

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЛОЕНИЯ В КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СТАТИЧЕСКИХ И ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК ПОСЛЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ

Чиара Бисаньи¹, Пьетро Брамбилла², Карлос Давила³

¹Миланский политехнический университет, кафедра аэрокосмической техники,
Виа Ла Маса 34, 20156 Милан, Италия,

в настоящее время находится в Университете Сан Диего, Калифорния, на кафедре проектирования сооружений, 9500 Гилман Драйв, Ла Жолла, Калифорния, США

²Миланский политехнический университет, кафедра аэрокосмической техники,
Виа Ла Маса 34, 20156 Милан, Италия

³NASA, Исследовательский центр им. Лэнгли, отдел строительной механики и проектов, Хэмптон, Вирджиния 23681, США

АННОТАЦИЯ

Для статических, закритических и переменных нагрузок исследована реализованная в пакете ABAQUS поступательная методика закрытия виртуальной трещины (МВЗТ), предназначенная для моделирования расслоения в композитных конструкциях. Предварительные оценки выполнялись с использованием образца типа «двойная консольная балка» (ДКБ) и образца для исследования смешанного изгиба (СИ). Исследованы последовательности узлового расщепления, отражающего распространение фронта расслоения. Эффект от использования внезапного и постепенного узлового расщепления был оценен с использованием как выровненных, так и не выровненных вдоль фронта трещины конечно-элементных сеток. После этого были выполнены усталостное моделирование с использованием алгоритма прямого циклического нагружения (ПЦН). Установлено, что для образцов типа ДКБ, которые характеризуются практически линейным откликом и чистым видом излома, алгоритм точно предсказывает скорость распространения в соответствии с законом Париса. Тем не менее, алгоритм ПЦН не учитывает различные законы распространения при различных видах излома. В заключительной части работы изучено расслоение на границе обшивки и стрингера фрагмента фюзеляжа летательного аппарата, в котором расслоение переходит в закритические деформации. Показано, что МВЗТ является робастным инструментом для определения начала распространения расслоения. Тем не менее, были обнаружены трудности в текущей реализации поступательной МВЗТ в ABAQUS при прогнозировании распространения расслоения внутри конструкций, подверженных закритическим деформациям или переменным нагрузкам.

1 ВВЕДЕНИЕ

Чтобы спроектировать устойчивую к повреждению композитную конструкцию, необходимо иметь подробное представление о механизмах усталости и повреждения, которые могут привести к ее разрушению. Следовательно, возможность прогнозирования усталостной долговечности конструкции и распространения трещин в

ней в соответствии с принятыми принципами проектирования является первостепенной. За последние годы были проведены несколько исследований, посвященных разработке методик, которые могут учитывать эффект закритических деформаций при возникновении и распространении повреждения [1-3].

Из-за малой межслойной прочности расслоение является наиболее распространенным и критичным видом повреждения в слоистых композитах, армированных волокнами [4,5]. Расслоения обычно возникают в местах с нерегулярной геометрией или там, где имеются технологические дефекты.

Возникновение и распространение расслоения может быть спрогнозировано с использованием основных положений механики линейно-упругой трещины, согласно которым энергия, требуемая для образования единицы поверхности трещины, является постоянной величиной, которая зависит только от материала [5]. Это свойство материала, обозначаемое G_c , называется вязкостью разрушения.

Наиболее распространенным численным методом для вычисления скорости высвобождения энергии (СВЭ) G является МВЗТ [6]. Используя метод конечных элементов (МКЭ), скорость высвобождения энергии может быть легко вычислена через узловое усилие в вершине трещины и перемещения узлов, расположенных непосредственно за вершиной. Если СВЭ G , вычисленная в любой точке, принадлежащей фронту расслоения, больше, чем вязкость разрушения материала, то расслоение считается склонным к распространению. Была показана пригодность метода для изучения расслоения как в образцах, так и сложных конструкциях [5,6]. Основное ограничение МВЗТ заключается в том, что СВЭ обычно не является постоянной вдоль фронта расслоения, и определение протяженности расслоения обычно не представляется возможным без пересоздания сетки конечных элементов (КЭ) методом проб и ошибок [6].

Предложенный Мэбсоном и др. в работе [7] КЭ, реализующий МВЗТ, представляет собой существенное улучшение для МВЗТ. КЭ МВЗТ основан на процедуре поступательного освобождения узловых усилий, которая позволяет прогнозировать распространение фронта расслоения вдоль направлений, не зависящих от конфигурации сетки КЭ. КЭ МВЗТ способен моделировать поступательное повреждение; другими словами, он может имитировать как возникновение, так и последующие этапы расслоения.

Реализованная в пакете ABAQUS поступательная МВЗТ представляет еще одну недавнюю модификацию подхода. Для уменьшения необходимости в построении сетки нерегулярных КЭ МВЗТ в ABAQUS используются «контактные поверхности» для связывания и дальнейшего поступательного расцепления узловых поверхностей. В данной работе реализация МВЗТ в версии пакета ABAQUS/Standard была использована для моделирования расслоения в композитных конструкциях под действием статических, закритических и переменных нагрузок. В следующем пункте будет описана способность реализованной в ABAQUS/Standard МВЗТ моделировать распространение усталостного расслоения, а также рассмотрены ограничения методики.

2 РАССЛОЕНИЕ ПРИ ДЕЙСТВИИ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

На рисунке 1 представлены три типовых образца, используемых для определения характеристик расслоения композита. Образец, традиционно используемый (начиная с 1960-х гг.) для исследования нагружения первого типа, представляет собой двойную консольную балку (ДКБ, рисунок 1,а). Характеристики трещины для нагружения второго типа определяются при трехточечном изгибе образца с концевым расслоением (ИКР, рисунок 1,б), который имеет почти те же размеры, что и образец ДКБ. Испытания со смешанным изгибом (СИ) обычно используют для исследования расслоения при смешанном нагружении [8]. В испытаниях применяется образец с расслоением, шарнирно закрепленный на концах и нагруженный с помощью рычага, который действует одновременно на середину образца и верхнее плечо образца (рисунок 1,в). Изменяя длину плеча рычага и положение точки опоры, можно получить различные коэффициенты смешанного нагружения (КСН): от почти чистого первого типа до чистого второго типа, где КСН определяется как отношение компонента СВЭ при втором типе к полной СВЭ.

В случае испытаний первого или второго типа вязкости разрушения обозначаются G_{Ic} и G_{IIc} соответственно; в случае же смешанного нагружения результирующая вязкость разрушения является промежуточной величиной, которая зависит от КСН. Для выражения вязкости расслоения при СИ часто используется критерий Бензегга-Кенане [9].

