

ЭКВИВАЛЕНТНОЕ ОТВЕРСТИЕ КАК КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА ПОСЛЕ НИЗКОСКОРОСТНОГО УДАРА

EQUIVALENT HOLE AS AN EVALUATION CRITERION OF A COMPOSITE MATERIAL RESIDUAL STRENGTH AFTER A LOW-SPEED IMPACT

Asoc. prof. Pavelko I.¹, Smolyaninov M.²

¹Institute of Aviation – Faculty of Transport and Mechanical Engineering – Riga Technical University

²RSEC “Aviatest LNK” Ltd., LV-1073, Rēzeknes str. 1, Riga, Latvia

Abstract: On the basis of a pilot study of samples of composite material mark- КМКУ-2М.120.Э01. provided a chart of this material stretching, as well as identified the loss of its strength in the presence of the concentrator in the form of holes. Theoretical and experimental studies were also carried out to assess the reduction of the static strength of this composite, extension test with impact damage with different energy of low-speed blow. All calculations were performed by the method of finite elements. Also was made assessment of the dependence of loss of strength from impact energy on the criterion of an equivalent hole. The results are compared with experimental and based on this may be deemed reliable.

KEYWORDS: IMPACT DAMAGE, IMPACT ENERGY, LOSS OF STRENGTH, CRITERION OF AN EQUIVALENT HOLE

1. Введение

За последние тридцать лет удельный вес композитных материалов в авиационных конструкциях значительно вырос и имеет тенденцию к дальнейшему увеличению. Это, безусловно, способствует новому качественному скачку с точки зрения эксплуатационной эффективности и экономичности. Однако композит обладает рядом специфических свойств, требующих серьезных дополнительных исследований. Проблема ударных повреждений композитных материалов является одной из основных при оценке эксплуатационной прочности современных самолетов. Имеется потенциальная опасность повреждения наружных поверхностей воздушного судна случайными предметами на режимах руления, взлета и посадки, столкновение с птицами, из-за влияния некоторых атмосферных явлений, в частности, града. Зачастую

ударные повреждения композитов внешне мало заметны, но вызывают самые разные варианты внутренних повреждений и значительное снижение прочности. Поэтому инструментальное обнаружение и идентификация ударных повреждений является актуальной задачей систем контроля технического состояния воздушных судов. В частности, этому вопросу уделяется большое внимание в исследованиях, проводимых в рамках Европейского проекта AISHA и его продолжения AISHAII. В настоящей работе исследовались две проблемы:

- 1) Как оценить ударное повреждение, располагая информацией о механических характеристиках материала и о параметрах удара (масса и скорость ударяющего тела)?
- 2) Как ударное повреждение влияет на прочность и долговечность конструкции?

2. Решение рассматриваемой проблемы

2.1. Расчет напряженного состояния образца при низкоскоростном ударе

В зависимости от энергии низкоскоростного удара ударяющее тело может внедряться в материал на различную глубину. Предполагая, что ударник имеет сферическую поверхность, можно считать, что деформированная поверхность образца состоит из непосредственно зоны контакта глубиной δ_0 и зоны сопряжения по смещению поверхности контакта глубиной W_0 (фиг. 1). Следовательно, задача заключается в определении фактической, т. е. полной глубины проникновения ударника $W_{\max} = W_0 + \delta_0$ и напряженного состояния в окрестностях зоны контакта при фиксированном значении радиуса сферической поверхности ударника R_m и различных радиусах площадки контакта R_c .

В настоящем исследовании принято: $R_m = 3,2$ мм, задан ряд значений $0 < R_c < R_m$:

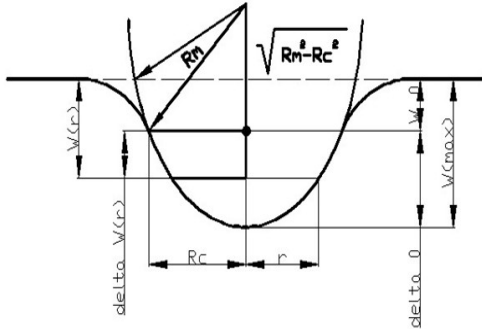
(1), $R_{ci} = R_{c(i-1)} + \Delta R_c$, где $\Delta R_c = \frac{R_m}{8}$. Далее

рассчитано: (2), $\delta_0(R_c) = R_m - \sqrt{R_m^2 - R_c^2}$ (см. таблица 1).

