

# МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ ABAQUS ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ И РАССЛОЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, НА ОСНОВЕ УТОЧНЕННОГО МНОГОСЛОЙНОГО ВОСЬМИУЗЛОВОГО КЭ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

Гондлях А.В., д.т.н., профессор

*Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев, Украина*

## Введение

Особенностью деформирования пространственных конструкций из композитных материалов является возможность возникновения не только трещин, обусловленных разрывом волокон и материала матрицы, но также и образование в процессе деформирования зон расслоения. Вследствие этих процессов, даже начально однородная композитная конструкция превращается в многослойную систему. Поскольку толщины отслоившихся участков, зачастую, малы по сравнению с размерами их в плане, использование стандартных 3D конечных элементов в этих случаях, как правило, приводит к возникновению численной неустойчивости решений. Использование оболочечных и трехмерных многослойных КЭ не позволяет моделировать неоднородность распределения деформаций поперечного сдвига и растяжения по толщине зон расслоений в связи с наложенными ограничениями на функции аппроксимации.

Поэтому, для моделирования процессов расслоения и разрушения конструкций из композитов, в среде ABAQUS на основании итерационно-аналитической теории [1] разработан и численно реализован специальный восьмиузловой изопараметрический многослойный конечный элемент пользователя (USER\_IAT\_3D\_FE) [2].

Для конструкций, выполненных из композиционных материалов, наличие более или менее значительных зон разрушения если и не является нормальным явлением, то, по крайней мере, далеко не всегда приводит к фатальным последствиям. Однако, при проектировании ответственных объектов, наличие подобных зон должно быть учтено, а также проанализирована возможность их дальнейшего развития и влияния на несущую способность конструкции в целом.

В связи со сложностью физических процессов, протекающих на микроуровне при разрушении композитных материалов (разрушение матрицы, волокон, пограничного слоя, влияние конструктивных дефектов, дислокационные явления и т.п.), описание работы конструкций выполненных на их основе, с требуемой для инженерной практики степенью достоверности возможно при помощи феноменологических критериев прочности. Главным преимуществом феноменологического подхода является интегральный учет всех факторов, влияющих на процесс разрушения композитов, а основным положением - зависимость прочности материала лишь от уровня достигнутого напряженно - деформированного состояния, через параметры которого записываются функции прочности. Нарушение феноменологических критериев прочности приводит к переходу материала в предельное состояние. Для однозначного определения этих функций требуются данные о прочностных характеристиках композита, которые могут быть получены экспериментально (пределы прочности материала в условиях простых напряженных состояний в случаях статического, либо динамического нагружения).

Исчерпание прочности отдельных слоев композита не всегда сказывается на текущем напряженном состоянии всей конструкции, а иногда даже с трудом обнаруживается экспериментально, но может существенно повлиять на дальнейшее поведение исследуемого объекта при условии, что зона разрушения будет прогрессировать. Это обуславливает актуальность разработки аппарата численного моделирования эволюции послойного разрушения, как отдельных элементов многослойного пакета слоев, так и всей конструкции в целом.

На основании этого в настоящей работе применяется, так называемый, структурно-феноменологический подход [3], предполагающий исследование прочности каждого слоя в отдельности, а не пакета в целом. Естественность такого подхода становится очевидной в весьма распространенном случае, когда конструкция набирается из разнородных слоев, прочностные характеристики которых не могут быть описаны на основании какой-либо одной теории прочности. В известной степени в этом случае могут прийти на помощь специальные критерии, разработанные для многослойных систем и, несомненно, имеющие широкую область применения. Однако структурно-феноменологический подход, находясь на более высокой степени детализации, позволяет исследовать послойное разрушение конструкций, что очень важно в целом ряде случаев. Более того, иногда разрушение одного какого-либо слоя может не оказать существенного влияния на работу конструкции в целом, как из прочностных, так и из технологических соображений, в то время как разрушение элемента другого слоя может привести к катастрофическим последствиям. Необходимо отметить и тот важный факт, что история трещинообразования в слоях, как правило, существенно сказывается на окончательной картине разрушения конструкции.

