В.С. Ерасов<sup>1</sup>, В.Д. Крылов<sup>1</sup>, С.В. Панин<sup>1</sup>, А.А. Гончаров<sup>1</sup>

## ИСПЫТАНИЯ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА УДАР ПАДАЮЩИМ ГРУЗОМ

Проанализированы стандарты проведения механических испытаний образцов из полимерных композиционных материалов (ПКМ) на удар падающим грузом и на сжатие после удара с определением остаточной прочности. Показаны различия в способах крепления образцов ПКМ при испытании на удар. Проанализированы расчетные методы оценки остаточной прочности образцов ПКМ при растяжении после удара согласно критерию эквивалентного отверстия (значения остаточной прочности при этом получаются завышенными) и критерию концентраций (значения остаточной прочности при этом получаются заниженными).

*Ключевые слова:* полимерный композиционный материал, удар падающим грузом, сжатие после удара, остаточная прочность.

V.S. Yerasov<sup>1</sup>, V.D. Krylov<sup>1</sup>, S.V. Panin<sup>1</sup>, A.A. Goncharov<sup>1</sup>

## DROP-WEIGHT IMPACT TESTING OF POLYMER COMPOSITE MATERIAL

Standards for mechanical testing of polymer composite materials samples (PCM) to define drop-weight impact, compression after the impact and residual strength were analyzed. The differences in the ways of PCM-samples mounting while impact testing were shown. Calculation methods for residual strength estimation of PCM samples at tension after impact tests according to the criterion of an equivalent hole (the residual strength value are obtained as too high) and the criterion of concentration (the residual strength values are obtained as understated) were analyzed.

*Keywords:* polymer composite material, drop-weight impact, compression after impact, residual strength.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят все более широкое применение в изделиях авиационной техники. Доля ПКМ в конструкции ЛА неуклонно растет с начала 80-х годов ХХ века и на сегодняшний день использование конструкционных материалов в готовых изделиях приближается к 50–60%. Элементы крыльев и фюзеляжа новых самолетов Boeing 787, Airbus A380 и др. изготовляют из слоистых ПКМ [1].

При сложном напряженно-деформированном состоянии, возникающем при эксплуатации авиационной техники, вместе с наполнителем (волокном) в ПКМ испытывают напряжения полимерная матрица и межфазная зона – область между матрицей и волокном, которые являются наиболее слабыми местами, что является опасным для ПКМ. Для большинства полимерных матриц, в том числе наномодифицированных, модуль упругости не превышает 4,6 ГПа [2], а прочность: 150 МПа, что значительно меньше аналогичных характеристик наполнителя (см. таблицу). Повышения надежности и ресурса изделий из ПКМ для авиационной техники можно достичь благодаря конструктивным решениям, исключающим нагружение матрицы и межфазной зоны, а

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

также путем разработки полимерных матриц с повышенными деформационными, ударными характеристиками и трещиностойкостью [3–6].

Материал	Марка	<i>Е</i> , ГПа	σ <sub>в</sub> , МПа
Углеродный наполнитель	HTS-40	240	4300
	T-800	280-310	5100
Полимерная матрица	ВСЭ-1212	3,8	60

Физико-механические	характеристики	наполнителя и матрицы

Проблемой является достоверная оценка работы полимерной матрицы и межфазной зоны в ПКМ [7]. Одним из методов такой оценки, позволяющей ранжировать ПКМ по устойчивости к воздействию таких факторов, как повреждение из-за столкновения с птицами, падение инструмента при ремонтных и регламентных работах и др., является испытание на удар падающим грузом. Определение остаточной прочности поврежденного образца позволяет оценить потерю несущей способности.

Существует ряд стандартов для проведения испытаний на удар [8–11] и на сжатие после удара [10–14].

Испытания падающим грузом проводят на плоских прямоугольных образцах из ПКМ толщиной от 4 до 6 мм с квазиизотропной схемой армирования  $[+45/0/-45/+90]_{ns}$  – для однонаправленных лент и  $[(+45/-45)/(0/+90)]_{ns}$  – для текстильных тканей. Допускаются также и другие варианты армирования. Образец закрепляется в четырех точках в зажимном приспособлении в виде рамки с прямоугольным отверстием, с усилием зажатия не менее 1100 Н в каждой точке. Удар наносится бойком полусферической формы  $\emptyset 16$  мм (рис. 1). После отскока ударник (боек) блокируется для предотвращения повторного соударения.



