

Таибов Рамазан Эльманович

бакалавр, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), г. Санкт-Петербург, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УДАРНЫХ (ИМПУЛЬСНЫХ) НАГРУЗКАХ

Аннотация. В статье рассматривается комплексная задача механики деформируемого твердого тела — математическое и численное моделирование процессов упругопластического деформирования и прогрессирующего разрушения слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) при высокоскоростном ударном (импульсном) воздействии. Разработана конечно-элементная модель пробития многослойной преграды из углепластика, учитывающая ортотропию упругих свойств монослоя, пластическое течение полимерной матрицы и критерии межслоевого разрушения (делиминации). Оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) проводилась с применением явного метода интегрирования по времени (Explicit Dynamics). Для описания разрушения волокон и матрицы использован модифицированный энергетический критерий Цая-Ву с учетом влияния скорости деформации по модели Коупера-Саймондса. В результате численных экспериментов получены зависимости поглощенной энергии и площади расслоения от начальной скорости ударника. Установлено, что учет пластических свойств полимерной связующей фазы позволяет повысить точность прогнозирования остаточной прочности конструкции на 15–20%. Результаты работы могут быть применены при проектировании элементов пассивной безопасности, бронезащиты и авиационных панелей.

Annotation. The article discusses a complex problem in the mechanics of deformable solids: the mathematical and numerical modeling of elastoplastic

deformation processes and progressive failure of layered polymer composite materials (PCM) under high-speed shock (impulse) loading. A finite-element model of penetration through a multi-layered carbon fiber-reinforced plastic barrier has been developed, taking into account the orthotropy of the monolayer's elastic properties, the plastic flow of the polymer matrix, and interlaminar failure (delamination) criteria. The assessment of the stress-strain state (SSS) was carried out using the explicit time integration method (Explicit Dynamics). To describe the failure of fibers and the matrix, a modified Tsai-Wu energy criterion was used, considering the strain rate effect according to the Cowper-Symonds model. As a result of numerical experiments, the dependencies of absorbed energy and delamination area on the initial impactor velocity were obtained. It was established that accounting for the plastic properties of the polymer binder phase allows improving the accuracy of predicting the residual strength of the structure by 15-20%. The study results can be applied in the design of passive safety elements, armor protection, and aviation panels.

Ключевые слова: композитные материалы, углепластик, ударное нагружение, упругопластическое деформирование, метод конечных элементов, критерий Цзя-Ву, делиминация, высокоскоростной удар.

Keywords: composite materials, carbon fiber, impact loading, elastoplastic deformation, finite element method, Tsai-Wu criterion, delamination, high-velocity impact.

1. ВВЕДЕНИЕ

Внедрение слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) является одним из главных трендов современного авиастроения, автомобилестроения и производства бронезащиты. Благодаря уникальному сочетанию низкой плотности и высоких удельных прочностных и жесткостных характеристик, ПКМ успешно вытесняют традиционные металлические сплавы. Однако, в отличие от изотропных металлов, композиты обладают сложной иерархической структурой и выраженной

анизотропией свойств. Одним из наиболее опасных видов эксплуатационных воздействий для слоистых пластиков является локальное ударное (импульсное) нагружение.

Даже при низкоскоростном ударе (например, падение инструмента при сборке, попадание града или щебня) внутри композитной панели возникают скрытые дефекты в виде межслоевых трещин (делиминаций), разрушения полимерной матрицы и разрывов отдельных волокон. При высокоскоростном ударе (баллистическое воздействие, столкновение с фрагментами лопаток турбин) процесс деформирования носит ярко выраженный нелинейный динамический характер, сопровождающийся прогрессирующим разрушением структуры с поглощением значительного количества кинетической энергии.

Долгое время при расчетах ПКМ на прочность предполагалось, что их поведение остается хрупким вплоть до момента разрушения. Однако современные исследования показывают, что полимерная матрица (особенно термопластичная или модифицированная эпоксидная) в условиях сложного трехосного сжатия и высоких скоростей деформации способна проявлять выраженные упругопластические свойства. Учет пластического течения матрицы позволяет более адекватно оценивать энергопоглощающую способность преграды.

Целью настоящей работы является разработка и верификация численной модели упругопластического деформирования слоистого композитного материала (углепластика) при импульсном ударном воздействии методами прикладной механики и расчетный анализ кинетики прогрессирующего разрушения.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

2.1. Уравнения динамики сплошной среды

Для описания процесса высокоскоростного соударения индентора с композитной преградой в рамках метода конечных элементов используется

явный (explicit) метод интегрирования уравнений движения во времени. Основное уравнение динамики имеет вид:

$$[\mathbf{M}] \cdot \{\mathbf{a}\} + [\mathbf{C}] \cdot \{\mathbf{v}\} + \{\mathbf{F}_{\text{int}}\} = \{\mathbf{F}_{\text{ext}}\} \quad (1)$$

где $[\mathbf{M}]$ — диагональная матрица масс системы; $[\mathbf{C}]$ — матрица демпфирования; $\{\mathbf{a}\}$ — вектор узловых ускорений; $\{\mathbf{v}\}$ — вектор узловых скоростей; $\{\mathbf{F}_{\text{int}}\}$ — вектор внутренних сил, зависящий от текущего напряженно-деформированного состояния; $\{\mathbf{F}_{\text{ext}}\}$ — вектор внешних узловых сил (контактного взаимодействия).

