

# ОСОБЕННОСТИ КЭ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ, ПОВРЕЖДЁННЫХ НИЗКОСКОРОСТНЫМ УДАРОМ

## FEATURES OF THE FINITE ELEMENT SOLVING METHODS OF RESIDUAL STRENGTH TASKS FOR LOW-VELOCITY IMPACT DAMAGED COMPOSITE STRUCTURES

S.Varickis<sup>(1,2)</sup>, I.Pavelko<sup>(1)</sup>, M.Smolianinov<sup>(1,3)</sup>

Research-and-development center "CENTRE COMPOSITE" Joint Venture of LNK Group and Progresstech (1),

60 Darziema Str., Riga, LV-1073, Latvia;

Riga Technical University (2), 1 Kalku Str., Riga, LV-1658, Latvia

SIA RSEC "Aviatest LNK" LV-1073 (3), Rēzeknes 1, Riga, Latvia

**Abstract:** There are made the calculations of residual strength of the site of skin made from composite stiffened by a stringer, damaged by low-velocity impact with material properties degradation, due to a local buckling of the layers in the area of impact damage and progressive delamination under the compressive load. The description of the calculation models and estimates of the residual compressive strength and three-point bending are given. The progressive delamination model shows the composite structure residual strength in compression case depending on of equivalent form of damage.

**KEYWORDS:** IMPACT DAMAGE, RESIDUAL STRENGTH, DEGRADATION OF MATERIAL PROPERTIES, THREE-POINT BENDING, INTERLAMINAR DELAMINATION, GROWTH OF DELAMINATIONS, PROGRESSIVE DAMAGE, THE CRITICAL STRAIN

### 1. Введение

Чтобы оценить последствия удара для остаточной прочности конструкции, необходимо иметь четкое представление о развитии повреждений в процессе удара и их окончательных параметрах. Существует несколько различных подходов к решению этой проблемы:

- 1) Простейший вариант базируется на сочетании упругого анализа ударного нагружения конструкции с частными критериями прочности, соответствующими отдельным видам повреждения. Основной недостаток этого подхода состоит в том, что при этом не учитывается взаимное влияние повреждений различного типа.
- 2) Сочетание упругого анализа ударного нагружения конструкции с общими скалярными критериями прочности при сложном напряженном состоянии. При этом, скалярные критерии дают информацию только о достижении предельного состояния, без указания типа возникшего повреждения. В сочетании с частными критериями прочности, соответствующими отдельным видам

повреждения, может быть получена оценка их наличия и размеров. Теории общих скалярных критериев прочности достаточно хорошо развиты [1]. Общая теория слоистых армированных сред позволяет перейти от обобщенных напряжений и деформаций анизотропного материала к напряжениям и деформациям слоя, записанным в координатной системе слоя. По характеристикам прочности слоя при различных простых видах нагружения может быть оценена возможность различных типов повреждения.

- 3) Использование критериев механики разрушения, имеющих в основе понятие скорости освобождения упругой энергии и энергетического баланса.
- 4) Подход, базирующийся на использовании механики повреждения. Последний подход имеет все более широкое применение, как в теории, так и практике расчетов поврежденных ударом конструкций из слоистых композитов

### 2. Решение рассматриваемой проблемы

Процедура предусматривает статический нелинейный расчёт конструкции с ударными повреждениями на заданный вид нагружения. Разрывы волокон при предшествующем ударе определяют прочность при растяжении и изгибе. На каждом шаге нагружения происходит развитие повреждений вплоть до полного исчерпания несущей способности конструкции. Распространение повреждений в слоях при растяжении и изгибе учитывается моделью прогрессирующего разрушения, реализуемой программно-пользовательским приложением ANSYS USERMAT. Его функция – разрешить пользователю вводить определённый закон деградации в существующую модель материала. Подпрограмма вызывается во всех интеграционных точках элементов на каждом шаге решения. Входные параметры для USERMAT задаются пользователем с помощью специальных команд [2]. Ввиду больших трудностей моделирования реальных форм повреждений, в каждом слое зоны повреждений моделируются эквивалентными площадями. При разбиении на КЭ в этих зонах задаётся материал с пониженными значениями упругих постоянных материала

$E_{i(d)} = d_{ii}E_{ii}$ ,  $G_{ij(d)} = d_{ij}G_{ij}$ , где  $d_{ii}$  и  $d_{ij}$  - параметры повреждений. Они задаются согласно рекомендациям [3] (Таблица 1).