Рис. 1. Копер для испытаний на удар падающим грузом (*a*), современный копер «COESFELD Fallbolzen» (б)

Могут использоваться приспособления с круглым (зажим образца осуществляется по контуру) или прямоугольным (зажим образца осуществляется в четырех углах) отверстием (рис. 2). При испытании квазиизотропного образца в приспособлении с круглым отверстием расслоение и расшепление ПКМ распространяется равномерно и симметрично относительно центра удара (реакция опор одинакова). Для неквазиизотропного образца расслоение ПКМ зависит от способа армирования (реакция опор одинакова). При испытании образцов как квазиизотропных, неквазиизотропных в приспособлении с прямоугольным отверстием так и возникающий в креплении на контуре момент зависит от расстояния до точки удара. Поэтому круглое отверстие приспособления обладает явным преимуществом по сравнению с прямоугольным, где зажим образца осуществляется в нескольких точках. Однако распространение повреждений (расслоений) в ПКМ ограничено вследствие небольших размеров рабочей зоны образца, диаметр которой всего 45 мм. Дальнейшее развитие данного метода требует стандартизации методов крепления образцов и разработки специальных конструктивных решений.

образец Собразец Собра Собр

Рис. 2. Зажимное приспособление для испытаний на удар падающим грузом с круглым (*a*) и прямоугольным отверстием (б)

Вышеперечисленные методы можно разделить на две группы.

В стандартах [8, 10, 12] задается нормированная энергия ударника заданной массы: 6,7 Дж на миллиметр толщины образца. Энергия подбирается исходя из толщины образца. При таком выборе энергии возможны виды разрушения ПКМ: сквозной

a)

пробой с разрушением волокон, повреждение волокон с расслоением, расслоение без повреждения волокон.

В стандартах [9, 13] испытания осуществляются в диапазоне энергий удара от 9 до 40 Дж, что соответствует нормированной энергии 2–8 Дж/мм для образцов толщиной ~5 мм. Находится энергия, которая соответствует «едва видимому повреждению от ударного воздействия» – вмятине глубиной 0,3 мм. При данных энергиях удара может происходить только расслоение ПКМ, без пробоя материала.

В обоих случаях при испытаниях записывается зависимость контактной силы от продолжительности контакта в процессе удара образца (рис. 3). По результатам испытания проводят оценку повреждений образцов, фиксируя глубину и размеры зоны повреждения, геометрические размеры отпечатка, их изменение с течением времени (релаксация отпечатка), местоположение сквозной зоны повреждения, контактную силу ( $F_1$ ), поглоценную энергию в момент скачка на диаграмме «контактная сила-продолжительность контакта», максимальную контактную силу ( $F_{max}$ ), максимальную поглощенную энергию. Методами неразрушающего контроля выявляют внутреннюю область повреждения.



Продолжительность контакта, с

Рис. 3. Кривая зависимости контактной силы от продолжительности при испытании на удар падающим грузом



Рис. 4. Образцы углепластика ВКУ-32 после испытаний на удар: *а* – вмятина; *б* – пробой

На рис. 4 показаны образцы углепластика марки ВКУ-32 толщиной 2,8 мм после испытания на удар падающим грузом на вертикальном копре «COESFELD Fallbolzen». При энергии удара 2,5–6 Дж/мм образцы имели едва заметные повреждения – вмятины (рис. 4, *a*), а при энергии более 13,0 Дж/мм – сквозной пробой (рис. 4, *б*). Зона повреждения оценивалась методом ультразвукового контроля (рис. 5) с использованием фазированных решеток [15]. Однако ультразвуковой анализ позволяет получить данные только о проекциях расслоений на плоскость, но не дает информации о зависимости размера области расслоения от координаты по толщине образца и повреждений на каж-

дом слое из-за перекрытия слоев. Предлагается использовать послойный анализ, например, методом томографии.



