

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

А.В. Жидков
Н.В. Леонтьев

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИТОВ В СРЕДЕ ANSYS С ПОМОЩЬЮ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СЛОИСТОГО КОНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано научно-методическим советом исследовательской школы
«Компьютерная и экспериментальная механика»
для студентов ННГУ, обучающихся по направлению подготовки
01.05.01 «Фундаментальная математика и механика»,
01.03.03 «Механика и математическое моделирование»

Нижний Новгород
2020

УДК 519.63
ББК 22.193
Ж69

Ж69 Жидков А.В., Леонтьев Н.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИТОВ В СРЕДЕ ANSYS С ПОМОЩЬЮ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СЛОИСТОГО КОНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА: Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2020. – 35 с.

Рецензент: д.ф.-м.н., профессор В.Л. Котов

В пособии рассматривается решение задач статического деформирования в среде ANSYS конструкций из слоистых композитов с использованием восьмиузловых пространственных (объёмных) конечных элементов. Приводится сравнение и анализ результатов решения, полученных для четырех вариантов конечно-элементных схем, доступных в ANSYS.

Пособие предназначено для приобретения практических навыков решения прикладных задач и закрепления теоретического материала по дисциплинам «Механика композиционных материалов», «Численные методы механики деформируемого твердого тела», «Метод конечных элементов» студентами по направлению подготовки «Механика и математическое моделирование» и специальности «Фундаментальная математика и механика», а также при написании курсовых и выпускных квалификационных работ.

Печатается по решению
научно-методического совета исследовательской школы
«Компьютерная и экспериментальная механика»

УДК 519.63
ББК 22.193

© Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ДЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ANSYS.....	5
1.1.Объемный конечный элемент для анализа слоистых композитов	5
1.2.Подготовка конечно-элементной модели при использовании объемных конечных элементов.	6
2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДЛЯ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТЕЛ	13
2.1.Изгиб пластины	13
2.2.Круговая цилиндрическая оболочка под внешним давлением	19
2.3.Цилиндрическая панель, жестко закрепленная по контуру, под действием внешнего давления	22
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	25
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	26
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	27
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	30
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	32
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	34

ВВЕДЕНИЕ

Композиционные материалы широко применяются в различных отраслях техники. Расчетное сопровождение проектирования композиционных конструкций требует разработки и внедрения эффективных методов их анализа. Пакет прикладных программ ANSYS является универсальным средством решения широкого класса задач механики и математической физики.

Естественно, в ANSYS имеются эффективные конечные элементы для решения задач моделирования композиционных материалов при различных нагрузках и режимах нагружения [1].

В версии 17.2 присутствует ряд конечных элементов, предназначенных для аппроксимации тел различной мерности и работающих с моделями композиционных сред. Основные конечные элементы для расчета композиционных сред по различным расчетным схемам представлены в таблице 1.

Таблица 1

Элементы ANSYS для композитов

<i>Расчётные схемы</i>	<i>Конечные элементы</i>
Балки	<i>BEAM188, BEAM189</i>
Пластины и оболочки	<i>SHELL181, SHELL281, SOLSH190</i>
Трёхмерные задачи	<i>SOLID185, SOLID186</i>

В пособии рассматривается использование только трёхмерных (3D) конечных элементов, а именно *SOLID185* и *SOLID46* с опциями различных вариантов конечно-элементных технологий. Приводятся результаты решения ряда задач, цель расчетов которых – показать влияние различных технологий на конечный результат.

1. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ДЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ANSYS

1.1. Объемный конечный элемент для анализа слоистых композитов

Элемент *SOLID185* доступен для использования в двух режимах: для моделирования как однородной среды, так и неоднородной слоистой среды. Переключение режимов происходит с помощью задания значения ключевой опции *KEYOPT(3)* или *k3*. Значение 0 соответствует однородной среде, 1 – слоистой среде.

Элемент *SOLID185* представляет собой криволинейный гексаэдр (шестигранник) с 8 узлами (рисунок 1), при построении которого используется изопараметрическая технология [2].

Известно, что из-за неполноты используемых аппроксимирующих функций шестигранные элементы обладают таким существенным недостатком, как сдвиговое заклипание. Эффект заклипания состоит в том, что жесткость элемента при некоторых видах деформирования может необоснованно возрастать. Сдвиговое заклипание возникает в задачах, где основным деформированным состоянием является изгиб.

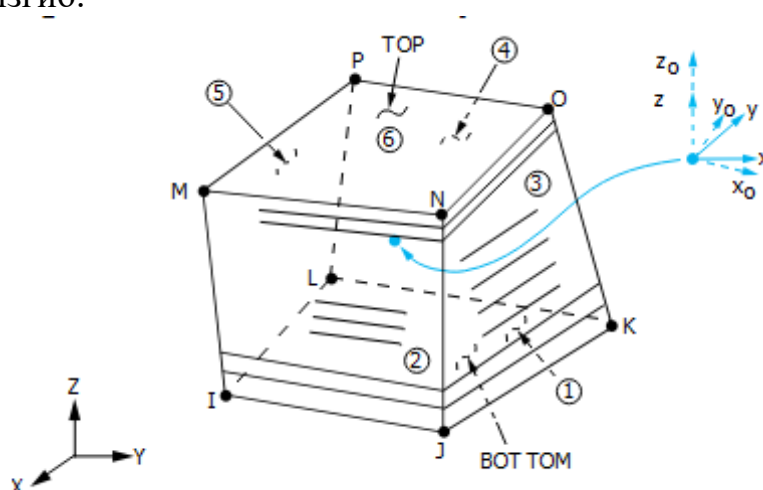


Рисунок 1. Восьмиузловой слоистый конечный элемент

Для преодоления этого негативного эффекта при работе с элементом *SOLID185* с опцией многослойности применяются две технологии [1]. Первая технология, которая называется «улучшенное представление деформаций (*enhanced strain formulation*)», состоит во введении тринадцати дополнительных внутренних степеней свободы и дополнительных аппроксимирующих функций, которые помогают устранить не только сдвиговое, но и объемное заклипание, возникающее в случае, когда материал элемента является почти несжимаемым. Добавление и обработка внутренних неизвестных происходит автоматически без участия пользователя.

При использовании второй технологии – «простое улучшенное представление деформаций (*simple enhanced strain formulation*)» – происходит добавление только девяти дополнительных внутренних степеней свободы (и, соответственно, девяти дополнительных функций). Применение этого метода предотвращает только сдвиговое запирание.

Выбор технологии построения конечного элемента осуществляется с помощью ключевой опции *KEYOPT(2)*. Значение 2 соответствует – методу улучшенного представления деформаций, а значение 3 – методу простого улучшенного представления деформаций.

1.2. Подготовка конечно-элементной модели при использовании объемных конечных элементов.

Определим существенные моменты при создании конечно-элементной модели. Задание данных для слоистого элемента может быть выполнено с использованием графического интерфейса и в командном режиме.

Задание конечного элемента с использованием интерфейса

Main Menu \ Preprocessor \ Element Type \ Add/Edit/Delete

Окно *Element Types: Add*

Окно *Library of Element Types: Solid \ Brick 8 node 185 \ OK*

Окно *Element Types: Options*

Окно *Solid185 element type options* (см. рис. 2)

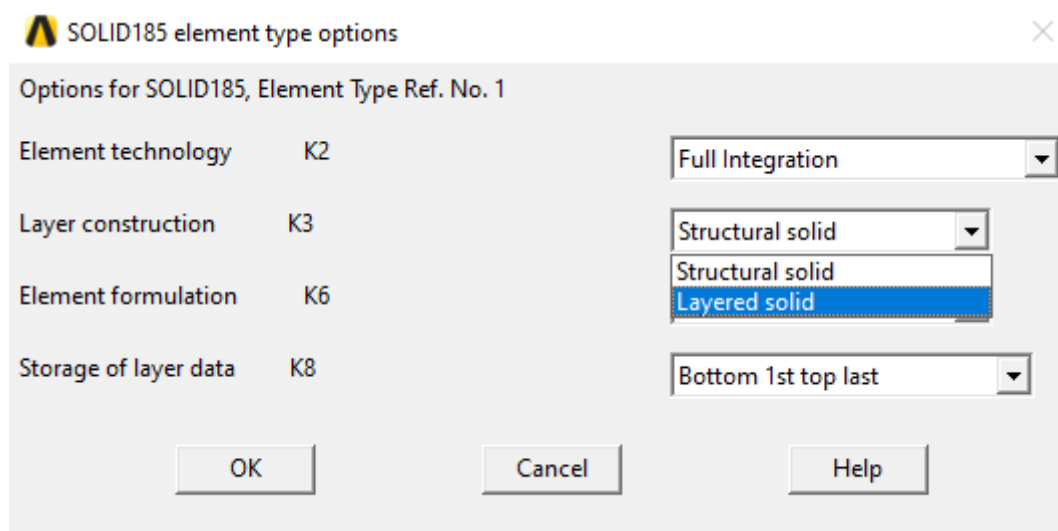


Рисунок 2. Окно задания опций элемента *Solid185*

После задания опции многослойности $k3 = 1$, значение опции $k2$ автоматически примет значение 3, соответствующее технологии «*Simplified enhanced strain formulation*».

Считаем, что материал слоя может быть изотропным или ортотропным. Ортотропный материал имеет три плоскости упругой симметрии и характери-

здается девятью независимыми константами. Задание свойств ортотропного материала осуществляется аналогично заданию свойств изотропного материала (рис. 3, 4).

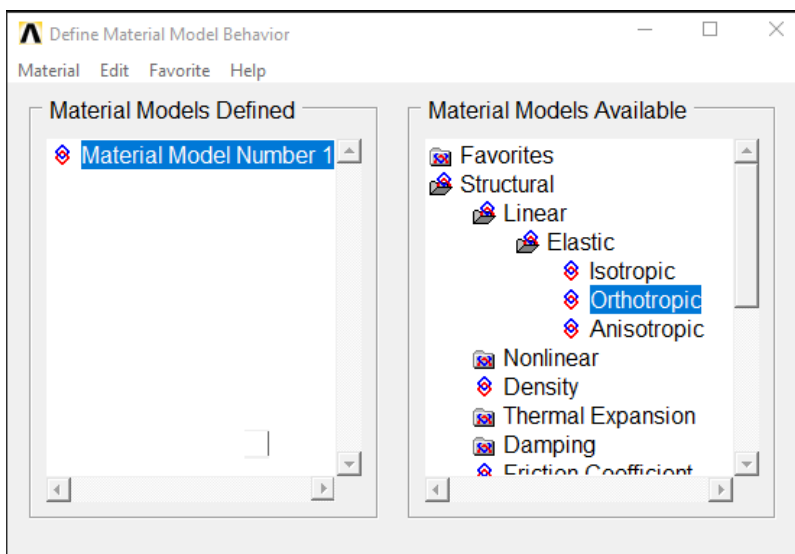


Рисунок 3. Выбор модели упругого ортотропного материала

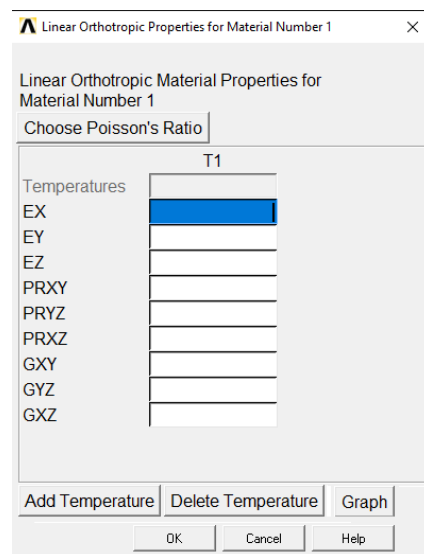


Рисунок 4. Задание упругих свойств ортотропного материала

Структуру слоев для элемента *SOLID185* можно определить с помощью инструмента «Section – сечение» (рис. 5).

