

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 678.5.067

doi: 10.26907/2541-7746.2022.2-3.206-220

ПРОЧНОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН С УДАРНЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

В.И. Митряйкин, О.Н. Беззаметнов

Казанский национальный исследовательский технический университет

им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, 420111, Россия

Аннотация

В работе решена одна из актуальных проблем, связанная с оценкой влияния ударных повреждений на прочностные характеристики конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Ударные повреждения по своей форме и размерам для разных многослойных материалов имеют существенные различия. Это затрудняет расчет напряженно-деформированного состояния таких конструкций численными методами, поскольку достаточно трудно учесть в расчетах размеры и форму повреждения. Оценено влияние повреждений на остаточную прочность многослойных пластин при помощи корректировочной функции, определяемой экспериментально.

Проведены испытания образцов ПКМ на ударном стенде с падающим грузом. После ударных воздействий измерялись глубина вмятин и площади повреждений с помощью метода ультразвукового эхо-импульсного контроля. Для отдельных образцов проведена послойная оценка характера разрушений с применением метода рентгеновской компьютерной томографии. Установлена взаимосвязь размеров повреждений и энергии удара для различных ПКМ. Проведено испытание пластин с повреждениями на сжатие, получены значения предельных нагрузок, а также функции снижения несущей способности пластин в зависимости от величины энергии удара.

Ключевые слова: композиционные материалы, низкоскоростной удар, повреждение, неразрушающий контроль, сжатие после удара, несущая способность

Применение композиционных материалов в конструкциях авиационной и космической техники обусловлено их высокими удельными прочностными характеристиками [1]. Конструкции летательных аппаратов могут получать ударные повреждения при попадании камней, града, столкновении с птицами, регламентных работах и т. д. [2]. Согласно рекомендациям нормативных документов [3, 4], ударное повреждение либо должно надежно обнаруживаться при стандартных формах обслуживания, либо не должно снижать прочность конструкций ниже расчетных значений при действии эксплуатационных нагрузок. Вопрос о том, какие повреждения допустимы в данном узле или детали, решается конструктором совместно со службой прочности. Для решения этой задачи необходимы современные средства диагностического контроля, сложные расчеты и испытания образцов материала, элементов конструкций с различными ударными повреждениями. Ударные воздействия, вызывающие повреждения авиационных конструкций в виде вмятин, расслоений, трещин, сквозных пробоин, находятся в диапазоне от 7 до 136 Дж [5]. Причем характер таких повреждений у различных композиционных материалов существенно отличается, как и их влияние на прочностные характеристики.

Расчетно-экспериментальная оценка влияния повреждений на прочность и устойчивость различных элементов композиционных конструкций является актуальной задачей, так как позволяет в первом приближении проанализировать ситуацию и наметить пути изменения геометрии, свойств слоев и других параметров конструкции, чтобы защитить ее от разрушения.

Влияние ударных повреждений на прочность конструкции оценивается с помощью коэффициента безопасности k , который определяется по следующей формуле:

$$k = R/R_0,$$

где R – исходное значение рассматриваемых свойств, R_0 – свойства конструкции с повреждениями.

Данный коэффициент может зависеть от множества факторов, таких как энергия удара, глубина вмятины, площади внутренних повреждений и т. д. В работе [6] приведены значения коэффициентов безопасности для авиационных конструкций в зависимости от расчетных размеров повреждения. После воздействий ударных нагрузок, исключая аварийную ситуацию, они должны быть не меньше $f = 0.67$. При оценке остаточной прочности поврежденной конструкции из ПКМ должно быть дополнительно учтено влияние температуры, влажности и других факторов, которые могут ухудшить прочностные и жесткостные характеристики конструкции. Для повышения достоверности оценки остаточной прочности поврежденной конструкции наряду с ее визуальным осмотром необходимо применение инструментальных методов неразрушающего контроля для более точного определения действительных размеров повреждений, используемых в прочностных расчетах. Для моделирования повреждений в расчетных схемах применяют различные подходы. Критерий эквивалентного отверстия предполагает, что поврежденный образец с учетом характера повреждения и уровня ударного воздействия может быть заменен аналогичным с эквивалентным отверстием для определения остаточной прочности (рис. 1, *a*). Алгоритм выбора размеров эквивалентного отверстия представляет собой сложную задачу, особенно для слоистых композитов, где внутренние расслоения и нарушения структуры значительно превышают визуально обнаруживаемые размеры вмятин. В соответствии с сертификационными требованиями вводится понятие идеализированного размера повреждения в виде отверстия с радиусом r , который находится по следующей формуле:

$$2r = 2\sqrt{\eta S/\pi},$$

где S – площадь зоны повреждения, определяемая визуально; η – корректирующий коэффициент, учитывающий наличие не обнаруживаемой зоны растрескивания, разрыва волокон, окружающей видимую часть повреждения.

Значение коэффициента η зависит от условий ударного нагружения, характеристик материала и размеров конструкции. Кроме того, во многих работах при расчетах поврежденных конструкций в качестве эквивалентного повреждения используют размеры профиля деформированной поверхности образца при воздействии на него ударника со сферической поверхностью (рис. 1, *b*).

Установлено, что в зависимости от энергии удара ударяющее тело внедряется в материал на различную глубину. Деформированная область образца состоит из непосредственно зоны контакта глубиной δ_0 , зоны сопряжения по поверхности контакта глубиной W_0 и радиуса площадки контакта R_c . По размерам таких повреждений в [7] определялась остаточная прочность образцов при сжатии, она оказалась завышенной по сравнению с экспериментальными данными. В работе [8] предложен критерий концентрации напряжения у границы деформированной зоны.