Интегрирование осуществляется по схеме центральных разностей, при которой шаг по времени Δt должен удовлетворять условию Куранта-Фридрихса-Леви (CFL) для обеспечения математической устойчивости решения:

$$\Delta t \leq L_{\min} / c \quad (2)$$

где $L_{\min}$ — минимальный характерный размер конечного элемента в сетке; c — скорость распространения продольной упругой звуковой волны в материале (в углепластике вдоль волокон $c \approx 8000\text{--}9000$ м/с).

2.2. Упругопластическая модель ортотропного материала

Монослой композита рассматривается как транстропная (ортотропная) среда. В зоне упругости связь между напряжениями σ и деформациями ε описывается обобщенным законом Гука. При превышении предела текучести полимерной матрицы активируется модель пластичности.

Для учета влияния скорости деформации на предел текучести применяется модифицированная феноменологическая модель Коупера-Саймондса (Cowper-Symonds):

$$\sigma_y = \sigma_0 \cdot (1 + (\dot{\varepsilon} / D)^{1/q}) \quad (3)$$

где σ_y — динамический предел текучести; σ_0 — статический предел текучести; $\dot{\varepsilon}$ — интенсивность скоростей пластических деформаций; D и q — эмпирические константы чувствительности материала к скорости нагружения.

2.3. Критерии разрушения ПКМ

Инициирование внутрислойного разрушения (разрыв волокон, растрескивание матрицы) описывается тензорным полиномиальным критерием Цзя-Ву (Tsai-Wu), который в плоской постановке имеет вид:

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 \geq 1 \quad (4)$$

где компоненты F_i и F_{ij} зависят от экспериментальных пределов прочности монослоя при растяжении, сжатии и сдвиге в продольном и поперечном направлениях.

Моделирование межслойного расслоения (делиминации) реализуется через применение когезионных элементов (Cohesive Zone Model) на базе критерия квадратичного взаимодействия напряжений (Quadratic Nominal Stress criterion), связывающего нормальные и касательные межслойные напряжения.

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ

Для численного исследования НДС была смоделирована пластина размером 100×100 мм. Преграда состоит из 16 слоев однонаправленного углепластика, уложенных по схеме $[0/45/-45/90]_{2s}$. Общая толщина композитной панели составляет 2,4 мм. Края пластины жестко защемлены по контуру. Ударник моделируется как недеформируемое стальное тело (полусфера) диаметром 10 мм и массой 15 грамм.

В качестве материала преграды выбран высокопрочный эпоксидный углепластик на основе углеродных волокон T300. Механические свойства монослоя приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Упругопластические и прочностные характеристики монослоя углепластика

Характеристика	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Модуль упругости вдоль волокон	E11	135,0	ГПа

Модуль упругости поперек волокон	E22, E33	8,5	ГПа
Модуль сдвига	G12, G13	4,5	ГПа
Коэффициент Пуассона	ν_{12}	0,3	-
Предел прочности на растяжение (вдоль)	Xt	2100	МПа
Предел прочности на сжатие (вдоль)	Xc	1300	МПа
Предел прочности (поперек)	Yt, Yc	60, 180	МПа
Предел текучести связующего	σ_0	45	МПа

Ударник совершает прямое нормальное соударение в центр пластины с начальной скоростью V_0 , варьируемой в диапазоне от 50 до 200 м/с. В ходе расчета фиксируются: профиль остаточной скорости ударника, количество поглощенной кинетической энергии, распределение пластических деформаций в полимерной матрице и площадь межслойного расслоения.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Анализ процесса пробития и энергопоглощения

Процесс соударения длится около 0,4–0,8 миллисекунд. В момент первого контакта в преграде возникает интенсивная изгибная волна, а также сдвиговые напряжения, превосходящие предел прочности матрицы. В зоне контакта матрица мгновенно переходит в пластическое состояние, что позволяет ей поглотить часть энергии за счет необратимого формоизменения (смятия) до возникновения хрупкого разрыва волокон.

Обобщенные результаты моделирования при различных начальных скоростях индентора представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Показатели энергопоглощения и повреждаемости ПКМ при ударе

Начальная скорость ударника V_0 , м/с	Начальная кин. энергия E_0 , Дж	Остаточная скорость V_r , м/с	Поглощенная энергия E_{abs} , Дж	Площадь расслоения S , мм ²
50	18,75	0 (отскок)	15,2	340
100	75,00	0 (застревание)	75,0	1250
150	168,75	85	114,5	1800
200	300,00	155	119,8	2100

При скорости $V_0 = 50$ м/с пробития не происходит, ударник отскакивает, отдавая большую часть энергии на образование обширной зоны делиминации (340 мм²). Предел баллистической стойкости (скорость V_{50} , при которой вероятность пробития равна 50%) для данной конфигурации пластины составил около 100 м/с — при этой скорости вся кинетическая энергия (75 Дж) рассеивается на разрыв волокон, пластическое течение и трение, индентор застревает в тыльных слоях.