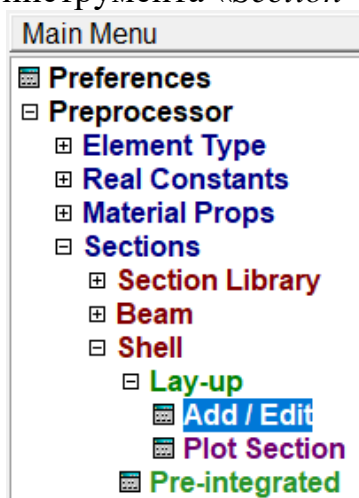


Рисунок 5. Меню задания сечения КЭ

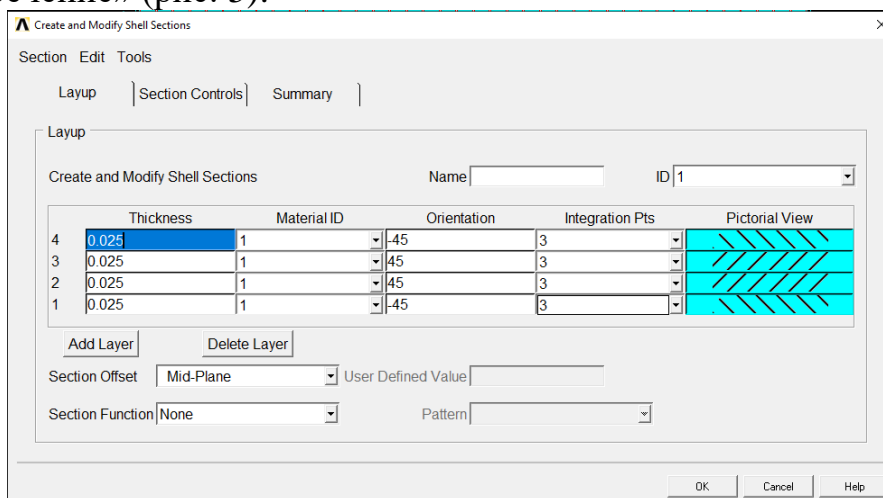


Рисунок 6. Окно редактирования сечения

Задание параметров структуры слоистого композита происходит в окне «Create and Modify Shell Sections» (рис. 6). Информация о сечении содержит:

Name – имя сечения (необязательный параметр),

ID – уникальный идентификатор сечения.

Для каждого слоя задается:

Thickness – толщина (здесь задается относительное значение, реальные толщины слоев определяются исходя из абсолютных размеров конечного элемента);

Material ID – идентификатор материала;

Orientation – угол (в градусах), определяющий поворот системы координат слоя относительно системы координат слоистого конечного элемента;

Integration Pts – количество точек интегрирования по слою. Может принимать значения 1, 3, 5, 7, 9. По умолчанию равно 3. Значение больше, чем три, может понадобиться, например, для учета нелинейного поведения материала.

На четвертом поле схематично показано направления слоев. Под направлением слоя имеем в виду направление оси $0\hat{x}$ локальной системы координат слоя по отношению к оси $0\tilde{x}$ системы координат элемента (*ANSYS 17.2 Help*).

В элементе может быть задано до 250 слоев.

По команде *Plot Section* можно получить схематичное изображение сечения для визуального контроля (рисунок 7).

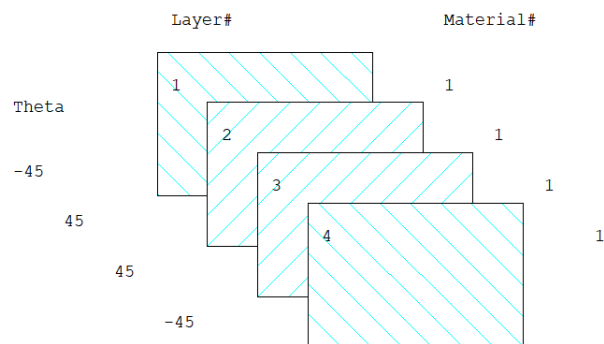


Рисунок 7. Схематичное изображение структуры композита

Задание конечного элемента в командном режиме

```
ET,1,185
KEYOPT,1,3,1 ! LAYERED SOLID ELEMENTS
KEYOPT,1,2,3 ! SIMPLE ENHANCED STRAIN FORMULATION
KEYOPT,1,8,1 ! STORE DATA FOR ALL LAYERS
```

```
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,25e6
MPDATA,EY,1,,1e6
MPDATA,EZ,1,,1e6
MPDATA,PRXY,1,,0.25
MPDATA,PRYZ,1,,0.01
MPDATA,PRXZ,1,,0.25
MPDATA,GXY,1,,5e5
MPDATA,GYZ,1,,2e5
MPDATA,GXZ,1,,5e5
```

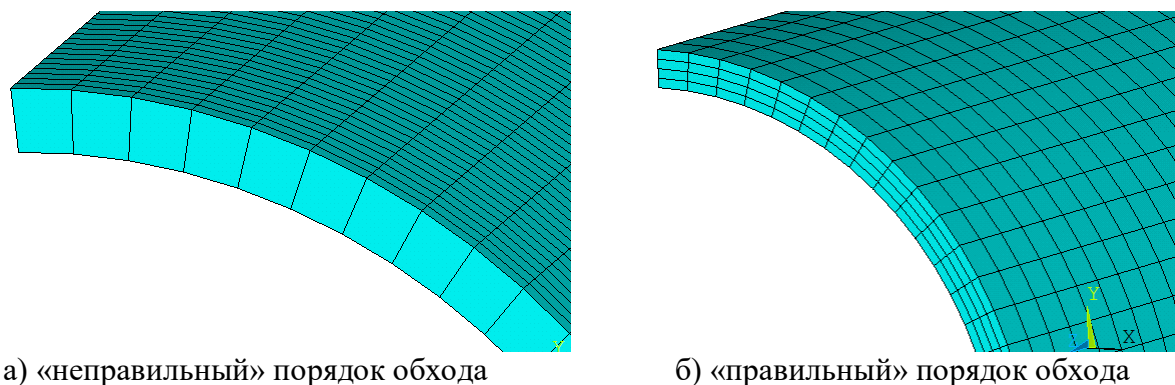
```
SECTYPE,1,SHELL
SECDATA,0.025,1,-45,1 ! LAYER 1: 0.025 THK, THETA 0
SECDATA,0.025,1,45,1 ! LAYER 2: 0.025 THK, THETA 90
```



```
SECDATA,0.025,1,45,1 ! LAYER 3: 0.025 THK, THETA 90
SECDATA,0.025,1,-45,1 ! LAYER 4: 0.025 THK, THETA 0
```

Инструмент «сечение» также доступен и для других элементов версии 17.2 с опцией многослойности.

Построение объемной геометрической и конечно элементной модели при использовании слоистых элементов осуществляется обычным способом. Но имеется одна очень важная особенность. Конечный элемент должен быть правильно сориентирован, то есть порядок обхода (локальная нумерация) узлов конечного элемента должна быть согласована с физическим расположением слоев в композитном теле. На рисунке 1 показан принятый в ANSYS порядок обхода узлов: сначала узлы «нижней» грани *I-J-K-L*, затем узлы «верхней» грани *M-N-O-P*. Если это правило нарушить, элементы будут построены неправильно. Такая ситуация иллюстрируется на рисунке 8. Рассматривается цилиндрическая панель с сеткой в один элемент по толщине. На рисунке 8а показан неправильный порядок обхода, слои располагаются перпендикулярно оси цилиндра. На рисунке 8б показан уже «правильный» порядок обхода – слои располагаются перпендикулярно радиальному направлению.



а) «неправильный» порядок обхода
б) «правильный» порядок обхода
Рисунок 8. Нарушение порядка обхода узлов
конечных элементов для цилиндрической оболочки

В данном случае номера узлов и элементов, а так же координаты узлов полностью совпадают. Различается только порядок обхода узлов при описании матрицы связности. Для исправления таких ситуаций в ANSYS существуют специальные команды переориентации объемов до построения сетки, либо переориентации конечных элементов уже построенной сетки. Для переориентации объемов служит команда *VEORIENT*, которую нужно запустить до построения сетки типа «*mapped*». Для исправления уже построенной сетки служит команда *EORIENT*. Информацию по применению этих команд легко найти в документации ANSYS.

Полезным инструментом также является отображение элемента, основанное на описании его структуры (*Display of element shapes based on real constant descriptions*). Включение этого режима можно выполнить с помощью меню *Utility Menu | PlotCtrls | Style | Size and Shape* или с помощью команды */ESHAPE*.

При этом обязательно задана опция $KEYOPT(8) = 1$, которая управляет сохранением данных по слоям. Опция имеет возможные значения:

- 0 (*Bottom 1stTopLast*) – когда напряжения сохраняются на нижней поверхности первого слоя и верхней поверхности последнего слоя;
- 1 (*AllLayers*) – когда напряжения сохраняются на верхней и нижней поверхности каждого слоя.

Первый вариант является менее затратным с точки зрения вычислительных ресурсов, но не отображает решение во всех слоях структуры. Второй вариант лишен этого недостатка (рис. 9).

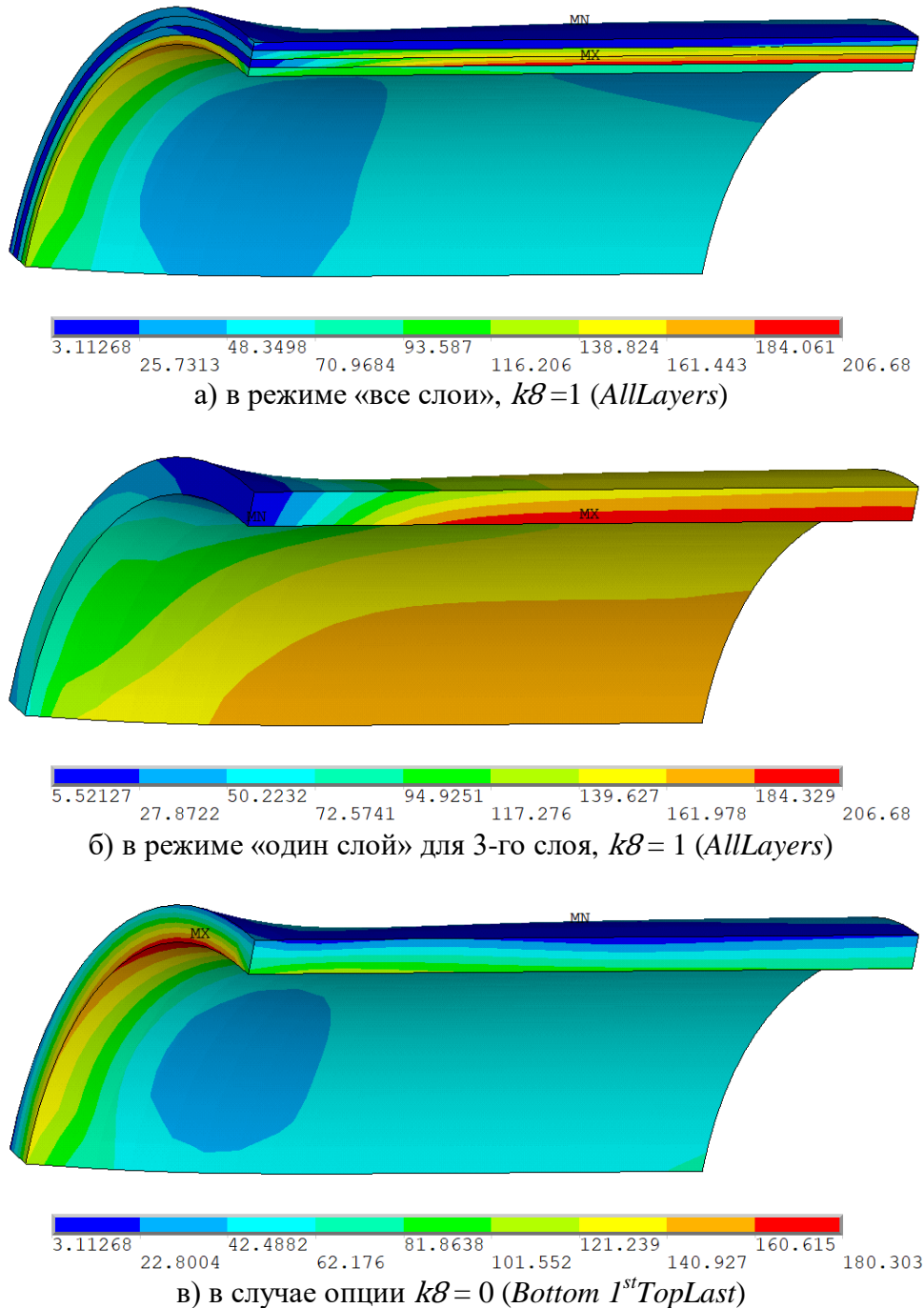


Рисунок 9. Отображение напряжений в слоистой цилиндрической оболочке

Графическое отображение результатов (напряжений) в ANSYS представлено также в двух вариантах (рис. 9). Наиболее «естественный» вариант предполагает, что отображаются сразу все слои (рис. 9а). Это работает лишь в том случае, если значение опции $k8 = 1$ (*AllLayers*) и работает режим отображения *Display of element shapes based on real constant descriptions*.