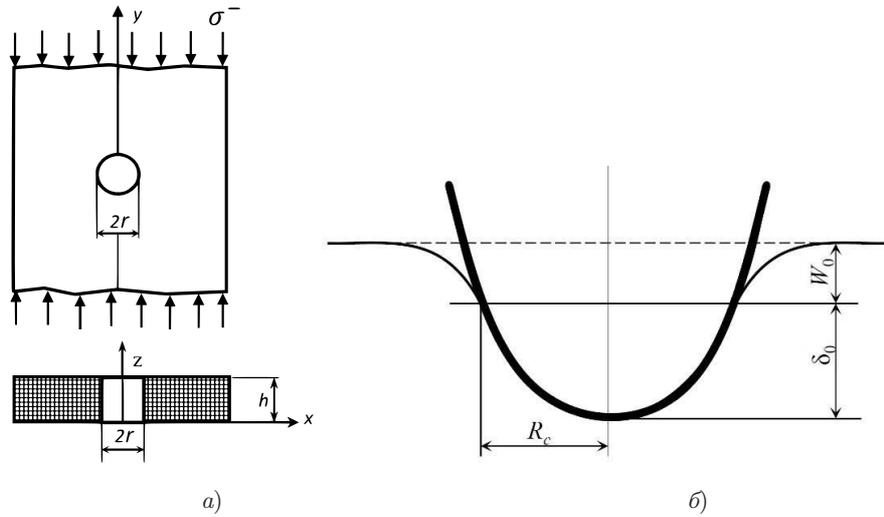


Рис. 1. а) Характерные размеры эквивалентного повреждения; б) профиль деформированной поверхности образца при низкоскоростном ударе ударником со сферической поверхностью

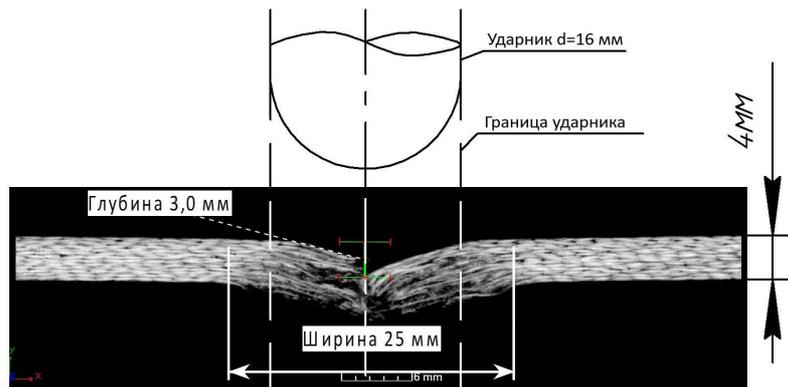


Рис. 2. Томограмма поврежденного образца стеклопластика серии С-5 в поперечном сечении и геометрические характеристики ударника

Методом конечных элементов рассчитываются напряжения у границы вмятины и в окрестностях зоны контакта, которые в последующем сравниваются с допустимыми для данного материала значениями, а зона, где было их превышение, принимается за границу повреждения. В работе [9] авторы используют методику, основанную на применении критерия разрушения монослоя и последующего расчета повреждаемости материала с учетом взаимодействия различных механизмов эволюции повреждений.

В работе [10] представлен нелинейный анализ поведения композитных сэндвич-панелей при одноосном квазистатическом сжатии после нанесения низкоскоростного удара с использованием метода конечных элементов. Основные виды повреждений, полученные в результате удара, включая остаточную деформацию на поверхности, разрушенный наполнитель под зоной воздействия и расслоение, включены в модель. Последовательный механизм разрушения сотового наполнителя учтен при анализе с применением техники деактивации элементов сетки. Характер распространения повреждений, который соответствует наблюдаемым при испытаниях

на сжатие сэндвич-панелей после удара (SCAI), был успешно зафиксирован при численном моделировании.

В работах [11, 12] представлено моделирование методом конечных элементов и последующих испытаний на удар падающим грузом и сжатие после удара образцов ПКМ, армированных однонаправленными волокнами. Эти испытания проведены на стандартных образцах, которые представляют собой монолитные плоские прямоугольные пластины с одинаковой укладкой слоев. Удар и сжатие после удара рассчитаны с использованием моделей материалов, сформированных с учетом механики разрушения сплошной среды. В моделях материала учитываются как механизмы разрушения каждого слоя, так и расслоение. Кроме того, с целью оценки точности расчетов дано сравнение с экспериментальными данными. В работе [13] исследована устойчивость круговой цилиндрической оболочки, находящейся под действием равномерного осевого сжатия и ослабленной в средней части круговым отверстием. Испытание цилиндрических стеклопластиковых панелей с отверстием на устойчивость при внешнем давлении проведено в [14].

Анализ результатов перечисленных выше исследований показывает, что они отличаются от результатов экспериментов в большую или меньшую сторону, поэтому особое внимание необходимо уделять определению действительных размеров повреждений. Современные методы неразрушающего контроля, в частности рентгеновская компьютерная томография, позволяют с высокой точностью рассмотреть повреждение, оценить его размеры, определить участки нарушения структуры. В качестве примера на рис. 2 показана полученная нами томограмма зоны повреждения образца стеклопластика серии С-5, где приведены размеры повреждения и геометрические характеристики ударного бойка в одном масштабе. При энергии удара 30 Дж размер повреждения в 1.56 раза превышает размер ударника. При соударении ударника и образца в материале произошли расслоение, межслоевое разрушение и разрыв волокон, это изменяет структуру материала, повышает пористость в зоне повреждения, что может понизить механические характеристики. Существующие методы теоретической оценки снижения упругих и прочностных характеристик в окрестностях повреждения не дают надежных результатов из-за трудности учета большого числа факторов, например: расчеты не учитывают вклад поврежденной структуры образца в процесс деформирования при действии различных нагрузок.

Экспериментальные исследования настоящей работы направлены на изучение процессов деформирования и разрушения прямоугольных пластин с ударными повреждениями, они проведены с использованием современного испытательного оборудования, что позволяет получить новые данные для создания методик расчетно-экспериментальной оценки снижения прочностных свойств конструкции после низкоскоростных ударных воздействий.