## 1. Процедура учета трещин в многослойном уточненном КЭ

В настоящей работе процесс трещинообразования моделируется по аналогии с [3] и интерпретируется как приобретение материалом в некоторой локальной области специфических анизотропных свойств, обусловленных влиянием появившихся трещин на напряженно-деформированное состояние конструкции (рис.1). Характерной особенностью этой методики моделирования трещин является не простое обнуление тех или иных компонент тензора напряжений, а коррекция тензора физико-механических констант разрушенной области на основе статических гипотез, принимаемых в зависимости от вида разрушения. Такой подход, является более обоснованным, по сравнению с известными подходами обнуления тех, либо иных компонент тензора физико-механических характеристик материала слоев, поскольку в этом случае полностью сохраняется физический смысл процесса образования зон разрушения.

Из-за отсутствия универсального критерия прочности и существенного различия прочностных свойств композиционных материалов ориентация на какую-либо одну теорию прочности может неоправданно сузить класс рассматриваемых задач, поэтому будем предполагать возможность использования любой поверхности разрушения, уравнение которой однозначно формулируется в пространстве напряжений или деформаций. Такой подход позволяет оперативно менять условия прочности в зависимости от вида применяемого материала, тем более что в пакете могут оказаться слои, прочностные свойства которых описываются разными критериями.

При построении модели физически нелинейного деформирования слоев конструкции будем исходить из основных положений теории пластического течения с трансляционным изотропным упрочнением.

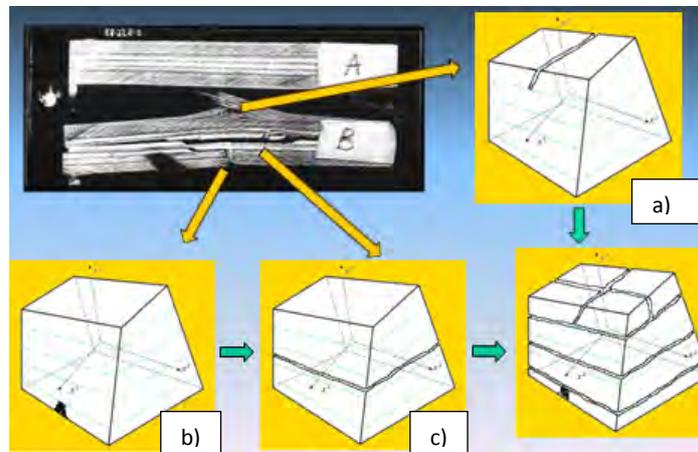


Рис. 1 – Схемы разрушения многослойного КЭ:  
а) – разрыв слоя; в) – смятие слоя; с) – сдвиг слоя

## 2. Коррекция функций приведения и матрица жесткости КЭ с учетом образовавшихся трещин

Важным самостоятельным этапом численной реализации исследования эволюции физически нелинейных процессов и разрушения, протекающих в композитных многослойных системах, на основе положений МКЭ является линейризация МЖ на каждом шаге нагружения с учетом реальной диаграммы работы материала слоев и образовавшихся трещин. В настоящей работе на основании положений построение МЖ элемента, слои которого претерпевают пластические деформации, осуществляется с использованием мгновенного тензора констант деформирования  $C_{cm}^{ijkl}$ . Причем, последний вычисляется с учетом текущих значений физико-механических характеристик слоев, принимаемых из реальных диаграмм, полученных путем ряда экспериментов.

При построении МЖ элемента с трещинами будем исходить из следующих предпосылок. Положим, что по достижении отдельными слоями КЭ предельных значений напряжений (после выполнения условия разрушения слоя), они перестают сопротивляться растяжению и изгибу. Полный вывод выражения для вычисления коэффициентов матрицы жесткости многослойного восьмиузлового изопараметрического КЭ с трещинами в отдельных слоях приведен в работе [3]. Запишем окончательное выражение вариации функционала энергии деформирования многослойного р-го КЭ:

$$\begin{aligned} \delta \bar{w}_p^f &= \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^8 \sum_{r=1}^8 G_{rtsf}^{k'q'm} u_{k'}^{s(t)} \delta u_{q'}^{f(r)} = \\ &= \sum_{t=1}^8 \sum_{r=1}^8 \left[ \sum_{m=1}^{M-M_t} G_{rtsf}^{k'q'm} + \sum_{m=M_t}^M \Gamma_{rtsf}^{k'q'm} \right] u_{k'}^{s(t)} \delta u_{q'}^{f(r)}, \end{aligned}$$

где  $M_t$  - количество разрушенных слоев.