Недостаток такого способа отображения состоит в том, что для внутренних слоев можно наблюдать напряжения только на торцах или построенных сечениях. В этом случае может помочь режим «отдельный слой», показанный на рисунке 9б. Здесь показаны напряжения для 3-го слоя (в данном случае слои считаются с наружной поверхности цилиндра). При отображении напряжения в слое «размазываются» на всю толщину пакета. В этом состоит определенное упрощение алгоритма, так как при построении изображения не нужно вычислять глобальные координаты точек границ слоя. Максимальные напряжения на рисунках 9а и 9б совпадают, так как максимум достигается именно на данном слое. На рисунке 9в показано отображение напряжений в случае задания опции $k8 = 0$ (*Bottom 1stTopLast*). Естественно, картина отличается от двух предыдущих.

В ANSYS имеется возможность использовать еще один восьмиузловой шестигранный конечный элемент. Это – *Solid46*. Данный элемент является архивным, не сопровождается, но им можно воспользоваться в командном режиме. Руководства современных версий не дают информации об этом элементе. Нужно пользоваться руководствами старых версий.

К сожалению, *Solid46* не работает с инструментом *Section*. Здесь приходится пользоваться инструментом *Real Constants* – действительные константы, описание для элемента *Solid46* можно найти в [3]. Инструкции по заполнению массива реальных констант зависят от значений опций конечного элемента. Мы не будем приводить их здесь полностью, а отошлем к уже упоминаемому руководству.

Приведем код на языке *APDL*, соответствующий приведенному коду для *Solid185*.

```

ET,1,SOLID46
!KEYOPT,1,1,0      ! extra displacement shapes
KEYOPT,1,1,1! no extra displacement shapes
KEYOPT,1,2,0! Постоянная толщина слоев
KEYOPT,1,3,0! Базовый вывод результатов
KEYOPT,1,4,0! Пользовательская функция не используется
!                для задания системы координат элемента
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,8,1

R,1,4,0,1,2,,, ! 1-номер массива реальных констант
                ! 4-количество слоев

RMORE, 0, , , ,
RMORE, 1,-45 ,0.5, 1, 45,0.5 ! материал, угол, толщина 1 слоя; то же для 2 слоя

```

RMORE, 1, 45, 0.5, 1, -45, 0.5 ! то же для 3 и 4 слоев

Максимальное количество слоев для данного элемента также 250.

Для элемента *Solid46* возможны две формулировки. В первой, соответствующей *KEYOPT(1) = 1 – no extra displacement shapes*, используются стандартные функции формы в виде произведения трех линейных функций локальных координат. Во втором, работающем по умолчанию, варианте, *KEYOPT(1) = 0 – extra displacement shapes*, к стандартным функциям формы для каждой компоненты перемещений добавляются несовместные функции локальных координат вида [4]:

$$(1 - r^2), (1 - s^2), (1 - t^2).$$

То есть добавляется всего 9 новых несовместных функций и новых переменных, введение которых предотвращает появление сдвигового записания. Напомним, что для элемента *Solid185* при использовании технологии *Simple Enhanced Strain Formulation* к стандартной аппроксимации так же добавляется 9 функций.

Для элемента *SOLID46* выполняется коррекция части упругих свойств на растяжение сжатие поперек плоскости слоев и поперечного сдвига [4]. Реальные жесткости здесь заменяются на эквивалентные, вычисленные из условия осреднения податливостей. Это позволяет более правильно учитывать жесткостные свойства КЭ. Напряжения, вычисленные с учетом такой коррекции, будут удовлетворять условиям равновесия на межслойных границах. В более поздней реализации *SOLID185* с опцией многослойности коррекции не выполняется.

Можно изменить ориентацию в плоскости слоев с помощью команды *ESYS* так же, как и для элементов оболочки.

Чтобы добиться правильного узлового порядка для сетки с отображением объема (шестигранник), вы можете использовать команду *VEORIENT*, чтобы указать желаемую ориентацию объема перед выполнением команды *VMESH*. В качестве альтернативы вы можете использовать команду *EORIENT* после автоматического создания сетки, чтобы переориентировать элементы, чтобы они соответствовали ориентации другого элемента или были как можно более параллельны определенной оси *ESYS*.

2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДЛЯ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТЕЛ

Далее приведены результаты решения ряда задач, полученные с помощью конечных элементов *Solid185* с $KEYOPT(2) = 2$ и $KEYOPT(2) = 3$ и *Solid46* с $KEYOPT(1) = 0$ и $KEYOPT(1) = 1$. Целью этих расчетов является показать влияние различных технологий на конечный результат. Приводятся цветные картины распределения решения по поверхности рассчитываемых объектов, а также таблицы, содержащие экстремальные значения компонент решения. Во всех задачах используются свойства ортотропного композита, определенные в тестовой задаче *VM82* из *Verification Manual* [1]. Свойства композита: $E_X = 25e6$; $G_{XY} = 5e5$; $V_{XY} = 0,25$; $E_Y = 1e6$; $G_{YZ} = 2e5$; $V_{YZ} = 0,01$; $E_Z = 1e6$; $G_{XZ} = 5e5$; $V_{XZ} = 0,25$. Ось X соответствует направлению армирования, оси Y и Z перпендикулярны направлению армирования и являются осями ортотропии. Размерность приведенных модулей упругости и сдвига – Па. Слой имеет одинаковую толщину. В приложениях 1-3 приведены командные файлы на языке *APDL* для решения приведенных ниже задач. Файлы снабжены подробными комментариями, что позволяет их использовать и модифицировать.

2.1. Изгиб пластины

Рассматривается квадратная шарнирно опертая по краям четырехслойная пластина с углами укладки слоев $0^0/90^0/90^0/0^0$. В силу наличия симметрии по геометрии, воздействиям, закреплению и свойствам материала для численного решения используется одна четвертая часть пластины. Координатные плоскости xOz и yOz являются плоскостями симметрии. Для решения используется сетка $20 \times 20 \times 1$ конечных элементов. Для интегрирования по толщине слоя используется трехточечная схема.

На рисунках 10 и 11 показано распределение компонент перемещений по осям X и Z на поверхности четверти пластины.

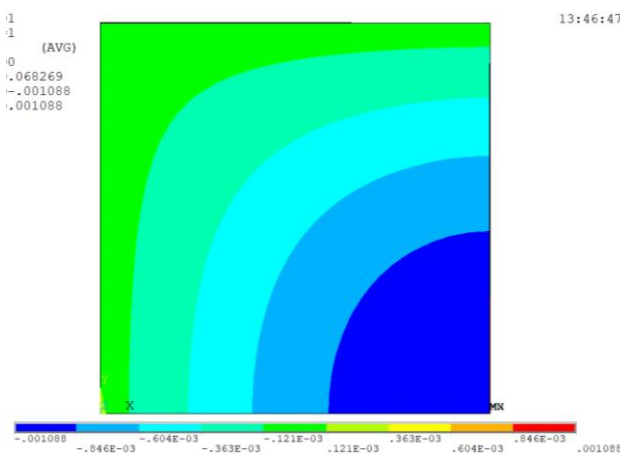


Рисунок 10. Распределение горизонтального перемещения U_X .

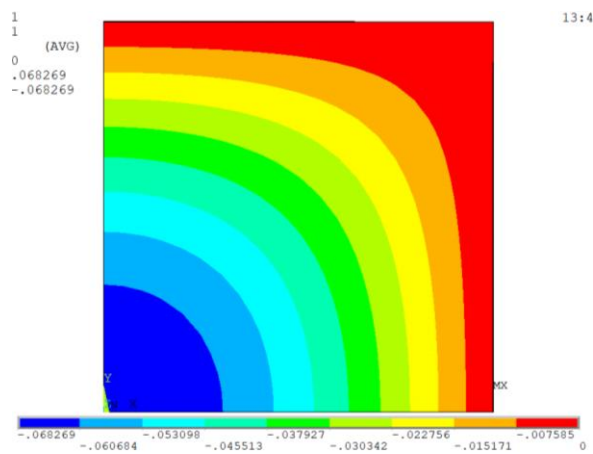


Рисунок 11. Распределение вертикального перемещения U_Z .

Из рисунков видно, что, несмотря на симметричную структуру пакета слоев, линии равных значений перемещений (границы цветных областей) не являются симметричными по X и Y . Это объясняется тем, что при изгибе даже симметричный пакет слоев не будет обладать свойствами ортотропии.

На рисунках 12–17 показано распределение напряжения σ_x , σ_y , σ_{xy} в первом слое – направление укладки совпадает с осью Z . Номера слоев отсчитываются снизу. Напряжения относятся к локальной системе координат, связанной со слоем. Показаны постоянные напряжения в ячейках, полученные с помощью инструмента *ELEMENT TABLE* без усреднения.