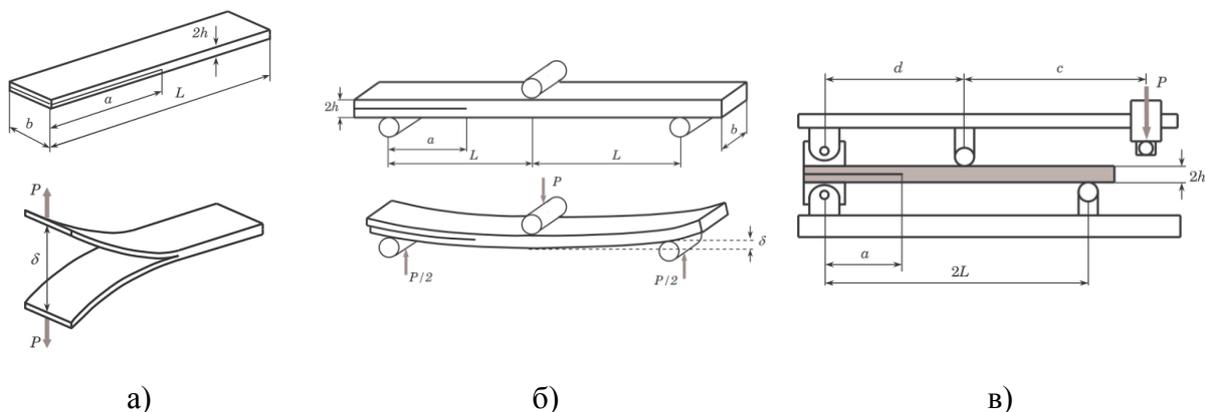


Рисунок 1 – Стандартные испытания на расслоение с образцами типа:

а) ДКБ; б) ИКР; в) СИ

Квазистатическое расслоение в образцах ДКБ, ИКР и СИ на этом этапе моделировалось с помощью алгоритма поступательной МВЗТ, реализованного в ABAQUS/Standard, для оценки самого алгоритма с точки зрения сходимости и точности решения. Для сравнения рассматривались образцы, использованные Тюроном и др. в работе [10]. На основании данных численных экспериментов были получены кривые «нагрузка-перемещение», которые потом были сравнены с аналитическими и экспериментальными данными, также приведенными в работе [10].

2.1 Анализ квазистатического расслоения при испытании первого типа

Эталонный образец ДКБ, использованный в данном исследовании, имеет ширину 25,4 мм, длину 102 мм и каждое плечо состоит из 12 однонаправленных слоев толщиной по 0,13 мм, т.е. суммарная толщина плеча равна 1,56 мм. Образец изготавливается из углеволоконного композита AS4/PEEK, характеристики которого приведены в таблице 1. Экспериментальные данные по вязкости разрушения и длине трещины приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Характеристики материала AS4/PEEK [10]

E_{11} (МПа)	E_{22} (МПа)	G_{12} (МПа)	G_{23} (МПа)	ν_{12}	ν_{23}
122 700	10100	5500	3700	0,25	0,45

Таблица 2 – Экспериментальные данные [10]

G_{II}/G_T	0% (ДКБ)	20% (СИ)	50% (СИ)	80% (СИ)	100% (ИКР)
G_C (кДж/м ²)	0,969	1,103	1,131	1,376	1,719
a_0 (мм)	32,9	33,7	34,1	31,4	39,3

КЭ модель (рисунок 2) состоит из двух совмещенных слоёв четырехузловых оболочечных элементов (S4R) с регулярной сеткой размерностью 102x24 элемента на каждое плечо. Два слоя элементов соединены с использованием поверхности типа CONTACT PAIR (КОНТАКТНАЯ ПАРА); взаимодействие с поверхностью трещины определяется с помощью МВЗТ для связывания двух плеч. Более того, сечения оболочечных элементов заданы с отступом, равным половине толщины, для обеспечения возможности использования совпадающих узлов для обоих плеч образца.

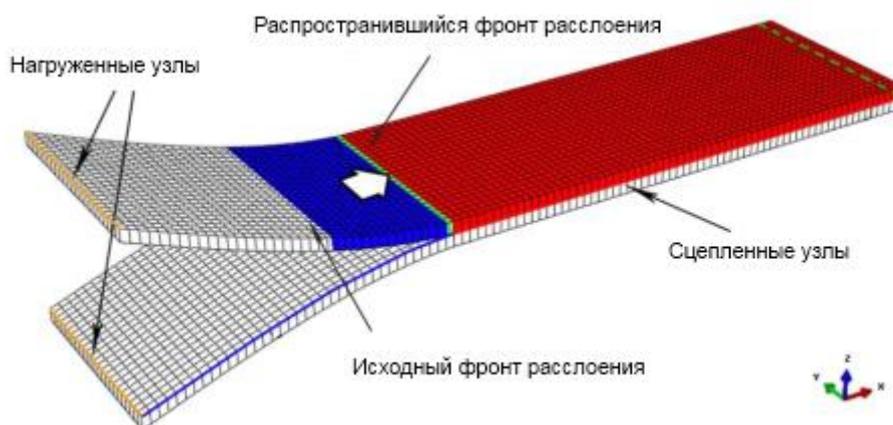


Рисунок 2 – КЭ модель образца типа ДКБ

В ABAQUS 6.11 доступны два типа расцепления узлов [11]: STEP (по умолчанию) и RAMP. Оба типа рассматриваются ниже, а также сравниваются результаты их работы.

Когда выбран тип расщепления STEP, ограничение, препятствующее раскрытию трещины, освобождается внезапно при достижении величины вязкости разрушения. На результирующей кривой «нагрузка-перемещение» присутствуют резкое падение величины нагрузки и ее восстановление из-за дискретного распространения трещины (рисунок 3).

Такой ступенчатый отклик неестественен, поскольку устойчивое расслоение должно быть непрерывным вследствие постепенного распространения трещины. Кроме того, при расчете имеются проблемы сходимости, что требует слишком малых приращений полной нагрузки. Тем не менее, модель воспроизводит жесткость образца и довольно хорошо отражает процесс распространения трещины. Критическая точка начала расслоения, которая соответствует первой нелинейности в экспериментальной кривой «нагрузка-перемещение», также была зафиксирована.

Для воспроизведения более естественного явления постепенного расщепления в ABAQUS 6.11 реализована новая возможность: постепенное расщепление в MB3T. С использованием типа RAMP, когда СВЭ превосходит критическое значение в вершине трещины, натяжение постепенно снимается так, что значение силы расщепления становится равным нулю до того, как начнет раскрываться следующий узел трещины. Таким образом, обеспечивается возможность моделирования непрерывного распространения трещины вместо дискретного, получаемого при использовании методики немедленного расщепления. Результирующая кривая «нагрузка-перемещение», также приведенная на рисунке 3, более точно отражает процесс непрерывного расслоения.

Дополнительное преимущество постепенного распространения трещины, связанное с использованием опции RAMP, заключается в улучшении сходимости равновесного решения, что позволяет использовать бóльшие временные шаги и меньшее число равновесных итераций. Более того, поскольку опция RAMP не приводит к внезапному расщеплению узлов, в процессе распространения трещины узлы, лежащие на одной прямой, раскрываются не одновременно. Вместо этого, фронт трещины может быть кривым (рисунок 4), что более точно соответствует экспериментальным данным, представленным на рисунке 5 [12].

