

РАСЧЁТ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТАКТНОЙ КРИВОЙ И ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ДЕГРАДАЦИИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА МИШЕНИ В ПРОЦЕССЕ УДАРА

CALCULATION OF CONTACT CURVE DEFINING CHARACTERISTICS AND ESTIMATION OF THE TARGET MATERIAL PROPERTY DEGRADATION DEGREE DURING IMPACT

Dr. sc. ing. Pavelko I.¹, Dr. sc. ing. Smolianinov M.²

Research-and-development center "CENTRE COMPOSITE" Joint Venture of LNK Group and Progresstech⁽¹⁾,
Darziema str. 60, Riga, LV-1073, Latvia;

RSEC "Aviatest LNK" Ltd.⁽²⁾, LV-1073, Rezeknes str. 1, Riga, Latvia

Abstract: *In many cases, the depth of a dent after a strike is the only information about the impact, which is known in the composite structure maintenance. It is topical to quickly identify damages emerging in composite structures for determining the residual strength of the structure, as well as dimensions and depth of the damage, so that to assess the necessity and the character of possible repair works. A method based on the energy balance for calculation of the governing impact parameters by using known values of the impact energy, impact speed, and the depth of residual indentation is justified. This solution makes it possible to adjust parameters of the degradation law of elastic characteristics of the target in simulating progressive destruction. This, in turn, makes it possible to increase the accuracy of determining the impact damage of the structure and its residual strength.*

KEYWORDS: CONTACT CURVE, RESIDUAL IDENTATION, DEGRADATION LAW, IMPACT DAMAGE, RESIDUAL STRENGTH.

1. Введение

Во многих случаях при эксплуатации инженерных конструкций из композитных материалов глубина вмятины является единственной доступной информацией о вызвавшем её ударе. В этой связи актуальной является возможность оперативной оценки повреждающих последствий удара, а также необходимости и характера ремонта при минимуме входной информации.

Большая часть ныне используемых программно-вычислительных комплексов даёт возможность рассчитывать композитные конструкции и их локальные зоны на удар методом конечных элементов и с учётом прогрессирующего разрушения, используя различные встроенные (например, Чанга, Хашина, Пака и др.) или задаваемые пользователем критерии. Однако для обеспечения приемлемой точности численного решения ныне существующие критерии разрушения требуют использования ряда дополнительных параметров, значения которых, как

правило, заранее не известны. Это значительно затрудняет внедрение названных критериев в практике инженерных расчётов. В большинстве случаев требуются дополнительные экспериментальные исследования с целью определения недостающих параметров, описывающих закон деградации упругих свойств материала композитной мишени в процессе ударного воздействия.

Исходя из сказанного, актуальной является задача разработки упрощённых моделей контактного взаимодействия при низкоскоростном ударе, остающихся при этом физически адекватными. Решение данной задачи позволит с приемлемой точностью прогнозировать ударную повреждаемость и остаточную прочность композитных конструкций, при минимизации объёма экспериментов. Названной проблеме посвящено данное исследование.

2. Предпосылки и средства для решения проблемы

Типичный для низкоскоростного удара вид контактной кривой (зависимость «контактная сила P_k – вертикальное перемещение точки контакта w ») показан на фиг.1 сверху. На фиг.1 снизу показаны: а) реальная контактная кривая после сглаживания флюктуаций (ограничена участками кривых нагрузки 1 и 2, участком линии 4, кривой разгрузки б); б) контактная кривая 1, получаемая расчётом на удар в упругой постановке (т. е. без учёта деградации упругих свойств материала мишени).

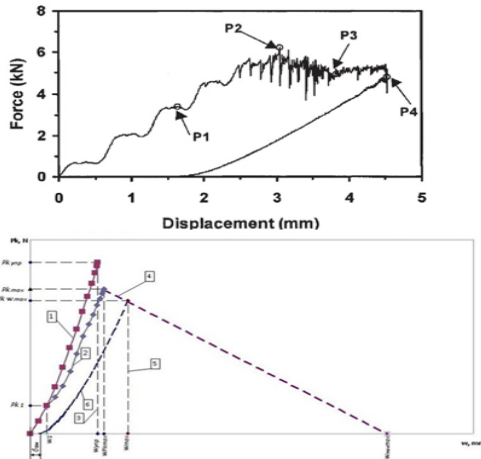
На основании расчётного моделирования [1] экспериментов, результаты которых приведены в [2], установлено, что при низкоскоростных ударах значительными массами (порядка нескольких кг) реальная временная функция контактной силы на

восходящем участке (т. е. до начала развития критических форм разрушений – разрывов волокон) практически полностью совпадает с получаемой расчётом в упругой постановке (фиг. 2).

