Задание композитного материала с помощью инструмента Разработчик композитов

В дереве модели **Навигатора симуляции (Simulation Navigator)** нажмите правой клавишей мыши на **2D** коллекторе *Comp\_Modeler* и выберите **Изменить (Edit)**.

В диалоговом окне **Коллектор сеток (Mesh Collector)** в выпадающем списке параметра **Тип (Type)** выберите **Композит (Laminate)** (рисунок 6.25), после чего нажмите на **Создать физический... (Create Physical...)** напротив **Свойства оболочки (Shell Property)**.

В группе **Компоновка слоя (Ply Layup)** с помощью команды **Импорт компоновки с применением сокращенного формата (Import Layup Using Shorthand Format)** задайте последовательность из четырех слоев, ориентированных под  $45^\circ$  друг относительно друга (рисунок 6.26):

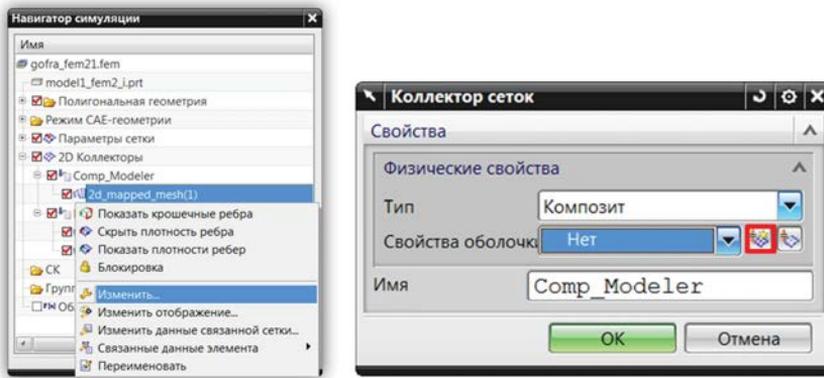


Рисунок 6.25. Диалоговое окно Коллектор сетки

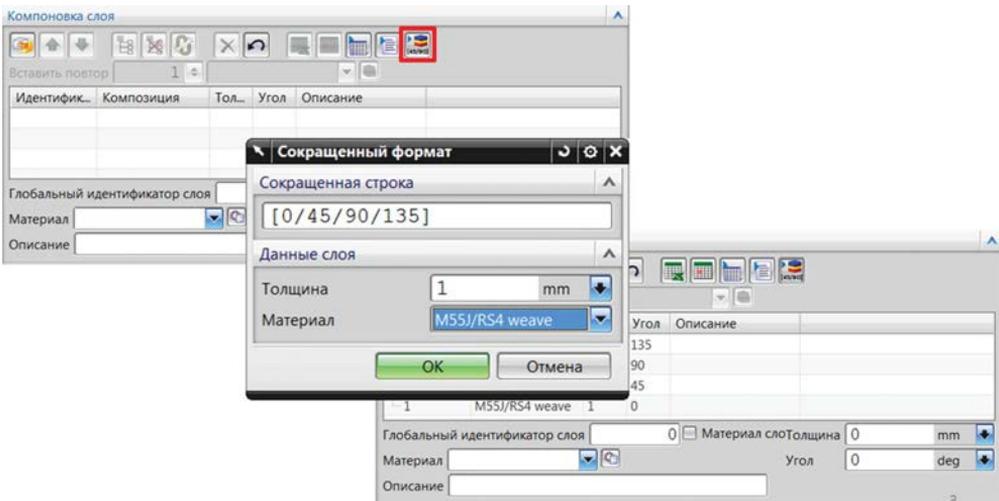


Рисунок 6.26. Диалоговое окно для быстрого создания компоновки слоев

- введите [0/45/90/135];
- введите значение *Толщина (Thickness)* 1 мм;
- выберите M55/RS4 weave в выпадающем списке параметра *Материал (Material)*.

Нажмите **ОК**.