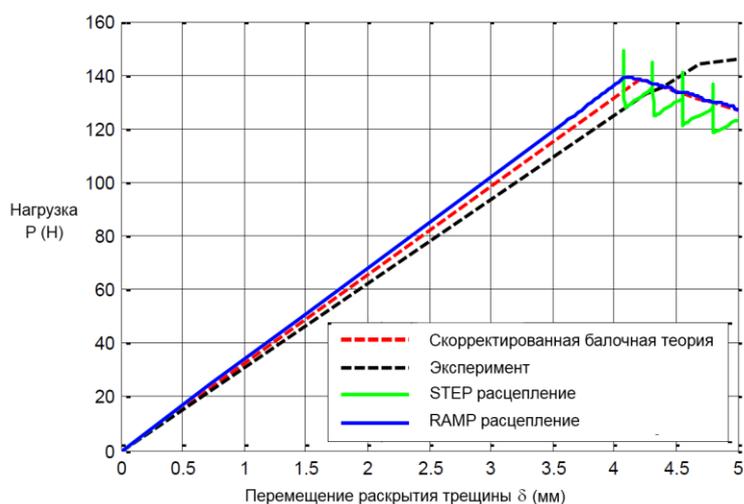


Рисунок 3 – Квазистатическое расслоение образца ДКБ (сравнение STEP и RAMP расслоений)

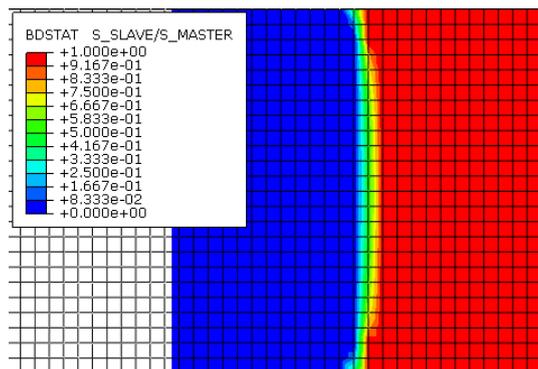


Рисунок 4 – Форма вершины трещины с использованием опции RAMP при квазистатическом расслоении образца ДКБ

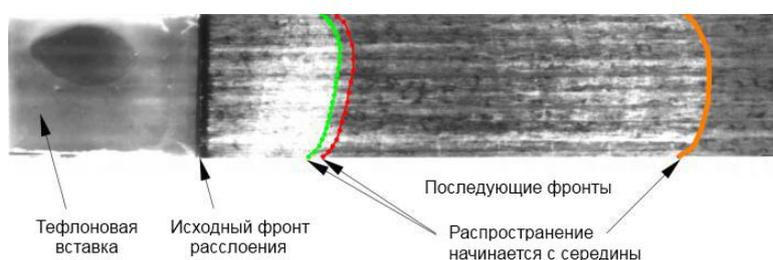


Рисунок 5 – Форма вершины трещины, полученной при испытании образца ДКБ

Для точного прогнозирования распространения расслоения используемая методика должна быть способна прогнозировать положение фронта расслоения, неориентированного по сетке КЭ. Для выяснения способности реализованного в ABAQUS алгоритма поступательной МВЗТ правильно отражать распространение фронта независимо от конфигурации сетки КЭ была создана модель образца с нерегулярной сеткой. Было обнаружено, что модель внезапного расщепления (которая установлена по умолчанию) неправильно воспроизводит расслоение при наличии нерегулярной сетки (рисунок 6,а), тогда как модель поступательного расщепления демонстрирует хорошие результаты при подобной конфигурации (рисунок 6,б). Полученные результаты также свидетельствуют о том, что для моделей с нерегулярными сетками опция RAMP обеспечивает правильный отклик «нагрузка-перемещение» (рисунок 7), тогда как опция STEP приводит к неправдоподобной форме фронта расслоения, выровненному по сетке КЭ, а также к нерегулярному отклику «нагрузка-перемещение», хотя момент возникновения расслоения спрогнозирован правильно.

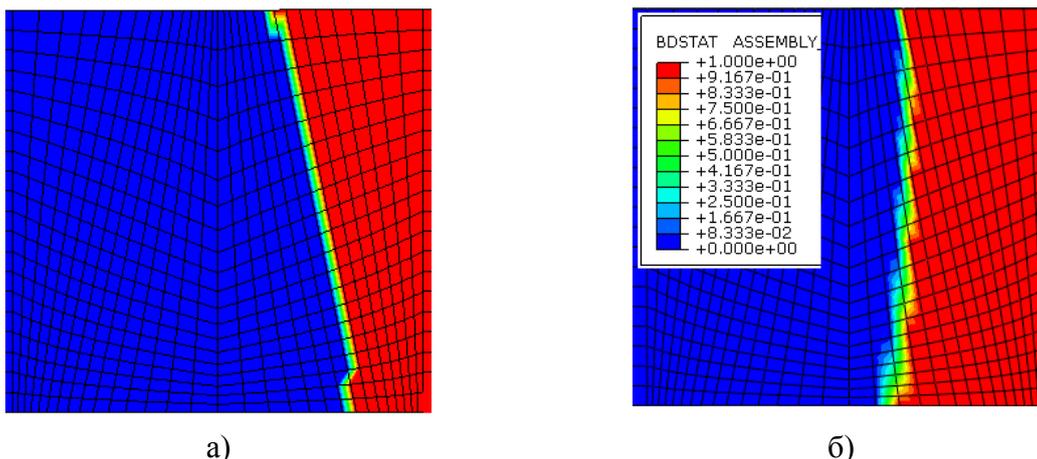


Рисунок 6 – Форма вершины трещины в модели образца ДКБ с нерегулярной сеткой:
а) сетка КЭ; б) форма фронта расслоения

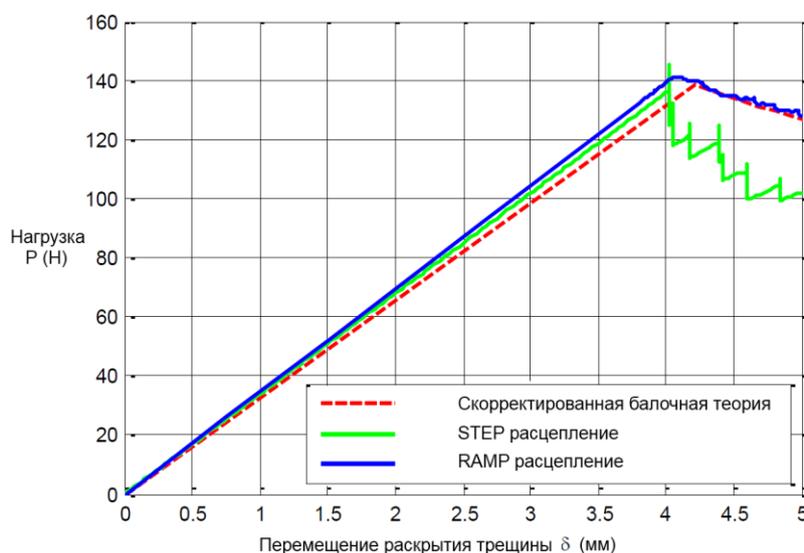


Рисунок 7 – Кривые «нагрузка-перемещение» для образца ДКБ с нерегулярной сеткой

2.2 Анализ квазистатического расслоения при втором типе испытаний и при смешанном изгибе

Пакет ABAQUS/Standard также использовался для исследования расслоения при втором типе нагружения и при смешанном изгибе. Конфигурация КЭ моделей образцов ИКР и СИ повторяла конфигурацию модели образца ДКБ, также к каждому образцу были приложены соответствующие граничные условия.