Таблица 1. Расчет δ_0

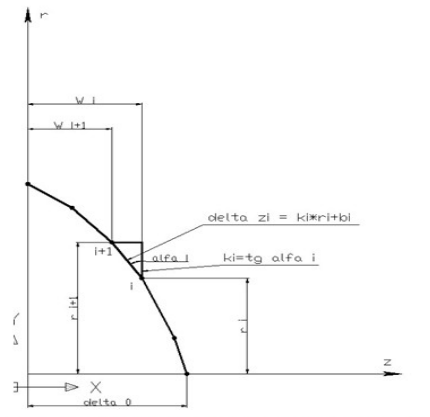
R_c, mm	4	8	12	16	20	24	28
δ_0, mm	0,250984	1,016133	2,335206	4,287187	7,020008	10,83399	16,50807

Следующим этапом было конструирование кусочно-линейной модели границы деформированной зоны. Любая точка на границе зоны контакта имеет определенный радиус $0 \leq r \leq R_c$ и связанную с ним глубину



Фиг.1. Вид деформированной поверхности композита при низкоскоростном ударе

(3), $\Delta w = w(r) - w_0 = \sqrt{R_m^2 - r^2} - R_m + \delta_0$, отсчитывая от точки пересечения поверхности недеформированной зоны с осью удара. Зона удара представлена в виде совокупности отрезков (фиг. 2).



Фиг.2. Кусочно-линейная аппроксимация границы деформированной зоны

Каждый из данных отрезков описывается уравнением (4), $\delta_{zi} = k_i r + b_i$, где: $k_i = \frac{\Delta w_{i+1} - \Delta w_i}{r_{i+1} - r_i}$; (5),

$b_i = \Delta w_i - k_i r_i$. Результаты вычислений сведены в таблицу 2.

Для каждого расчетного значения R_c зона контакта разбивается на 5 участков (фиг. 2). Программой ELCUT были выполнены конечно-элементные расчеты для пластины толщиной $t = 2$ мм из углепластика КМКУ-2М.120.Э.01, имеющего следующие упругие константы:

$$E_\theta = E_r = 3,47 \cdot 10^{10} \text{ Pa}; \quad E_z = 1,15 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$$

$$\nu_\theta = \nu_r = 0,33; \nu_z = 0,11$$

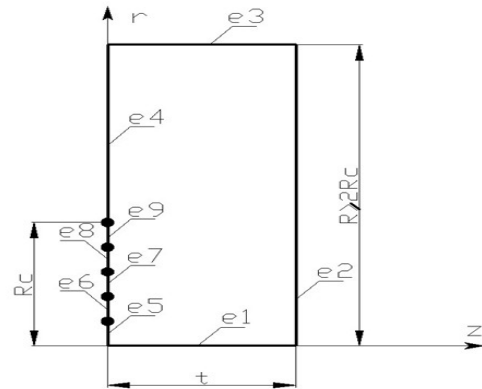
Алгоритм расчета: строится контур (фиг. 3) и сетка с наименьшим размером КЭ на радиусе R_c ;

граничные условия: при сжимающем ударе: перемещения поверхности e_1 по радиусу $\delta_r = 0$, а поверхности e_2 по глубине

$\delta_z = 0$; распределенная нагрузка $p = 0$ на поверхности e_3 и e_4 ; при изгибающем ударе: перемещения поверхности e_1 по радиусу $\delta_r = 0$, а поверхности e_2 по глубине $\delta_z = 0$; распределенная нагрузка $p = 0$ на поверхности e_2 и e_4

Таблица 2. Расчет граничных условий КЭ модели.