Задачей эксперимента в этом случае является определение регрессионных функций, учитывающих влияние повреждений, нанесенных различной энергией удара на предельную нагрузку. Метод был успешно использован для решения ряда задач прочности и устойчивости пластин и оболочек с отверстиями. В настоящей работе эта методика применена для исследования многослойных пластин с ударными повреждениями.

Предельные нагрузки при сжатии пластины с повреждением предлагается находить по следующей формуле:

$$P_{kp} = P_{kp}^0 \cdot f(G), \quad (1)$$

где P_{kp}^0 – предельная нагрузка при сжатии неповрежденной пластины, $f(G)$ – неизвестная функция, учитывающая влияние энергии удара на нагрузку и определяемая экспериментально, G – энергия удара.

Табл. 1

Результаты испытаний образцов без повреждений и с отверстиями

Диаметр отверстия, мм	Разрушающее усилие, кН		Погрешность, %
	Эксперимент	КЭ-метод	
0	131.95	139.15	5.46
5	-	103.73	-
10	98.193	90.26	-9.07
15	86.105	85.132	-1.15
20	83.817	84.436	0.74

Современные методы расчета, в частности основанные на методе конечных элементов, позволяют исследовать напряженно-деформированное состояние различных композиционных конструкций без повреждений. Сравнение результатов расчета и экспериментальных данных можно провести, например, для пластин неповрежденных и с отверстиями.

В работе с помощью комплекса Ansys Static Structural была проведена серия тестовых расчетов пластин одного материала без повреждения и с отверстиями. Задача была решена в трехмерной постановке на базе восьмиузлового конечного элемента с учетом геометрической нелинейности. Сетка строилась с целью максимальной детализации области около отверстия, так как она является концентратором напряжений в данном анализе. Вычисления проводили с использованием критерия прочности по максимальным деформациям. Исследовано напряженно-деформированное состояние, определены значения предельных нагрузок и напряжений при сжатии.

Для сравнения значений расчетной и экспериментальной предельной нагрузок были проведены испытания пластин на сжатие. Результаты сравнения приведены в табл. 1. Определенные механические параметры позволили провести калибровку расчетной методики и более точно описать поведение конструкции. По полученным экспериментальным данным введен поправочный коэффициент для расчета предельной нагрузки и напряжения неповрежденной пластины.

Далее были экспериментально определены корректирующие функции, входящие в формулу (1), для оценки влияния площади повреждений или энергии удара на прочностные характеристики. Исследования проведены для различных композиционных материалов, что позволило провести их сравнительную оценку по ударостойкости. В качестве объектов исследования были выбраны 13 видов образцов ПКМ с различными схемами переплетения: полотно (направление волокон $0^\circ/90^\circ$), саржа ($0^\circ/90^\circ$), рогожа ($0^\circ/90^\circ$), мультиаксиальная ткань ($\pm 45^\circ$) – и с разной природой волокон: стеклоткани, углеткань, кевлар и высокомолекулярный полиэтилен, среди которых были образцы стеклопластиков на основе тканей: мультиаксиальной ВХ 450 (серия С-1); полотняного переплетения ORTEX 360 (серия С-2); сатинового переплетения ЕЕ 106 (серия С-3); саржевого переплетения ЕЕ 380, (серия С-4); сатинового переплетения Т-10-14 (серия С-5); полотняного переплетения Т-13П (серия С-2). Образцы углепластиков на основе тканей: мультиаксиальных СВХ 300 (серия У-1) и СВХ 301 (серия У-2); полотняного переплетения СС 201, направление волокон $0^\circ/90^\circ$ (серия У-3). Образцы кевларопластика, изготовленные из ткани саржевого переплетения марки Style 282 (серия К-1). Гибридные композиты на основе тканей: саржевого переплетения ПЭ/СК 204 (30%/70%) (серия Г-1) и СК 204 (50%/50%) (серия Г-2), а также образцы на основе ткани из высокомолекулярного полиэтилена полотняного переплетения ВМП (серия П-1).

Изготовление стандартных образцов проводилось методом прессового формования с применением жесткой формообразующей оснастки и подогреваемого пресса.

Температурный режим был выбран для всех образцов один в соответствии с требованиями к полимеризации связующего. Образцы изготавливались на основе эпоксидного связующего SICOMIN SR 8500 и отвердителя SICOMIN SZ 8525. Данная эпоксидная система обладает высокой технологичностью: низкой вязкостью и коротким временем отверждения. Размеры формуемых пластин составляли $950 \times 330 \times 4$ мм, образцы для испытаний размерами $150 \times 100 \times 4$ мм вырезались фрезой.

Нанесение ударных повреждений проводили с использованием копра с вертикально-падающим грузом Instron Dynatup 9250HV (Instron corporation, США). Ударный наконечник диаметром 16 мм оснащен высокочувствительным датчиком нагрузки PCB Piezotronics, позволяющим регистрировать нагрузку с точностью $\pm 1\%$ от измеряемого диапазона и линейностью 0.2%. Падающий груз перемещается по вертикальным направляющим, что позволяет с высокой точностью наносить удары в выбранное место конструкции. Машина оснащена пневматической системой предотвращения повторного удара. Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 33496-2015 «Метод испытания на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом». Методика эксперимента заключалась в нанесении низкоскоростного удара вертикально падающим грузом по образцам с тремя значениями энергии: 10, 20, 30 Дж. При испытаниях записывалась зависимость контактной силы F и энергии G от продолжительности контакта в процессе удара. При этом рассчитывались энергия инициации повреждения, поглощённая энергия и максимальная нагрузка при ударе.