$G_{rtsf}^{k'q'm}$  - коэффициенты МЖ неразрушенных слоев р-го КЭ,

$\Gamma_{rtsf}^{k'q'm}$  - коэффициенты МЖ р-го КЭ с разрушенными слоями.

Как известно, наиболее эффективным при решении нелинейных задач, является использование шагово-итерационных методов. В настоящей работе для решения физически и геометрически нелинейных задач с учетом трещинообразования реализован шагово-итерационный алгоритм последовательных нагружений, основанный на модифицированном методе Ньютона - Канторовича.

Переформирование матрицы жесткости (метод переменных жесткостей) выполняется в начале очередного шага по нагрузке (с учетом деформированной расчетной схемы конструкции) и после каждого этапа "нанесения" трещин (для учета анизотропии, обусловленной трещинообразованием) вместе с итерационно-аналитическим методом переменных аппроксимаций (для переопределения функций разложения вектора перемещений по толщине пакета слоев конструкции с учетом образовавшихся трещин) (рис. 2).

Моделирование пластической работы материала осуществляется в процессе итераций по методу дополнительных нагрузок.

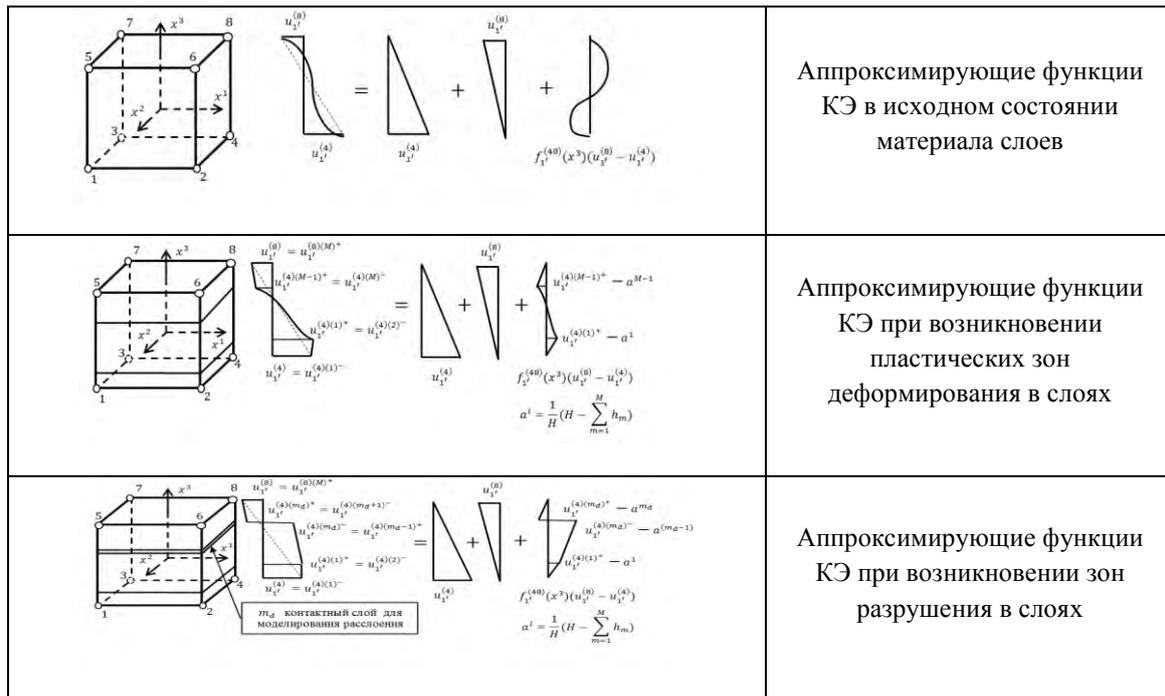


Рис.2 – Итерационно-аналитическая коррекция функций аппроксимации компонент вектора перемещений КЭ в зависимости от физически нелинейных процессов, протекающих в материале слоев при деформировании конструкции

### 3. Определение области применения разработанного КЭ при исследовании процессов разрушения и пластического деформирования многослойных конструкций

Данный КЭ был разработан в системе Автоматизации Прочностных Расчетов Оболочечных и Комбинированных Систем (АПРОКС). Практика использования этого КЭ при решении большого числа тестовых и прикладных задач показала его эффективность при исследовании процессов нелинейного деформирования и разрушения, однородных по толщине и многослойных пространственных конструкций.