Моделирование испытания чистого второго типа с опцией STEP приводило к неустойчивому распространению трещины, что требовало величины приращения порядка 10^{-10} от конечной нагрузки для достижения равновесного состояния.

В отличие от испытаний с образцом ДКБ, использование опции RAMP не улучшило решение для расслоения второго типа. Кроме того, по всей видимости, установка этой опции не способна справиться с нагружением в плоскости расслоения. Несмотря на

использование нескольких конфигураций сеток с различным размером КЭ, разных значений временных шагов и других опций, сходимость решения так и не была достигнута. Решатель не способен найти решение после того, как достигнута величина вязкости разрушения, даже если он правильно определяет момент возникновения расслоения.

Была разработана КЭ модель образца СИ, которая позволяет варьировать КСН. Для того чтобы выразить СВЭ при испытании СИ как функцию от КСН, использовался критерий Бензеггага-Кенане [9]. Параметр η критерия может быть вычислен с помощью метода наименьших квадратов: в работе [10] $\eta = 2,254$.

Результаты численного анализа образца СИ показывают, что при использовании опции внезапного расщепления STEP расслоение имеет те же характеристики, что и в моделях образцов ДКБ и ИКР: трещина устойчиво распространяется при малых значениях КСН, когда преобладает первый тип нагружения; при этом кривые «нагрузка-перемещение» хорошо соотносятся с аналитическими и экспериментальными данными. Для образцов СИ с возрастающим преобладанием второго типа нагружения сходимость процедуры приращения нагрузки оказалась слишком медленной.

В заключение оценка результатов анализа с установленной опцией RAMP показала, что модель образца СИ, как и модель образца ИКР, не достигла сходимости равновесных итераций после момента возникновения расслоения.

3 РАССЛОЕНИЕ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК

Расслоение при действии переменных нагрузок происходит через несколько циклов, в течение которых скорость распространения трещины зависит от амплитуды нагрузки и свойств материала. В следующих пунктах описано применение инструмента DIRECT SYCLIC Analysis (DCA, анализ при прямом циклическом нагружении) пакета ABAQUS/Standard для исследования распространения усталостной трещины при различных вмешанных видах разрушения.

3.1 Инструмент DIRECT SYCLIC Analysis пакета ABAQUS

Инструмент DCA пакета ABAQUS реализует квазистатический тип анализа, который, используя комбинации рядов Фурье и временного интегрирования, обеспечивает устойчивый циклический отклик конструкции, в которой каждый последующий цикл такой же, как и в предыдущей. Целью данной методики является избегание необходимости выполнения анализа переходного процесса, который может требовать большого количества расчетов, при которых необходимо приложение большого числа циклов для получения устойчивого отклика. Инструмент DCA пакета ABAQUS учитывает нелинейность свойств материала, но предполагает геометрическую линейность и фиксированные условия контакта. Он также может быть использован совместно с МВЗТ для прогнозирования прогрессирующего повреждения или роста расслоения вследствие воздействия переменных нагрузок [11]. При заданном виде циклической нагрузки, вязкости разрушения материала, и коэффициентах, входящих в закон Париса, расчет прямой циклической усталости может быть использован для вычисления СВЭ, полученной в ходе циклического нагружения, и прогнозирования роста трещин.

Частично поддерживается расслоение при смешанном нагружении: хотя вязкость разрушения может быть выражена как функция от КСН, может быть задан только закон Париса, который не зависит от КСН

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta G)^m \quad (1)$$

где ΔG – изменение СВЭ между максимальным и минимальным значением нагрузки за один цикл. Если в течение одного цикла СВЭ в любой точке превосходит предельное значение, условия роста усталостного расслоения удовлетворяются, трещина продвигается с расцеплением узлов с наибольшей СВЭ на вершине трещины. Это распространение изменяет отклик последующих итераций расчета вследствие изменения условий контакта. Методика позволяет рассчитать количество циклов, необходимых для продвижения трещины вдоль такого элемента. Оценка методики с использованием образцов ДКБ, ИКР и СИ приведена ниже.

3.2 Анализ усталостного расслоения при испытании первого типа

Образцы ДКБ, ИКР и СИ, использованные Эспом и др. в работе [13] при усталостных испытаниях, были смоделированы в пакете ABAQUS и рассчитаны с помощью DSA. Образцы изготовлены из слоев препрега материала НТА/6376С, механические характеристики которого приведены в таблице 3.

Образец ДКБ имеет размеры 20 мм в ширину и 150 мм в длину. Выкладка близка к однонаправленной: $[0_{12}/(\pm 5/0_4)_S]$, где знак // указывает положение плоскости расслоения. Каждый слой имеет толщину 0,13 мм, т.е. номинальная толщина образца $2t = 3,12$ мм. Начальная длина трещины $a_0 = 35$ мм. Необычная выкладка была выбрана с целью предотвращения межслойного проникновения волокон в образцах ДКБ и СИ. Для упрощения задачи и возможности применения существующей аналитической модели полагается, что коэффициент Пуассона по всему образцу равен нулю, а сам образец изготовлен из однонаправленных слоев так, что выкладка соответствует $[0_{12}/0_{12}]$. Таким образом, появляется возможность получить однородное состояние нагружения первого типа с чистым двумерным (цилиндрическим) откликом, как показано в [14]. С учетом имеющихся экспериментальных данных, полученных Джунтти и др. в работе [15], можно с помощью линейной регрессии вычислить коэффициенты закона Париса для всех образцов, как было сделано в работе [16]. Найденные коэффициенты кривых Париса приведены в таблице 4.

Таблица 3 – Упругие характеристики материала НТА/6376С

E_{11} (МПа)	E_{22} (МПа)	G_{12} (МПа)	G_{23} (МПа)	ν_{12}	ν_{23}
120000	10500	5250	3480	0,30	0,51

Таблица 4 – Характеристики распространения трещины в материале НТА/6376С

k	G_c (кДж/м ²)	G_{th} (кДж/м ²)	M	C
0 – ДКБ	0,260	0,060	5,46	4,46
0.5 – СИ	0,447	0,066	6,24	23,8
1 – ИКР	1,002	0,100	4,33	0,116

Сравнение характеристик распространения трещин, представленных в таблице 4, для трех КСН показывает, как сильно смешанное нагружение влияет на скорость распространения трещины. Следовательно, необходимо использовать специфическую информацию, соответствующую каждому случаю нагружения в отдельности; получение этой информации является трудной задачей для сложных конструкций, в которых соотношение типов нагружения меняется в разных частях и даже может меняться с течением времени. Модели распространения трещин, с помощью которых можно прогнозировать распространение расслоения при таких общих условиях, еще не разработаны.