По результатам испытаний проводилась оценка повреждений с фиксацией глубины и размера отпечатка и их изменения в зависимости от удара. Для определения глубины вмятины использовался цифровой микрометр. Видимые повреждения на поверхности образцов не дают полного представления о разрушениях внутри материала. Первоначально зона повреждений образцов оценивалась ультразвуковым томографом. Результаты сканирования позволили определить площадь внутренних разрушений при различных энергиях удара. Эксперимент проводили при помощи комплекса неразрушающего полуавтоматического контроля Olympus OmniScan MX2 с датчиком 3.5 МГц с фазированными решетками (64 элемента).

Послойный анализ повреждений проведен с использованием системы промышленной микротомографии Phoenix V|Tome|X S240 (WaygateTechnologies, Германия). Данная система оснащена микрофокусной рентгеновской трубкой с максимальным ускоряющим напряжением 240 кВ мощностью 320 Вт. В ходе эксперимента были получены томограммы зоны удара в двух плоскостях. Это позволило с высокой точностью определить размеры повреждения по объему образца и в отдельных слоях. Наблюдалось разрушение волокон, повреждение волокон с расслоениями, расслоения без повреждения волокон.

Испытание образцов, имеющих ударные повреждения при действии на них сжимающей нагрузки, проводилось на электромеханической универсальной испытательной машине Instron 5882 (Instron corporation, США) с регистрирующим программно-аппаратным комплексом Instron 5800 сер. № 588K3888. Наибольшая нагрузка, которую может воспроизводить испытательная машина, составляет 100 кН. Для измерения значений нагрузки применяется силоизмерительный датчик тензометрический Instron, точность измерения силы сжатия составляет $\pm 0.15\%$ от диапазона измерения. Деформация образца при сжатии определялась с помощью датчика перемещения траверсы, которая давила на образец. Пределы погрешности определения перемещений траверсы составляют $\pm 0.05\%$ от рабочего диапазона. Для измерения деформаций всей поверхности образца при сжатии использовалась бесконтактная система измерения деформации Vic-3D (Correlated

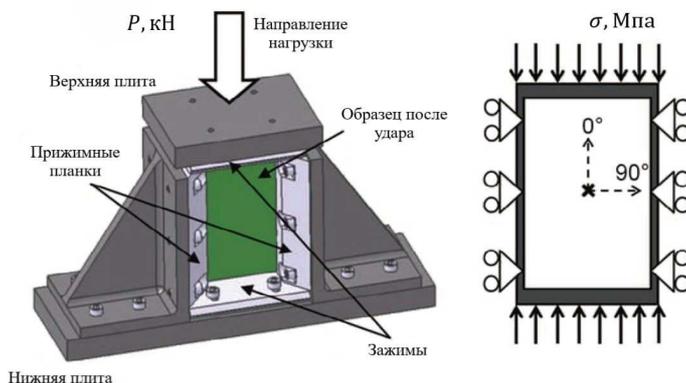


Рис. 3. Схема нагружения и условия закрепления образцов

Solutions, США). Она имеет следующие технические характеристики: скорость съемки 0.5 Гц (100 кадров на проект), поле обзора 150×200 мм, разрешение по деформации 50 мкм/мм.

Методика проведения эксперимента разработана с учетом требований ГОСТ 33495-2015 и ASTM D7137. Испытания проводились при температуре окружающей среды $23\text{--}25$ °С и влажности 44–51%. Образцы перед испытанием устанавливались в специализированной испытательной оснастке. Она представляет собой сборную конструкцию, состоящую из нижней рамы, боковых подкрепляющих элементов, прижимных планок и верхней плиты (рис. 3). Фиксация образца осуществлялась поджатием прижимных планок с лицевой и обратной стороны больших сторон пластины, это обеспечивало их шарнирное опирание при нагружении. Перед установкой специализированной оснастки к штоку машины дополнительно закрепляется давящая площадка с шарнирной опорой для исключения перекоса пластины. Далее шток подводился к верхней плите и проводилось поджатие образца в оснастке для исключения зазоров в крепежных элементах испытательной системы.

Усилие поджатия составляло 150 Н. Такое крепление должно обеспечивать совпадение продольной оси образца с направлением действия нагрузки, а торцевые поверхности должны быть параллельны опорным поверхностям. Скорость штока машины при нагружении образца составляла 2 мм/мин. При этом проводилась регистрация графической зависимости между нагрузкой P и перемещением траверсы Δl (диаграмма деформирования). Обработка результатов замеров в реальном времени проводилась с помощью программы Bluehill, которая после ввода геометрических размеров пластины позволяла построить зависимость между напряжением σ и деформацией ε , %, которая рассчитывается автоматически по данным перемещения траверсы. На рис. 4 в качестве примера показаны зависимость между осевой нагрузкой и перемещением траверсы для образца стеклопластика серии С-6 с нанесенным повреждением. Установлено снижение несущей способности образца при увеличении энергии удара. Вся информация о результатах эксперимента хранится в памяти компьютера для последующей обработки.

Для каждой серии образцов находили среднее арифметическое значение $\sigma_{кр}$ и $P_{кр}$. В первую очередь фиксировалась предельная нагрузка разрушения пластин при сжатии после нанесения первого удара с низким значением энергии (10 Дж). Далее испытывались образцы с большей энергией удара и определялась зависимость падения нагрузки, данный параметр характеризует величину постударной

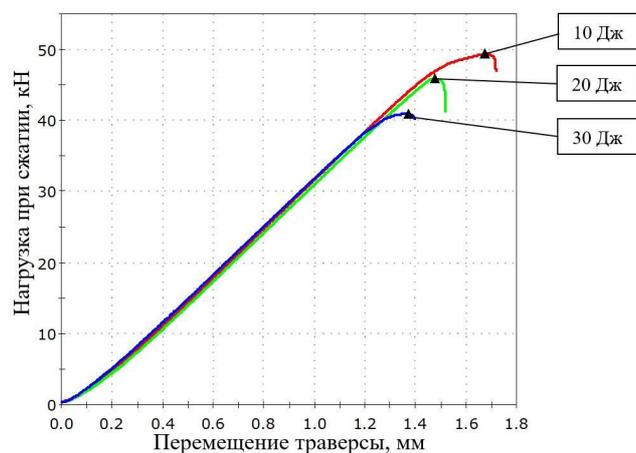


Рис. 4. Зависимость нагрузки от перемещения траверсы образцов стеклопластика серии С-6 при сжатии после удара