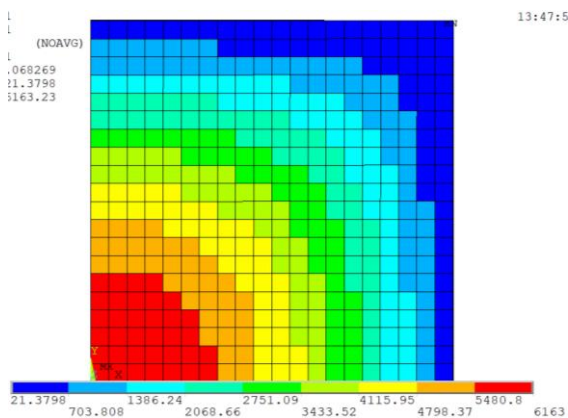


Рисунок 12. Распределение напряжений σ_x

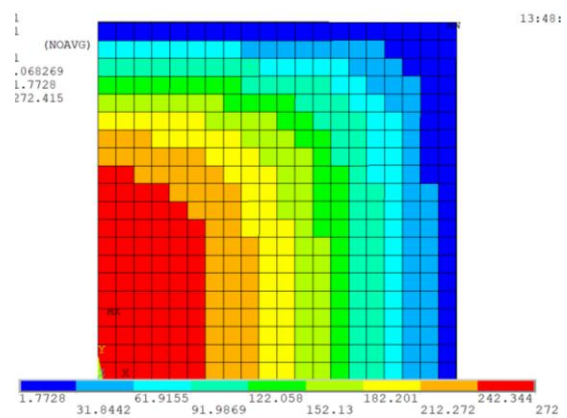


Рисунок 13. Распределение напряжений σ_y

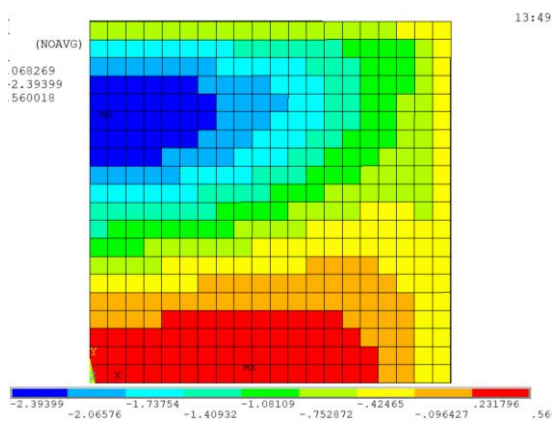


Рисунок 14. Распределение напряжений σ_z

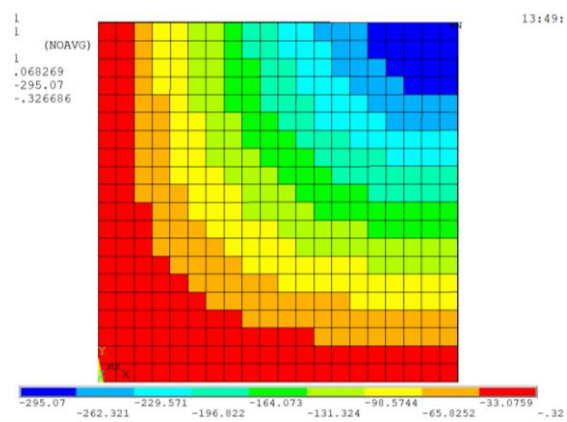


Рисунок 15. Распределение напряжений σ_{xy}

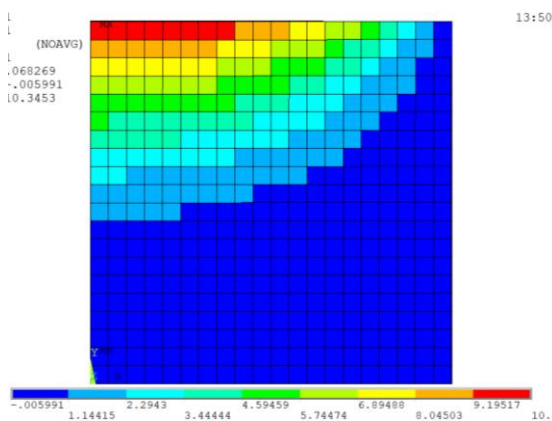


Рисунок 16. Распределение напряжений σ_{yz}

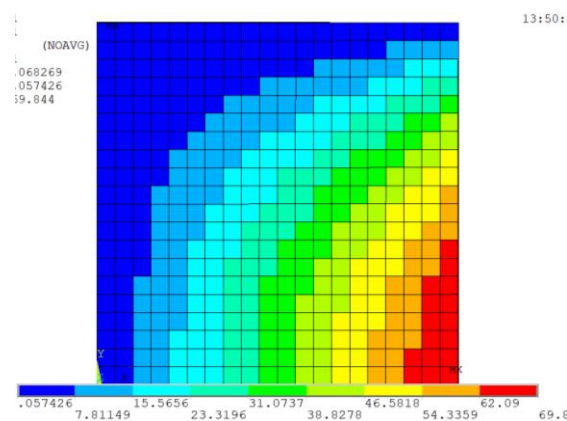


Рисунок 17. Распределение напряжений σ_{xz}

Для вывода результатов напряжений применяется прием, позволяющий «размазать» напряжения в слое на толщину конечного элемента в целом.

В таблице 2 приведены результаты сравнения экстремальных с учетом знака значений перемещений и напряжений для первого слоя композита, полученные с помощью элементов *Solid185* с $k2=2$ и $k2=3$ и *Solid46* с $k1=0$ и $k1=1$. Если значение какой-то величины около нуля, а при этом второе значение имеет конечную величину, значение около нуля не приводится. Так же, если минимальное и максимальное значения какой-либо величины различаются только знаком, приводится только значение максимума. В шестом столбце, обозначенном как «185-3/185-2», приведено относительного рассогласования результатов *Solid185* с $k2=2$ и *Solid185* с $k2=3$ по отношению в первому. В седьмом столбце приведено относительного рассогласования результатов *Solid185* с $k2=2$ и *Solid46* с $k1=0$ по отношению к первому. И, наконец, в восьмом столбце приведено относительного рассогласования результатов *Solid46* с $k1=0$ и *Solid46* с $k1=1$ по отношению к первому. Величины относительного рассогласования решений приведены в процентах.

Таблица 2

Сравнение решений для задачи изгиба пластины с условиями симметрии

Величина	<i>Solid185-2</i>	<i>Solid185-3</i>	<i>Solid46-0</i>	<i>Solid46-1</i>	185-3/185-2	46-0/185-2	46-1/46-0
U	1,09E-03	1,09E-03	1,09E-03	9,69E-04	-0,09	-0,09	-10,86
W	-0,06827	-0,06825	-0,06832	-0,06088	-0,03	0,07	-10,88
σ_x-min	21,3798	21,1309	21,102	18,6022	-1,16	-1,30	-11,85
σ_x-max	6163,23	6161,04	6160	5496,24	-0,04	-0,05	-10,78
σ_y-max	272,415	272,318	272,504	250,501	-0,04	0,03	-8,07
σ_z-min	-2,39399	-2,39362	-2,39586	0,00266	-0,02	0,08	-100,11
σ_z-max	0,560018	0,55968	0,553944	56,9675	-0,06	-1,08	10184
$\sigma_{xy}-min$	-295,07	-294,921	-295,103	-257,552	-0,05	0,01	-12,72
$\sigma_{xy}-max$	-0,32669	-0,32655	-0,3267	-0,30317	-0,04	0,01	-7,20
$\sigma_{yz}-min$	-0,00599	-0,00591	-0,00943	-0,00183	-1,29	57,42	-80,61
$\sigma_{yz}-max$	10,3453	10,3441	18,1062	19,9204	-0,01	75,02	10,02
$\sigma_{xz}-min$	0,057426	0,057388	0,040174	0,037362	-0,07	-30,04	-7,00
$\sigma_{xz}-max$	69,844	69,8443	48,8856	47,3923	0,0004	-30,01	-3,05

Видно, что результаты, полученные с помощью элементов *Solid185* с $k2=2$ и $k2=3$, различаются между собой минимально. Максимальные относительные различия по напряжениям не превышают 1,3%, а в основном составляют сотые доли процента. Различия для результатов элемента *Solid46* с $k1=0$ и $k1=1$ значительно существеннее и достигают 10-20%, а максимальные значения σ_z различаются в сто раз. Возможно, это связано с тем, что при $k1=1$ в *Solid46* используются «простые» функции формы без корректирующих технологий. Поскольку в данной задаче преобладает изгиб, элемент *Solid46* с $k1=1$, как и следовало ожидать, работает хуже. Для элементов *Solid185* с $k2=2$ и *Solid46* с $k1=0$ все компоненты решения согласуются с точностью до 1%, за исключением напряжений поперечного сдвига. Это можно объяснить, что в элементах

применяются схожие корректирующие технологии, но для элемента *Solid46* выполняется коррекция части упругих свойств на растяжение сжатие поперек плоскости слоев и поперечного сдвига. Отсутствие больших расхождений для нормальных напряжений σ_Z связано с тем, что жесткости слоев на растяжение-сжатие в направлении Z не различаются, тогда как жесткости на поперечный сдвиг существенно различны, и осреднение жесткостей и податливостей естественно дает различные результаты.

Решена задача изгиба квадратной пластины с углами укладки $-45^\circ/45^\circ/45^\circ/-45^\circ$ под действием равномерного давления. Свойства ортотропного монослоя и толщин слоев определены ранее. Схема армирования показана на рисунке 7. Первый слой соответствует нижней поверхности пластины. В этом случае для численного решения необходимо выбирать всю пластину, так как свойства симметрии по материалу отсутствуют. Поэтому задача решалась на сетке $40 \times 40 \times 1$ конечных элементов. Рассмотрены условия свободного (шарнирного) опирания и жесткой заделки. Командный файл, выполняющий решение задачи в ANSYS, приведен в приложении 1.

На рисунках 18 и 19 показано распределение компонент перемещений в направлении осей X и Z по поверхности свободно опертой по краям пластины.

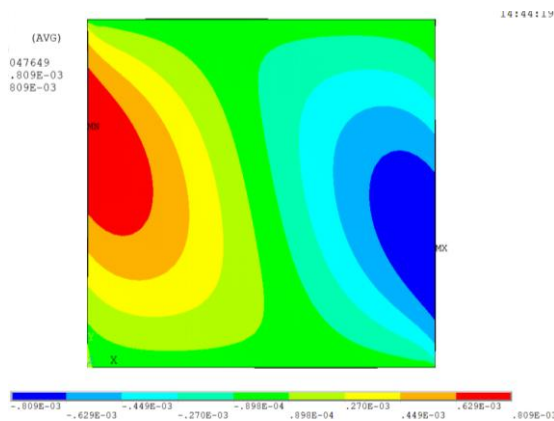


Рисунок 18. Распределение горизонтального перемещения U_X

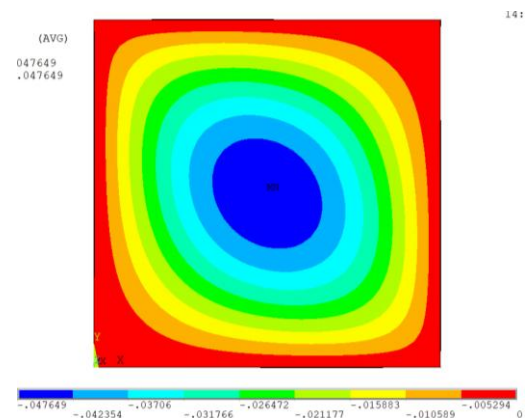


Рисунок 19. Распределение вертикального перемещения U_Z

На рисунках 20–25 показано распределение компонент напряжений σ_X , σ_Y , σ_Z , σ_{XY} , σ_{YZ} , σ_{XZ} в первом слое. Показано решение, полученное с использованием элемента *Solid185* с $k2=2$. Результаты, полученные для других элементов и значений опций, имеют такой же характер, а экстремальные значения для всех расчетных случаев приведены в таблице 3. В таблице 3 используются те же обозначения, что и в таблице 1.

