

СДВИГОВАЯ ЖЁСТКОСТЬ, КАК КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ НИЗКОСКОРОСТНОГО УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОСТРАНСТВЕННО-АРМИРОВАННЫЕ УГЛЕПЛАСТИКИ

Shear rigidity as a criterion of evaluation of low-speed impact on the 3D reinforced carbon fiber composites

Asoc. prof. Pavelko I.¹, Smolyaninov M.², Zhigun V.³

Institute of Aviation – Faculty of Transport and Mechanical Engineering – Riga Technical University

SIA RSEC “Aviatest LNK” LV-1073, Rēzeknes 1, Riga, Latvia

University of Latvia - Institute of Polymer Mechanics - Aizkraukles 23, LV-1006 Riga, Latvia

Abstract: *The main objectives of this paper were: a) to determine the relationship between the impact energy and the sizes of the area of possible delaminations as well as between the impact energy and stresses value; b) to develop the method of composite materials damage evaluation at the low-speed impact which makes it possible to obtain consistent and implementable results at the specified level of impact load. FE analysis was performed to establish the relationship between the impact energy and the sizes of the area of possible delaminations as well as between the impact energy and stresses value. Relationships have been established between relative decrease in material rigidity and the energy of the low-speed compression and flexural impact for different length to thickness ratio of the samples.*

KEYWORDS: *LOW-SPEED IMPACT, CARBON-CARBON COMPOSITES, SHEAR RIGIDITY, IMPACT LOADING, IMPACT ENERGY, AREA OF POSSIBLE DELAMINATIONS.*

1. Введение

Одной из отличительных особенностей углерод-углеродных композитов является их низкая трещиностойкость, обусловленная хрупкостью углеродной матрицы. В то же время необходимо отметить, что низкоскоростные ударные воздействия наиболее широко распространены на практике. Поэтому использование углерод-углеродных композитов в элементах конструкций вызывает необходимость исследования их поведения после

воздействия указанного вида нагрузок. Основные цели данной работы: а) выработка подхода к оценке повреждаемости композитных материалов при низкоскоростном ударном воздействии, позволяющем получать стабильные и воспроизводимые результаты при определенном уровне ударного нагружения; б) установление зависимости размеров зоны возможных расслоений и величины напряжений от энергии удара.

2. Решение рассматриваемой проблемы

2.1. Математическое обоснование

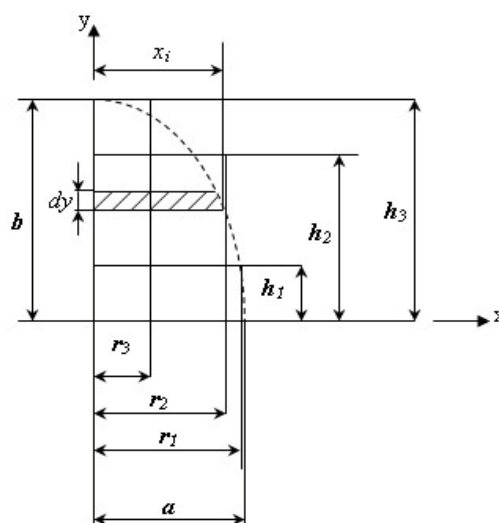
Принято, что контактные напряжения распределены в соответствии с теорией Герца. В случае сферического ударника контактное давление $p(x, y)$ распределено по закону эллипсоида (фиг. 1) в круговой зоне радиуса a , зависящего от величины суммарной контактной силы P и радиуса ударника R , т.е. [1, 2]:

$$p(x, y) = p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2 + y^2}{a^2}}, \quad (1)$$

$$\text{где } a = \left(\frac{3P}{4} \cdot \frac{1-\nu^2}{E} \cdot R \right)^{1/3}, \quad (2)$$

$$p_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{\pi a^2} \quad (3)$$

На первом этапе устанавливалась зависимость между энергией удара и равнодействующей контактных напряжений (контактной силой). В связи с



Фиг. 1. Распределение нагрузки на площадке контакта и её кусочно-линейная аппроксимация.

особенностями интерфейса расчетной программы контактное давление (1) было аппроксимировано совокупностью постоянных нагрузок, величина которых выбирается из условия статической эквивалентности. Практически это сводится к тому, что эллиптическая кривая сечения эллипсоида нагрузки аппроксимируется ступенчатой кусочно-постоянной линией, что даёт совокупность прямоугольников со сторонами, размеры которых r_k и h_k определяются из условия равенства площадям соответствующих частей эллипса, представляющих собой семейство криволинейных трапеций. Площадь k -й криволинейной трапеции

$$S_k = \int_{h_{k-1}}^{h_k} x(y) dy \tag{4}$$

В то же время, уравнение эллиптической кривой $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \Rightarrow x(y) = a\sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}}$, где $\bar{y} = \frac{y}{b}$.