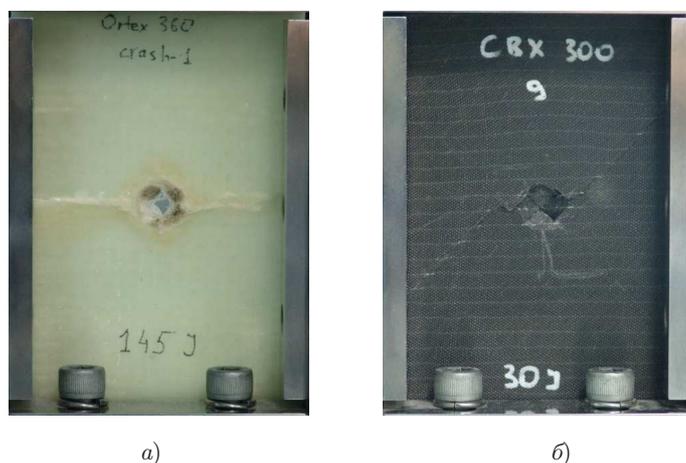


Рис. 5. Характер разрушения пластин: а) стеклопластика серии С-2; б) углепластика серии У-1 при сжатии после удара

несущей способности материала. По полученным данным строились диаграммы снижения прочностных характеристик различных образцов с повреждениями.

По окончании испытаний определяли характер и местоположение разрушения образца с использованием специальных идентификационных обозначений разрушения в соответствии со стандартом. Идентификационное обозначение разрушения состоит из трех символов, обозначающих тип, область и местоположение разрушения. Типичный характер разрушения имеющих повреждения пластин из различных материалов при сжатии показан на рис. 5. Полученные результаты на сжатие пластин из различных материалов с ударными повреждениями представлены в табл. 2.

При обработке экспериментальных данных были построены диаграммы зависимости нагрузки при сжатии от энергии удара. На рис. 6 представлена диаграмма для образцов углепластика серии У-3, стеклопластика С-1, кевларопластика К-1 и высокомолекулярного полиэтилена П-1. Каждый представленный тип образцов показал снижение несущей способности при увеличении энергии удара, однако

Табл. 2

Результаты испытаний на сжатие отдельных образцов

Природа материала	Серия образцов	Тип плетения	Энергия удара, Дж	Критическая нагрузка при сжатии, кН	Критическое напряжение, МПа	Площадь повреждения после удара, мм
Стеклопластик	С-1	Мульти-	10	61.455	153.638	307.440
			20	50.230	125.574	314.414
			30	45.053	112.633	420.459
	С-2	Полотно	10	62.463	156.157	97.590
			20	62.119	155.296	192.247
			30	56.402	141.004	262.160
	С-3	Сатин	10	81.254	203.134	86.989
			20	68.677	171.103	313.906
			30	65.251	163.128	486.120
	С-4	Саржа	10	68.245	176.026	45.766
			20	64.344	170.612	203.524
			30	60.411	138.014	461.146
	С-5	Сатин	10	60.815	152.038	94.037
			20	60.521	151.302	137.381
			30	59.917	149.793	302.982
	С-6	Полотно	10	47.082	117.706	237.105
			20	46.446	116.116	567.155
			30	41.436	103.590	867.243
Углепластик	У-1	Мульти-	10	58.686	146.715	233.950
			20	47.411	118.526	479.831
			30	39.375	98.437	673.505
	У-2	Мульти-	10	64.743	161.857	137.870
			20	59.011	147.528	410.221
			30	53.446	131.235	482.091
	У-3	Полотно	10	69.928	174.819	340.976
			20	56.783	141.958	1001.646
			30	51.486	128.715	1261.985
Кевлар	К-1	Саржа	10	32.490	81.225	515.497
			20	30.894	77.235	1556.644
			30	30.440	76.100	2762.163
Гибрид	Г-1	Саржа	10	43.772	109.430	–
			20	41.007	102.518	–
			30	34.308	85.769	–
	Г-2	Саржа	10	57.063	142.657	351.718
			20	47.062	117.654	469.634
			30	42.933	107.332	707.914
ПЭ	П-1	Полотно	10	15.414	38.534	449.666
			20	12.368	30.921	1140.571
			30	12.363	30.906	2463.612

углепластик при относительно высоких показателях критической нагрузки показал наиболее резкое падение несущей способности при минимальном уровне удара. Вторым фактором, влияющим на несущую способность образцов после удара, является площадь повреждения. На рис. 7 представлена диаграмма зависимостей соответствующих параметров для образцов серии С-4, С-5, У-1 и У-2.

На рис. 8 представлена диаграмма падения предельной нагрузки образцов ПКМ различной природы, но единой схемы переплетения ткани $0^\circ/90^\circ$ (сатин, саржа, полотно). Динамика падения несущей способности образцов углепластика оказа-