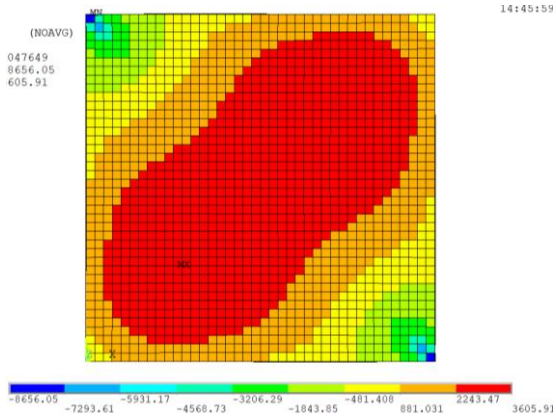


Рисунок 20. Распределение напряжений σ_x

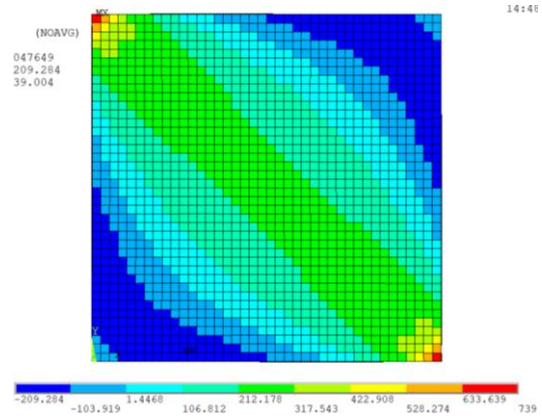


Рисунок 21. Распределение напряжений σ_y

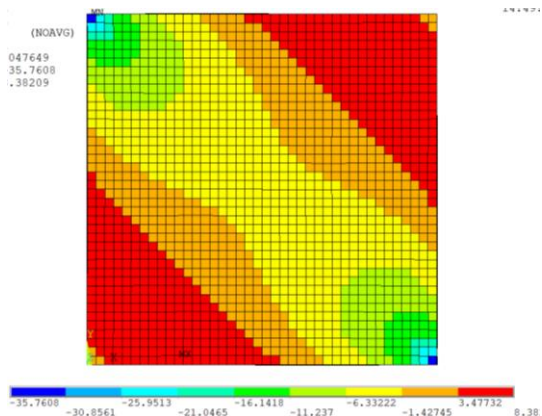


Рисунок 22. Распределение напряжений σ_z

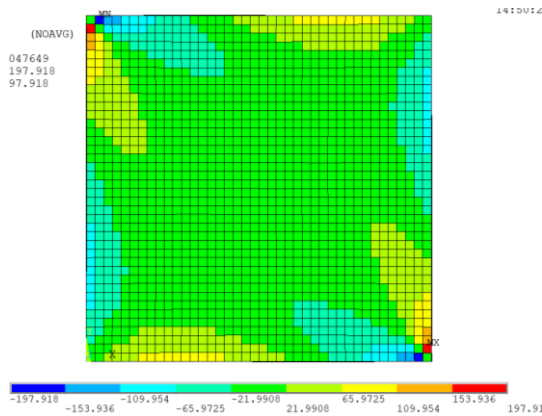


Рисунок 23. Распределение напряжений σ_{xy}

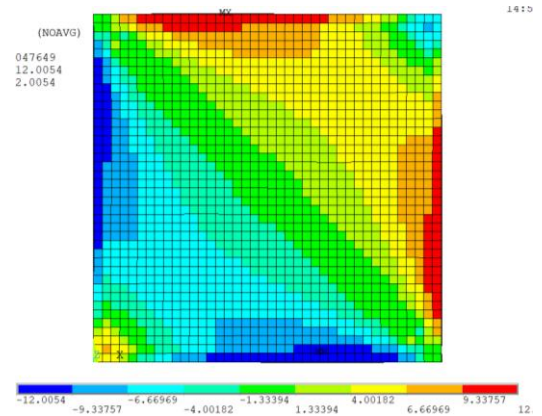


Рисунок 24. Распределение напряжений σ_{yz}

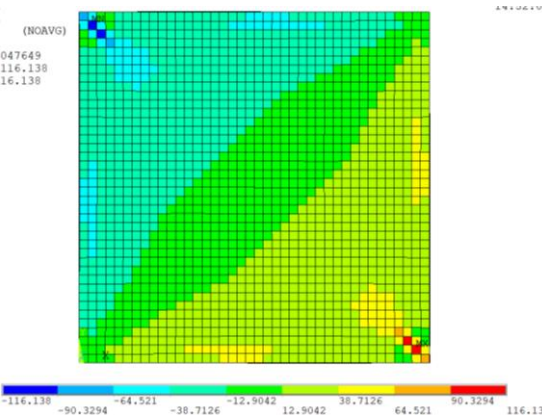


Рисунок 25. Распределение напряжений σ_{xz}

Таблица 3

Сравнение решений для задачи изгиба квадратной пластины с углами укладки $-45^\circ/45^\circ/45^\circ/-45^\circ$ с условиями свободного опирания

Величина	<i>Solid185-2</i>	<i>Solid185-3</i>	<i>Solid46-0</i>	<i>Solid46-1</i>	<i>185-3/185-2</i>	<i>46-0/185-2</i>	<i>46-1/46-0</i>
U_{-min}	-8,09E-04	-8,06E-04	-8,06E-04	-7,14E-04	-0,37	-0,37	-11,41
U_{-max}	8,09E-04	8,06E-04	8,06E-04	7,14E-04	-0,37	-0,37	-11,41
W	-0,04765	-0,04755	-0,04761	-0,04262	-0,21	-0,08	-10,48
σ_x_{-min}	-8656,05	-9377,24	-9289,94	-8195,93	8,33	7,32	-11,78
σ_x_{-max}	3605,91	3599,51	3599,94	3259,83	-0,18	-0,17	-9,45

Таблица 3

Сравнение решений для задачи изгиба квадратной пластины с углами укладки $-45^\circ/45^\circ/45^\circ/-45^\circ$ с условиями свободного опирания

Величина	<i>Solid185-2</i>	<i>Solid185-3</i>	<i>Solid46-0</i>	<i>Solid46-1</i>	<i>185-3/185-2</i>	<i>46-0/185-2</i>	<i>46-1/46-0</i>
σ_y-min	-209,284	-208,827	-209,8	-167,923	-0,22	0,25	-19,96
σ_y-max	739,004	651,316	649,273	514,505	-11,87	-12,14	-20,76
σ_z-min	-35,7608	-34,1771	-33,9834	-76,1117	-4,43	-4,97	123,97
σ_z-max	8,38209	8,36508	8,40233	32,7424	-0,20	0,24	289,68
σ_{xy-max}	197,918	161,461	162,303	111,374	-18,42	-17,99	-31,38
σ_{yz-max}	12,0054	11,9873	21,0486	20,5712	-0,15	75,33	-2,27
σ_{xz-max}	116,138	110,584	73,7022	51,74	-4,78	-36,54	-29,80

Решение для перемещений, полученных с помощью элементов *Solid185* с $k2=2$ и $k2=3$, различаются между собой минимально. А вот для напряжений так утверждать нельзя. Напряжения σ_x при растяжении различаются на доли процента, а при сжатии – неожиданно на 8%. Так же значительные различия наблюдаются для напряжений σ_y при растяжении и касательных напряжений σ_{xy} . Для элементов *Solid185* с $k2=2$ и *Solid46* с $k1=0$ наблюдаются уже отмеченные различия, а также еще большие различия для напряжений поперечного сдвига σ_{yz} и σ_{xz} – до 75%. Кстати, решения для *Solid185* с $k2=3$ и *Solid46* с $k1=0$ очень хорошо согласуются, за исключением напряжений поперечного сдвига σ_{yz} и σ_{xz} . Особенно значительно – в четыре раза – различаются напряжения σ_z для результатов *Solid46* с $k1=0$ и *Solid46* с $k1=1$.

Для случая жесткой заделки по контуру пластины приведем только итоговую таблицу 4. Картины распределения решения студенты могут построить самостоятельно, используя командный файл в приложении 1.

Таблица 4

Сравнение решений для задачи изгиба квадратной пластины с углами укладки $-45^\circ/45^\circ/45^\circ/-45^\circ$ и условиями жесткой заделки

Величина	<i>Solid185-2</i>	<i>Solid185-3</i>	<i>Solid46-0</i>	<i>Solid46-1</i>	<i>185-3/185-2</i>	<i>46-0/185-2</i>	<i>46-1/46-0</i>
$U-max$	2,91E-04	2,90E-04	2,91E-04	2,43E-04	-0,34	0,00	-16,49
W	-0,01841	-0,0184	-1,85E-02	-0,01564	-0,04	0,40	-15,38
σ_x-min	-3388,85	-3386,81	-3376,23	-2754,83	-0,06	-0,37	-18,41
σ_x-max	1844,59	1843,99	1844,47	1611,16	-0,03	-0,01	-12,65
σ_y-min	-178,453	-178,353	-179,792	-146,283	-0,06	0,75	-18,64
σ_y-max	135,282	135,247	135,452	114,795	-0,03	0,13	-15,25
σ_z-min	-5,39851	-5,39658	-5,38299	-29,2954	-0,04	-0,29	444,22
σ_z-max	3,25168	3,24988	3,24268	16,6522	-0,06	-0,28	413,53
σ_{xy-max}	139,533	139,452	140,016	113,778	-0,06	0,35	-18,74
σ_{yz-max}	14,6734	14,6703	25,67	26,1184	-0,02	74,94	1,75
σ_{xz-max}	68,8105	68,8026	47,7122	43,6669	-0,01	-30,66	-8,48

Решение, полученных с помощью элементов *Solid185* с $k2=2$ и $k2=3$, практически совпадают. Отличия результатов элементов *Solid185* с $k2=2$ и *Solid46* с $k1=0$ наблюдаются только для напряжений поперечного сдвига σ_{YZ} и σ_{XZ} – до 75%. Наибольшее различие – в пять раз – наблюдается по напряжениям σ_Z для результатов *Solid46* с $k1=0$ и *Solid46* с $k1=1$. Различие результатов этих элементов для перемещений и напряжений в плоскости слоев – 12-18%, а для напряжений поперечного сдвига – до 8,5%.

2.2. Круговая цилиндрическая оболочка под внешним давлением

Решена задача статического деформирования кругового слоистого цилиндра под действием внешнего давления. Цилиндр образован четырьмя слоями с углами укладки $-45^\circ/45^\circ/45^\circ/-45^\circ$. На одном из концевых сечений заданы условия симметрии по оси цилиндра и статически определяемые закрепления, обеспечивающие отсутствие линейных перемещений в плоскости поперечного сечения и поворотов. Второе концевое сечение свободно. К внешней поверхности приложено равномерное внешнее давление. Задача была решена на сетке $40 \times 8 \times 1$ конечных элементов. Как и для предыдущей задачи, получены решения для четырех случаев: с использованием элементов *Solid185* с $k2=2$ и $k2=3$ и *Solid46* с $k1=0$ и $k1=1$. Командный файл, выполняющий решение задачи в ANSYS, приведен в приложении 2.

На рисунке 26 показано распределение компонент перемещений U_X (в глобальной декартовой системе координат) по поверхности цилиндра. Рисунок для компоненты U_Y выглядит аналогично, но развернут на 90° вокруг оси цилиндра. Распределение компоненты U_Z показано на рисунке 27.

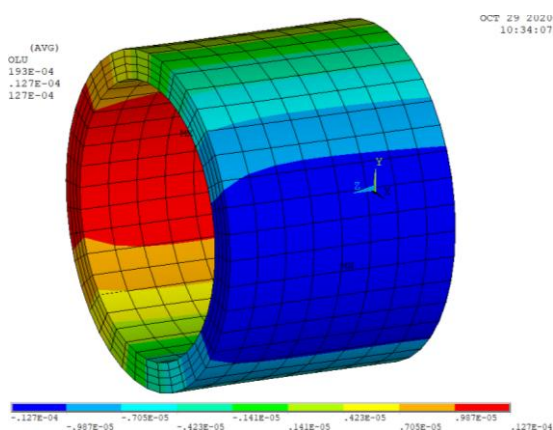


Рисунок 26. Распределение перемещения U_X

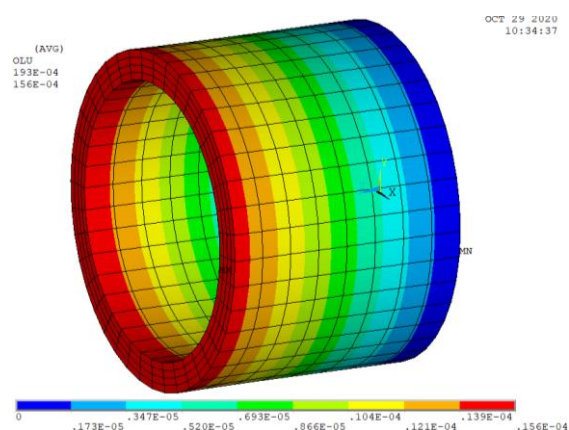


Рисунок 27. Распределение перемещения U_Z

На рисунках 28–33 показано распределение компонент напряжений σ_X , σ_Y , σ_Z , σ_{XY} , σ_{YZ} , σ_{XZ} в первом слое композита. Показано решение, полученное с использованием элемента *Solid185* с $k2=2$. Результаты, полученные для других элементов и значений опций имеют такой же характер, а экстремальные значения для всех расчетных случаев приведены в таблице 5.