R, m	1,6								
R, mm	32	r, mm	0	0,8	1,6	2,4	3,2	4	
t, mm	20	dw(i), mm	0,250384	0,240983	0,210959	0,160857	0,090582	0	
delta_0, mm	0,250984	k	-0,0125	-0,03753	-0,06263	-0,08784	-0,11323	0	
		b	0,538	0,568	0,5982	0,6687	0,7399	0	
R, mm	32	r, mm	0	1,6	3,2	4,8	6,4	8	
t, mm	20	dw(i), mm	1,016133	0,976108	0,865731	0,654095	0,369602	0	
delta_0, mm	1,016133	k	-0,02502	-0,02524	-0,12603	-0,1778	-0,231	0	
		b	1,6901	1,7705	1,933	2,1815	2,522	0	
R, mm	32	r, mm	0	2,4	4,8	7,2	9,6	12	
t, mm	20	dw(i), mm	2,335206	2,245079	1,973159	1,514666	0,86126	0	
delta_0, mm	2,335206	k	-0,03755	-0,1133	-0,19103	-0,27226	-0,35886	0	
		b	3,7752	3,957	4,3301	4,915	5,7463	0	
R, mm	32	r, mm	0	3,2	6,4	9,6	12,8	16	
t, mm	20	dw(i), mm	4,287187	4,126705	3,640656	2,813242	1,615672	0	
delta_0, mm	4,287187	k	-0,05013	-0,15192	-0,25857	-0,37424	-0,5049	0	
		b	6,2772	6,6029	7,2855	8,396	10,068	0	
R, mm	32	r, mm	0	4	8	12	16	20	
t, mm	20	dw(i), mm	7,020008	6,789024	6,003875	4,684802	2,732821	0	
delta_0, mm	7,020008	k	-0,06275	-0,19129	-0,32977	-0,488	-0,68321	0	
		b	9,67	10,184	11,292	13,191	16,314	0	
R, mm	32	r, mm	0	4,8	9,6	14,4	19,2	24	
t, mm	20	dw(i), mm	10,83399	10,47194	9,360044	7,410903	4,43399	0	
delta_0, mm	10,83399	k	-0,07543	-0,23165	-0,40607	-0,62019	-0,92375	0	
		b	14,744	15,494	17,168	20,252	26,06	0	
R, mm	32	r, mm	0	5,6	11,2	16,8	22,4	28	
t, mm	20	dw(i), mm	16,50807	16,01426	14,48406	11,74334	7,360638	0	
delta_0, mm	16,50807	k	-0,08010	-0,27325	-0,46941	-0,78263	-1,3144	0	
		b	22,233	23,269	25,89	30,616	42,528	0	



Фиг.3. Схема КЭ модели для ELCUT

На каждом отрезке площадки контакта (e_5 – e_9) задаются перемещения по линейному закону: (6), $\delta_{zi} = b_i + 0 \cdot z + k_i \cdot r$. В первом приближении предполагается $w_0 = 0$. Последовательные приближения осуществляются подбором значения свободного члена b_i , который однозначно определяет величину w_0 . Расчет последовательных приближений производился до достижения $\sigma_z \rightarrow 0$ в точке с координатами $z = 0, R = R_c$ с точностью до $\pm 1 \text{ MPa}$. Результаты правильного решения записываются вдоль линий, параллельных оси симметрии с шагом $0,25 \cdot R_c$, от $r = 0$ до $r \approx R_c$. В итоге имеем поле механических напряжений в окрестностях контактной зоны и фактическую глубину проникновения ударника для каждого значения R_c .

