

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ МАССЫ И СКОРОСТИ УДАРНИКА НА РАЗВИТИЕ УДАРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ПКМ ПРИ НИЗКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ ЗАДАННОЙ ЭНЕРГИИ

INFLUENCE OF THE MASS AND VELOCITY RATIO OF DROP POINT ON DEVELOPMENT OF IMPACT DAMAGES IN STRUCTURES MADE FROM COMPOSITE AT LOW VELOCITY IMPACT OF GIVEN ENERGY

I.Pavelko⁽¹⁾, N.Sidenko^(1,2), V.Cimanis^(1,2), P. Sobolev⁽¹⁾

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

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

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

Abstract: There are made the calculations of the site of skin made from composite stiffened by a stringer for a low velocity impact for different conditions of supportation and two mass/velocity ratios of drop point at a given energy. Also considered the gradual degradation of the elastic properties of the material during the process of impact. Also are evaluated the dimensions of the destroyed areas and nature of the damage in the layers of material for different boundary and initial conditions, and given their calculated values. As well are made the conclusions about several regularities of impact damage depending on the mass / velocity ratio of the drop point. Was proposed a computational evaluation method of visual signs of damage caused by low-velocity impact.

KEYWORDS: IMPACT DAMAGE, IMPACT ENERGY, DAMAGE CRITERION, FIBER BREAKAGE, INTERLAMINAR DELAMINATIONS, CRACKING THE MATRIX

1. Введение

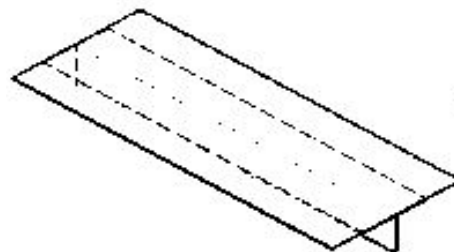
При ударе слоистых композитов сначала возникает растрескивание материала матрицы в продольных нормальных сечениях слоя, параллельных волокнам, что вызывает образование межслойных расслоений. Далее возрастает нагрузка на волокна и материал матрицы в направлении волокон, в результате чего достигается максимальная контактная нагрузка. Развиваются процессы разрыва волокон на обратной стороне и у поверхности контакта, а также дробления матрицы. Разрыв наружного слоя приводит к резкому снижению жесткости композита и падению контактной силы с одновременным продвижением ударника вглубь композита. Разрушаются следующие слои, контактная сила понижается. Большой интерес представляют результаты моделирования расслоений. Практически 80% расслоений появляются к моменту достижения максимальной контактной силы, 20% - при понижении нагрузки в случае полной адсорбции энергии композитом. В случае отскока при обратном движении ударника расслоения не развиваются. Описание развития ударного повреждения базируется, в частности, на результатах [1]. Как показывают результаты ряда исследований, в частности [2], [3], по мере возрастания энергии удара размеры повреждений увеличиваются, а связанные с ними остаточная прочность и жесткость конструкции понижаются по параболическому закону до некоторых предельных значений. Дальнейшее возрастание энергии не оказывает заметного влияния на эти показатели. Ударная энергия является не единственным фактором, влияющим на размеры повреждений. Заметное влияние оказывает продолжительность удара [4]: при малых скоростях ударника в начальный момент контакта время удара намного больше времени, необходимого для достижения изгибной волны краёв мишени, следовательно, в этом случае преобладающей является первая форма деформированной поверхности (квазистатический случай); увеличение скорости и уменьшение массы ударника повышает вклад изгибных волн в отклик при ударе, следовательно, проявляются более высокие формы прогиба и увеличение зон концентрации напряжений, вызванных ударом.

Целью данного исследования является оценка влияния вышеназванных характеристик удара и условий опирания мишени на размеры, месторасположение и характер повреждений в слоях.

2. Предпосылки и средства для решения проблемы.

2.1. Исходные данные задачи

Объектом исследования является участок подкреплённой Т-образным стрингером обшивки из ПКМ (фиг. 1).