В настоящее время на основе приведенных выше соотношений в среде ABAQUS разработан конечный элемент пользователя USER\_IAT\_3D и алгоритм моделирования основе этого КЭ процессов нелинейного деформирования и прогрессирующего разрушения материала слоев пространственных конструкций.

#### 1.1. Апробация возможности моделирования расслоения при изгибе пакета слоев на основе USER\_IAT\_3D КЭ

Возможность моделирования процесса расслоения многослойных конструкций, на базе разработанного уточненного USER\_IAT\_3D элемента рассмотрена на примере модельной задачи об исследовании деформирования трехслойной свободно опертой балки с тонким средним слоем, находящейся в условиях изгиба.

Геометрические параметры балки: длина -  $L = 20$ ; общая высота -  $H = 1$ ; ширина -  $B = 1$ ; толщина нижнего слоя -  $t_1 = 0,499$ ; толщина среднего слоя -  $t_2 = 0,002$ ; толщина верхнего слоя -  $t_3 = 0,499$ ;

Физико-механические характеристики верхнего и нижнего слоев:  $E_1 = E_3 = 1.0 \cdot 10^6$ ;  $\nu = 0$ ;

Модуль упругости среднего слоя варьировался в диапазоне:

$E_2 = 1.0 \cdot 10^5 \div 1.0 \cdot 10^{-4}$ ;  $\nu = 0$ .

Балка нагружена сосредоточенной силой  $P = 1$ , приложенной в середине пролета балки.

Для оценки достоверности результатов, полученных на основе разработанного уточненного USER\_IAT\_3D элемента, параллельно была проведена серия численных экспериментов по расчету этой конструкции на основании трехмерных КЭ в рамках системы АПРОКС.

Независимо выполнены расчеты балки на базе использования, многослойного оболочечного КЭ ABAQUS Multilayer\_S4R и трехмерного многослойного элемента ABAQUS Multilayer\_C3D8I. На рис. 6 приведены результаты исследований, отражающие зависимость изменения прогиба центральной точки балки в зависимости от уровня модуля упругости среднего слоя.

На рис. 3 приведены результаты исследований, отражающие зависимость изменения прогиба центральной точки балки в зависимости от уровня модуля упругости среднего слоя.

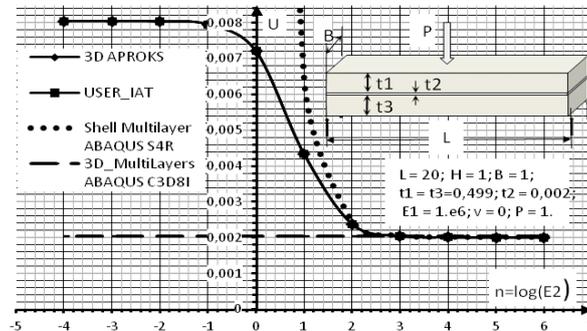


Рис. 3 – Изменение прогиба в центре свободно опертой балки в зависимости от уровня модуля упругости среднего тонкого слоя

В результате расчетов установлено, что при изменении жесткости среднего слоя на два порядка по отношению к жесткости внешних слоев, определение напряженно-деформированного состояния подобного рода конструкций необходимо производить с учетом фактора неоднородного распределения деформаций поперечного сдвига по толщине пакета слоев.

При изменении жесткости среднего слоя на шесть порядков и более внешние слои начинают работать независимо друг от друга. Данные расчета напряженно-деформированного состояния балки, полученные по предлагаемому уточненному USER\_IAT\_3D элементу, теории полностью согласуются с результатами трехмерного и теоретического расчетов, в то время как применение многослойных оболочечных и трехмерных элементов из библиотеки ABAQUS отражают правильную схему деформирования балки только в диапазоне малых значений параметра неоднородности деформаций поперечного сдвига.