Таблица 1.

	$d_{11}$	$d_{22}$	$d_{33}$	$d_{12}$	$d_{13}$	$d_{23}$
Разрушение волокна	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1
Расслоение	1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1
Разрушение матрицы	1	0.3	1	0.3	1	0.3

Инициирование повреждений и их распространение в волоконно-армированных композитах смоделированы с использованием встроенной процедуры нелинейного решения в ANSYS V14. Для определения возникновения повреждения материала (TB, DMGI) выбирается соответствующий

критерий (максимальных деформаций, максимальных напряжений, Пака, Хашина) либо определяется пользователем в виде программного кода.

Закон развития повреждения определяет, как материал деградирует после возникновения повреждения (TB,DMGE). Единственным законом развития повреждения, в настоящее время доступным в версии 14 является мгновенное снижение жесткости.

Этот закон заключается в редукации жесткости при растяжении и сжатии.

Значения могут колебаться от 0 (отсутствие повреждений) и 1 (полное разрушение).

Пределы прочности материала (TB, FCLI) задаются для определения максимального напряжения или деформации, при достижении которого в i-элементе срабатывает закон деградации.

При оценке прочности на сжатие конструкции, частично поврежденной ударом, основным понижающим фактором является расслоение слоистого пластика по поверхностям взаимного соединения. Оно имеет решающее влияние на прогресс повреждения при сжатии и, в конечном итоге, на остаточную прочность конструкции из ПКМ. Проверка предельных условий распространения расслоений при данной нагрузке производится с использованием энергетических критериев механики разрушения. Если эти критерии выполняются хотя бы для одного расслоения, то дальше должны быть определены его новые размеры и расчёт повторяется для того же уровня начального напряжения  $\sigma_0$ . В противном случае напряжение увеличивается на величину приращения  $\Delta\sigma$ , и расчёт повторяется с заменой напряжения  $\sigma_0$  на  $\sigma_1 = \sigma_0 + \Delta\sigma$ . Прогнозирование роста расслоений может быть реализовано КЭ моделированием. Современные методы расчёта предусматривают моделирование роста расслоения на основе т.н. «виртуальной техники закрытия трещины» (VCCT). Её применение для прогнозирования роста нанесённого ударом несквозного расслоения при сжатии отработывается в настоящее время. В данной работе применена упрощённая методика; каждый отслоившийся слой рассматривается в отдельности (фиг. 1). Расчёт выполняется в следующей последовательности:

- из расчёта на устойчивость при сжатии определяются слои, потерявшие устойчивость в отслоившейся зоне при заданном уровне действующей сжимающей нагрузки с сохранением формы деформированной поверхности;
- для названных слоёв выполняется расчёт на сжатие после потери устойчивости, из результатов которого выводится распределение напряжений на границе деформированной поверхности;
- по полученным компонентам напряжений вычисляются коэффициенты интенсивности напряжений у границ отслоившейся зоны, пользуясь зависимостями

$$\sigma_1 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} Re \left[ \frac{s_1 s_2}{s_1 - s_2} \left( \frac{\frac{s_2}{\sqrt{\cos\theta - s_2 \sin\theta}}}{-\frac{s_1}{\sqrt{\cos\theta - s_1 \sin\theta}}} \right) \right] +$$