В [3] было показано, что: а) характер контактной кривой при прочих одинаковых условиях не зависит от скорости удара (фиг. 3); б) вертикальное перемещение точки контакта, соответствующее максимуму контактной силы, ненамного превышает значение, снятое с кривой, полученной расчётом в упругой постановке, для такой же контактной силы (фиг. 4).

Данные результаты приводят к важному выводу: *Энергия, уходящая на растрескивание и расслоения пренебрежительно мала по сравнению с энергией, которую может поглотить композит, а также с*

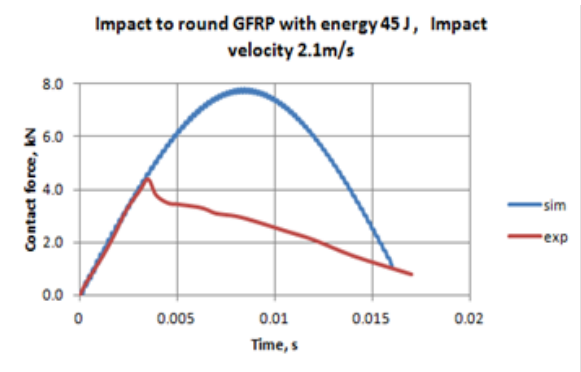
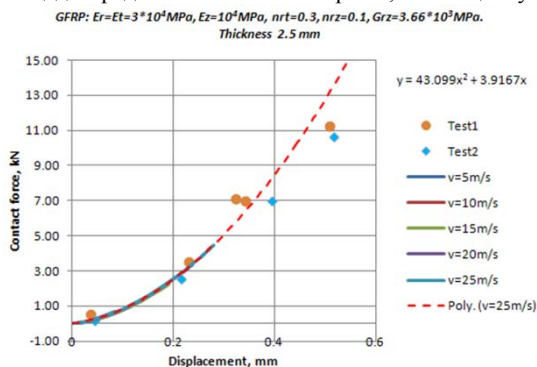
энергией, поглощаемой композитом после начала понижения контактной силы.



Фиг. 1. Типичный вид контактной кривой и характерные стадии ударного воздействия.

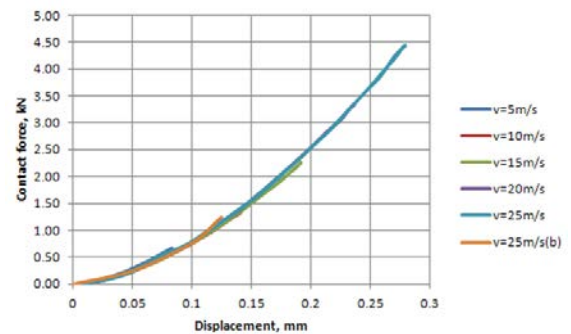
3. Решение рассматриваемой проблемы

На основании вывода, сделанного в п. 2, реальная контактная кривая может быть преобразована к виду, показанному на фиг. 4 – ограничивает площадь, выделенную красным фоном. С другой стороны, эта площадь представляет собой энергию, поглощённую



Фиг. 2. Временные функции контактной силы: экспериментальная – красная; расчётная (в упругой постановке) – синяя.

GFRP: $E_r = E_t = 3 \cdot 10^4 \text{ MPa}$, $E_z = 10^4 \text{ MPa}$, $\nu_{rt} = 0.3$, $\nu_{rz} = 0.1$, $G_{rz} = 3.66 \cdot 10^3 \text{ MPa}$. Thickness 2.5 mm



Фиг. 3. Кривые контактного нагружения композитной мишени при разных скоростях удара.

композитной мишенью в процессе удара. Она, в свою очередь, равна т. н. «избыточной энергии упругого удара» - площадь, выделенная на фиг. 4 зелёным фоном. Пренебрегая нелинейностью участка кривой 1, отсюда имеем

$$P_{k \max} W_{\max} - P_{k(w \max)} W_{(Pk \max)} + P_{k(w \max)} \delta_{\text{вм}} = P_{k \text{ упр}} W_{\text{упр}} - P_{k \max} W_{(Pk \max)} \quad (1)$$