### 3.2. Апробация возможности моделирования расслоения слоев при отрыве на основе USER\_IAT\_3D КЭ.

Возможность моделирования процесса расслоения многослойных конструкций, на базе разработанного уточненного USER\_IAT\_3D элемента рассмотрена на примере модельной задачи об исследовании деформирования пятислойной жестко зашпеленной консольной балки с тонким средним слоем, находящейся под действием равномерно распределенной на лицевых поверхностях нагрузки (рис. 4).

Геометрические параметры балки: длина -  $L = 10$ ; общая высота -  $H = 1$ ; ширина -  $B = 1$ ; толщина верхнего и нижнего слоя -  $h_1 = h_5 = 1/3$ ; толщина внутренних слоев -  $h_2 = h_3 = h_4 = 1/6$ ;

Физико-механические характеристики всех слоев в исходном состоянии:  $E = 1.0 \cdot 10^6$ ;  $\nu = 0$ ;

Модуль упругости среднего слоя варьировался в диапазоне:

$E_0 = 1.0 \cdot 10^6 \div 1.0 \cdot 10^{-5}$ ;  $\nu = 0$ .

Интенсивность распределенной нагрузки:  $Q = 1$ .

Для оценки достоверности результатов, полученных на основе разработанного уточненного USER\_IAT\_3D элемента, параллельно была проведена серия численных экспериментов по расчету этой конструкции на основании трехмерных КЭ в рамках системы АПРОКС.

Независимо выполнены расчеты балки на базе использования, многослойного оболочечного КЭ ABAQUS Multilayer\_S4R и трехмерного многослойного элемента ABAQUS Multilayer\_C3D8I.

На рис. 4 приведены результаты исследований, отражающие зависимость изменения раскрытия свободного торца жестко зашпеленной пятислойной балки в зависимости от уровня модуля упругости  $E_0$  среднего тонкого слоя

В результате исследования установлено, что при изменении жесткости среднего слоя на пять порядков и более по отношению к жесткости внешних слоев, определение напряженно-деформированного состояния подобного рода конструкций необходимо производить с учетом фактора неоднородного распределения деформаций обжатия по толщине пакета слоев конструкций.

При изменении жесткости среднего слоя на восемь порядков и более внешние слои начинают работать независимо друг от друга. Данные расчета напряженно-деформированного состояния балки, полученные по предлагаемому

уточненному USER\_IAT\_3D элементу, теории полностью согласуются с результатами трехмерного и теоретического расчетов, в то время как применение многослойных оболочечных и трехмерных элементов из библиотеки ABAQUS отражают правильную схему деформирования балки только в диапазоне малых значений параметра неоднородности деформаций обжатия.

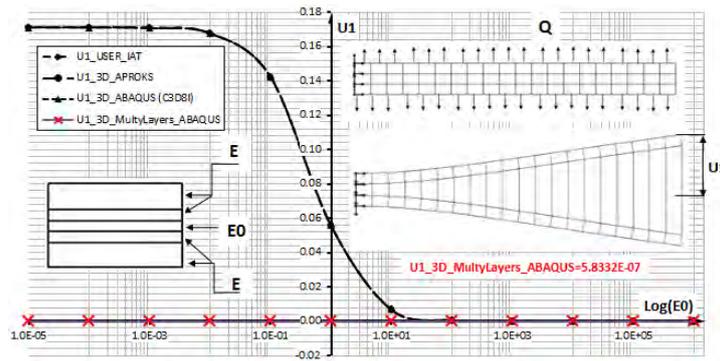


Рис.4 – Изменение раскрытия свободного торца жестко защемленной пятислойной балки в зависимости от уровня модуля упругости  $E_0$  среднего тонкого слоя

## 1.2. Аprobация алгоритма моделирования процессов разрушения многослойных конструкций на основе USER\_IAT\_3D КЭ.

Аprobация моделирования процессов разрушения многослойных конструкций, на базе разработанного уточненного USER\_IAT\_3D элемента рассмотрена на примере модельной задачи нелинейного деформирования на разрыв девятислойного металло-композитного компактного образца с центральным отверстием. Образец состоит из трех алюминиевых слоев, двух композитных слоев и трех адгезионных слоев (рис. 5).