Рис. 5. Зона повреждения образца углепластика, определенная методом ультразвукового контроля



Рис. 7. Диаграммы сжатия образцов после удара (скорость нагружения 1,25 мм/мин)



Рис. 6. Приспособление для испытания на сжатие после удара



Рис. 8. Профиль деформированной поверхности образца при низкоскоростном ударе ударником со сферической поверхностью:  $R_c$  – радиус площадки контакта;  $W_0$  – глубина зоны сопряжения по смещению поверхности контакта;  $\delta_0$  – глубина зоны контакта ударника и образца

Проведены испытания при сжатии для оценки остаточной прочности, в которых образцы фиксируют в специальном приспособлении в виде рамки (рис. 6). Среднее значение разрушающей нагрузки образцов углепластика составило ~40 кН (рис. 7).

В работе [16] для расчета остаточной прочности ПКМ при растяжении после ударного воздействия исследована зависимость снижения прочности композиционного материла от энергии удара. Показано, что значения остаточной прочности лежат в интервале, где верхняя граница определяется по критерию эквивалентного отверстия, а нижняя граница – по критерию концентраций. Профиль деформированной поверхности образца в момент соударения схематически изображен на рис. 8.

Критерий эквивалентного отверстия предполагает следующее: исходя из характера повреждения и уровня энергии ударного воздействия, которому подвергается образец из ПКМ, рассчитано, что такой образец может быть заменен аналогичным с эквивалентным отверстием для определения остаточной прочности при растяжении [14]. Значения остаточной прочности при этом получаются завышенными.

Критерий концентраций основан на конечно-элементных расчетах концентрации напряжений у границы деформированной зоны. При этом учитывается, что максимальные напряжения у границы вмятины – концентрация напряжений – распространяется по всему ослабленному сечению (вмятина и расслоение). Значения остаточной прочности оказываются заниженными.

Ширина коридора экспериментальных данных, описываемых моделью [15], составляет значительную величину. Так, при энергии удара 10,6 Дж разброс значений отношения пределов прочности образца с отверстием и неповрежденного образца (без отверстия) составляет ±0,16 при средней величине 0,69 (коэффициент вариации 0,16). Кроме того, сам алгоритм расчета эквивалентного отверстия представляется трудоемким.

Проведенный анализ показывает, что необходима унификация методов крепления образцов при испытании на удар падающим грузом, а также включение в стандарты на методы испытаний при сжатии и растяжении образцов ПКМ после удара, унифицированных расчетных методов с целью сокращения объема механических испытаний.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 231–242.
- Смотрова С.А., Осипчик В.С., Смотров А.В. Создание эпоксидных связующих нового поколения для ПКМ, используемых при изготовлении агрегатов натурных конструкций ЛА и их ДПМ //Механика и наномеханика структурно-сложных и гетерогенных сред. 2010. Т. 1. С. 141–149.
- 3. Ерасов В.С. Физико-механические характеристики как основные интегральные показатели качества авиационных конструкционных материалов. М.: ВИАМ. 2011. 16 с.
- 4. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сеник В.Я., Коновалов В.В., Трупин Ю.П., Нестеренко Г.И. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 19–21.
- 5. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.
- 6. Ерасов В.С., Финогенов Г.Н. Трещиностойкость полимерных композитов при межслойном отрыве и сдвиге //Авиационные материалы и технологии. 2003. №3. С. 62–67.
- 7. Ерасов В.С., Котова Е.А. Эрозионная стойкость авиационных материалов к воздействию твердых (пылевых) частиц //Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 30–36.
- 8. ASTM D 7136/D 7136M 07 Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event.
- 9. Метод испытания полимерных композиционных материалов на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом: СТО 1-595-30-406–2011. М.: ВИАМ. 2011.
- 10. AITM 1.0010–94 Airbus Industrie Test Method. Fiber Reinforced Plastics. Determination of compression strength after impact.
- 11. ASTM D 7137/D 7137M–07 Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates.
- 12. SACMA SRM 2R 1994 Specification.
- 13. ASD-STAN PREN 6038 EN-Aerospace Series Fibre Reinforced Plastics Test Method Determination of the Compression Strength After Impact-Edition P1.
- 14. Метод испытания полимерных композиционных материалов на сжатие после удара: СТО 1-595-30-409–2011. М.: ВИАМ. 2011.
- 15. Бойчук А.С., Генералов А.С., Далин М.А., Степанов А.В. Неразрушающий контроль технологических нарушений сплошности Т-образной зоны интегральной конструкции из ПКМ с использованием ультразвуковых фазированных решеток //Все материалы. Энциклопедический справочник. М.: 2012. №10. С. 38–43.