В итоге площадь k -й криволинейной трапеции

$$S_k = ab \int_{\bar{h}_{k-1}}^{\bar{h}_k} \sqrt{1 - \bar{y}^2} d\bar{y} \tag{5}$$

приравнивается площади эквивалентного прямоугольника

$$S_k = r_k h_k \tag{6}$$

Следовательно, зона контакта может быть разделена на n условных частей окружностями, радиусы которых определяются по формуле

$$\bar{r}_k = \frac{r_k}{a} = \frac{1}{2 \cdot (\bar{h}_k - \bar{h}_{k-1})} \left(\arcsin \bar{h}_k - \arcsin \bar{h}_{k-1} + \bar{h}_k \sqrt{1 - \bar{h}_k^2} - \bar{h}_{k-1} \sqrt{1 - \bar{h}_{k-1}^2} \right) \tag{7}$$

где: $\bar{h}_k = \frac{h_k}{b} = \frac{p_k}{p_0}$, $1 \leq k \leq n$.

Далее принят следующий алгоритм расчёта:

1. Из условия "сосредоточенная сила в центре" определяется ориентировочное значение максимальной контактной силы при заданной энергии удара T [3]

$$\tilde{P}_{max} = \sqrt{\frac{2DT}{\alpha b^2}}, \tag{8}$$

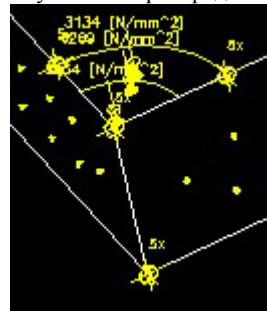
где: изгибная жесткость $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$; α - поправочный коэффициент; E и ν - упругие константы материала пластины.

2. В пределах $0 \leq P \leq \tilde{P}_{max}$ задаются различные значения контактной силы $P_i = i \cdot \Delta P$.

3. Для каждого P_i рассчитывается:

- внешний радиус зоны контакта (2);

- величина контактного давления по оси симметрии объекта (3);
- ступенчатое распределение нагрузки (7).



Фиг. 2. КЭ модель. Распределение нагрузки на площадке контакта.

4. Создаётся КЭ модель (фиг. 2), где условия опирания (закрепления) объекта могут соответствовать как сжимающему (свободное опирание по всей поверхности), так и изгибающему (защемление по краям) удару. Выполняется КЭ расчёт.

5. Из результатов КЭ расчёта для каждого расчётного случая определяется:
- распределение контактного давления по радиусу контактной зоны $p(r)$;
 - деформация поверхности в направлении удара $w(r)$.

Расчётные значения указанных параметров записываются для каждой из m окружностей в пределах контактной зоны.

6. Для каждого расчётного случая определяется работа контактной силы по формуле

$$A_i = A_{i-1} + \delta A_i \tag{9}$$

$$\text{где } \delta A_i = \frac{1}{2} \int_S \delta p_i \delta w_i dS \tag{10}$$

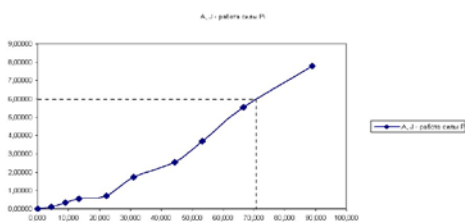
Преобразование (10) даёт

$$\delta A_i = \frac{\pi}{8} \sum_{j=0}^m (p_{ij} + p_{i,j-1}) \times (w_{ij} - w_{i-1,j} + w_{i,j-1} - w_{i-1,j-1}) \times (r_j^2 - r_{j-1}^2) \tag{11}$$

где $0 \leq j \leq m$.

7. Строится график $A(P)$ (фиг. 3), по которому, приравняв работу контактной силы к заданной энергии низкоскоростного удара $A = T$, определяется контактная сила P_p , соответствующая этой энергии.