Геометрические параметры образца: длина -  $L = 101.6$  мм; ширина -  $W = 50.8$  мм; толщина алюминиевого слоя -  $0.34$  мм; толщина композитного слоя -  $0.458$  мм; толщина адгезионного слоя -  $0.034$  мм.

Диаметр центрального отверстия -  $12.7$  мм.

Физико-механические характеристики алюминиевых слоев:  $E = 7.0 \cdot 10^4$  МПа;  $\nu = 0.33$ ;

Физико-механические характеристики композитных слоев:

$E_{11} = 46400$  МПа,  $E_{22} = 46400$  МПа,  $E_{33} = 63430$  МПа,

$\nu_{12} = 0.01$ ,  $\nu_{13} = 0.02$ ,  $\nu_{23} = 0.318$ ,

$G_{12} = 12000$  МПа,  $G_{13} = 12000$  МПа,  $G_{23} = 16410$  МПа.

Пределы прочности композитных слоев:

$\sigma_{11} = 402$  МПа,  $\sigma_{22} = 402$  МПа,  $\sigma_{33} = 550$  МПа,

$\sigma_{12} = 400$  МПа,  $\sigma_{13} = 400$  МПа,  $\sigma_{23} = 400$  МПа;

Физико-механические характеристики адгезионных слоев:

$E = 46400$  МПа,  $\nu = 0.39$ ,

Пределы прочности адгезионных слоев:

$\sigma_{11} = 402$  МПа,  $\sigma_{22} = 402$  МПа,  $\sigma_{33} = 402$  МПа.

$\sigma_{12} = 150$  МПа,  $\sigma_{13} = 150$  МПа,  $\sigma_{23} = 150$  МПа.

Образец нагружен растягивающей равномерно распределенной нагрузкой на торцах в направлении длины образца.

В расчетной схеме учтены все плоскости симметрии (рис. 6)

Для оценки достоверности результатов, полученных на основе разработанного уточненного USER\_IAT\_3D элемента, параллельно была проведена серия численных экспериментов по расчету этой конструкции на основании трехмерных КЭ в рамках системы АПРОКС.

Независимо выполнены расчеты образца на базе многослойного оболочечного КЭ ABAQUS Multilayer\_S4R и трехмерного многослойного элемента ABAQUS Multilayer\_C3D8I (рис. 7).