Удерживая клавишу **CTRL**, выберите в таблице 2-й и 4-й слои, установите флажок напротив *Материал слоя (Ply Material)*, напротив параметра *Материал слоя (Ply Material)* нажмите на *Выберите материал слоя (Select Ply Material)* (рисунок 6.27).

В открывшемся диалоговом окне **Управление материалом слоя композита (Laminate Ply Material Manager)** в выпадающем списке параметра *Тип (Type)* выберите *Однонаправленный (Unidirectional)*, нажмите **Создать (Create)**.

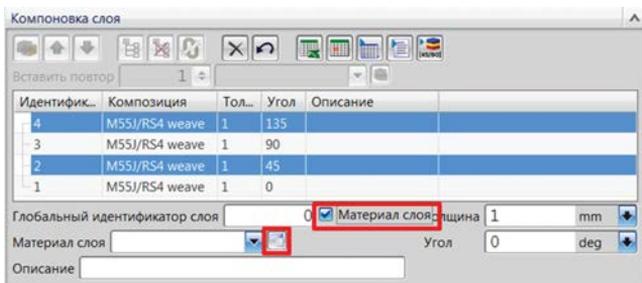


Рисунок 6.27. Задание материала слоя

В диалоговом окне **Материал слоя композита (Composite Material Ply)** (рисунок 6.28) выполните следующие действия:

- нажмите на *Выберите материал (Select Material)* напротив *Матрица материалов (Matrix Material)*, в качестве материала задайте *Еpoxy*;
- в качестве *Матричная объемная доля (Matrix Volume Fracture)* введите *0,4*;
- нажмите на *Выберите материал (Select Material)* напротив *Материал слоя (Fiber Material)*, в качестве материала задайте *E-glass*;
- укажите значение *0.5* для *Объемная доля слоя (Fiber Volume Fracture)*.

Нажмите **OK**.

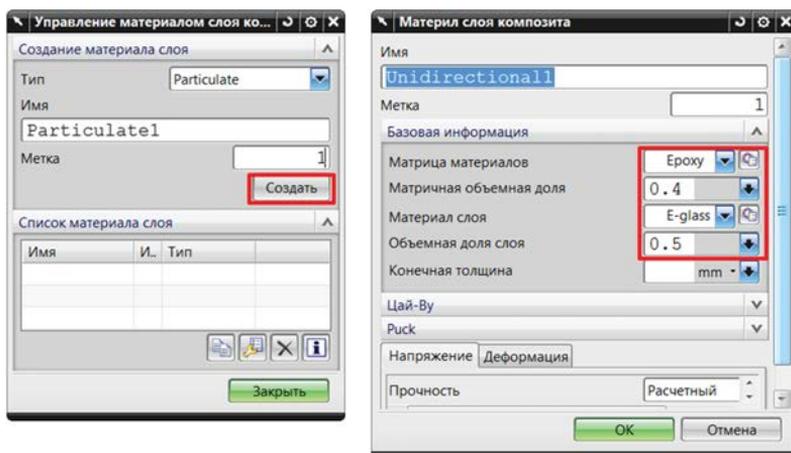


Рисунок 6.28. Задание материала слоя композита

Закройте диалоговое окно **Управление материалом слоя композита (Laminate Ply Material Manager)**. Убедитесь, что 2-му и 4-му слоям присвоен материал *Unidirectional1*.

В группе **Свойства композита (Laminate Properties)** в выпадающем списке параметра **Теория прочности (Failure Theory)** выберите **Хоффман (Hoffman)**, для **Допускаемое напряжение для связывания (Allowable Stress For Bonding)** введите 1000 МПа.

В группе Проверка (Validation) нажмите на Анализ прочности композита (Analyze Laminate Strength). В появившемся окне для Сила в плоскости X (X In-Plane Force) и Сила в плоскости Y (Y In-Plane Force) задайте значения 5000 Н/м и 10000 Н/м соответственно, после чего нажмите Экспорт таблицы (Export Spreadsheet). В файле Excel перейдите во вкладку Анализ нагрузки (Strength Analysis), найдите блок данных Допустимые нагрузки на композит (Allowable Loads on Laminate), в этом блоке представлена информация по предельно допустимым нагрузкам. Вернитесь в NX, закройте все диалоговые окна.