Фиг. 1. Объект исследования

Упругие характеристики монослоя табл.1.:

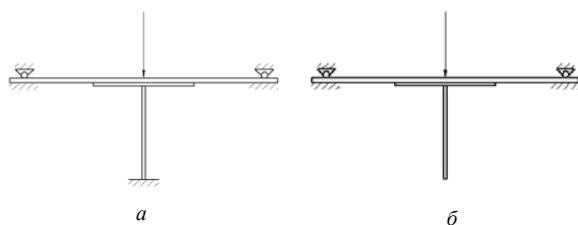
E_{11} , МПа	1.3×10^5	F_{11+} , МПа	1510
E_{22} , МПа	6.9×10^3	F_{11-} , МПа	-1187
E_{33} , МПа	6.9×10^3	F_{22+} , МПа	34
G_{12} , МПа	5.78×10^3	F_{22-} , МПа	196
G_{13} , МПа	5.78×10^3	F_{12} , МПа	59
G_{23} , МПа	5.78×10^3	F_{13} , МПа	100
ν_{12}	0.36	F_{23} , МПа	100

Здесь F_{ij} – пределы прочности; в индексе ij - направления: 1 – продольное (вдоль волокон), 2 – поперечное (перпендикулярно волокнам и плоскости слоя), 3 – по глубине пакета; знак (+) обозначает растяжение, (-) – сжатие.

Удар с параметрами (табл.2) наносится по центру рассматриваемого участка обшивки.

Энергия Т, Дж	35		50		65	
Масса ударника, кг	0.067	3.8	0.067	3.8	0.067	3.8
Скорость в начальный момент контакта, м/с	32.3	4.3	38.6	5.13	44	5.85
Форма наконечника	Сферическая					

Граничные условия показаны на фиг. 2 (а – сжимающий; б – изгибающий удар).



Фиг.2. Условия закрепления при ударе: а – сжимающем; б – изгибающем

2.2. Метод расчёта

Для расчёта ударного воздействия на конструкции из ПКМ используется Лагранжевый подход. В его основе лежат уравнения сохранения массы, количества движения, внутренней энергии и замыкающее эту систему определяющее соотношение, запрограммированные в ANSYS/LS-DYNA. Уравнения и особенности пространственно-временной дискретизации, используемой в ANSYS/LS-DYNA, рассмотрены в [5]. Петля интегрирования по времени дифференциальных уравнений включает следующие операции: вычисление узловых нагрузок; вычисление узловых ускорений; вычисление узловых скоростей; вычисление приращений перемещений и перемещений; выравнивание сетки; адвекционный шаг; вычисление деформаций в элементах; вычисление напряжений в элементах. В ANSYS/LS-DYNA реализованы два адвекционных алгоритма, использующие систему полу индексного подёма (half index shift – HIS) для пересчёта исторических переменных в узлах. Существует возможность учёта постепенной деградации упругих свойств материала мишени в процессе удара. В модель материала Nonlinear Inelastic Composite Damage Material Model, вводятся физико-механические характеристики монослоя, пределы прочности по видам нагружения, объёмный модуль и коэффициент сдвиговой нелинейности α . Реализуется модель разрушения Чанга, учитывающая 3 формы повреждения:

- полное разрушение по разрывам волокон

$$F_{fiber} = \left(\sigma_1 / F_{11+} \right) + \bar{\tau} \quad (1)$$

- разрушение матрицы

$$F_{matrix} = \left(\sigma_2 / F_{22+} \right) + \bar{\tau} \quad (2)$$

- разрушение при сжатии

$$F_{comp} = \left(\frac{\sigma_2}{2 F_{12}} \right)^2 + \left[\left(\frac{F_{22-}}{2 F_{12}} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_2}{F_{22-}} + \bar{\tau} \quad (3)$$

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_{12}^2 / (2 G_{12}) + (3/4) \alpha \tau_{12}^4}{F_{12}^2 / (2 G_{12}) + (3/4) \alpha F_{12}^4}, \quad 0.1 \leq \alpha \leq 0.5.$$