16. Павелко И., Смолянинов М. Исследование влияния ударного повреждения на прочностные характеристики композита //Механика композитных материалов. 2011. Т. 47. №3. С. 471–484.

## REFERENS LIST

- 1. Grashhenkov D.V., Chursova L.V. Strategija razvitija kompozicionnyh i funkcional'nyh materialov [Strategy of development of composite and functional materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 231–242.
- 2. Smotrova S.A., Osipchik V.S., Smotrov A.V. Sozdanie jepoksidnyh svjazujushhih novogo pokolenija dlja PKM, ispol'zuemyh pri izgotovlenii agregatov naturnyh konstrukcij LA i ih DPM [Reviews creation epoxy binding new generation for PCM(polymer compositr materials) used at production of units of natural designs of aircraft and their DPM] //Mehanika i nanomehanika strukturno-slozhnyh i geterogennyh sred. 2010. T. 1. S. 141–149.
- 3. Erasov V.S. Fiziko-mehanicheskie harakteristiki kak osnovnye integral'nye pokazateli kachestva aviacionnyh konstrukcionnyh materialov [Physicomechanical characteristics as main integrated indicators of quality of aviation constructional materials]. M.: VIAM. 2011. 16 s.
- Erasov V.S., Grinevich A.V., Senik V.Ja., Konovalov V.V., Trupin Ju.P., Nesterenko G.I. Raschetnye znachenija harakteristik prochnosti aviacionnyh materialov [Calculated values of characteristics of durability of aviation materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 19–21.
- Erasov V.S., Jakovlev N.O., Nuzhnyj G.A. Kvalifikacionnye ispytanija i issledovanija prochnosti aviacionnyh materialov [Qualification tests and researches of durability of aviation materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 440–448.
- 6. Erasov V.S., Finogenov G.N. Treshhinostojkost' polimernyh kompozitov pri mezhslojnom otryve i sdvige [Crack-resistance of polymeric composites at an interlaminar separation and shift] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2003. №3. S. 62–67.
- Erasov V.S., Kotova E.A. Jerozionnaja stojkost' aviacionnyh materialov k vozdejstviju tverdyh (pylevyh) chastic [Erosive resistance of aviation materials to influence of firm (dust) particles] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №3. S. 30–36.
- 8. ASTM D 7136/D 7136M 07 Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event.
- 9. Metod ispytanija polimernyh kompozicionnyh materialov na soprotivlenie povrezhdeniju pri udare padajushhim gruzom [Test method of polymeric composite materials on resistance to damage at blow falling freight]: STO 1-595-30-406–2011. M.: VIAM. 2011.
- 10. AITM 1.0010–94 Airbus Industrie Test Method. Fiber Reinforced Plastics. Determination of compression strength after impact.
- 11. ASTM D 7137/D 7137M–07 Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates.
- 12. SACMA SRM 2R 1994 Specification.
- 13. ASD-STAN PREN 6038 EN-Aerospace Series Fibre Reinforced Plastics Test Method Determination of the Compression Strength After Impact-Edition P1.
- 14. Metod ispytanija polimernyh kompozicionnyh materialov na szhatie posle udara [Test method of polymeric composite materials on compression after blow]: STO 1-595-30-409–2011. M.: VIAM. 2011.
- 15. Bojchuk A.S., Generalov A.S., Dalin M.A., Stepanov A.V. Nerazrushajushhij kontrol' tehnologicheskih narushenij sploshnosti T-obraznoj zony integral'noj konstrukcii iz PKM s ispol'zovaniem ul'trazvukovyh fazirovannyh reshetok [Nondestructive control of technological violations of a continuity of the T-shaped zone of an integrated design from PCM with use of the ultrasonic phased lattices] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik. M.: 2012. №10. S. 38–43.
- 16. Pavelko I., Smoljaninov M. Issledovanie vlijanija udarnogo povrezhdenija na prochnostnye harakteristiki kompozita [Research of influence of shock damage on strength characteristics of a composite] //Mehanika kompozitnyh materialov. 2011. T. 47. №3. S. 471–484.