

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ КОМПОЗИТОВ К НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ УДАРНЫМ ПОВРЕЖДЕНИЯМ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ

© 2019 г. В.Ю. Шпильной¹, В.П. Вавилов¹, Д.А. Дерусова^{1, 2,*}, В.А. Красновейкин²

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия 634028 Томск, пр-т Ленина, 30

² Институт физики прочности и материаловедения, СО РАН, Россия 634050 Томск, Академический пр-т, 2/4

*E-mail: red@tpu.ru

Поступила в редакцию 28.11.2018; после доработки 14.06.2019

Принята к публикации 28.06.2019

Неразрушающий контроль качества композитов малой толщины является важной научно-технической задачей ввиду существенного повреждения материалов даже при незначительных ударных нагрузках. Исследована устойчивость углепластикового композита толщиной 1 мм к ударным повреждениям энергией до 10 Дж. Отдельное внимание уделено анализу «видимой» площади дефектов, образованных в результате последовательного нанесения ударов с увеличением и понижением энергии в диапазоне от 1 до 5 Дж. Площадь дефектных отметок оценивали путем анализа изображений вибраций на поверхности композитов, полученных с помощью акустической стимуляции композита и лазерного вибросканирования.

Ключевые слова: углепластиковые композиционные материалы, неразрушающий контроль, ударные повреждения, сканирующая лазерная виброметрия.

DOI: 10.1134/S0130308219090021

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиционные материалы, в особенности стекло- и углепластики, широко применяются в различных областях промышленности на протяжении более 40 лет. Популярность углепластиковых композитов в автомобильной [1, 2], авиа- [2, 3] и ракетно-космической [2—4] отраслях обуславливается их высокой прочностью, сопоставимой со сталью [2, 5—7], сравнительно невысокой плотностью и широким температурным диапазоном [6].

Технологии производства композиционных материалов из углепластика [9, 10] непрерывно совершенствуются. При этом, несмотря на широкий спектр предложений по упрочнению композитов путем их гибридизации, существует ряд областей производства, где необходимо использовать композиты малой толщины, например, при производстве деталей спортивных автомобилей [1]. В данном случае толщина и прочность являются ключевыми факторами при разработке тонких конструкций.

С расширением областей применения углепластиковых композитов и усложнением технологических процессов изготовления возрастают требования к их качеству. По своим прочностным характеристикам такие композиты способны выдерживать ударные воздействия с энергией более 25 Дж [11], но их устойчивость к нагрузкам такого типа резко снижется при уменьшении толщины материала. Для композитов толщиной около 7 мм удар с энергией около 5 Дж вызывает небольшое повреждение, практически не наносящее ущерба изделию [12]. Однако ударное повреждение такой же энергии в композите толщиной около 1 мм может привести к его полному разрушению. В связи с этим исследование ударных воздействий низкой энергии в композитах малой толщины имеет важное значение для проектирования конструкций из композитов.

Дефекты, возникающие в композитах малой толщины, как правило, представляют собой конгломерат трещин, расслоений и разрывов упрочняющих волокон. Существует ряд методов обнаружения таких неоднородностей. В последнее время наиболее активно используют методы неразрушающего контроля [13], например, ультразвуковую (УЗ) томографию [14], тепловой контроль и др. Новым перспективным методом является лазерная виброметрия, позволяющая визуализировать в трехмерном представлении вибрации на поверхности изделий с дефектами [15]. Комбинация акустической стимуляции изделия с лазерным вибросканированием позволяет проводить контроль качества при низком уровне акустической мощности используемых излучателей благодаря активации локальных резонансных вибраций в области дефектов [16].

В настоящей работе методика резонансной лазерной виброметрии применена к исследованию устойчивости углепластиковых композитов толщиной 1 мм к ударным нагрузкам с энергией

до 10 Дж. В том числе проанализированы дефекты, образующиеся в результате цикла последовательных ударных воздействий с увеличением/понижением энергии удара, включая анализ зависимости площади дефекта от энергии удара.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом настоящего исследования выбраны пластины из углепластика размером $160 \times 120 \times 1$ мм, состоявшие из трех слоев углеродного волокна. Изучали устойчивость композита к ударным повреждениям энергией до 10 Дж, включая цикл последовательных воздействий с нарастанием/убыванием энергии удара. Ударные повреждения были нанесены с помощью копра, применяемого при испытаниях на удар падающим грузом с направляющим механизмом ударника в виде цилиндрической трубы согласно ГОСТ 33496—2015.