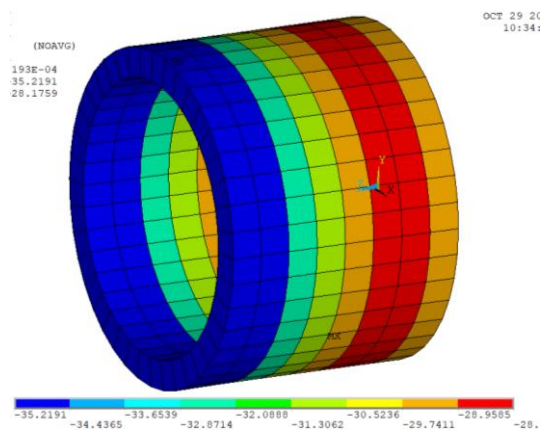


Рисунок 28. Распределение напряжений σ_x

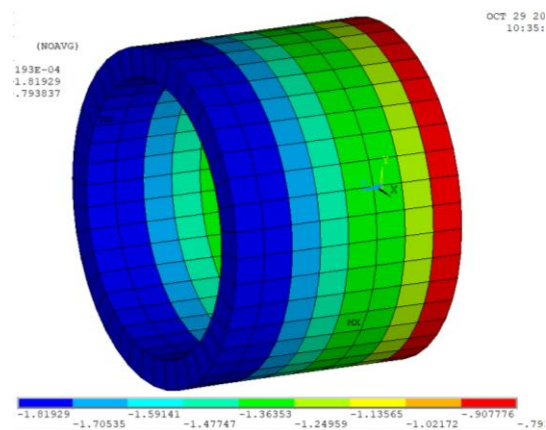


Рисунок 29. Распределение напряжений σ_y

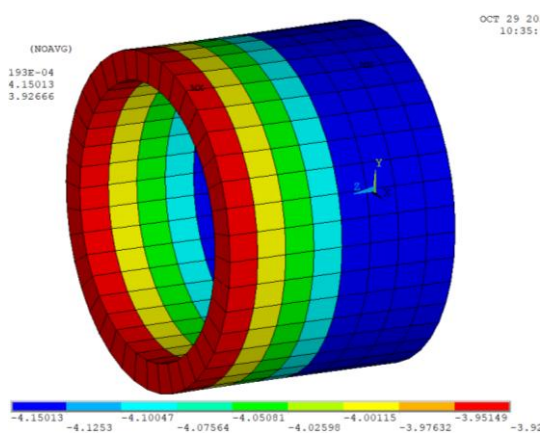


Рисунок 30. Распределение напряжений σ_z

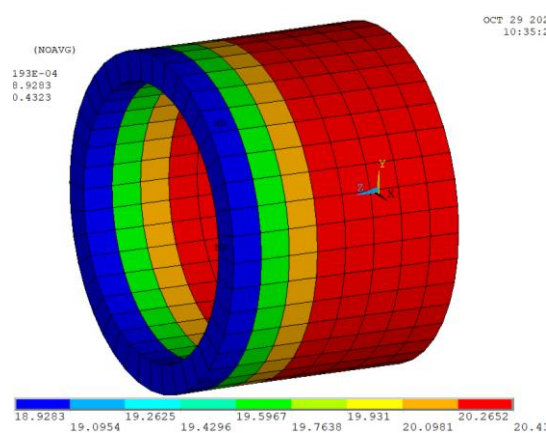


Рисунок 31. Распределение напряжений σ_{xy}

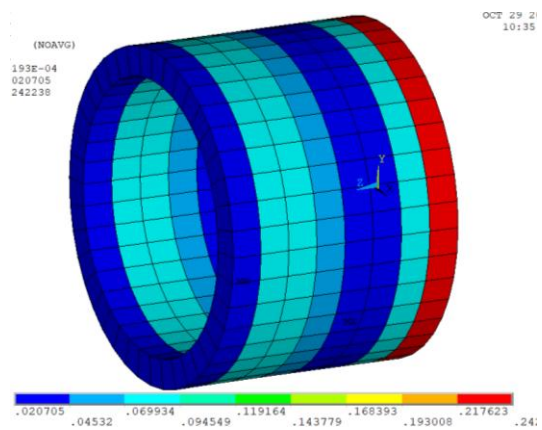


Рисунок 32. Распределение напряжений σ_{yz}

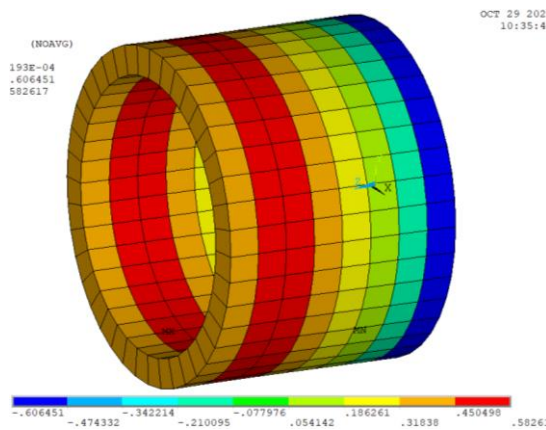


Рисунок 33. Распределение напряжений σ_{xz}

Таблица 5

Сравнение решений для задачи деформирования цилиндра под действием внешнего давления

Величина	<i>Solid185-2</i>	<i>Solid185-3</i>	<i>Solid46-0</i>	<i>Solid46-1</i>	<i>185-3/185-2</i>	<i>46-0/185-2</i>	<i>46-1/46-0</i>
<i>U-max</i>	1,27E-05	1,27E-05	1,27E-05	1,26E-05	0,00	0,00	-0,79
<i>W-max</i>	1,56E-05	1,56E-05	1,56E-05	1,56E-05	0,00	0,00	0,00

**Сравнение решений для задачи деформирования цилиндра
под действием внешнего давления**

Величина	<i>Solid185-2</i>	<i>Solid185-3</i>	<i>Solid46-0</i>	<i>Solid46-1</i>	<i>185-3/185-2</i>	<i>46-0/185-2</i>	<i>46-1/46-0</i>
σ_x-min	-35,2191	-35,2191	-35,7149	-35,3957	0,00	1,41	-0,89
σ_x-max	-28,1759	-28,1759	-29,0871	-28,8752	0,00	3,23	-0,73
σ_y-min	-1,81929	-1,81928	-1,80513	-1,73807	-0,00055	-0,78	-3,71
σ_y-max	-0,79384	-0,79386	-0,78341	-0,80882	0,00277	-1,31	3,24
σ_z-min	-4,15013	-4,1501	-4,14776	-4,02819	-0,00072	-0,06	-2,88
σ_z-max	-3,92666	-3,92709	-3,97971	-3,93043	0,01095	1,35	-1,24
$\sigma_{xy}-min$	18,9283	18,9284	18,9442	19,1268	0,00053	0,08	0,96
$\sigma_{xy}-max$	20,4323	20,4323	20,4182	2,04E+01	0,00	-0,07	-0,20
$\sigma_{yz}-max$	0,242238	0,242234	0,381976	0,35365	-0,00165	57,69	-7,42
$\sigma_{xz}-min$	-0,60645	-0,60645	-0,38214	-0,36026	0,00	-36,99	-5,73
$\sigma_{xz}-max$	0,582617	0,582645	0,394462	0,360259	0,00481	-32,29	-8,67

На рисунке 34 показаны графики перемещений на линии $\{X=0.5, Y=0, 0 \leq Z \leq 0.785\}$, которая является внутренней образующей цилиндра при $Y=0$. На графиках показаны решения, полученные для четырех расчетных случаев.

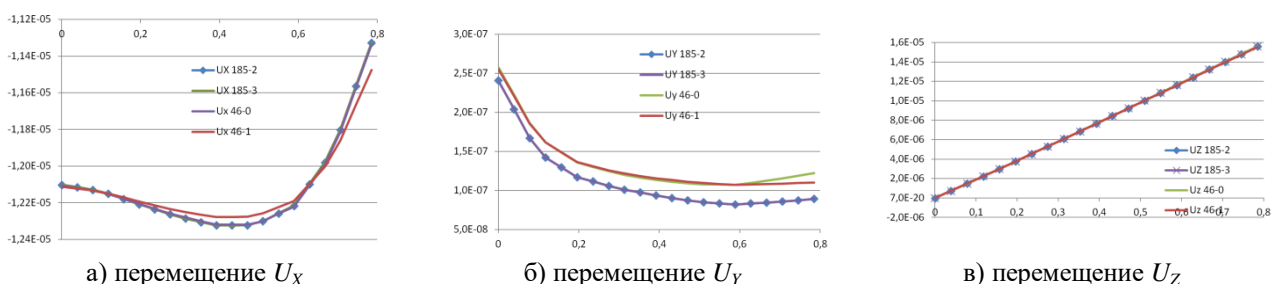


Рисунок 34. Графики перемещений вдоль внутренней образующей цилиндра $\{X=0.5, Y=0, 0 \leq Z \leq 0.785\}$

Аналогичные графики для внешней образующей цилиндра $\{X=0.6, Y=0, 0 \leq Z \leq 0.785\}$ показаны на рисунке 35.

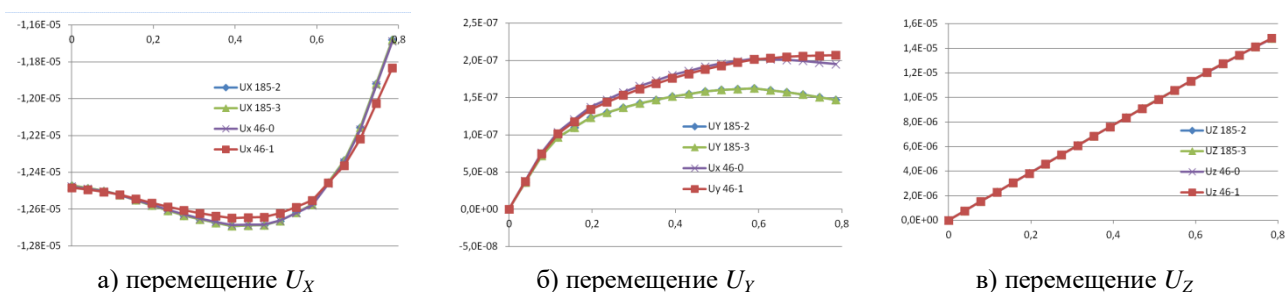


Рисунок 35. Графики перемещений вдоль внешней образующей цилиндра $\{X=0.6, Y=0, 0 \leq Z \leq 0.785\}$

Графики для перемещений U_X и U_Y на рисунках «а» и «б», соответствующих обеим линиям, группируются по элементам *Solid185* и *Solid46*. Графики для перемещений U_Z на рисунках «в» визуально совпадают полностью. Результаты для различных элементов согласуются с точностью до 20%. Следует отметить, что наличие перемещений U_Y на этих линиях означает закручивание цилиндра вокруг оси при действии равномерного внешнего давления и связано с жесткостями поперечного сдвига, которые, как уже отмечалось, для элементов вычисляются по-разному.

Результаты, полученные с помощью элементов *Solid185* с $k2=2$ и $k2=3$, практически совпадают. Максимальное относительное различие наблюдается для компоненты σ_{YZ} и составляет 0,1%. Значительные отличия результатов элементов *Solid185* с $k2=2$ и *Solid46* с $k1=0$ наблюдаются только для напряжений поперечного сдвига σ_{YZ} и σ_{XZ} – до 60%. В данной задаче различия для результатов *Solid46* с $k1=0$ и *Solid46* с $k1=1$ не столь велики – не превышают 10%.

2.3. Цилиндрическая панель, жестко закрепленная по контуру, под действием внешнего давления

Решена задача статического деформирования жестко закрепленной по контуру цилиндрической панели, выполненной из четырехслойного композита с углами укладки $-45^\circ/45^\circ/45^\circ/-45^\circ$ под действием равномерного внешнего давления. Панель вытянута вдоль оси Z , имеет угол раствора 90° (между положительными направлениями осей X и Y). Использовалась сетка $20 \times 18 \times 1$ конечных элементов. Командный файл, выполняющий решение задачи в ANSYS, приведен в приложении 3.

На рисунках 36 и 37 показаны картины распределения перемещений по поверхности цилиндрической панели.