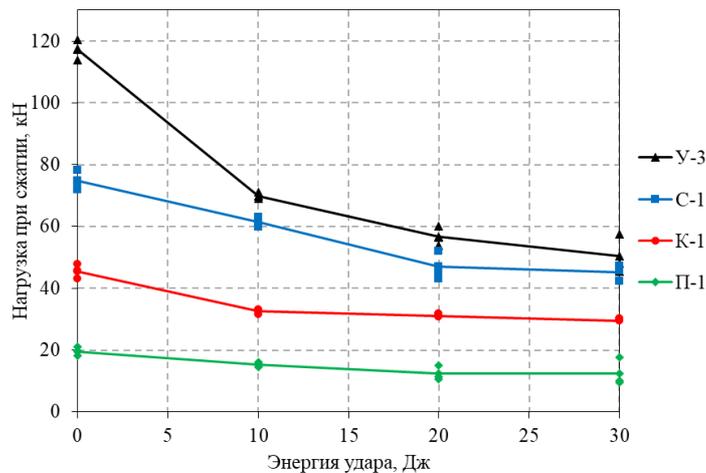


Рис. 6. Изменение максимальной нагрузки при сжатии от энергии удара

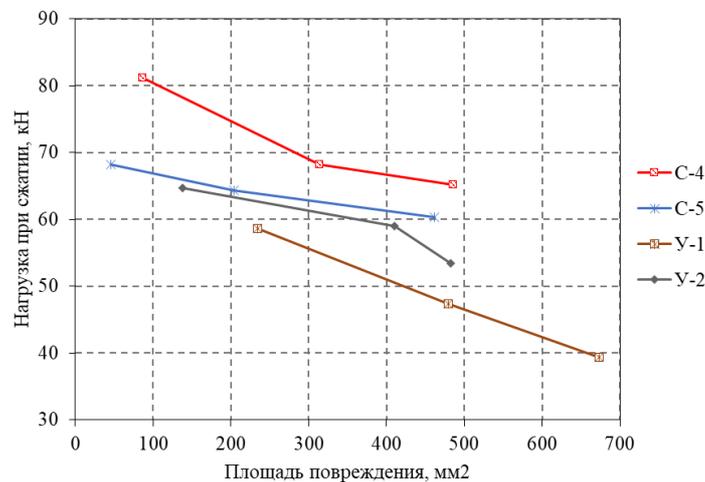


Рис. 7. Зависимость несущей способности образцов от площади повреждений

лась максимальной и при симметричной схеме армирования, что говорит о его наименьшей стойкости к ударным повреждениям из всех представленных материалов. Минимальное падение нагрузки при сжатии после нанесения удара показали образцы кевларопластика и высокомолекулярный полиэтилен, однако несущая способность таких материалов существенно ниже, чем у образцов углепластика и стеклопластика.

Для отдельных серий с использованием результатов эксперимента получены аппроксимирующие функции для формулы (1), учитывающие влияние на нагрузку энергии удара $f(G)$:

$$\text{Серия C-1: } f(G) = 1 - 0.0252G + 0.0004G^2, \quad R^2 = 0.983;$$

$$\text{Серия Y-3: } f(G) = 1 - 0.0446G + 0.0009G^2, \quad R^2 = 0.986.$$

Установлены зависимости падения несущей способности образцов, имеющих различную природу и тип переплетения армирующего материала. Наименьшее падение средних значений несущей способности пластин при ударе 30 Дж относи-

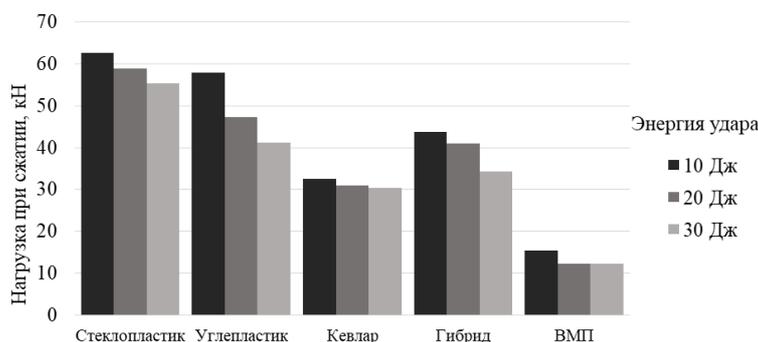


Рис. 8. Сравнительная оценка поведения различных материалов с повреждениями при сжатии

тельно данного параметра при 10 Дж показали образцы стеклопластиков серий: С-5 (1.49%), С-2 (10.74%), С-4 (12.97%) и кевларопластика К-1 (6.73%), а наибольшее падение нагрузки – образцы углепластика У-1 (49.04%), У-3 (35.81%) и стеклопластика С-1 (36.4%).

В работе разработана методика расчетно-экспериментальной оценки влияния ударных повреждений на несущую способность многослойных композиционных пластин. Экспериментальные исследования настоящей работы были направлены на изучение процессов деформирования и разрушения прямоугольных пластин с ударными повреждениями, они проведены с использованием современного испытательного оборудования и неразрушающих методов контроля, что позволяет получить новые данные для расчетно-экспериментальной оценки снижения прочностных свойств материала пластин после низкоскоростных ударных воздействий. В ходе исследования проведена оценка влияния природы армирующего материала и типа переплетения на характеристики ударостойкости композиционного материала при низкоскоростном ударе, определены закономерности влияния энергии удара и структуры материала на показатели площадей внутренних разрушений образцов. Показаны результаты влияния различной энергии удара на остаточную прочность образцов многослойных композиционных материалов. Получены новые экспериментальные данные о процессах деформирования и разрушения спектра образцов ПКМ при низкоскоростном ударе различной энергии. Проведен комплексный анализ и сравнение размеров повреждений образцов после удара с применением различных методов неразрушающего контроля: ультразвукового контроля с фазированными решетками, рентгеновской компьютерной томографии. Получены структурные формулы, позволяющие проводить оценку изменения механических свойств композиционных материалов различной структуры в условиях комбинированных ударных и статических воздействий.

Благодарности. Работа выполнена в рамках соглашения Минобрнауки № 075-02-2021-1546 от 22 июня 2021 г. в целях реализации мероприятий международного сотрудничества с Российско-Вьетнамским тропическим научно-исследовательским и технологическим центром.

Литература

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932-2002. – М.: МИСИС-ВИАМ, 2002. – С. 23–47.