Испытания проводили с использованием метода резонансной УЗ виброметрии, который основан на стимуляции объекта исследования широкополосным акустическим сигналом и одновременным лазерным сканированием его поверхности. Выбор акустической стимуляции материалов в широком диапазоне частот определялся наличием множественных расслоений в структуре слоистых композиционных материалов, имеющих характерные резонансные частоты (см. [17]). Также следует отметить, что феноменология явления локального резонанса дефекта детально рассмотрена Солодовым, Буссе и др. [16, 18, 19]. Установлено, что дефекты в полимерных и композиционных материалах приводят к локальному снижению массы и жесткости изделий, в результате чего образуются области, подверженные интенсивным резонансным колебаниям. Учитывая указанные особенности структуры сложных многокомпонентных дефектов в слоистых композитах (таких как расслоения, ударные повреждения, трещины, отверстия и т.д.), было выявлено, что широкополосная стимуляция в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц, позволяет определить размер и положение повреждений композиционных материалов путем активации их резонансных частот [16]. Ключевым моментом является применение техники лазерной виброметрии, которая позволяет оценить как скорость вибраций на поверхности исследуемых композитов в процессе акустической стимуляции, так и резонансные частоты дефектов и, как следствие, оценить их размеры и локализацию.

Указанная методика резонансной лазерной виброметрии была применена для оценки дефектов в углепластиковых композиционных материалах после нанесения ударных повреждений различной энергии. В процессе контроля модулированный по частоте акустический сигнал подавали на пьезоэлектрический преобразователь, закрепленный на объекте исследования. Скважность, период и форма (меандр) подаваемого на изделие сигнала задавали генератором сигналов специальной формы AWG-4164, соединенным с высоковольтным усилителем AVA-1810. Контроль вибраций на поверхности пластин в процессе их акустической стимуляции проводили с помощью трехкомпонентного сканирующего лазерного виброметра PSV-400-3D фирмы «Polytec» (Германия). Структурная схема установки резонансной УЗ виброметрии приведена на рис. 1. Среднеквадратичная амплитуда колебаний на поверхности исследуемого материала, измеренная в процессе проведения виброизмерений, была преобразована с помощью быстрого преобразования

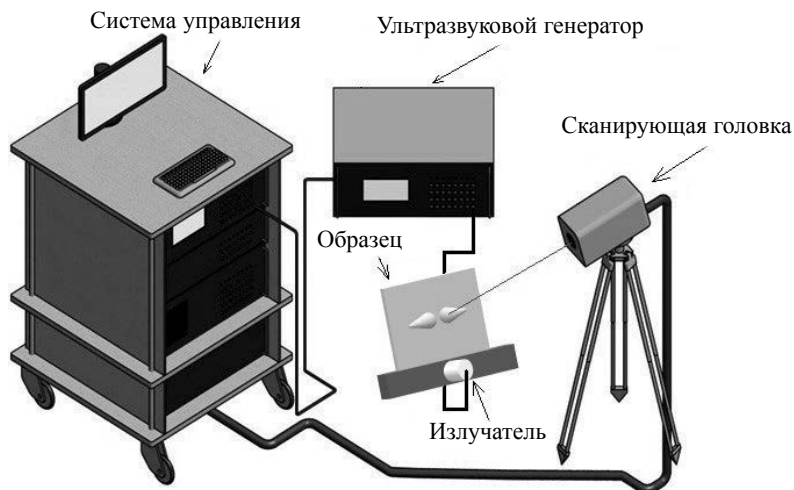


Рис. 1. Структурная схема установки резонансной УЗ виброметрии.

Фурье в амплитудно-частотный спектр вибраций каждой точки сканирования и всего образца в целом. Анализ полученных данных позволил оценить степень повреждения композита.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

В рамках данного исследования была разработана конечно-элементная модель ортотропного композита с использованием пакета CAE Fidesys 1.7. Механическое поведение материала описано в постановке Лагранжа системой уравнений, включающей уравнения сохранения массы, импульса и энергии, уравнение состояния, а также уравнения для параметров модели, учитывающие возникновение повреждений. Разрушение учитывали следующим образом: для каждой компоненты напряжения определяли величину разрушения (три напряжения разрушения при растяжении и три максимальных напряжения сдвига) [20]

$$e_{11f}^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{F_{11}(1-D_{11})} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{F_{12}(1-D_{12})} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{31}}{F_{31}(1-D_{31})} \right)^2 \geq 1,$$

где σ_{11} , σ_{12} , σ_{31} — напряжения, действующие в материале; F_{11} , F_{12} , F_{31} — напряжения при разрушении; D_{11} , D_{12} , D_{31} — параметр поврежденности среды для соответствующих плоскостей. При $D_{ij} = 1$ материал считается локально разрушенным, и напряжения обращаются в нуль. После достижения напряжения разрушения, линейное уменьшение напряжения моделировали с указанной энергией разрушения. Накопление повреждений определяли для каждого последующего временного шага в виде:

$$D_{11}^{n+1} = D_{11}^n + \Delta D_{11} + C^* \Delta D_{12} + C^* \Delta D_{31},$$

где C^* — коэффициент связи повреждений.