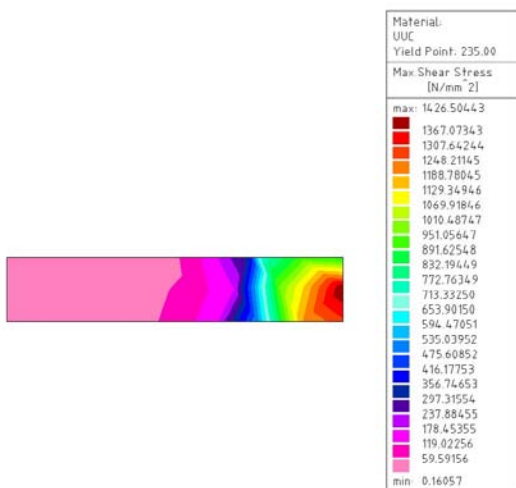
8. Для силы P_p выполняются пп. 1 - 4 данного алгоритма.



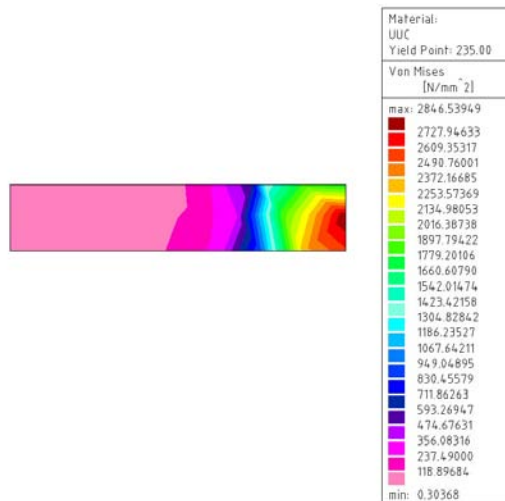
Фиг. 3. К определению расчётного значения контактной силы (соответствует сжимающему)

9. Из результатов КЭ расчёта для силы P_p определяется:

- распределение касательных напряжений в плоскости симметрии объекта (фиг. 4), согласно которому может быть выявлена зона возможных расслоений;
- распределение эквивалентных напряжений Мизеса – Хилла в той же плоскости (фиг. 5).



Фиг. 4. Распределение касательных напряжений в плоскости симметрии объекта (соответствует сжимающему удару).



Фиг. 5. Распределение эквивалентных напряжений Мизеса – Хилла в плоскости симметрии объекта (соответствует сжимающему удару).

2.2. Оценка влияния низкоскоростного удара на жёсткость материала при сдвиге.

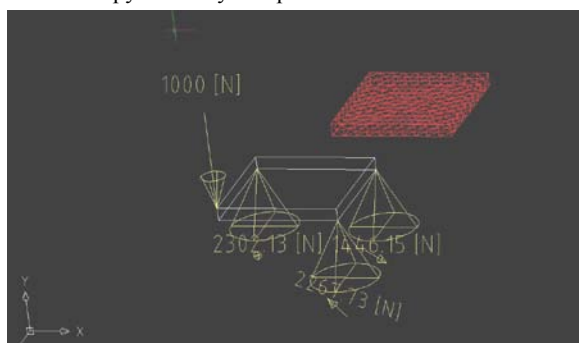
1. Полагая, что материал теряет несущую способность в зоне, где эквивалентные напряжения Мизеса – Хилла во время нанесения удара превышают предел прочности $\sigma_{ekv} > \sigma_p$, формируется модель повреждённого объекта согласно подходу, описанному в 2.1.
2. Методом КЭ определяется прогиб w_p в месте приложения нагрузки к неповреждённому (фиг. 6) и подвергнутому низкоскоростному удару (фиг. 7) объекту, нагруженному по трёхточечной схеме.

3. По формуле [4]:

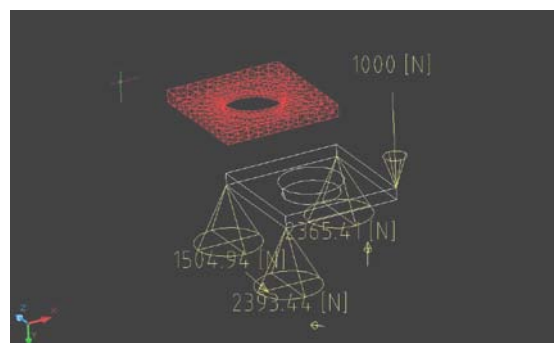
$$D_{66} = \frac{Fc^2}{4w_p} \tag{12}$$

рассчитывается жёсткость при сдвиге неповреждённого и подвергнутого низкоскоростному удару объекта, где: c - длина стороны; F - контрольная нагрузка.

4. Определяется изменение жёсткости при сдвиге, наступающее в результате повреждения, нанесённого низкоскоростным ударом.



Фиг. 6. Неповреждённый объект, нагруженный по трёхточечной схеме.