Свойства материала для части конструкции определены. Но поскольку свойства композитного материала являются ортотропными, необходимо указать ориентацию материала. Для этого выделите все сетки рассматриваемого коллектора, нажмите правую клавишу мыши и выберите команду Изменить данные связанной сетки (Edit Mesh Associated Data). В диалоговом окне Ассоциативные данные сетки (Mesh Associated Data) в выпадающем списке параметра Метод ориентации материала (Material Orientation Method) выберите MCID. Нажмите ОК.

### 7.3. Создание драпировки композита

В дереве модели Навигатора симуляции (Simulation Navigator) нажмите правой клавишей мыши на 2D коллекторе Layup\_Modeler и выберите Изменить (Edit). В диалоговом окне Коллектор сеток (Mesh Collector) в выпадающем списке параметра Тип (Type) выберите Композит (Laminate) (рисунок 6.25), после чего нажмите на Создать физический... (Create Physical...).

В группе параметров Свойства композита (Laminate Properties) в списке параметра Теория прочности (Failure Theory) выберите Хоффман (Hoffman), в качестве Допускаемое напряжение для связывания (Allowable Stress For Bonding) задайте 1000 МПа. В списке параметра Режим накопления (Failure Theory) выберите Наследовать из раскладки (Inherited from Layup). Нажмите ОК во всех диалоговых окнах. Вызовите команду Глобальная компоновка (Global Layup) (панель инструментов Разработчик композитов (Laminate Modeler)). В появившемся диалоговом окне нажмите на Импорт компоновки из композита PPT (Import Layup from a Laminate PPT). В новом диалоговом окне из списка выберите Laminat1 (рисунок 6.29). Выделите все появившиеся в таблице слои, нажмите на Задайте ввод раскладки (Define Draping Input).

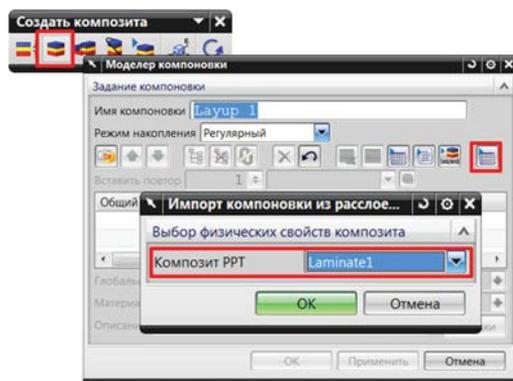


Рисунок 6.29. Импорт компоновки

В появившемся диалоговом окне выполните следующие действия (рисунок 6.30):

- убедитесь, что выбран Однонаправленный (Unidirectional) в списке параметра Решатель (Solver);
- выберите в качестве 2D объектов пять граней;
- задайте подрезки, указав 2 ребра;
- укажите начальную точку и вектор, совпадающий с осью Y.

Нажмите ОК.