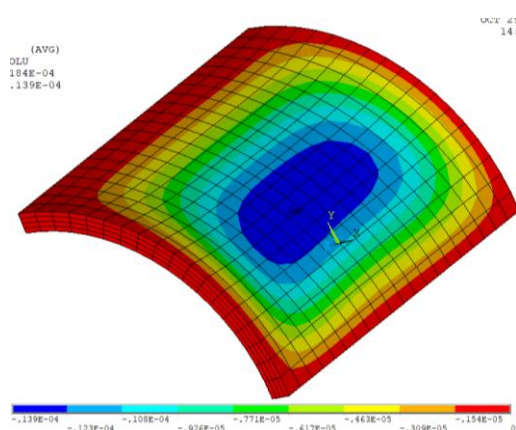


Рисунок 36. Распределение перемещения U_X

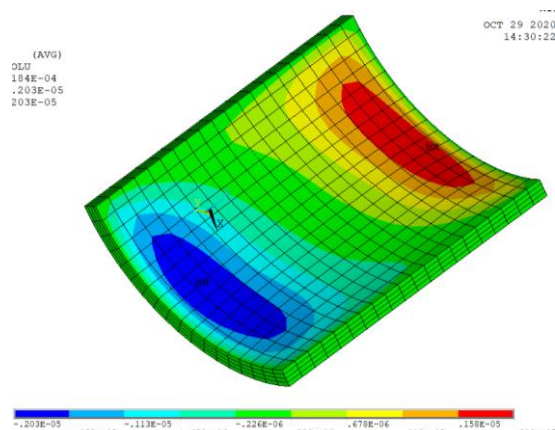


Рисунок 37. Распределение перемещения U_Z

На рисунках 38–43 показаны картины распределения напряжений по поверхности цилиндрической панели.

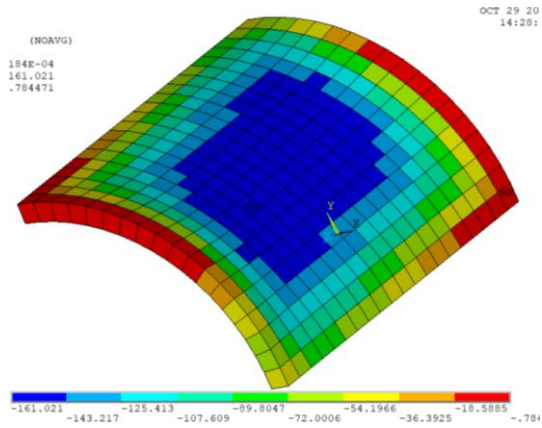


Рисунок 38. Распределение напряжений σ_x

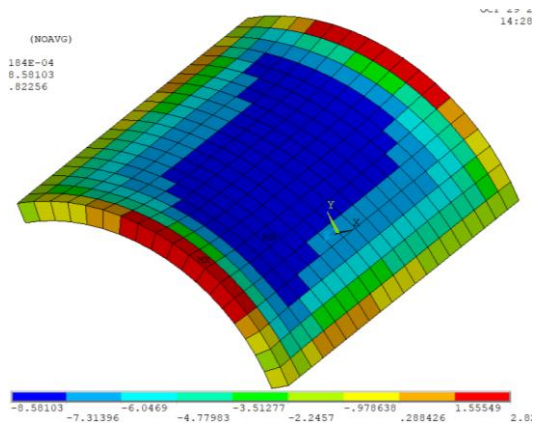


Рисунок 39. Распределение напряжений σ_y

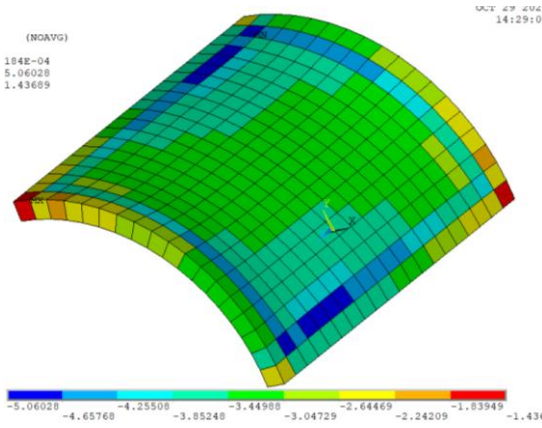


Рисунок 40. Распределение напряжений σ_z

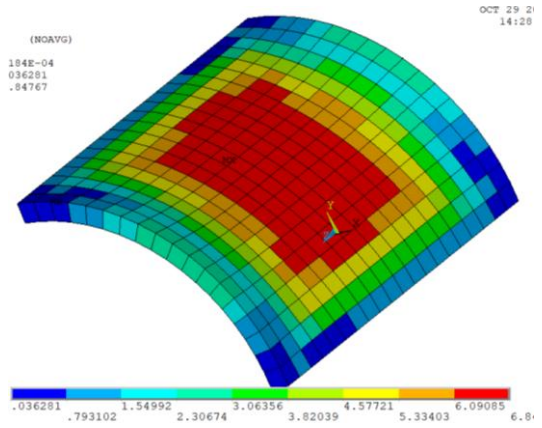


Рисунок 41. Распределение напряжений σ_{xy}

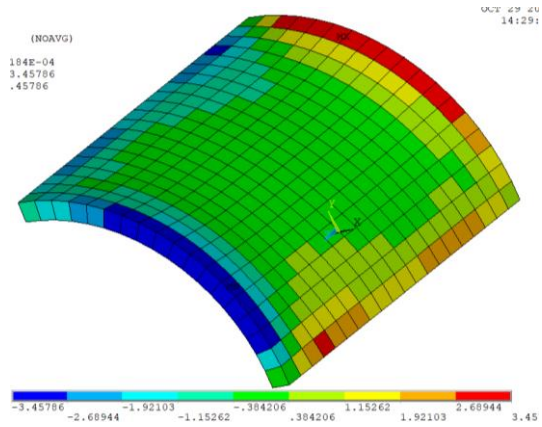


Рисунок 42. Распределение напряжений σ_{yz}

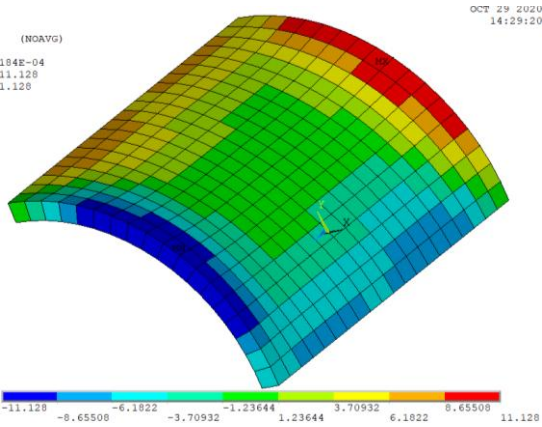


Рисунок 43. Распределение напряжений σ_{xz}

Таблица 6

Сравнение решений для задачи изгиба цилиндрической панели, жестко заделанной по контуру

Величина	<i>Solid185-2</i>	<i>Solid185-3</i>	<i>Solid46-0</i>	<i>Solid46-1</i>	<i>185-3/185-2</i>	<i>46-0/185-2</i>	<i>46-1/46-0</i>
U_{-min}	-1,39E-05	-1,39E-05	-1,37E-05	-1,37E-05	0,000	-1,44	0,00
W_{-max}	2,03E-06	2,03E-06	1,93E-06	1,88E-06	0,000	-4,93	-2,59
σ_x_{-min}	-161,021	-160,987	-158,751	-158,049	-0,021	-1,41	-0,44
σ_x_{-max}	-0,784471	-0,790484	-0,809908	-0,683328	0,767	3,24	-15,63

Таблица 6

Сравнение решений для задачи изгиба цилиндрической панели, жестко заделанной по контуру

Величина	<i>Solid185-2</i>	<i>Solid185-3</i>	<i>Solid46-0</i>	<i>Solid46-1</i>	<i>185-3/185-2</i>	<i>46-0/185-2</i>	<i>46-1/46-0</i>
σ_y -min	-8,58103	-8,57448	-8,45933	-8,36461	-0,076	-1,42	-1,12
σ_y -max	2,82256	2,81992	2,36166	2,16397	-0,094	-16,33	-8,37
σ_z -min	-5,06028	-5,07153	-5,04075	-4,68568	0,222	-0,39	-7,04
σ_z -max	-1,43689	-1,43137	-1,44623	-1,21618	-0,384	0,65	-15,91
σ_{xy} -max	6,84767	6,84848	6,7367	6,69251	0,012	-1,62	-0,66
σ_{yz} -max	3,45786	3,45858	5,69096	6,0461	0,021	64,58	6,24
σ_{xz} -max	11,128	11,1326	7,12349	7,38964	0,041	-35,99	3,74

Для жестко закрепленной по краям цилиндрической панели результаты, полученные с помощью элементов *Solid185* с $k2=2$ и $k2=3$, практически совпадают. Для элементов *Solid185* с $k2=2$ и *Solid46* с $k1=0$ только напряжения поперечного сдвига σ_{yz} и σ_{xz} значительно отличаются, различие составляет 65 и 36% соответственно. А различия для результатов *Solid46* с $k1=0$ и *Solid46* с $k1=1$, как и в предыдущей задаче не велики – не превышают 10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пособии рассмотрено использование только трёхмерных (объёмных) конечных элементов – *SOLID185* и *SOLID46* с опциями различных вариантов конечно-элементных технологий. Применение других типов элементов (таблица 1) может быть рассмотрено самостоятельно.

Проведён анализ результатов расчётов модельных задач для различных вариантов конечно-элементных технологий. Показано, что по некоторым параметрам напряжённого состояния результаты могут различаться.

В приложениях 1-4 приведены командные файлы для ANSYS, с помощью которых можно повторить или провести самостоятельно новые расчёты конструкций из композитов. В приложениях 1-3 содержатся командные файлы задач, решённых в пособии. Приложение 4 позволяет получить элементные таблицы (*Element Table*) для компонент напряжений и по ним получить изображения распределений полей напряжений.

Хотелось бы отметить следующее. Расчет конструкций из композитов является важной и ответственной задачей. В пособии приведены решения задач, полученные с использованием различных конечно-элементных моделей. В общем можно утверждать, что все использованные технологии дают приблизительно одинаковые результаты по перемещениям и напряжениям в плоскости слоев (плоскости армирования). А вот нормальные напряжения по толщине и касательные напряжения поперечного сдвига могут различаться, и довольно значительно. Конечно, можно сказать, что величины этих напряжений не столь велики по сравнению с величинами напряжений, действующих в плоскости армирования. Но ведь и с точки зрения прочности композиты обладают анизотропией, и относительно небольшие по абсолютной величине напряжения сдвига могут оказаться опаснее значительно больших по абсолютной величине напряжений растяжения, действующих вдоль армирующих волокон.

Вопросы для размышления:

Какому же из полученных решений отдать предпочтение?

На основании какого из решений делать вывод о прочности?

Насколько использованные в данном пособии модели являются грубыми?