2. *Фегенбаум Ю.М., Дубинский С.В., Божевалов Д.Г., Соколов Ю.С., Метелкин Е.С., Миколайчук Ю.А., Шапкин В.С.* Обеспечение прочности композитных авиационных конструкций с учетом случайных эксплуатационных ударных воздействий. – М.: Техносфера, 2018. – 506 с.
3. МОС 25.571. Оценка допустимости повреждений и усталостной прочности конструкции // Авиационные правила. Ч. 25: Нормы летной годности самолетов транспортной категории. Издание 5 с поправками 1–8. – М.: АВИАИЗДАТ, 2015. – С. 76–78.
4. Advisory Circular: Composite Aircraft Structure, AC No 20-107B, Change: 1. – Fed. Aviat. Adm., U.S. Dep. Transp., 2010. – 38 p.
5. *Kan H.P., Cordero R., Whitehead R.S.* Advanced Certification Methodology for Composite Structure: Fin. Rep. DOT/FAA/AR-96/111. – Fed. Aviat. Adm., U.S. Dep. Transp., 1997. – 161 p.
6. Сертификация агрегатов пассажирских самолетов из полимерных композиционных материалов: Науч.-техн. отчет. – Жуковский: ЦАГИ, 1992. – 132 с.
7. *Ерасов В.С., Крылов В.Д., Панин С.В., Гончаров А.А.* Испытания полимерного композиционного материала на удар падающим грузом // Авиационные материалы и технологии. – 2013. – № 3. – С. 60–64.
8. *Pavelko I., Smolaninova M.* Equivalent hole as an evaluation criterion of a composite material residual strength after a low-speed impact // Mach., Technol., Mater.: Int. Virtual J. Sci., Tech. Innovations Ind. – 2010. – No 7. – P. 12–16.
9. *Lopes C.S., Camanho P.P., González C.* Advanced simulation of low-velocity impact on fibre reinforced laminates // Proc. 4th Int. Conf. on Impact Loading of Lightweight Structures (ICCILS 2014). – Project: VIRTEST – Multiscale Virtual Testing of CFRP Samples. Cape Town, 2014.
10. *Zonghong X., Vizzini A.J., Qingru T.* On residual compressive strength prediction of composite sandwich panels after low-velocity impact damage // Acta Mech. Solida Sin. – 2006. – V. 19, No 1. – P. 9–17. – doi: 10.1007/s10338-006-0602-z.
11. *González E.V., Maimí P., Camanho P.P., Turon A., Mayugo J.A.* Simulation of drop-weight impact and compression after impact tests on composite laminates // Compos. Struct. – 2012. – V. 94, No 11. – P. 3364–3378. – doi: 10.1016/j.compstruct.2012.05.015.
12. *Linke M., Garcia-Manrique J.A.* Contribution to reduce the influence of the free sliding edge on compression-after-impact testing of thin-walled undamaged composites plates // Materials. – 2018. – V. 11, No 9. – Art. 1708, P. 1–13. – doi: 10.3390/ma11091708.
13. *Коноплев Ю.Г., Тильш А.П.* Устойчивость цилиндрических оболочек с вырезами при кручении и внешнем давлении // Теория пластин и оболочек: Сб. аспирантских работ. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1972. – Вып. 2. – С. 159–165.
14. *Митряйкин В.И., Догаджин В.Н., Беззаметнов О.Н., Иксанов Р.Ч.* Испытание элементов конструкций с повреждениями // Итоги науки. Вып. 46: Избр. тр. Всерос. конф. по проблемам науки и технологий. – М.: РАН, 2020. – Вып. 46. – С. 9–31.
15. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в 3 т. / Под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – Т. 3. – 568 с.

Поступила в редакцию
17.02.2022

Митряйкин Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры машиностроения и инженерной графики

Казанский национальный исследовательский технический университет имени

А.Н. Туполева – КАИ

ул. К. Маркса, д. 10, г. Казань, 420111, Россия

E-mail: vmitryaykin@bk.ru

Беззаметнов Олег Николаевич, кандидат технических наук, научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории № 6

Казанский национальный исследовательский технический университет имени

А.Н. Туполева – КАИ

ул. К. Маркса, д. 10, г. Казань, 420111, Россия

E-mail: bezzametnovoleg@mail.ru

ISSN 2541-7746 (Print)

ISSN 2500-2198 (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA.
SERIYA FIZIKO-MATEMATICHESKIE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series)

2022, vol. 164, no. 2–3, pp. 206–220

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2541-7746.2022.2-3.206-220

Strength of Multilayered Plates with Impact Damage

*V.I. Mitryaykin**, *O.N. Bezzametnov***

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,

Kazan, 420111 Russia

E-mail: **vmitryaykin@bk.ru*, ***bezzametnovoleg@mail.ru*

Received February 17, 2022

Abstract

This article solves one of the central problems of how impact damage affects the strength of polymer composite materials (PCM). Impact damage on sandwich materials varies in the resulting shape and size, thus hampering the numerical assessment of their stress-strain state because these damage characteristics are difficult to predict. Here, we introduced an experimental technique to determine the PCM strength and modeled the impact damage on rectangular plates to illustrate the conclusions drawn. The critical compressive load and stress of the undamaged plates were obtained by the finite element method. The experimental correction function was deduced to evaluate the effect of the damage area and impact energy on the residual strength. Vertical impact testing of the PCM samples was performed. Following the impact on the plate, the depth of the dents and the damage area were measured using the pulse-echo ultrasonic technique. The failure behavior was analyzed layer by layer for individual samples with the help of X-ray computed tomography. For a number of PCM samples, a relationship between the damage size and the impact energy was established. Compression testing of the damaged plates was carried out. The critical buckling loads and the functions of a decrease in the load-bearing capacity of the plates depending on the impact energy value were calculated.

Keywords: composite materials, low-velocity impact, damage, non-destructive inspection, compression after impact, load-bearing capacity

Acknowledgments. This study was performed under agreement no. 075-02-2021-1546 of June 22, 2021 with the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation to encourage the international cooperation with the Joint Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Center.

Figure Captions

Fig. 1. *a)* The characteristic size of equivalent damage; *b)* the deformed surface profile of the sample subjected to a low-velocity impact with spherical impactor.