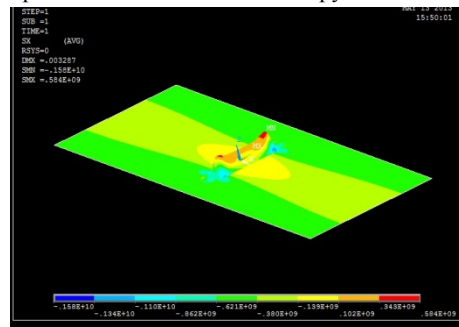
$$+ \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} Re \left[ \frac{1}{s_1 - s_2} \left( \frac{\frac{s_2^2}{\sqrt{\cos\theta - s_2 \sin\theta}}}{-\frac{s_1^2}{\sqrt{\cos\theta - s_1 \sin\theta}}} \right) \right]$$

$$\sigma_2 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} Re \left[ \frac{1}{s_1 - s_2} \left( \frac{\frac{s_1}{\sqrt{\cos\theta - s_2 \sin\theta}}}{-\frac{s_2}{\sqrt{\cos\theta - s_1 \sin\theta}}} \right) \right] +$$

$$+ \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} Re \left[ \frac{1}{s_1 - s_2} \left( \frac{\frac{1}{\sqrt{\cos\theta - s_2 \sin\theta}}}{-\frac{1}{\sqrt{\cos\theta - s_1 \sin\theta}}} \right) \right]$$

где  $s_1, s_2$  – корни характеристического уравнения, коэффициенты которого определяются упругими характеристиками ортотропного материала; т.к. рост расслоения возможен лишь в плоскости слоёв, то  $\theta=0$ ;

- если хотя бы в одном узле достигается превышение коэффициента интенсивности напряжений над его критическим значением, то размер отслоившейся зоны увеличивается, расчёт повторяется для того же уровня сжимающей нагрузки;
- если при увеличенном размере расслоения превышение коэффициента интенсивности напряжений над его критическим значением не наблюдается, то переходят к следующему уровню сжимающей нагрузки при новом равновесном размере расслоения;
- если при увеличенном размере расслоения коэффициент интенсивности напряжений продолжает нарастать, то данное состояние с точки зрения эксплуатационной пригодности следует считать предельным для данной конструкции.

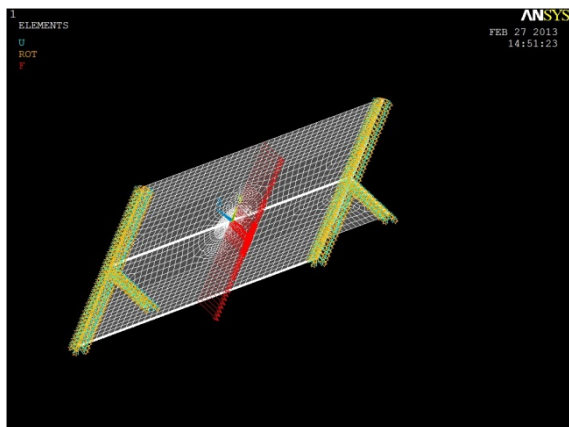


Фиг.1. Модель отслоившегося слоя после локальной потери устойчивости в отслоившейся зоне.

### 3. Результаты и дискуссия

#### 3.1. Расчёт конструкции с ударным повреждением на изгиб.

На фиг. 2 показана схема нагружения участка подкреплённой Т-образным стрингером обшивки из ПКМ с ударным повреждением



Фиг. 2. Схема нагружения объекта

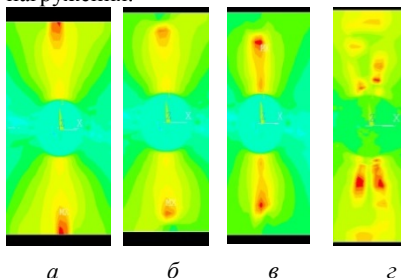
Таблица 2. Упругие характеристики монослоя

Параметр	Неповреждённый материал	Зона полных разрушений	Зона расслоений и растрескиваний	Зона растрескиваний
$E_1, МПа$	$1.3 \times 10^5$	$1.3 \times 10^4$	$1.3 \times 10^5$	$1.3 \times 10^5$
$E_2, МПа$	$6.9 \times 10^3$	$2.07 \times 10^3$	$2.07 \times 10^3$	$2.07 \times 10^3$
$E_3, МПа$	$6.9 \times 10^3$	$6.9 \times 10^2$	$6.9 \times 10^2$	$6.9 \times 10^3$
$G_{12}, МПа$	$5.78 \times 10^3$	$5.78 \times 10^2$	$5.78 \times 10^2$	$1.56 \times 10^3$
$G_{13}, МПа$	$5.78 \times 10^3$	$5.78 \times 10^2$	$5.78 \times 10^2$	$5.78 \times 10^3$
$G_{23}, МПа$	$5.78 \times 10^3$	$5.78 \times 10^2$	$5.78 \times 10^2$	$1.56 \times 10^3$
$\nu_{12}$	0.36	0.036	0.036	0.11