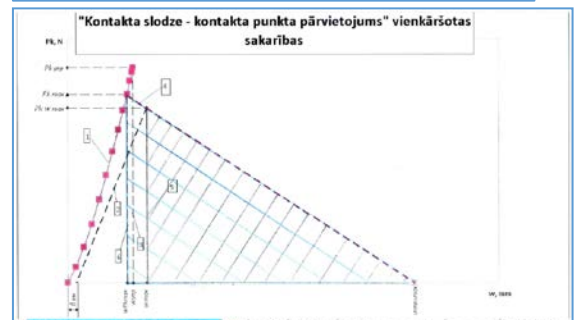
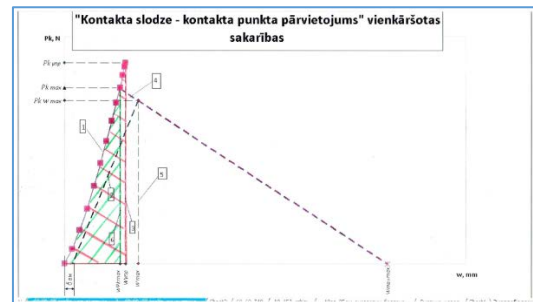
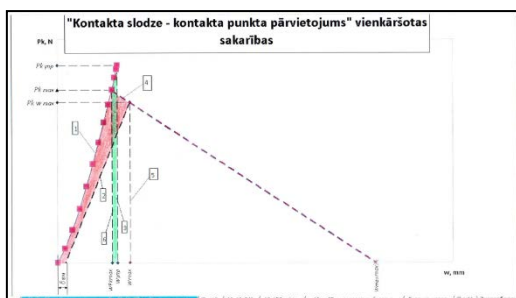
Здесь: $P_{k \max}$, W_{\max} - соответственно максимум контактной силы и максимум перемещения точки контакта, получаемые КЭ расчётом на удар с учётом прогрессирующего разрушения; $P_{k \text{ упр}}$, $W_{\text{упр}}$ - соответственно максимум контактной силы и максимум перемещения точки контакта, получаемые КЭ расчётом на удар в упругой постановке; $P_{k(w \max)}$ - контактная сила, соответствующая W_{\max} ; $W_{(Pk \max)}$ - вертикальное перемещение точки контакта, соответствующее $P_{k \max}$; $\delta_{\text{вм}}$ - глубина вмятины после удара.

Из подобия треугольников, обозначенных на фиг. 5 красной (его площадь эквивалентна энергии удара) и зелёной штриховкой следует очевидное соотношение

$$\frac{W_{упр}}{W_{(Pk\ max)}} = \frac{P_{k\ упр}}{P_{k\ max}} \tag{2}.$$

Фиг. 4. Кривые контактного нагружения композитной мишени: 1 - полученная расчётом в упругой постановке; 1-4-2 - реальная.

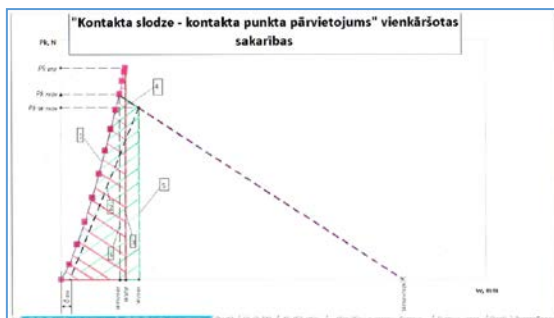
Фиг. 5. К получению формулы (2).



Фиг. 7. К получению формулы (4).

На фиг.6 обе площади (помеченные красной и зелёной штриховкой) эквивалентны энергии удара, откуда следует зависимость

$$w_{max} + (\delta_{ем} - w_{(Pk\ max)}) \frac{P_{k(w\ max)}}{P_{k\ max}} = \frac{P_{k\ упр}}{P_{k\ max}} W_{упр} - w_{(Pk\ max)} \tag{3}.$$



Фиг. 6. Графическое представление энергии удара: реальная – зелёная штриховка; в упругой постановке – красная штриховка.

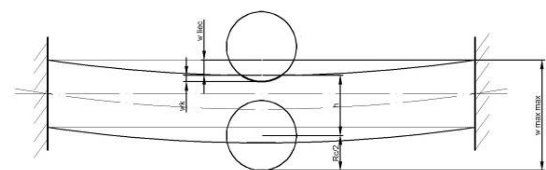
На основании подобия треугольников, показанных штриховкой с левым и правым наклоном на фиг. 7, получается зависимость

$$\frac{R_c + h - \left(\frac{P_{k\ max}}{k}\right)^{1/n}}{(w_{(Pk\ max)} - w_{max}) + \left(R_c + h - \left(\frac{P_{k\ max}}{k}\right)^{1/n}\right)} = \frac{P_{k\ max}}{P_{k(w\ max)}} \tag{4}.$$

В формуле (4): R_c – радиус сферического ударника; h – толщина композитной мишени; k – контактный

коэффициент; n – показатель степени контактного закона Герца.