Была оценена модель усталостного повреждения пакета ABAQUS с использованием КЭ модели образца ДКБ подобной той, что использовалась при статическом анализе. Модель состоит из двух слоев оболочечных элементов S4R с совпадающими узлами и отступом, равным половине толщины плеча. Сетка КЭ однородна вдоль короткой стороны, в то время как вдоль образца размер КЭ уменьшен в зоне расслоения: так, элементы в области распространения трещины имеют размеры 1 мм в ширину и 0,5 мм в длину (рисунок 8). Это сделано для уменьшения времени расчёта без потери точности. Общее количество элементов модели – 2800. Грани элементов образуют поверхности расслоения, сцепленные элементы связаны с помощью свойства CONTACT PAIR пакета ABAQUS.

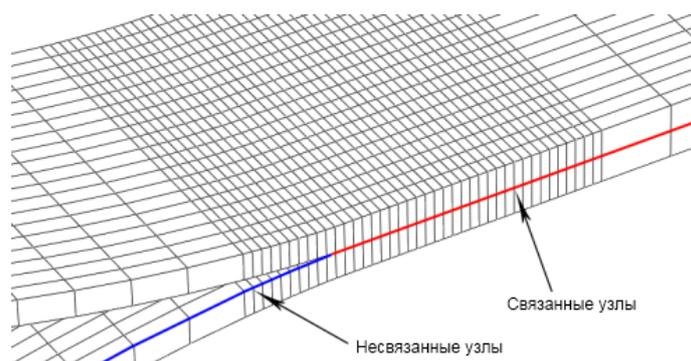


Рисунок 8 – КЭ модель образца ДКБ для усталостного анализа

Для обеспечения сходимости алгоритма прямых циклических нагрузок были изменены управляющие параметры, касающиеся устойчивого состояния и критерия обнаружения пластических деформаций, по рекомендациям Руководства с примерами задач пакета ABAQUS [17]. Результаты были сравнены с аналитическими данными, полученными Джунтти и др. в работе [15].

Применение методики ДСА начинается с задания цикла нагружения с наперед заданным количеством шагов. Для оценки необходимого количества временных шагов были проведены три расчета: с 10, 20 и 100 шагов на один цикл. Приведенные на рисунке 9 результаты показывают, что 10 шагов недостаточно для корректного описания циклического отклика, поскольку скорость распространения трещины отстает от скорости в остальных расчетах примерно в 5 раз от общего числа циклов. Результаты с 20 временными шагами (1/20 периода цикла) хорошо соотносятся с аналитической моделью. При уменьшении шага до 1/100 периода цикла увеличения точности решения не последовало.

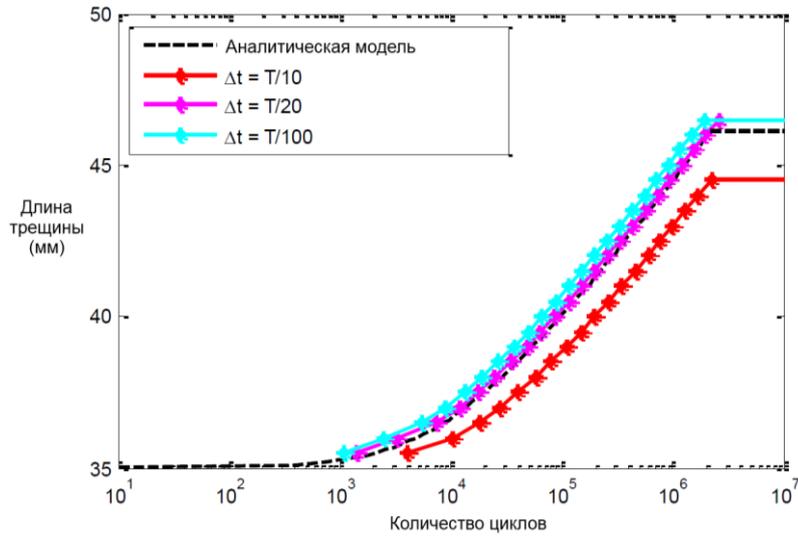


Рисунок 9 – Анализ усталости образца ДКБ

В процессе распространения расслоения, поскольку уровень СВЭ выше в середине, центральные узлы открываются первыми, и затем трещина распространяется к краям; такое же поведение было отмечено и при статическом анализе. На рисунке 10 показано распространение трещины в ходе анализа с временным шагом 1/100. Число циклов для нескольких шагов приведено в подрисуночной надписи.