При достижении какого-либо критерия повреждения в i -элементе программа обнуляет упругие константы материала, соответствующие данной форме разрушения (E_2 , ν_1 , ν_2 – разрушение при сжатии; E_2 , G_{12} , ν_1 , ν_2 – разрушение матрицы; E_1 , E_2 , G_{12} , ν_1 , ν_2 – полное разрушение). Для идентификации вида нанесённого ударом повреждения слоя использованы критерии разрушения, предложенные Хашином [6]:

- условия разрывов волокон

$$\left(\frac{\sigma_1}{F_{11+}} \right)^2 + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{F_{12}^2} \geq 1, \quad \text{если } \sigma_1 > 0 \quad (4)$$

$$\left(\frac{\sigma_1}{F_{11-}} \right)^2 \geq 1, \quad \text{если } \sigma_1 < 0$$

- условия растрескиваний матрицы

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{F_{22+}} \right)^2 + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{F_{12}^2} + \\ & + \frac{\tau_{23}^2 - \tau_{22}\tau_{33}}{F_{23}^2} \geq 1, \quad \text{если } \sigma_2 + \sigma_3 > 0 \\ & \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{F_{22-}} \cdot \left[\left(\frac{F_{22-}}{2 F_{23}} \right)^2 - 1 \right] + \frac{(\sigma_2 + \sigma_3)^2}{4 F_{23}^2} + \\ & + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_2 \sigma_3}{F_{23}^2} + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{F_{12}^2} \geq 1, \\ & \text{если } \sigma_2 + \sigma_3 < 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Для прогнозирования площадей межслойных расслоений Ольсен [7] предлагает следующую зависимость, базирующуюся на энергетических критериях механики разрушения:

$$A = 0.17 \cdot (F_{dn} + F_0)(w_{dn} - w_0) / G_{IIc}, \quad (6)$$

где: F_{dn} , w_{dn} – соответственно контактная сила и взятый со знаком (-) прогиб в момент появления n -го расслоения; F_0 , w_0 – максимальная контактная сила и соответствующий ей прогиб, взятый со знаком (-); G_{IIc} – характеристика вязкости разрушения связующего по II форме (продольный сдвиг). В свою очередь

$$F_{dn} \cong 1.213 \pi \sqrt{32 G_{IIc} D^* / (n+2)}, \quad (7)$$

где эффективная изгибная жёсткость ортотропного пакета $D^* \approx \sqrt{0.5 \cdot D_{11} D_{22} (1 + (D_{12} + 2 D_{66}) / \sqrt{D_{11} D_{22}})}$

Значение w_{dn} может быть получено из результатов КЭ решения. Однако использование формулы (7) сопряжено со значительными трудностями вычислительного характера, кроме того, требует специального эксперимента на вязкости разрушения связующего. В связи с этим, в представленной работе для оценки размера расслоения принята следующая приближённая зависимость, предложенная в [8]:

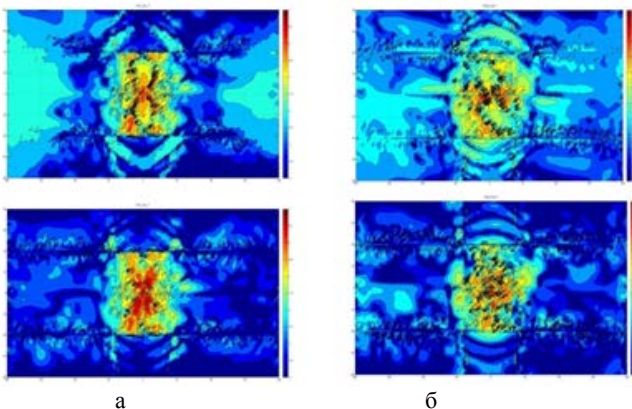
$$\left(\sigma_1 / F_{11+} \right)^2 + \left(\tau_{12} / F_{12} \right)^2 \geq 1 \quad (8)$$

6 компонентов вектора напряжений, полученных в каждом узле в результате КЭ решения, передаются в Microsoft Excel. Вычисленные по формулам Хашина значения передаются в MATLAB, где с помощью специальной программы вычисляются конечные площади повреждений по каждому виду в каждом слое.