Фиг. 7. Объект после низкоскоростного удара, нагруженный по трёхточечной схеме.

3. Результаты и дискуссия

Расчёты согласно описанной в §2 методике были выполнены для следующих начальных условий (таблица 1).

Таблица 1.

Материал	Трансверсально-изотропный углерод-углеродный композит
$E_x = E_y$, МПа	2.31×10^4
E_z , МПа	1.61×10^4
ν_{xz}^*	0.138
ν_{zx}^*	0.115
σ_p , МПа	94
Форма поверхности ударника	сферическая
Радиус ударника R , мм	20
Форма образца в плане	квадрат
Длина стороны образца C , мм	25, 37.5, 50
Толщина образца t , мм	2.5
Характер удара	низкоскоростной сжимающий, низкоскоростной изгибающий
Энергия удара T , Дж	1, 3, 6, 8, 10

* первый индекс означает направление нагрузки, а второй - изменение деформации в поперечном направлении

Результаты для сжимающего и изгибающего удара приведены в таблицах соответственно 2 и 3.

На графике (фиг. 8) показано изменение жёсткости при сдвиге, наступающее в результате низкоскоростного сжимающего удара в диапазоне ударных энергий 0 – 10 Дж, для различных соотношений длины стороны к толщине образца.

4. Заключение

По результатам выполненной работы могут быть сделаны следующие выводы:

- снижение сдвиговой жёсткости, наступающее в результате низкоскоростного удара, является ощутимым уже при сравнительно малых ударных энергиях;
- снижение сдвиговой жёсткости, которое может быть выявлено экспериментальным путём, может быть использовано для установления наличия и

5. Литература

1. Кильчевский Н. А. Теория соударений твердых тел. - М., Л.: ОГИЗ, Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. – 254 с.
2. Zukas J. A., Nicholas T., Greszcuk L. B., Curran D. R. // Impact Dynamics. – John Wiley&Sons New York – 1982 - pp. 9 – 45.
3. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле – М.: «Наука», 1967 - 444 с.

Таблица 2

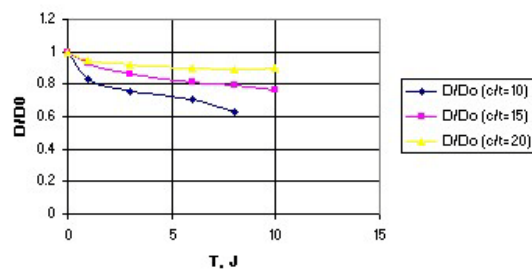
T, J	σ_{ekv_max} , МПа	τ_{max} , МПа	w_p , мм	D, N°mm	D/Do (c/t=10)	c/t	σ_p , МПа	D, D, N°mm	P, N	b, mm
0			11.23	13913.82		1				
1	1847.6	936.7	13.481	11590.386	0.833024256		94	13913.82	1000	25
3	2434.2	1221.2	14.932	10464.104	0.752076078					
6	2846.6	1426.5	15.89	9833.2284	0.706733795					
8	3092.2	1547.4	17.908	8725.1508	0.627094036					

Таблица 3.

T, J	σ_{ekv_max} , МПа	τ_{max} , МПа	c/t	σ_p , МПа	b, mm
1	825	465	15	94	37.5

T, J	σ_{ekv_max} , МПа	τ_{max} , МПа	c/t	σ_p , МПа	b, mm
1	627	362	20	94	50
6	1493	791			
10	1953	1010			

Для низкоскоростного изгибающего удара аналогичная зависимость не была получена, так как при указанных размерах исследуемых образцов уже при ударе энергией 1 Дж наступает практически полное разрушение.



Фиг. 8. Изменение при сдвиговой жёсткости в результате низкоскоростного сжимающего удара.

степени ударного повреждения элементов конструкций;

- разрушающие последствия изгибающего удара с точки зрения остаточной жёсткости и прочности конструкций из ПКМ намного ощутимее, чем сжимающего удара.

4. Тарнопольский Ю. М., Жигун И. Г., Поляков В. А. Пространственно-армированные композиционные материалы: Справочник. – М.: Машиностроение. - 1987. – 224 с.: ил.
5. Igor V. Pavelko, Maxim P. Smolyaninov and Valery I. Zhigun. Assessment of spatially-reinforced carbon composites exfoliation after a low-speed impact. 16th International Conference on Composite Structures ICCS16. – A. J. M. Ferreira (Editor)@FEUP, Porto:2011, pp. 631.1 - 631.2.