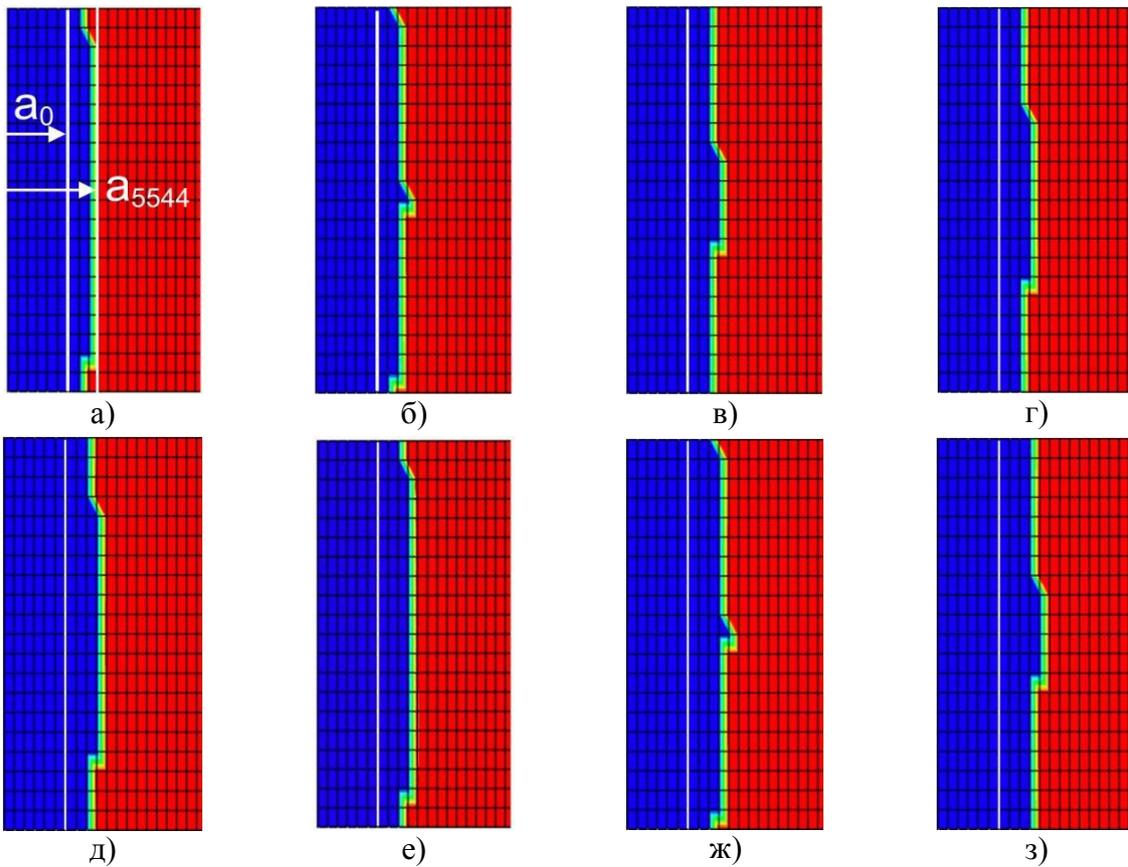


Рисунок 10 – Рост усталостной трещины в образце ДКБ:

а) 5544 циклов; б) 7086 циклов; в) 7142 циклов; г) 7294 циклов; д) 7804 циклов; е) 8952 циклов; ж) 10780 циклов; з) 10902 циклов

3.3 Анализ усталостного расслоения при втором типе испытаний и при смешанном изгибе

Для изучения возможности пакета ABAQUS/Standard рассчитывать усталостную долговечность при смешанном циклическом нагружении была использована КЭ модель эталонного образца СИ со значением КСН 48%. Результаты показывают, что хорошая корреляция с аналитическим решением получается тогда, когда цикл представляется 20 и более шагами нагрузки. Тем не менее, были отмечены некоторые проблемы численного анализа при распространении усталостной трещины, когда, после возникновения трещины на следующей линии узлов, фронт трещины распространяется в поперечном направлении к кромкам образца.

В заключение, распространение трещины при втором типе испытаний было исследовано с использованием образца ИКР и КЭ моделью, подобной модели для статического анализа. Тем не менее, метод прямого циклического нагружения не предсказывает корректной деформации образца. Анализ не учитывает условий контакта между плечами, что приводит к появлению деформированного состояния, показанного на рисунке 11. В действительности, в Руководстве пользователя по проведению расчетов в пакете ABAQUS указано, что в методе прямого циклического нагружения предполагается постоянство условий контакта в пределах каждого цикла нагружения.

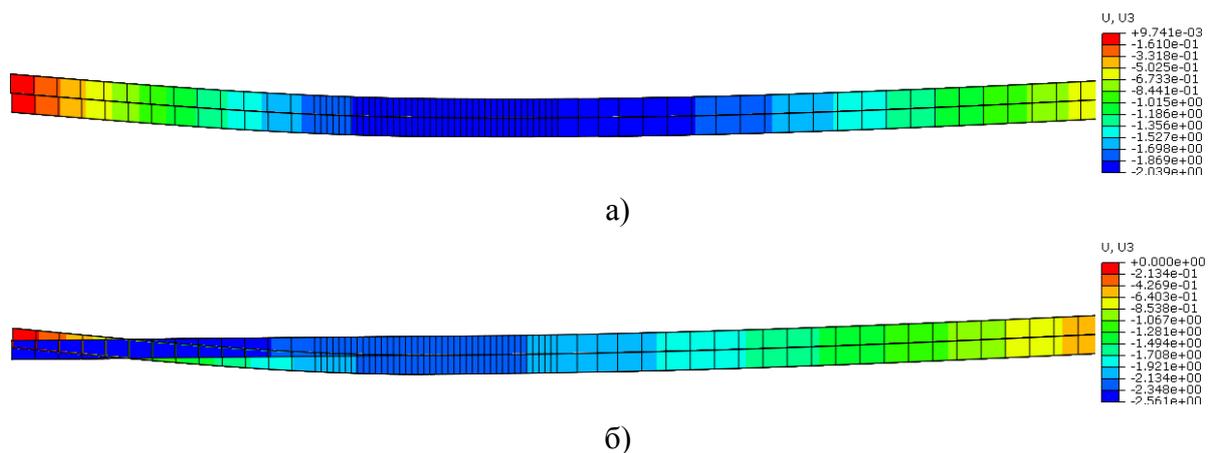


Рисунок 11 – Перемещения из плоскости нагружения в образце ИКР:
а) статический анализ; б) анализ прямого циклического нагружения

4 ОБРАЗЕЦ СО СТРИНГЕРОМ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА СЖАТИЕ

Проектирование устойчивых к повреждению тонкостенных подкрепленных конструкций, работающих под воздействием сжимающих нагрузок, является весьма сложной задачей, поскольку разрушение таких конструкций является результатом взаимодействия между механизмами развития закритических деформаций и местных повреждений. Для оценки возможности алгоритма поступательной МВЗТ прогнозировать механизм расслоения, приводящего к разрушению конструкции после потери устойчивости, был смоделирован фрагмент подкрепленной конструкции, в котором распространение расслоений происходит в закритической области.

4.1 Описание образца

Образец со стрингером для испытаний на сжатие (ОСИС) был разработан Бисаньи и др. в работе [1] для получения малой и удобной для численного анализа модели для изучения отказа относительно сложной части конструкции, подверженной сжатию. Форма образца оптимизирована таким образом, что меньший образец воспроизводит условия после потери устойчивости соответствующей многострингерной панели. Стрингер изготовлен из материала IM7/8552, характеристики которого приведены в таблице 5. Номинальная толщина каждого слоя составляет 0,125 мм. Последовательность укладки слоев обшивки [45/90/-45/0]_S, стрингера – [-45/0/45/0/45/0/-45]. Начальный дефект получен вставкой 20 мм тефлоновой пленки между стрингером и обшивкой (рисунок 12, размеры в миллиметрах).