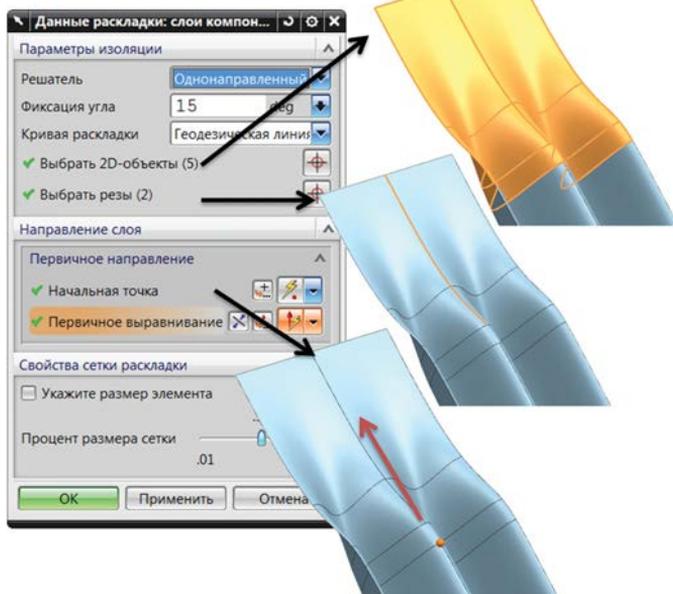


Рисунок 6.30. Создание драпировки

Выделив третий сверху слой в таблице, нажмите на **Создание нового слоя (Create New Ply)**. Для нового слоя укажите материал *Steel* и задайте *Толщина (Thickness)* 0.5 мм. Нажмите на **Задайте ввод раскладки (Define Draping Input)**.

В появившемся диалоговом окне выполните следующие действия (рисунок 6.31):

- в списке параметра *Решатель (Solver)* выберите *Проекция (Projection)*;
- задайте в качестве 2D объектов две грани.

Нажмите **ОК** во всех диалоговых окнах.

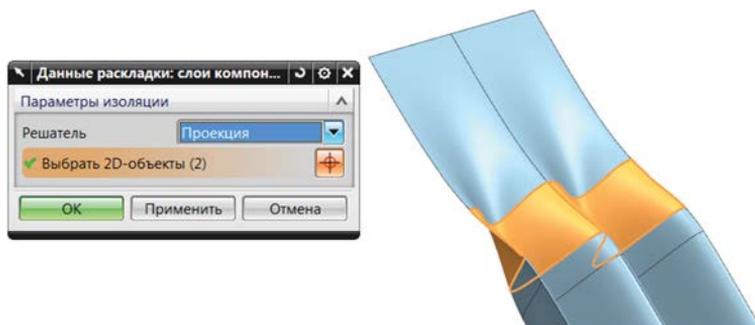


Рисунок 6.31. Создание драпировки

Для расчета укладки слоев используйте команду **Обновить глобальную компоновку и зоны (Update Global Layups and Zones)** в панели инструментов **Создание композита (Laminates)**.

В графической области отображается процесс драпировки (рисунок 6.32). Обратите внимание, что появилось окно **Информация (Information)**, которое содержит информацию о количестве созданных зон и о качестве укладки по слоям.

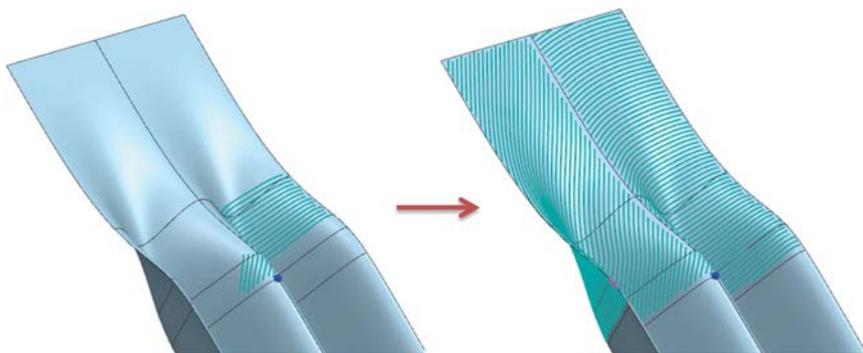


Рисунок 6.32. Создание зон

Для задания ориентации материала выделите все КЭ сетки коллектора *Layup\_Modeler*, нажмите правой клавишей мыши и выберите команду **Изменить данные связанной сетки (Edit Mesh Associated Data)**. В появившемся диалоговом окне в списке параметра **Метод ориентации материала (Material Orientation Method)** выберите *MCID*, в списке параметра *MCID* **Определение (MCID Definition)** укажите *Наследовать из компоновки (Inherited from Layup)*.