2.2. Эквивалентное отверстие, как критерий верхней границы потери прочности композита после низкоскоростного удара

Для каждого расчетного случая интегрированием по площадям определяется:

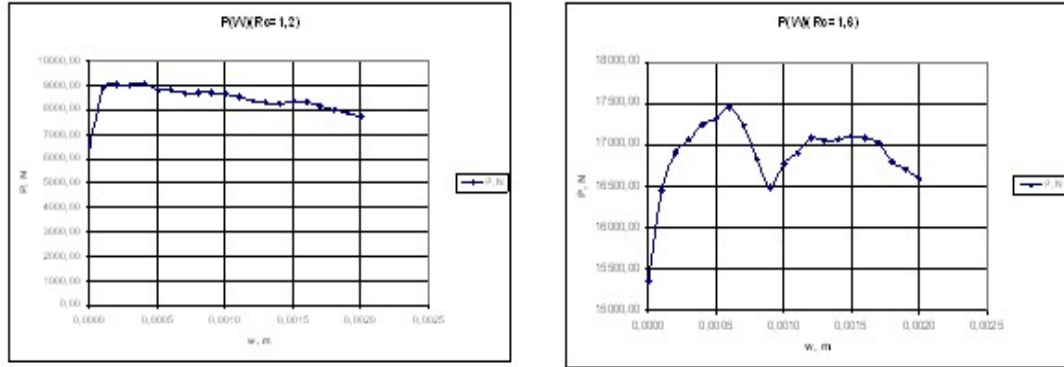
- сила удара: (7),

$$P = 0,5 \cdot \pi \cdot \Delta r \cdot \left[(\sigma_{z0} + \sigma_{z1})(r_0 + r_1) + (\sigma_{z1} + \sigma_{z2})(r_1 + r_2) + \dots + (\sigma_{z(n-1)} + \sigma_{zn})(r_{n-1} + r_n) \right]$$

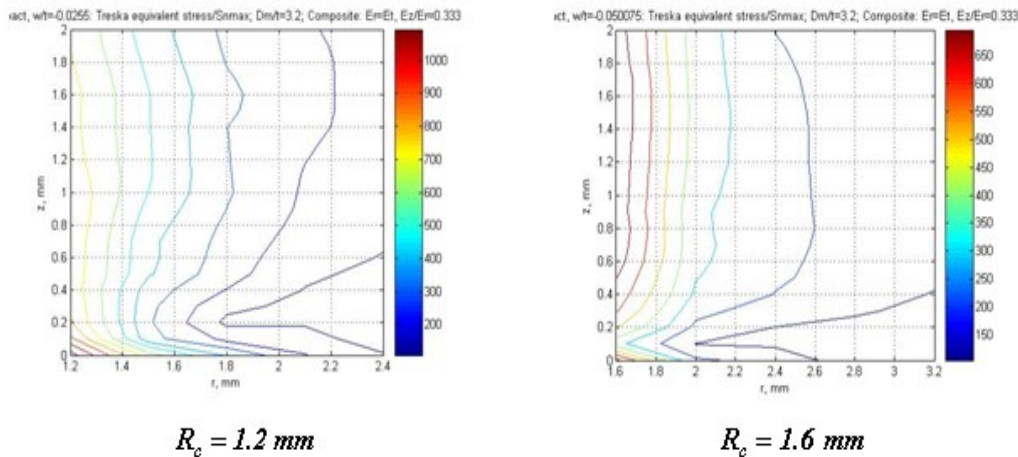
- энергия удара: (8), $T = 0,5 \cdot \sum P_n \cdot \Delta w$.

Таким образом, имеем функциональные зависимости $P(w_{max})$ и $T(w_{max})$ (таблица 3). Для пяти расчетных случаев имеются также графики

$P(w_{max})$ (фиг. 4) и распределение эквивалентных напряжений σ_{Tr} в окрестностях оси удара согласно КЭ-расчетам (фиг. 5).