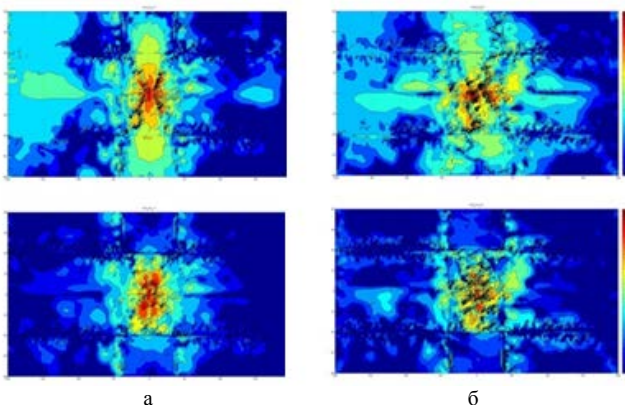
3. Результаты и дискуссия

На фиг. 3 и фиг. 4 показаны типичные формы зон повреждений, нанесённых сжимающим ударом одинаковой энергии. Замечено, что повреждения в слоях, уложенных под 0^0 (параллельно стрингеру), имеют лепестковую форму, практически симметричную относительно оси удара. В слоях с укладкой 45^0 повреждения имеют вид множественных

локальных зон, рассеянных относительно оси удара с тенденцией распространения вдоль волокон в несколько большей степени, чем перпендикулярно волокнам.

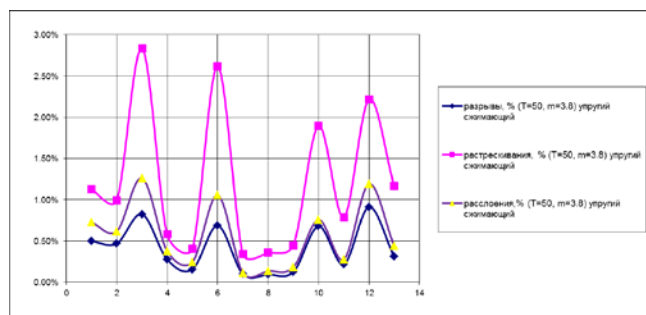


Фиг.3. Типичные формы зон разрывов (сверху) и расслоений (снизу) в слоях, уложенных: *a* – под 0°; *б* – под 45°, в результате сжимающего удара 50 Дж ударником массой 0.067 кг.



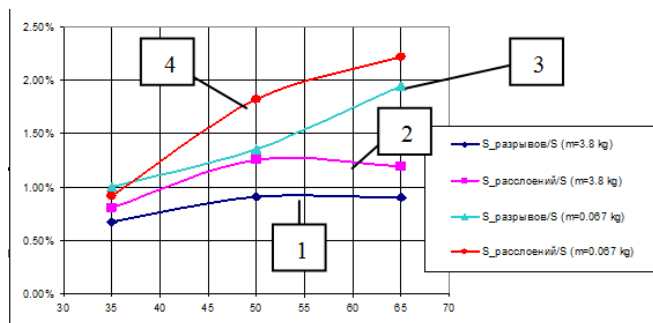
Фиг.4. Типичные формы зон разрывов (сверху) и расслоений (снизу) в слоях, уложенных: *a* – под 0°; *б* – под 45°, в результате сжимающего удара 50 Дж ударником массой 3.8 кг.

На фиг. 5 показано распределение повреждённых зон по слоям пакета от лицевой к тыльной поверхности при сжимающем ударе. Под относительным размером повреждения понимается отношение суммарной площади всех повреждений данного типа в данном слое к площади всего участка обшивки (фиг. 1). Нижний график (фиг.5) отображает разрывы волокон, средний – расслоения, верхний – растрескивания.