## 7.4. Выполнение статического анализа

Перейдите к расчетной модели, в дереве модели вкладки **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)** отображены созданные контейнеры нагрузок, ограничений и объектов симуляции. Расчетная модель готова для запуска на решение. Сохраните модель, для этого нажмите правой клавишей мыши на *Gofra\_sim* в окне **Вид файла симуляции (Simulation File View)** и выберите **Сохранить (Save)**.

Для запуска созданной расчетной модели на решение нажмите правой клавишей мыши на *Solution 1* и выберите **Решить... (Solve...)**. Нажмите **OK**.

Обратите внимание, что появилось несколько окон. При появлении надписи «**Законченный (Completed)**» в нижней части окна монитора анализа и «**Задача выполнена (Job Finished)**» в мониторе решения закройте все новые окна, отвечающие за решение.

## 7.5. Просмотр результатов статического анализа для композитного изделия

В дереве модели вкладки **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)** дважды нажмите левой клавишей мыши на *Results* активного решения *Solution 1* для перехода в **Навигатор постпроцессора (Post Processing Navigator)** с загруженными результатами. Для просмотра результатов

раскройте вкладку *Solution 1* двойным нажатием левой клавиши мыши на *Перемещение по узлам (Nodal Displacement)*. В графической области отобразится распределение по узлам суммарного перемещения (модуль вектора перемещения).

Выполните команду **Расширенный отчет постпроцессора (Advanced Post Report)** панели инструментов **Создать композит (Create Laminate)**. В появившемся диалоговом окне *Отчет постпроцессора композита (Laminate Post Report)* выберите решение *Solution 1*. Нажмите **ОК**.

В дереве модели вкладки **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)** нажмите правой клавишей мыши на *Отчет постпроцессора композита 1 (Laminate Post Report 1)* и выберите **Сгенерировать графический отчет (Generate Graphical Report)**. Укажите *Расчет напряжений и деформаций слоя (Solver Ply Stresses and Strains)*. Убедитесь, что для результатов *Индекс разрушения (Failure Index)* установлен соответствующий флажок. Нажмите **ОК**.

Нажмите правой клавишей мыши на *Графический отчет 1 (Graphical Report 1)* и выберите **Сгенерировать файл результатов (Generate Result File)** (рисунок 6.33).

Дважды нажмите левой клавишей мыши на новый узел *Results* для перехода в **Навигатор постпроцессора (Post Processing Navigator)** с загруженными результатами *Графический отчет*