Выражение $R_c + h - \left(\frac{P_{k\ max}}{k}\right)^{1/n}$ в формуле (4) означает наибольшее возможное перемещение ударника в процессе контактного взаимодействия (фиг. 8), а площадь, ограниченная линиями 1, 4 и осью абсцисс на фиг. 4 – 7 эквивалентна энергии насыщения – максимальной энергии, которую может поглотить композит в процессе контактного взаимодействия.



Уравнения (1) и (2) преобразуются к виду (5) и (6) соответственно:

Фиг. 8. Перемещение ударника и мишени в процессе контактного взаимодействия.

$$w_{max} + \delta_{ем} - w_{(Pk\ max)} \left[1 + \frac{W_{(Pk\ max)} - W_{max}}{R_c + h - \left(\frac{P_{k\ max}}{k}\right)^{1/n} \frac{W_{(Pk\ max)}}{W_{упр}}} \right] = \frac{W_{упр}^2 - W_{(Pk\ max)}^2}{W_{(Pk\ max)}} \tag{5}.$$

$$P_{k\ max} = P_{k\ упр} \frac{W_{(Pk\ max)}}{W_{упр}} \tag{6}.$$

Энергетическое выражение, получаемое по формуле площади заштрихованной зелёным цветом фигуры на фиг. 6

$$T = 0.5 [P_{k(w \max)} W_{(Pk \max)} - P_{k \max} W_{\max} - P_{k(w \max)} W_{\max}] \quad (7)$$

с учётом (3) и (4) преобразуется к виду

$$w_{\max} = \frac{2T + P_{k \text{ упр}} \frac{W_{(Pk \max)}^2}{W_{\text{упр}}}}{P_{k \text{ упр}} \frac{W_{(Pk \max)}}{W_{\text{упр}}}} \left[1 + \frac{W_{(Pk \max)} - W_{\max}}{R_c + h - \left(\frac{P_{k \text{ упр}} \cdot W_{(Pk \max)}}{k \cdot W_{\text{упр}}} \right)^{\sqrt[n]{n}}} \right]$$

(8).

4. Результаты и дискуссия

Для 27-слойной композитной пластины толщиной 5.29 мм был выполнен расчёт на изгибающий удар 40 Дж в упругой постановке. Материал монослоя пластины имеет следующие физико-механические характеристики: $E_1=130000 \text{ МПа}$; $E_2=E_3=6900 \text{ МПа}$; $G_{12}=G_{13}=5780 \text{ МПа}$; $G_{23}=2537 \text{ МПа}$; $\nu_{12}=0.36$. Укладка слоёв пластины: 45/0/-45/0/90/0/-45/45/0/45/0/-45/0/90/0/-45/0/45/0/45/-45/0/90/0/-45/0/45. Удар наносился стальным ударником массой 5.5 кг с диаметром полусферического наконечника 16 мм. Размеры ударной зоны мишени в плоскости слоёв: 60×60 мм. Расчётом были определены значения $P_{k \text{ упр}}$ и $W_{\text{упр}}$, глубина вмятины определялась экспериментом равнялась $\delta_{\text{эм}}=0.53 \text{ мм}$. Пользуясь изложенной в п. 3 методикой, были вычислены следующие значения определяющих параметров контактного взаимодействия: $P_{k \max}=31.35 \text{ кН}$, $P_{k(w \max)}=30.72 \text{ кН}$, $w_{\max}=2.31 \text{ мм}$, $w_{(Pk \max)}=2.07 \text{ мм}$.

5. Заключение

В работе предложен и обоснован метод определения характерных параметров контактного взаимодействия при низкоскоростном ударе, позволяющий адекватно моделировать процесс развития повреждений конечно-элементным расчётом. Это даёт возможность значительно сократить количество входных параметров, необходимых для использования ныне существующих критериев разрушения в конечно-элементных расчётах. Получаемое в итоге повреждённое состояние композитной конструкции даёт возможность получать достоверные результаты по остаточной прочности после удара при различных видах статического нагружения.

6. Литература

1. I. Pavelko, V. Pavelko, M. Smolyaninovs, Helge Pfeiffer, Martine Wevers. Simulation of Impact Damage in a Composite Plate and its Detection – Excerpt from the Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Milan.
2. Belingardi G., Vadori R. Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates – International Journal of Impact Engineering 27 (2002) 213 – 229 pp.

Решение системы уравнений (4), (5), (6), (8) даёт значения определяющих параметров контактного взаимодействия: $P_{k \max}$, $P_{k(w \max)}$, w_{\max} и $w_{(Pk \max)}$.

3. Pavelko I., Pavelko V., and Smolyaninov M. Impact of composite component of aircraft and its damage – XVI International Conference Mechanics of Composite Materials, Book of Abstracts, May 28 – June 1, 2012 Riga, Latvia, p. 165.