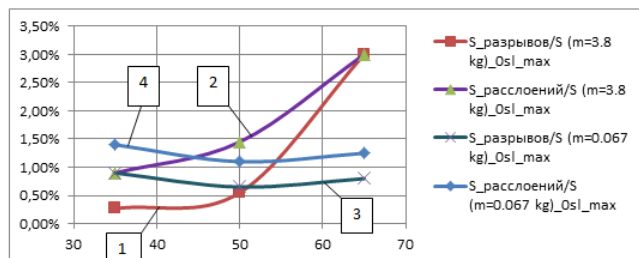
Фиг. 5. Относительные размеры повреждений по слоям пакета при сжимающем ударе

Фиг. 6 иллюстрирует влияние соотношения масса/скорость ударника на наибольшие размеры повреждений при сжимающем ударе.



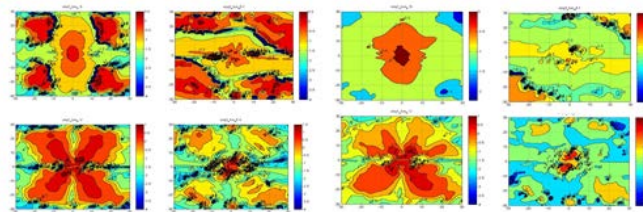
Фиг. 6. Относительные размеры максимальных повреждений от энергии сжимающего удара для 2-х различных масс: разрывы при $m=3.8$ кг (1) и $m=0.067$ кг (3); расслоения при $m=3.8$ кг (2) и $m=0.067$ кг (4)

При изгибающем ударе появляются дополнительные периферийные зоны повреждений, связанные с влиянием изменения геометрии объекта и граничных условий. Это влияние при прочих равных условиях тем значительнее, чем больше масса ударника. Поэтому эффект масса/скорость при изгибающем ударе и сравнительно небольших размерах мишени не столь однозначен, как в случае сжимающего удара. Как уже отмечалось, при ударе малой скорости и большой массы, преобладающей является первая форма деформированной поверхности мишени. С этим связано намного более выраженное, чем при ударе большой скорости и малой массы влияние граничных условий и изменений площади сечения. Следовательно, при сравнительно небольших размерах объекта периферийные зоны повреждений, возникающие под влиянием вышеназванных факторов, могут сливаться с зонами повреждений от контактных напряжений, вызванных ударом. Фиг.7.



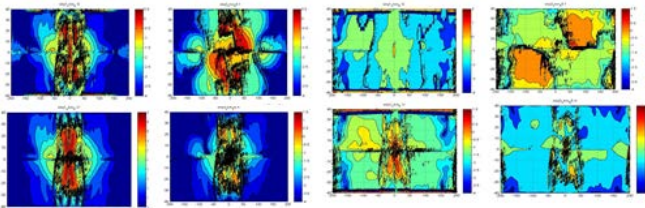
Фиг. 7. Относительные размеры максимальных повреждений в слоях, уложенных под 0° от энергии изгибающего удара для 2-х различных масс: разрывы при $m=3.8$ кг (1) и $m=0.067$ кг (3); расслоения при $m=3.8$ кг (2) и $m=0.067$ кг (4)

На фиг.8 и фиг.9 показаны формы повреждений в локальной зоне в окрестностях точки первоначального контакта, а на фиг. 10 и фиг. 11 – полные повреждения. В подобных случаях в результате удара малой скорости и большой массы возможны большие размеры повреждений по сравнению с ударом большой скорости и малой массы, особенно в слоях с ненулевой укладкой.



Фиг. 8. Типичные формы зон разрывов (сверху) и расслоений (снизу) в локальной зоне слоёв, уложенных: *a* – под 0°; *б* – под 45°, в результате изгибающего удара 50 Дж ударником массой 0.067 кг.

Фиг. 9. Типичные формы зон разрывов (сверху) и расслоений (снизу) в локальной зоне слоёв, уложенных: *a* – под 0°; *б* – под 45°, в результате изгибающего удара 50 Дж ударником массой 3.8 кг.



Фиг. 10. Типичные формы зон разрывов (сверху) и расслоений (снизу) в слоях, уложенных: *а* – под 0° ; *б* – под 45° , в результате изгибающего удара 50 Дж ударником массой 0.067 кг.