Таблица 3. Пределы прочности монослоя, МПа

$F_{11+}$	$F_{11-}$	$F_{22+}$	$F_{22-}$	$F_{12}$	$F_{13}$	$F_{23}$
1510	-1187	34	-196	59	100	100

В Таблице 3 приведены пределы прочности монослоя по видам нагружения.

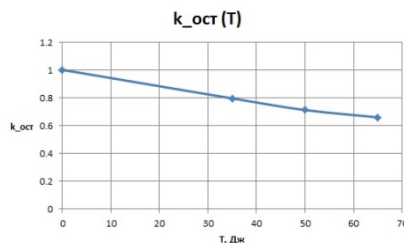


Фиг. 3.

$a$  – начало разрушения;  $b, v$  – развитие разрушения;  $z$  – полное разрушение

### 5. Литература

1. А. Викарио, Р. Толанд. Критерии прочности и анализ конструкций из композиционных материалов. В кн.: Композиционные материалы. Под общей ред. Л. Браутмана и Р. Крока. Том 7, часть 1. Анализ и проектирование конструкций. Перевод с англ. М.1978, с.62-107.
2. ANSYS USER Material Subroutine USERMAT//Mechanics Group Development Department ANSYS, Inc. Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317 – November, 1999.



Фиг. 4. Снижение прочности на изгиб от энергии сжимающего удара

На фиг. 3 показано развитие разрушения в опасном сечении по мере возрастания приложенной силы. Расчёт выполнен для объекта, повреждённого сжимающим ударом энергией 30, 50 и 65 Дж при массе стального ударника 0.067 кг со сферическим наконечником. График остаточной прочности на 3-точечный изгиб, как функции энергии сжимающего удара приведен на фиг. 4.

### 3.2. Оценка остаточной прочности на сжатие

Для 8-ми слоёв обшивки получены следующие площади расслоений слоёв в результате изгибающего удара энергией 65 Дж в % по отношению к общей площади лицевой поверхности (Таблица 4).

Таблица 4

Nr.	1/2	2/3	3/4	4/5	5/6	6/7	7/8
$S_{ps}, \%$	3.3	2.9	5.3	2.2	1.4	1.2	0.9

Повреждения были смоделированы в виде эллиптических зон эквивалентной площади, длины полуосей которых:  $a$  – в продольном,  $b$  – в поперечном направлениях. Расчёты по методике, описанной в §2, были выполнены для следующих соотношений длин полуосей:  $a/b=0.25; 0.5; 1$  (круг); 2; 4 по отношению к направлению действия сжимающей нагрузки. Критический коэффициент интенсивности напряжений принят  $K_{Ic}=1.95$  МПа $\cdot\sqrt{м}$ . Получены значения коэффициента остаточной прочности при сжатии  $k_{ост(c)}$  (Таблица 5), свидетельствующие о значительном влиянии формы отслоения на результаты КЭ моделирования.

Таблица 5

$a/b$	0.25	0.5	1	2	4
$k_{ост(c)}$	0.71	0.56	0.49	0.64	0.83

Полученная зависимость расчётного значения коэффициента остаточной прочности при сжатии согласуется с качественной оценкой, выполненной по методике [4].

3. Pierre-Luc Vachon, Vladimir Brailovski, Patrick Terriault. Prediction of the propagation of impact-induced delamination in carbon/epoxy laminates//Composite Structures 95 (2013) 227 – 235.

4. Болотин В.В. Дефекты типа расслоений в конструкциях из композиционных материалов// Механика композиционных материалов. 1984. № 2. с. 239-256.

5. И. Павелко, М. Смолянинов. Исследование влияния ударного повреждения на прочностные характеристики композита. – Рига: «Механика композитных материалов», 2011 – Т. 47, №.3, стр. 471 - 484.