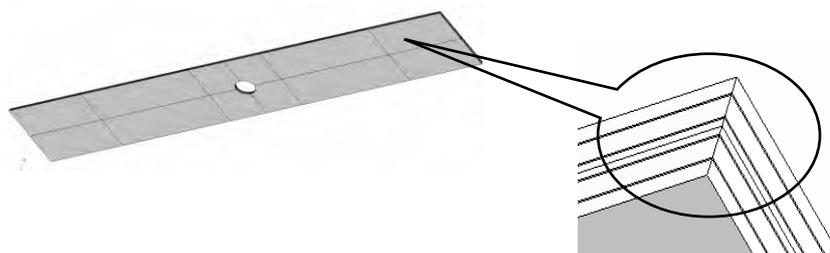


Рис. 5 – Девятислойный композитный образец

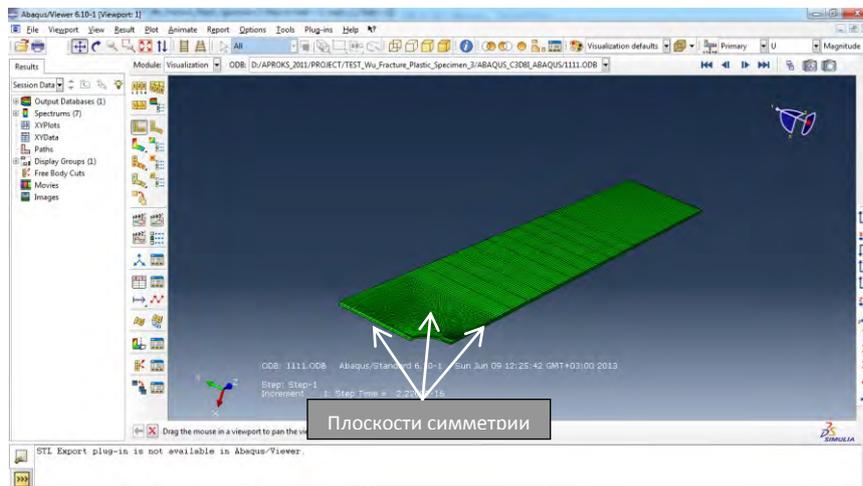


Рис. 6 – Расчетная схема девятислойного композитного образца.

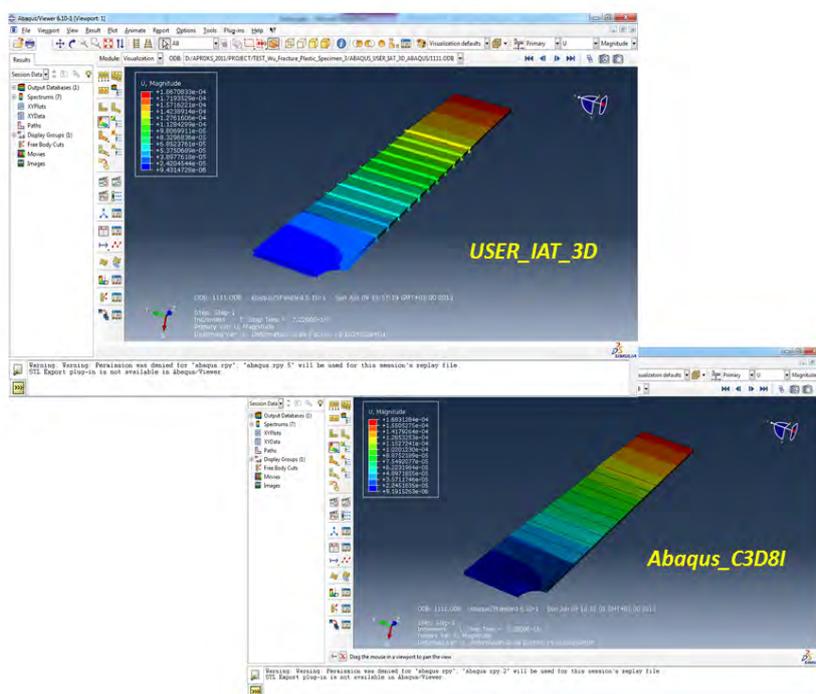


Рис. 7. – Сравнительный анализ результатов линейного расчета образца с использованием USER\_IAT\_3D и C3D8I КЭ

В результате численного моделирования процесса разрушения образца установлено, что зарождение повреждений начинается в средних адгезионных слоях на границе отверстия в зоне максимальных касательных напряжений (рис. 8).

Развитие этих зоны приводит возникновению зоны расслоения в области отверстия и возникновению зон пластического деформирования в алюминиевых слоях (рис. 9).

Эволюция дальнейшего развития зон расслоения в адгезионных слоях и зон пластических деформаций в алюминиевых слоях приводит к возникновению магистральной трещины в композитном слое (рис. 10).

Дальнейшее развитие магистральных трещин в композите, расслоение в адгезионных слоях и достижение критических деформаций в зонах физически нелинейного деформирования алюминиевых слоев приводит к возникновению сквозных трещин в алюминиевых слоях (рис. 11). В конечном счете, эти процессы приводят к полному исчерпанию несущей способности компактного многослойного образца.

Сравнение результатов численного моделирования нелинейного деформирования и разрушения образца с экспериментальными данными свидетельствует об их хорошем согласовании по параметрам последовательности образования зон разрушения и расслоения материала слоев, пластического деформирования слоев, диаграмме "нагрузка-прогиб".