Фиг.4. Зависимость силы удара P от глубины внедрения ударника (на примере Kc=1.2 мм и Kc=1,6 мм)



Фиг. 5. Распределение эквивалентных напряжений в окрестностях оси удара (на примере Kc=1.2 мм и Kc=1,6 мм)

По данным статистической обработки экспериментальных результатов [1], полученных в «Авиатест ЛНК» известны следующие характеристики материала КМКУ-2М.120.Э.01. с комбинированной укладкой волокон - 0°-45°-90°:

- предел прочности неповрежденного образца на растяжение $\sigma_p = 281,5$ МПа;
- предел прочности образца площадью поперечного сечения $S = 61,88$ мм² с отверстием $d = 5$ мм на растяжение $\sigma_{po} = 221,9$ МПа;
- коэффициент потери прочности образца площадью поперечного сечения $S = 61,88$ мм² с отверстием

$$d = 5 \text{ мм: (9), } \bar{P}_0 = \frac{\sigma_{po}}{\sigma_p} = \frac{221,9}{281,5} = 0,788$$

По известному значению разрушающих напряжений материала и результатам КЭ-расчетов были определены границы разрушенной зоны при различной энергии удара T . Исключением разрушенной зоны из расчетной модели для каждого расчетного случая определялись:

- остаточная площадь ее поперечного сечения $S_{ост}$;
- потерянная площадь: (10), $S_{номер} = S - S_{ост}$, мм²;
- соответствующее снижение прочности: (11),

$$\bar{P} = \frac{S_{ост}}{S};$$

- диаметр отверстия, эквивалентного удару с данной

энергией равен: (12), $d_{ekv} = \frac{S_{номер}}{t}$.

3. Результаты и дискуссия

Таблица 3. Результаты расчетов

R_c , мм	R_c/t	w_{max} , мм	w_{max}/t	T , Дж	$S_{нотер}$, мм ²	$S_{осм}$, мм ²	$d_{экв}$, мм	\bar{P}
0,4	0,2	0,0135	0,00675	0,118	0,201	61,679	0,100	0,997
0,8	0,4	0,0742	0,0371	1,316	4,611	57,269	2,306	0,926
1,2	0,6	0,1825	0,09125	8,845	8,114	53,765	4,057	0,869
1,6	0,8	0,3286	0,1643	17,727	9,064	52,816	4,532	0,854
2,0	1,0	0,5568	0,2784	40,740	13,107	48,773	6,554	0,788

Из таблицы 3 видно, что коэффициент потери прочности $\bar{P} = 0,788$ соответствует удару энергией $T = 40,74$ Дж, диаметр эквивалентного отверстия $d_{экв} = 6,554$ мм. По данным [1] точно такое снижение прочности вызывается отверстием

$d_o = 5$ мм. Это можно объяснить тем, что при расчетах влияние концентрации напряжений в зоне отверстия не принималось во внимание. Поэтому можно утверждать, что критерий эквивалентного отверстия применим для оценки верхней границы потери прочности композитного материала в результате низкоскоростного удара.

Таблица 4. Результаты расчетов

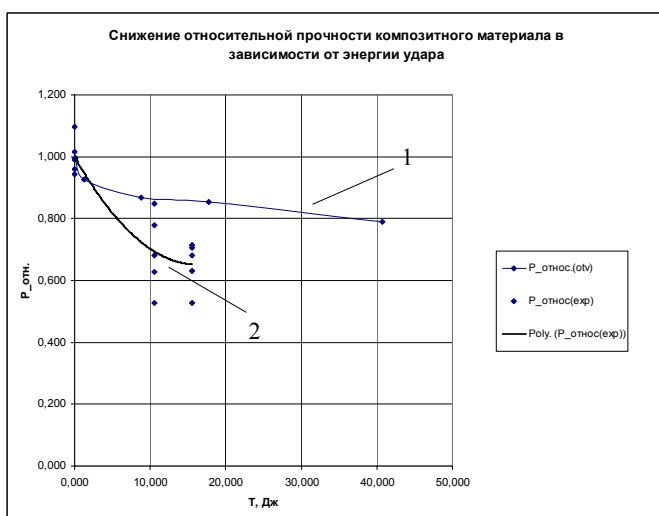
R_c , мм	R_c/t	w_{max} , мм	w_{max}/t	T , Дж	σ_k , МПа	\bar{P}
0.4	0.2	0.0135	0.00675	0.118	100	1
0.8	0.4	0.0742	0.0371	1.316	100	1
1.2	0.6	0.1825	0.09125	8.845	200	0,5
1.6	0.8	0.3286	0.1643	17.727	227	0,441
2.0	1.0	0.5568	0.2784	40.740	235	0,426