Фиг. 11. Типичные формы зон разрывов (сверху) и расслоений (снизу) в слоях, уложенных: *а* – под 0° ; *б* – под 45° , в результате изгибающего удара 50 Дж ударником массой 3.8 кг.

4. Заключение

По результатам выполненной работы могут быть сделаны следующие выводы:

1. Размеры повреждений уменьшаются по глубине пакета до некоторого минимума в средних слоях, в нижних слоях снова возрастают.
2. Размеры повреждений, нанесённых сжимающим ударом малой массы и большой скорости, больше размеров повреждений, нанесённых сжимающим ударом большой массы и малой скорости при одной и той же ударной энергии. Эта разница увеличивается по мере возрастания энергии.
3. Энергия 50 Дж является пороговой для сжимающего удара массой 3.8 кг, т. е. при дальнейшем увеличении энергии заметного роста повреждений не наблюдается. Напротив, при массе ударника 0.067 кг пороговое значение энергии сжимающего удара в расчётном диапазоне достигнуто не было, размеры повреждений с ростом энергии продолжают увеличиваться.
4. Размеры повреждений, вызванных контактными напряжениями от изгибающего удара малой массы и большой скорости, больше размеров повреждений, вызванных контактными напряжениями от изгибающего удара большой массы и малой скорости при одной и той же ударной энергии. Напротив, размеры периферийных зон, вызванных влиянием изменения площади поперечного сечения объекта и граничных условий, становятся заметными при изгибающем ударе большой массы и малой скорости. Вклад этих зон в общие площади повреждений повышается по мере увеличения ударной энергии и при больших энергиях становится преобладающим. Названные зоны являются не ожидаемыми и плохо поддающимися обнаружению, следовательно, представляют повышенную опасность с точки зрения эксплуатационной безопасности.
5. Повреждающие последствия изгибающего удара, как правило, больше, чем сжимающего.
6. По данным расчётов наибольшие размеры повреждений наблюдаются в слоях, уложенных под 45° , что особенно характерно для изгибающего удара большой массы. Это может быть объяснено эффектами межслойного сдвига при переходе укладки, а также геометрии объекта и граничных условий.
7. Предполагается, что размеры и форма визуально заметного ударного повреждения могут быть оценены по рассчитанным размерам и форме зоны полных разрушений. Так, сжимающий удар энергией 50 Дж при массе ударника 3.8 кг наносит визуально заметное повреждение на лицевой поверхности на глубину 6 верхних слоёв пакета площадью около 0.5% от общей площади лицевой поверхности исследуемого объекта.

Два последних вывода нуждаются в дополнительной экспериментальной проверке.

5. Литература

1. Zhidong Guan and Chihdar Yang. Low-Velocity Impact and Damage Process of Composite Laminates. *Journal of Composite Materials* 2002; 36; 851 DOI: 10.1177/0021998302036007512.
2. И. Павелко, М. Смолянинов. Исследование влияния ударного повреждения на прочностные характеристики композита. – Рига: «Механика композитных материалов», 2011 – Т. 47, №.3, стр. 471 - 484.
3. И. Павелко, М. Смолянинов, В. Жигун. Сдвиговая жёсткость, как критерий оценки низкоскоростного ударного воздействия на пространственно-армированные углепластики – Сборник докладов XX Международной научно-технической конференции trans&MOTAUTO'12, ISBN:1310-3946: Варна, Болгария, 27 – 29.06.2012 – стр. 63 - 66.
4. R. Olson. Mass criterion for wave controlled impact response of composite plates. – ASME Mechanics and Materials Conference, Blacksburg, VA, June, 1999.
5. А. Ю. Муйземник, А. А. Богач. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA. – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2005.
6. Hashin, Z., 1980. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites”, *J. Appl. Mech.* 47, 329 -334.
7. R. Olson. Analytical model for delamination growth during small mass impact on plates. – *International Journal of Solids and Structures* 47 (2010), 2884 – 2892.
8. E. Pietrapaoli. Progressive Failure Analysis of Composite Structures Using a Constitutive Material Model (USERMAT) Developed and Implemented in ANSYS - *Appl. Compos Mater* (2012) 19: 657 – 668.