Fig. 2. Tomogram of the damaged fiberglass sample of series S-5 in cross-section and the geometric characteristics of the impactor.

Fig. 3. Loading and mounting of the samples.

Fig. 4. Diagram showing the dependence of the load on the displacement of the crossbeam of the fiberglass samples of series S-6 during the compression after the impact.

Fig. 5. Damage in the plates: *a)* fiberglass of series S-2; *b)* carbon fiber of series U-1 during the compression after the impact.

Fig. 6. Change in the maximum load during the compression from the impact energy.

Fig. 7. Dependence of the load-bearing capacity of the samples on the damage area.

Fig. 8. Comparative assessment of the behavior of different materials damaged during the compression.

References

1. Kablov E.N. A 21st century perspective on aircraft materials engineering. Vision and tasks. In: *Aviatsionnyye Materialy. Izbrannyye Trudy VIAM 1932-2002* [Aircraft Materials. Selected Articles of the All-Russian Research Institute of Aircraft Materials]. Moscow, MISIS-VIAM, 2002, pp. 23–47. (In Russian)
2. Fegenbaum Yu.M., Dubinsky S.V., Bozhevalov D.G., Sokolov Yu.S., Metelkin E.S. *Obespechenie prochnosti kompozitnykh aviatsionnykh konstruksii s uchetom sluchainykh ekspluatatsionnykh udarnykh vozdeistvii* [Ensuring the Integrity of Composite Aircraft Structures with Account of Accidental Operational Impacts]. Moscow, Tekhnosfera, 2018. 506 p. (In Russian)
3. CFR 25.571. Assessing damage tolerance and fatigue of structures. In: *Aviatsionnyye pravila* [Aviation Requirements]. Pt. 25: Airworthiness standards for transport aircraft. Moscow, AVIAIZDAT, 2015, pp. 76–78. (In Russian)
4. *Advisory Circular: Composite Aircraft Structure, AC No 20-107B, Change: 1*. Fed. Aviat. Adm., U.S. Dep. Transp., 2010. 38 p.
5. Kan H.P., Cordero R., Whitehead R.S. *Advanced Certification Methodology for Composite Structure: Fin. Rep. DOT/FAA/AR-96/111*. Fed. Aviat. Adm., U.S. Dep. Transp., 1997. 161 p.
6. Certification of passenger aircraft made of polymer composite materials. *Scientific Technical Report*. Zhukovsky, TsAGI, 1992. 132 p. (In Russian)
7. Erasov V.S., Krylov V.D., Panin S.V., Goncharov A.A. Drop-weight testing of polymer composite material. *Aviat. Mater. Tekhnol.*, 2013, no. 3, pp. 60–64. (In Russian)
8. Pavelko I., Smolaninovs M. Equivalent hole as an evaluation criterion of a composite material residual strength after a low-speed impact. *Mach., Technol., Mater.: Int. Virtual J. Sci., Tech. Innovations Ind.*, 2010, no. 7, pp. 12–16.
9. Lopes C.S., Camanho P.P., González C. Advanced simulation of low-velocity impact on fibre reinforced laminates. *Proc. 4th Int. Conf. on Impact Loading of Lightweight Structures (ICCILS 2014)*. Project: VIRTEST – Multiscale Virtual Testing of CFRP Samples. Cape Town, 2014.

10. Zonghong X., Vizzini A.J., Qingru T. On residual compressive strength prediction of composite sandwich panels after low-velocity impact damage. *Acta Mech. Solida Sin.*, 2006, vol. 19, no. 1, pp. 9–17. doi: 10.1007/s10338-006-0602-z.
11. González E.V., Maimí P., Camanho P.P., Turon A., Mayugo J.A. Simulation of drop-weight impact and compression after impact tests on composite laminates. *Compos. Struct.*, 2012, vol. 94, no. 11, pp. 3364–3378. doi: 10.1016/j.compstruct.2012.05.015.
12. Linke M., Garcia-Manrique J.A. Contribution to reduce the influence of the free sliding edge on compression-after-impact testing of thin-walled undamaged composites plates. *Materials*, 2018, vol. 11, no. 9, art. 1708, pp. 1–13. doi: 10.3390/ma11091708.
13. Konoplev Yu.G., Til'sh A.P. Stability of cylindrical shells with cutouts under torsion and external loading. In: *Teoriya plastin i obolochek: Sb. aspirantskikh rabot* [Theory of Plates and Shells: A Collection of Articles by Postgraduate Students]. Kazan, Izd. Kazan. Univ., 1972, no. 2, pp. 159–165. (In Russian)
14. Mitryaikin V.I., Dogadkin V.N., Bezzametnov O.N., Iksanov R.Ch. Testing structural elements with damage. In: *Itogi nauki. Vyp. 46: Izbr. tr. Vseros. konf. po problemam nauki i tekhnologii* [The Outcomes of Science. No. 46: Sel. Proc. All-Russ. Conf. on the Problems of Science and Technology]. Moscow, Ross. Akad. Nauk, 2020, no. 46, pp. 9–31. (In Russian)
15. Birger I.A., Panovko Ya.G. (Eds.) *Prochnost', ustoychivost', kolebaniya* [Strength, Stability, and Oscillation]. Vol. 3. Moscow, Mashinostroenie, 1968. 568 p. (In Russian)

⟨ **Для цитирования:** Митряйкин В.И., Беззаметнов О.Н. Прочность многослойных пластин с ударными повреждениями // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2022. – Т. 164, кн. 2–3. – С. 206–220. – doi: 10.26907/2541-7746.2022.2-3.206-220. ⟩

⟨ **For citation:** Mitryaykin V.I., Bezzametnov O.N. Strength of multilayered plates with impact damage. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2022, vol. 164, no. 2–3, pp. 206–220. doi: 10.26907/2541-7746.2022.2-3.206-220. (In Russian) ⟩