Означает ли, что ANSYS является недостаточно хорошим расчетным инструментом?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ANSYS. Mechanical APDL Documentation. Release 17.2.
2. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ. – М.:Мир, 1984. – 428 с.
3. ANSYS Elements Reference Release 12.1
<http://docshare04.docshare.tips/files/17204/172048919.pdf>
4. ANSYS Theory Reference Release 5.6

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Командный файл решения задачи изгиба пластины:

```
!Задание параметров
*set,n,40 !число элементов по стороне
*set,h,0.1 !толщина пластины
*set,L,10 !размер пластины

/PREP7

!Для использования элемента SOLID185 снять комментарий
!с секций задания конечного элемента и сечения

ET,1,SOLID185      !задание типа КЭ. Нужно выбрать нужную формулировку
KEYOPT,1,3,1
KEYOPT,1,2,2!Enhanced strain formulation
!KEYOPT,1,2,3      !Simple Enhanced strain formulation
KEYOPT,1,6,0
KEYOPT,1,8,1

SECTYPE,1,SHELL  !задание сечения
SECDATA,0.025,1,-45,3 ! слой 1: толщина 0.025, матер. 1, угол -45, 3 т. интегр.
SECDATA,0.025,1, 45,3 ! слой 2: толщина 0.025, матер. 1, угол 45, 3 т. интегр.
SECDATA,0.025,1, 45,3 ! слой 3: толщина 0.025, матер. 1, угол 45, 3 т. интегр.
SECDATA,0.025,1,-45,3 ! слой 4: толщина 0.025, матер. 1, угол -45, 3 т. интегр.

!Для использования элемента SOLID46 снять комментарий
!с секций задания конечного элемента и реальных констант

!ET,1,SOLID46
!!KEYOPT,1,1,0      ! extra displacement shapes
!KEYOPT,1,1,1      ! no extra displacement shapes
!KEYOPT,1,2,0      ! Постоянная толщина слоев
!KEYOPT,1,3,0      ! Базовый вывод результатов
!KEYOPT,1,4,0      ! Пользовательская функция не используется
                    для задания системы координат элемента
!KEYOPT,1,5,0
!KEYOPT,1,8,1

!R,1,4,0,1,2,,, ! реальные константы
!RMORE, 0, , , ,
!RMORE, 1,-45 ,0.5,1, 45,0.5 !материал, угол, толщина 1 слоя; то же для 2 слоя
!RMORE, 1, 45 ,0.5,1,-45,0.5 !то же для 3 и 4 слоев

!Свойства ортотропного материала
MP,EX,1,25E6
MP,EY,1,1E6
MP,EZ,1,1E6
MP,GXY,1,5E5
```

```

MP,GYZ,1,2E5
MP,GXZ,1,5E5
MP,PRXY,1,0.25
MP,PRYZ,1,0.01
MP,PRXZ,1,0.25

K,1          ! угловые точки при Z=0
K,2,L
K,3,L,L
K,4,,L
KGEN,2,1,4,1,,h    ! копируем угловые точки на h вверх
L,1,5
*REPEAT,4,1,1
LESIZE,ALL,,1
V,1,2,3,4,5,6,7,8

LESIZE, 5, , ,n, , , ,0
LESIZE, 7, , ,n, , , ,0
LESIZE, 9, , ,n, , , ,0
LESIZE, 11, , ,n, , , ,0

LESIZE, 6, , ,n, , , ,0
LESIZE, 8, , ,n, , , ,0
LESIZE, 10, , ,n, , , ,0
LESIZE, 12, , ,n, , , ,0

MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH, 1

! Блок задания граничных условий
! установить и снять комментарий с нужных секций

! Свободное опирание:
! на сторонах запрещены вертикальное и тангенциальное перемещения
! условия закрепления как жесткого целого выполняются
NSEL,S,LOC,X,0
D,ALL,UZ,,,,UY
NSEL,S,LOC,Y,0
D,ALL,UZ,,,,UX
NSEL,S,LOC,X,L
D,ALL,UZ,,,,UY
NSEL,S,LOC,Y,L
D,ALL,UZ,,,,UX

! Жесткое закрепление:
! на сторонах запрещены все перемещения
!NSEL,S,LOC,X,0
!D,ALL, , , , ,ALL, , , ,

```

```
!NSEL,S,LOC,Y,0
!D,ALL,,,,,ALL,,,,
!NSEL,S,LOC,X,L
!D,ALL,,,,,ALL,,,,
!NSEL,S,LOC,Y,L
!D,ALL,,,,,ALL,,,,

NSEL,ALL

SFE,ALL,6,PRES,,1 ! равномерное давление 1

FINISH

/SOLU
SOLVE
FINISH
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Командный файл решения задачи деформирования кругового цилиндра под действием внешнего давления

!Задание параметров

*SET,R,0.5 !внутренний радиус цилиндра

*SET,h,0.1 !толщина цилиндра

*SET,L,1.57*R !длина цилиндра равна 1/4 длине дуги внутренней окружности

/PREP7

!Для использования элемента SOLID185 снять комментарий

!с секций задания конечного элемента и сечения

ET,1,SOLID185 !задание типа КЭ. Нужно выбрать нужную формулировку

KEYOPT,1,2,2!Enhanced strain formulation

!KEYOPT,1,2,3 !Simple Enhanced strain formulation

KEYOPT,1,3,1

KEYOPT,1,6,0

KEYOPT,1,8,1

SECTYPE,1,SHELL !задание сечения

SECDATA,0.025,1,-45,3 ! слой 1: толщина 0.025, матер. 1, угол -45, 3 т. интегр.

SECDATA,0.025,1, 45,3 ! слой 2: толщина 0.025, матер. 1, угол 45, 3 т. интегр.

SECDATA,0.025,1, 45,3 ! слой 3: толщина 0.025, матер. 1, угол 45, 3 т. интегр.

SECDATA,0.025,1,-45,3 ! слой 4: толщина 0.025, матер. 1, угол -45, 3 т. интегр.

!Для использования элемента SOLID46 снять комментарий

!с секций задания конечного элемента и реальных констант

!ET,1,SOLID46

!KEYOPT,1,1,1 ! extra displacement shapes

!!KEYOPT,1,1,1 ! no extra displacement shapes

!KEYOPT,1,2,0 ! Постоянная толщина слоев

!KEYOPT,1,3,0 ! Базовый вывод результатов

!KEYOPT,1,4,0 ! Пользовательская функция не используется

! для задания системы координат элемента

!KEYOPT,1,5,0

!KEYOPT,1,8,1

!R,1,4,0,1,2,,, ! реальные константы

!RMORE, 0, , , ,

!RMORE, 1,-45 ,0.5,1, 45,0.5!материал, угол, толщина 1 слоя; то же для 2 слоя

!RMORE, 1, 45 ,0.5,1,-45,0.5!то же для 3 и 4 слоев

!Свойства ортотропного материала

MP,EX,1,25E6

MP,EY,1,1E6

MP,EZ,1,1E6

MP,GXY,1,5E5

```

MP,GYZ,1,2E5
MP,GXZ,1,5E5
MP,PRXY,1,0.25
MP,PRYZ,1,0.01
MP,PRXZ,1,0.25

CYL4, , ,R,0,R+h,90,L!Генерация объема - четверть полого цилиндра

ESIZE,h,0, !задаем размер конечного элемента h
MSHAPE,0,3D !3D сетка из шестигранников
MSHKEY,1 !типа mapped - регулярная

VEORIENT,1,AREA,3, !переориентация объема

VMESH, 1 !построение сетки в объеме 1

CSYS,1 !активна цилиндрическая система координат
VGEN,4,1, , , ,90, , ,0 !копируем построенный объем
! !всего 4 копии - целый цилиндр

NUMMRG,NODE, , , ,LOW !отождествляем узлы с одинаковыми координатами
NUMCMP,NODE !перенумеруем узлы

FLST,2,4,5,ORDE,4
FITEM,2,1
FITEM,2,7
FITEM,2,13
FITEM,2,19
/GO
DA,P51X,UZ, !задаем условие UZ=0 на торце

D, 1, , , , ,UY, , , , !закрепляем цилиндр от смещений UY
D,209, , , , ,UY, , , , !и вращения вокруг оси Z
D, 13, , , , ,UX, , , , !и смещения UX

FLST,2,4,5,ORDE,4
FITEM,2,3
FITEM,2,9
FITEM,2,15
FITEM,2,21
/GO
SFA,P51X,1,PRES,7 !внешнее давление

CSYS,0!активна декартова система координат

FINISH

/SOL
SOLVE
FINISH

```

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Командный файл решения задачи изгиба цилиндрической панели, жестко заделанной по контуру, под действием внешнего давления

!Задание параметров

*SET,R,1 !внутренний радиус панели

*SET,h,0.1 !толщина

*SET,L,2 !длина панели

/PREP7

!Для использования элемента SOLID185 снять комментарий

!с секций задания конечного элемента и сечения

ET,1,SOLID185 !задание типа КЭ. Нужно выбрать нужную формулировку

KEYOPT,1,2,2!Enhanced strain formulation

!KEYOPT,1,2,3 !Simple Enhanced strain formulation

KEYOPT,1,3,1

KEYOPT,1,6,0

KEYOPT,1,8,1

SECTYPE,1,SHELL !задание сечения

SECDATA,0.025,1,-45,3 ! слой 1: толщина 0.025, матер. 1, угол -45, 3 т. интегр.

SECDATA,0.025,1, 45,3 ! слой 2: толщина 0.025, матер. 1, угол 45, 3 т. интегр.

SECDATA,0.025,1, 45,3 ! слой 3: толщина 0.025, матер. 1, угол 45, 3 т. интегр.

SECDATA,0.025,1,-45,3 ! слой 4: толщина 0.025, матер. 1, угол -45, 3 т. интегр.

!Для использования элемента SOLID46 снять комментарий

!с секций задания конечного элемента и реальных констант

!ET,1,SOLID46

!KEYOPT,1,1,1 ! extra displacement shapes

!!KEYOPT,1,1,1 ! no extra displacement shapes

!KEYOPT,1,2,0 ! Постоянная толщина слоев

!KEYOPT,1,3,0 ! Базовый вывод результатов

!KEYOPT,1,4,0 ! Пользовательская функция не используется

! для задания системы координат элемента

!KEYOPT,1,5,0

!KEYOPT,1,8,1

!R,1,4,0,1,2,,, ! реальные константы

!RMORE, 0, , , , ,

!RMORE, 1,-45,0.5,1, 45,0.5!материал, угол, толщина 1 слоя; то же для 2 слоя

!RMORE, 1, 45,0.5,1,-45,0.5!то же для 3 и 4 слоев

!Свойства ортотропного материала

MP,EX,1,25E6

MP,EY,1,1E6

MP,EZ,1,1E6

MP,GXY,1,5E5


```

MP,GYZ,1,2E5
MP,GXZ,1,5E5
MP,PRXY,1,0.25
MP,PRYZ,1,0.01
MP,PRXZ,1,0.25

!Генерация объема - четверть полого цилиндра
CYL4, , ,R,0,R+h,90,L

ESIZE,h,0,      !задаем размер конечного элемента h
MSHAPE,0,3D      !3D сетка из шестигранников
MSHKEY,1      !типа mapped - регулярная

VEORIENT,1,AREA,3,      !переориентация объема

VMESH, 1      !построение сетки в объеме 1

DA, 1,ALL      !задание жесткой заделки на
DA, 6,ALL,      !боковых гранях панели
DA, 5,ALL,
DA, 2,ALL,

SFA, 3,1,PRES,7 !задание равномерного давления =1 на внешней поверхности панели

FINISH

/SOL
SOLVE!решение
FINISH

```

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

С помощью командного файла, приведенного ниже, можно получить элементные таблицы (*Element Table*) для компонент напряжений для первого слоя в системе координат монослоя. Легко настроить для вывода в любой другой доступной системе координат. При выводе на модели будут отображаться ребра конечных элементов.

```
/POST1
RSYS,SOLU
AVPRIN,0
! AVRES,2,
! /EFACET,1
LAYER,1           !здесь задать номер слоя
FORCE,TOTAL
!*
AVPRIN,0,,
ETABLE,,S,X
!*
AVPRIN,0,,
ETABLE,,S,Y
!*
AVPRIN,0,,
ETABLE,,S,Z
!*
AVPRIN,0,,
ETABLE,,S,XY
!*
AVPRIN,0,,
ETABLE,,S,YZ
!*
AVPRIN,0,,
ETABLE,,S,XZ
!*
!*
/EDGE,1,1,45
/GLINE,1,0
!
!*

PLETAB,SX,NOAV ! команда отображения элементной таблицы
!PLETAB,SY,NOAV
!PLETAB,SXY,NOAV
!PLETAB,SZ,NOAV
!PLETAB,SYZ,NOAV
!PLETAB,SXZ,NOAV
```

Александр Васильевич **Жидков**
Николай Васильевич **Леонтьев**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИТОВ В СРЕДЕ ANSYS
С ПОМОЩЬЮ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СЛОИСТОГО
КОНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА**

Учебно-методическое пособие

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского».
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.