Таблица 5 – Характеристики материала IM7/8552

E_{11} (МПа)	E_{22} (МПа)	G_{12} (МПа)	ν_{12}	G_{Ic} (кДж/м ²)	G_{IIc} (кДж/м ²)
150000	9080	5290	0.32	0.277	0.788

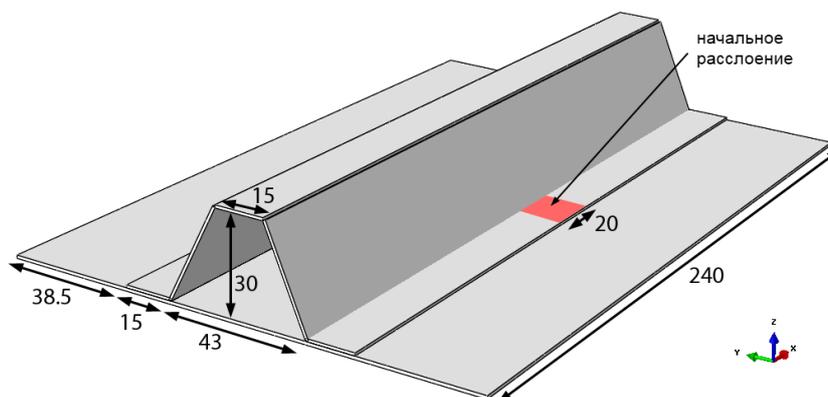


Рисунок 12 – Геометрия ОСИС

4.2 Предварительный анализ

КЭ модель состоит из двух оболочек. Плоская оболочка представляет обшивку, шляпообразная оболочка – подкрепляющий элемент. Обе оболочки состоят из четырехузловых оболочечных элементов с сокращенной интеграцией (S4R). Были использованы отступы стенок для обеспечения совпадения узлов вдоль контактных поверхностей между стрингером и обшивкой. Для упрощения не моделировались концевые лепестки, но их наличие задавалось в виде ограничения степеней свободы концевых узлов на перемещение и вращение. Сетка состоит из однородных квадратных элементов размерами 2,5x2,5 мм, всего в модели 9888 элементов. Как и для рассмотренных ранее образцов ДКБ, ИКР и СИ, была задана контактная пара со взаимодействием с поверхностью трещины для связывания узлов обшивки и стрингера вдоль полок стрингера.

Результаты эксперимента показывают, что повреждение распространяется неустойчиво. Сразу же после возникновения расслоения образец полностью теряет свою жесткость, как показано на рисунке 13. Результаты численного моделирования

предсказывают величину докритической линейной жесткости 67,5 кН/мм, которая на 12% больше экспериментальной. Потеря устойчивости происходит при 9,5 кН, что хорошо соотносится с результатами эксперимента (10 кН). Спрогнозированная в данном предварительном анализе предельная нагрузка составила 34,5 кН, всего лишь на 4% меньше, чем экспериментальная величина 36 кН. Подобные результаты были получены Бисаньи и др. [1] в ходе численного анализа ОСИС с использованием метода моделей с зонами сцепления.

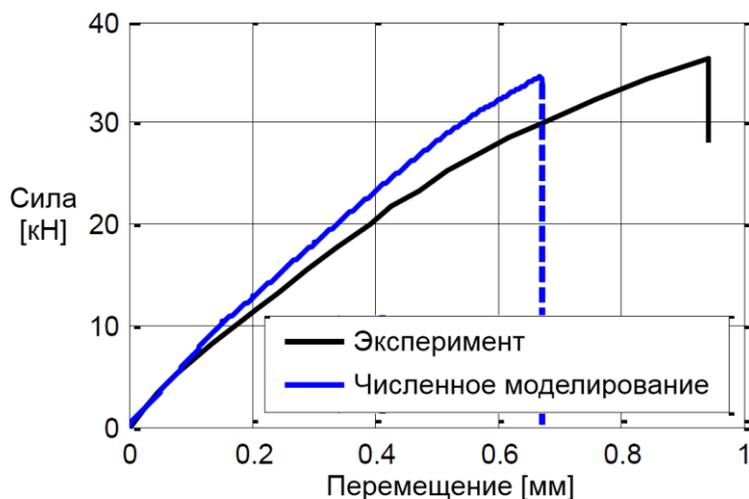


Рисунок 13 – Квазистатический анализ ОСИС: кривые «нагрузка-перемещение»

Анализ условий расслоения показал, что распределение СВЭ трехмерно: сдвиговые компоненты (второго и третьего типа), расположенные в плоскости расслоения, обычно сконцентрированы на внешних узлах, тогда как компонент первого типа неравномерно распределен по всей вершине трещины. Следовательно, процесс расслоения начинается с узлов наивысшей концентрацией СВЭ и затем, из-за последующего перераспределения напряжений, распространение продолжается за счет компонента первого типа, и фронт расслоения движется под углом примерно 45°, как видно из рисунка 14.

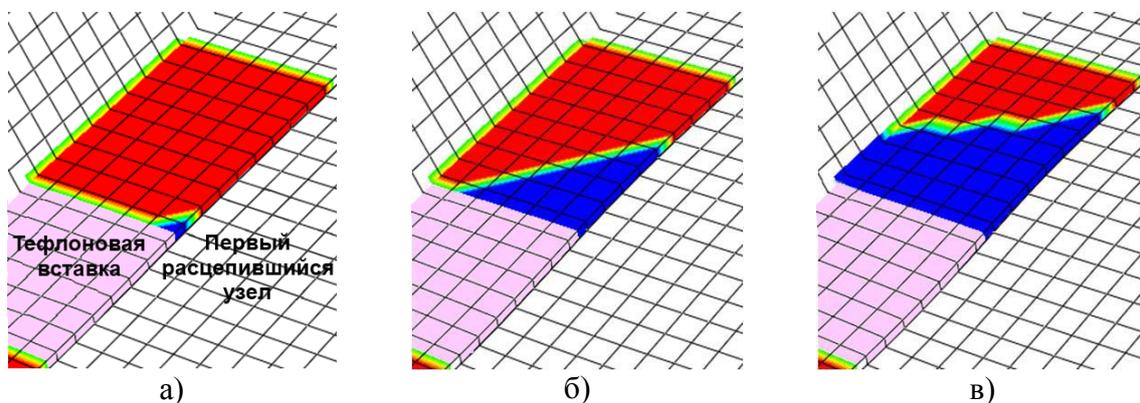


Рисунок 14 – Процесс расслоения при квазистатическом анализе ОСИС

4.3 Анализ с циклическими нагрузками

Для оценки работоспособности инструмента DCA с фрагментом конструкции, находящимся в закритическом состоянии, был проведен усталостный анализ, в ходе которого модель ОСИС была подвергнута циклическим синусоидальным перемещениям с амплитудой 0,5 мм. Результаты показывают, что методика прямого циклического нагружения не способна отследить момент наступления потери устойчивости, а результирующее деформированное состояние соответствует равномерному сжатию. Этот результат не является неожиданным, поскольку методика DCA основана на геометрически линейном отклике [11]. Разница между линейным и нелинейным откликом, полученная при стандартном квазистатическом анализе, проиллюстрирована на рисунке 15: DCA обеспечивает чистый косинусоидальный отклик, который прямо пропорционален приложенному перемещению, тогда как в квазистатическом анализе жесткость меняется после потери устойчивости. Попытка учесть геометрическое несовершенство для DCA провалилась, поскольку общий отклик модели остался линейным и пропорциональным приложенной нагрузке.