Известны также некоторые экспериментальные результаты. Экспериментальные образцы углепластиков в рабочей части имели ширину 12,5 мм и толщину 2 мм. Ударное повреждение осуществлялось на специальном копре. Груз с диаметром наконечника $d_n = 6,4$ мм свободно сбрасывался с высоты $h = 0,5$ м. Удар наносился по поверхности образца, свободно лежащего на жестком основании. Энергия удара определена по формуле: (13), $T = mgh$. Ее значение варьировалось массой груза: $m_1 = 2,16$ кг и $m_2 = 3,16$ кг. После этого образцы подвергались статическому

растяжению до разрушения. Фиксировались значения разрушающих напряжений σ_{p_imp} образца, подвергнутого удару. Затем по формуле: (14), $\bar{P} = \frac{\sigma_{p_imp}}{\sigma_p}$ определялась относительная потеря прочности. Таким образом, были испытаны по 5 образцов подвергнутых удару с энергией $T = 10,6$ Дж и $T = 15,5$ Дж. Результаты испытаний представлены в таблице 5.

Таблица 5. Экспериментальные результаты

T , Дж	0	0	0	0	0	0	0	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
\bar{P}	0,991	0,993	1,016	0,942	0,961	1,097	0,682	0,847	0,779	0,528	0,628	0,628	0,706	0,631	0,682	0,528	0,713



Фиг.6. Коэффициент потери прочности материала КМКУ-2М.120.Э.01., как функция энергии удара
1-по критерию эквивалентного отверстия; 2-по результатам эксперимента

4. Заключение

Как видно из графиков (фиг. 6), все экспериментальные точки находятся ниже границы снижения прочности, определенной по критерию эквивалентного отверстия. Это подтверждает, что в результате проведенных исследований разработан подход, позволяющий с достаточно точно определять верхнюю границу возможной потери прочности углепластика в результате повреждения низкоскоростным ударом, который может быть успешно использован при создании системы непрерывного контроля технического состояния воздушного судна.

5. Литература

1. Отчет № 08/АТ-03. По результатам статических испытаний композитных образцов гладкой панели на растяжение, сжатие и сдвиг – «Авиатест ЛНК», Рига: 2008.
2. Г.М. Гуняев, С.М. Боровская. “Стойкость углепластиков к ударному воздействию - Всесоюзный институт авиационных материалов”, Москва: 2007. - 125 с.
3. Русов Б.П. “Метод оценки сопротивления полимерных композиционных материалов удару // Механика конструкций из композитных материалов. – Новосибирск: Наука, 1984.
4. I .Pavelko, V. Pavelko, R. Chatys, D. Кепка. Some regularities of impact damage of fibrous composite. Scientific Proceeding of Riga Technical University, Series 6 “Transport and Engineering. Transport. Aviation Transport”, N27. – Riga, RTU, 2008. – Pp.350 – 358. (ISSN 1407-8015)
5. Igor V. Pavelko, Vitaly P. Pavelko, Rafal Chatys. Strength of fibrous composites with impact damage. Conference “Kompozyty polimerowe”. Warszawa-Wista 22-25.11.2007r. Mechanika Zeszyt Naukowy nr 219.-Warszawa: Oficyna wydawnicza politechniki warszawskiej, 2007. p.p. 187-198
6. В.П. Павелко, И.В. Павелко, Р. Хатыс. Влияние низкоскоростных ударных повреждений на прочность волокнистых композитов. Необратимые процессы в природе и технике: Труды Четвертой Всероссийской конференции 29-31 января 2007 г. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, ФИАН 2007. – с.352-355.