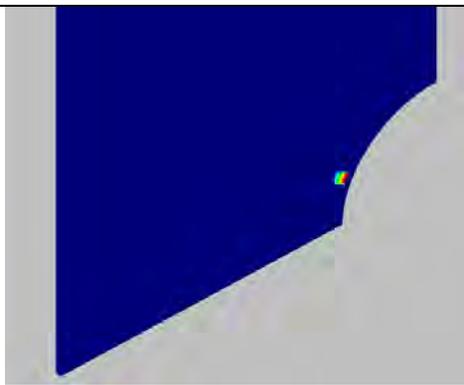


Рис. 8 – Зарождение зоны расслоения в адгезионном слое

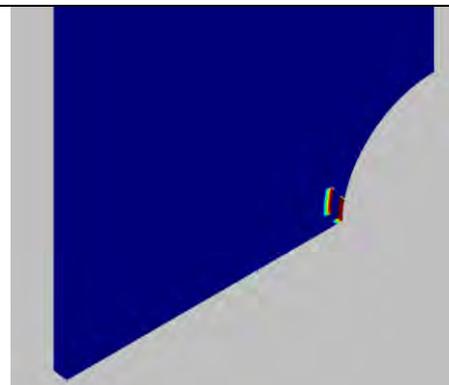


Рис. 9 – Возникновение зон пластичности в алюминиевых слоях

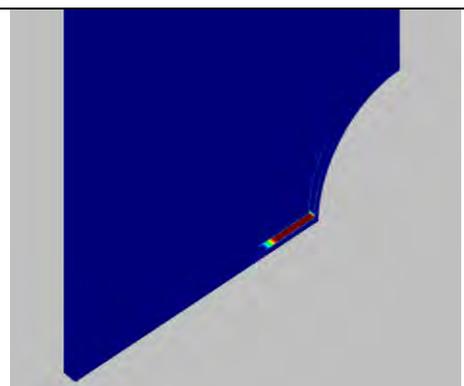


Рис. 10 – Сквозная трещина отрыва в композитном слое

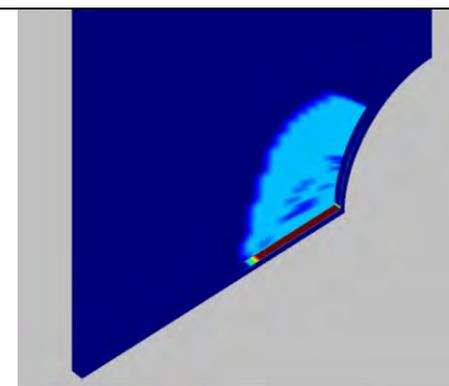


Рис.11 – Характерная картина разрушения образца при продвижении сквозной трещины в композите

## Выводы

Для моделирования процессов расслоения и разрушения конструкций из композитов, в среде ABAQUS на основании итерационно-аналитической теории разработан и численно реализован специальный восьмиузловой изопараметрический многослойный конечный элемент пользователя (USER\_IAT\_3D).

Разработан новый экономичный и универсальный алгоритм, состоящий из четырех основных блоков:

- 1) блока, реализующего интегрирование по параметру нагружения;
- 2) блока, обеспечивающего вычисление "дополнительных нагрузок";
- 3) блока, реализующего метод переменных жесткостей;
- 4) блока, реализующего итерационно-аналитический метод переменных аппроксимаций (рис. 2).

Сравнение результатов численных решений контрольных задач с аналитическими решениями и экспериментальными данными свидетельствует об их хорошем согласовании по параметрам последовательности распространения зон разрушения и расслоения материала слоев, пластического деформирования слоев, диаграммам "нагрузка-прогиб" и т.п.

## Литература

1. А.В. Гондлях Уточненная модель деформирования многослойных конструкций для исследования процессов прогрессирующего разрушения // «Восточно-Европейский журнал передовых технологий» № 2/7 (56), 2012, стр. 52-57.
2. А.В. Гондлях Адаптация итерационно - аналитического многослойного конечного элемента в систему ABAQUS // «Восточно-Европейский журнал передовых технологий». № 3/7 (57), 2012, стр. 62-68.
3. Баженов В. А., Сахаров А. С., Гондлях А.В., Мельников С. Л. Нелинейные задачи статики и динамики многослойных оболочек. - К.: НИИ Строймеханики, 1994, 264 с.