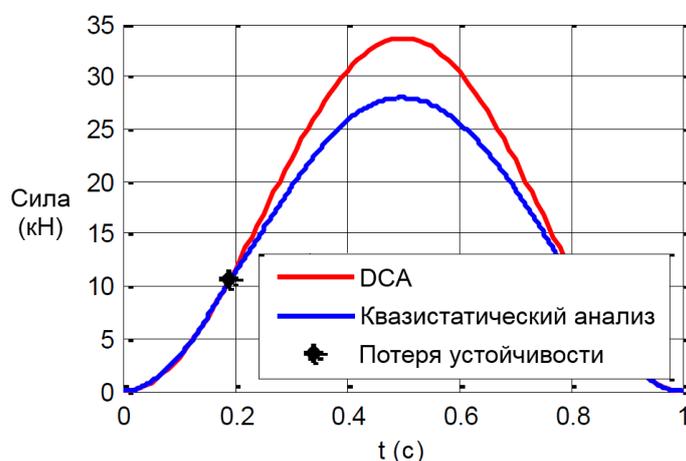


Рисунок 15 – Анализ ОСИС при циклическом нагружении: сравнение сил реакции

Более того, поскольку компоненты СВЭ непостоянны вдоль вершины расслоения, невозможно найти уникальный КСН для описания условий нагружения. Т.к. закон усталости Париса является функцией смешанного нагружения и доступно задание только одного закона, не представляется возможным описать скорость распространения усталостных повреждений для всех видов смешанного нагружения. Эта неспособность текущей реализации усталостной модели DCA в ABAQUS учитывать различные смешанные формы разрушения представляет собой еще одно ограничение, которое не дает возможности применить методику для задач анализа конструкций, уровень сложности которых выше уровня простейших задач.

5 ВЫВОДЫ

Для статических, закритических и переменных нагрузок исследована реализованная в пакете ABAQUS поступательная методика закрытия виртуальной трещины (МВЗТ).

Для оценки возможностей методики МВЗТ проведено моделирование расслоения под воздействием статических нагрузок. Были исследованы оба метода расцепления узлов, STEP и RAMP, а также эффект, связанный с взаимным ориентированием фронта расслоения и сетки КЭ. Установлено, что спрогнозированное начало расслоения соответствует аналитическим данным. Этап распространения расслоения был также корректно предсказан для простых конструкций с равномерными распределениями напряжений и перемещений. Тем не менее, были обнаружены критические проблемы, когда алгоритм применяется к задачам, в которых фронт расслоения распространяется в направлениях, не ориентированных по сетке. В частности, метод показал надежные результаты только чистого первого типа нагружения, в то время как для второго типа нагружения и высоких значений коэффициента смешанного нагружения (КСН) его применение закончилось неудачей.

Исследовано расслоение под действием переменных нагрузок с совместным использованием алгоритма усталости при прямом циклическом нагружении и МВЗТ. Алгоритм правильно предсказывает усталостную долговечность простых образцов, хотя он имеет некоторые ограничения при моделировании сложных конструкций. В действительности процедура не учитывает различные законы распространения усталостных повреждений при смешанном нагружении, и поддерживает только линейный анализ. Тем не менее, алгоритм может быть эффективно использован для конструкций с линейным поведением и постоянной формой распространения трещины.

В заключение был проанализирован сложный фрагмент конструкции, состоящий из панели со стрингером шляпообразного сечения, подверженный сжимающей нагрузке; полученные результаты были сравнены с экспериментальными данными. Последние показывают, что распространение расслоения возникает в закритической области работы конструкции. Поверхность раздела между обшивкой и подкрепляющим элементом была смоделирована при помощи МВЗТ; был выполнен нелинейный квазистатический анализ. Установлено, что реализованный в ABAQUS алгоритм МВЗТ правильно воспроизводит начало распространения трещины даже при наличии закритических деформаций, что делает его ценным инструментом для предварительной оценки предельных нагрузок и вида повреждения. Тем не менее, алгоритм метода анализа при прямом циклическом нагружении оказался непригодным для усталостного анализа, в котором есть нелинейные перемещения и соотношение компонент смешанного нагружения неодинаково в разных местах модели.

6 ЛІТЕРАТУРА

1. Bisagni, C., Vescovini, R., Dávila, C.G. "Single-Stringer Compression Specimen for the Assessment of Damage Tolerance of Postbuckled Structures." *Journal of Aircraft* 48 (2011): 495–502.
2. Bisagni, C. "Progressive Delamination Analysis of Stiffened Composite Panels in Post-Buckling". Proceedings of the 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference AIAA 2006-2718. (2006).
3. Orifici, A., Ortiz de Zarate Alberdi, I., Thomson, R., Bayandor, J. "Compression and Post-Buckling Damage Growth and Collapse Analysis of Flat Composite Stiffened Panels." *Composites Science and Technology* 68 (2008): 3150–3160.
4. Turon Travesa, A. Simulation of Delamination in Composites under Quasi-Static and Fatigue Loading using Cohesive Zone Models. PhD Thesis, Universitat de Girona, 2006.
5. O'Brien, K.T. Characterization of Delamination Onset and Growth in a Composite Laminate, *Damage in Composite Materials*. ASTM STP. 775 (1982): 140–167.
6. Krueger, R. Virtual Crack Closure Technique: History, Approach, and Applications. NASA Contractor Report. 211628 (2002).
7. Mabson, G.E., Deobald, L.R., Dopker, B., Hoyt, D., Baylor, J.S., Graesser, D.L. "Fracture Interface Elements for Static and Fatigue Analysis." In: Proc. 16th Int. Conf. on Composite Materials (ICCM-16), Kyoto, Japan, CD-ROM, 2007: 1-10.
8. Reeder, J.R., Crews, J.H. Nonlinear Analysis and Redesign of the Mixed-Mode Bending Delamination Test, NASA Technical Memorandum. 102777 (1991).
9. Benzeggagh, M.L., Kenane, M. "Measurement of Mixed-Mode Delamination Fracture Toughness of Unidirectional Glass/Epoxy Composites with Mixed-Mode Bending Apparatus." *Composite Science and Technology* 56(4) (1996): 439-449.
10. Turon, A., Camanho, P.P., Costa, J., Dávila C.G. "A Damage Model for the Simulation of Delamination in Advanced Composites under Variable-Mode Loading." *Mechanics of Materials* 38 (2006): 1072-1089.
11. Simulia, Abaqus 6.11 Analysis User's Manual, 2011.
12. Krueger, R. An Approach to Assess Delamination Propagation Simulation Capabilities in Commercial Finite Element Codes. NASA Technical Memorandum 215123 (2008).
13. Asp, L.E., Sjörgen, A., Greenhalgh, E.S. "Delamination Growth in a Carbon/Epoxy Composite under Fatigue Loading." *Journal of Composite Technology Research* 23 (2001): 55–68.
14. Brambilla, P. Modeling of Delamination in Composite Structures under Static and Fatigue Loading. Master thesis, Politecnico di Milano, July 2012.
15. Juntti, M., Asp, L.E., Olsson, A.R. "Assessment of Evaluation Methods for the Mixed-Mode Bending Test." *Journal of Composites Technology & Research* 21 (1999): 37–48.
16. Turon, A., Costa, J., Camanho, P.P. "Simulation of Delamination in Composites under High-Cycle Fatigue." *Composites Part A: Applied* 38 (2007): 2270–2282.
17. Simulia, Abaqus 6.11 Example Problems Manual, 2011.