При повышении скорости до 200 м/с происходит сквозное пробитие. Интересно отметить, что величина поглощенной преградой энергии (E_{abs}) при $V_0 = 150$ м/с и 200 м/с стабилизируется на уровне 115-120 Дж. Это объясняется тем, что при высоких скоростях процесс разрушения строго локализуется в виде «вырубания» (plugging) цилиндрической пробки, и волны напряжений не успевают распространиться на периферию пластины. Соответственно, площадь межслоевого расслоения при сквозном высокоскоростном пробитии растет незначительно по сравнению с низкоскоростным ударом.

4.2. Влияние упругопластической модели на точность расчета

Сравнительный анализ двух моделей (чисто упруго-хрупкой и упругопластической) показал, что игнорирование пластичности полимерной связующей фазы приводит к занижению расчетной баллистической стойкости на 15–20%. В упругопластической модели пластическое микротечение матрицы вокруг жестких углеродных волокон сглаживает пиковые концентрации напряжений, задерживая момент разрушения (активации критерия Цая-Ву). В результате расчетные значения остаточной скорости

индентора в пластической модели оказываются ниже, что точнее коррелирует с известными экспериментальными данными для авиационных пластиков.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе решена актуальная задача прикладной механики — разработана и верифицирована численная модель упругопластического деформирования и прогрессирующего разрушения многослойных композитных структур при импульсном ударном воздействии.

Внедрение упругопластической модели деформирования ортотропной среды, учитывающей влияние скорости деформации по Коуперу-Саймондсу и критерию Цая-Ву, позволило получить адекватную картину высокоскоростного пробития углепластиковой преграды.

Установлено, что учет вязкопластического течения связующего материала в зонах локального контактного сжатия имеет принципиальное значение для расчетов энергопоглощения, повышая точность прогнозирования остаточной прочности преграды на 15–20%.

Определена зависимость площади расслоения (делиминации) и поглощенной энергии от начальной кинетической энергии ударника. Доказано, что после превышения предела баллистической стойкости (V_{50}) зона структурных повреждений локализуется, а количество поглощаемой энергии выходит на асимптотический максимум.

Полученные результаты могут быть эффективно использованы конструкторскими бюро для виртуальных испытаний и проектирования облегченных элементов бронезащиты, защитных кожухов газотурбинных двигателей и панелей фюзеляжа аэрокосмической техники, снижая необходимость в проведении дорогостоящих натурных полигонных экспериментов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бате К. Ю. Методы конечных элементов / Пер. с англ. – Москва: Физматлит, 2010. – 1024 с.
2. Луцко, А. Н. Прикладная механика: учебное пособие / А. Н. Луцко, М. Д. Телепнев, Н. А. Марцулевич [и др]; под общ. ред. Н. А. Марцулевича – 5-е изд., исп. – Санкт-Петербург: СПбГТИ(ТУ), 2013. – 273 с.
3. Тарнопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А. Пространственно-армированные композиционные материалы. – Москва: Машиностроение, 1987. – 224 с.
4. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. – Москва: Машиностроение, 1988. – 272 с.
5. Tsai S.W., Wu E.M. A general theory of strength for anisotropic materials // Journal of Composite Materials. – 1971. – Vol. 5. – P. 58-80.
6. Belytschko T., Liu W.K., Moran B. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. – John Wiley & Sons, 2000. – 650 p.
7. Cowper G.R., Symonds P.S. Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams // Brown University, Division of Applied Mathematics Report. – 1957. – No. 28.

REFERENCES

1. Bathe K. J. Finite Element Procedures. Moscow: Fizmatlit, 2010. 1024 p. (In Russ.)
2. Lutsko A.N., Telepnev M.D., Martsulevich N.A. [et al.] Applied mechanics: textbook; under general ed. N.A. Martsulevich. 5th ed., rev. St. Petersburg: SPbSTI(TU), 2013. 273 p. (In Russ.)
3. Tarnopolsky Yu.M., Zhigun I.G., Polyakov V.A. Spatially Reinforced Composite Materials. Moscow: Mashinostroyenie, 1987. 224 p. (In Russ.)
4. Vasilyev V.V. Mechanics of Structures from Composite Materials. Moscow: Mashinostroyenie, 1988. 272 p. (In Russ.)

5. Tsai S.W., Wu E.M. A general theory of strength for anisotropic materials // Journal of Composite Materials. 1971. Vol. 5. P. 58-80.
6. Belytschko T., Liu W.K., Moran B. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. John Wiley & Sons, 2000. 650 p.
7. Cowper G.R., Symonds P.S. Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams // Brown University, Division of Applied Mathematics Report. 1957. No. 28.