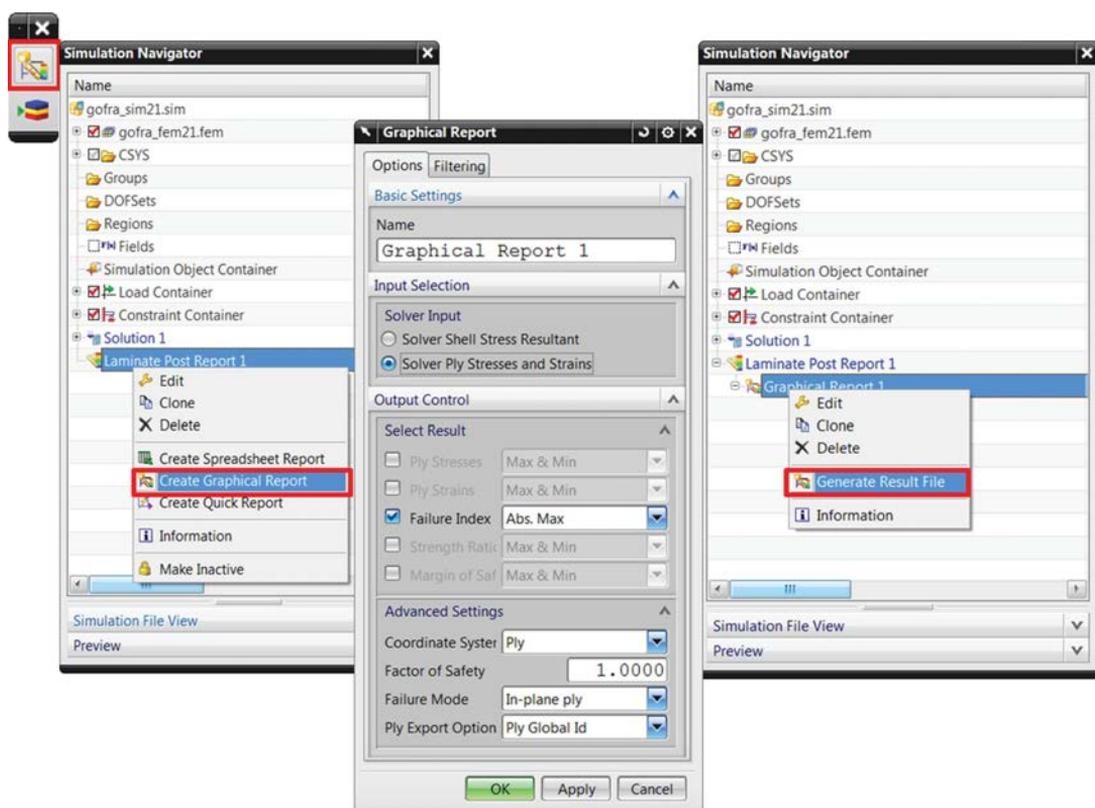


Рисунок 6.33. Создание Расширенного отчета постпроцессора для композитных структур

1 (Graphical Report 1). Для просмотра результатов раскройте вкладку *Графический отчет 1 (Graphical Report 1)*, дважды нажмите левой клавишей мыши на *Max Abs FI – Ply 5 p*. В графической области отобразится распределение индекса разрушения (рисунок 6.34).

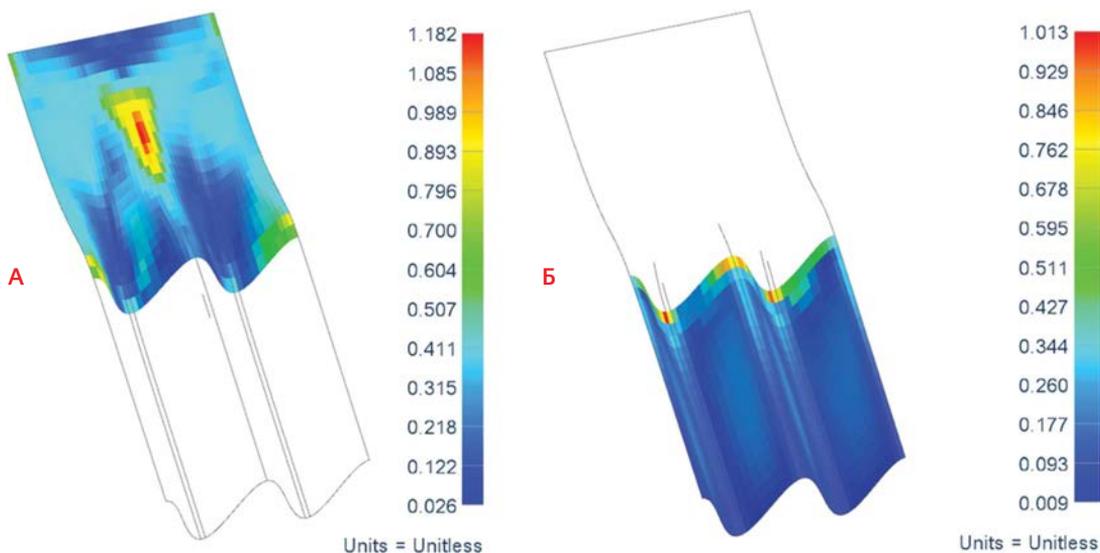


Рисунок 6.34. Распределение индекса разрушения: А – для 5-го слоя, Б – для 3-го слоя

По окончании работы с моделью и результатами для ее закрытия выберите через главное меню: **Файл** → **Закреть** → **Все детали (File → Close → All Parts)**.