Использованная ортотропная модель накопления повреждений учитывает энергию разрушения композита. При достижении растягивающими или сдвиговыми напряжениями предельно допустимых значений, дальнейшее деформирование приводит к разрушению композита. При этом появление повреждений учитывает энергию разрушения композита. Повреждение бездефектной пластины из углепластика моделировали ударом копра массой 2 кг, на конце которого был закреплен стальной шарик диаметром 16 мм, что соответствовало условиям натурального эксперимента. Начальные и граничные условия для композита и копра задавали в соответствии со стандартом ASTM D 7136/D 7136M—12. На краях пластины задавали условия жесткого защемления:

$$\begin{cases} x = 0, u = 0, v = 0, w = 0; \varphi_x = \frac{\partial w}{\partial x} \\ y = 0, u = 0, v = 0, w = 0; \varphi_y = \frac{\partial w}{\partial y} \end{cases}$$

где u — перемещение в направлении оси x ; v — перемещение в направлении оси y ; w — перемещение в направлении z ; φ — угол поворота края пластинки.

Для копра задавали начальные условия:

$$\text{при } t = 0: \quad v = v_0, \quad z = z_0, \quad \frac{dv}{dt} = 0,$$

где v_0 — скорость копра в момент удара, z_0 — начальная координата точки удара.

На рис. 2 приведена зависимость изменения амплитуды компоненты деформации ϵ_{zz} от энергии удара, имеющая вид возрастающей функции. Изображения видимых повреждений углепластика на рис. 3 показывают увеличение площади повреждения композита с ростом энергии удара от 1 до 10 Дж.

На рис. 4 показано изменение во времени компоненты деформации по оси Z (ϵ_{zz}) непосредственно в точке удара копра. Видно, что к моменту времени 0,2 мс деформация достигает более 5 %. В период от 0,2 до 0,24 мс происходит снижение уровня деформации до 3 %, что связано с отскоком ударника и снятием внешней нагрузки с пластины. Остаточные деформации поврежденной области составляют 3 %.

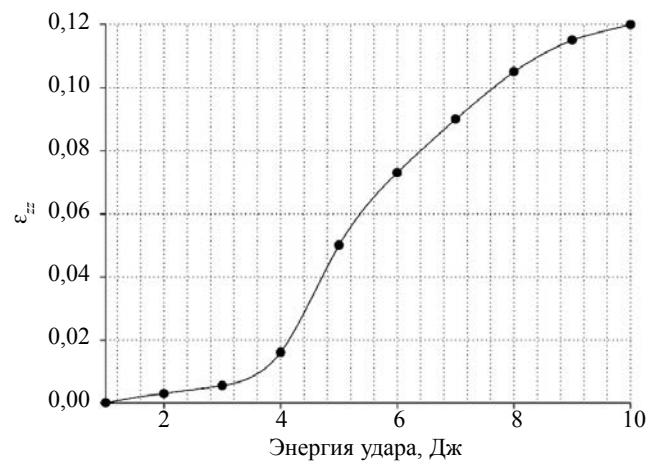


Рис. 2. Зависимость изменения амплитуды компоненты деформации ϵ_{zz} от энергии удара.

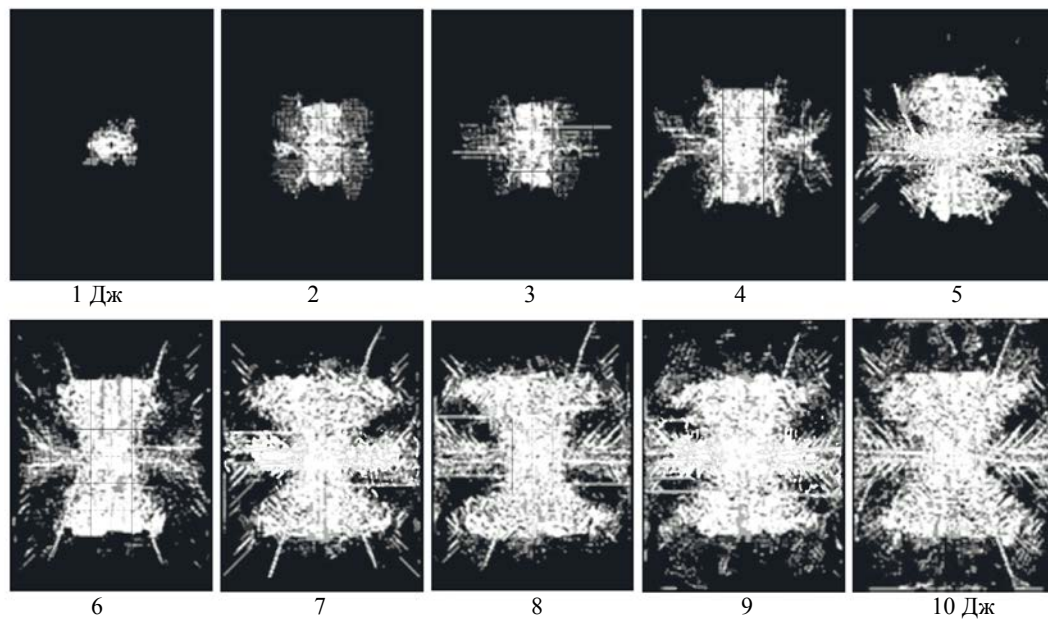


Рис. 3. Разрушение углепластикового композита толщиной 1 мм в результате нанесения одиночных ударов с энергией от 1 до 10 Дж.

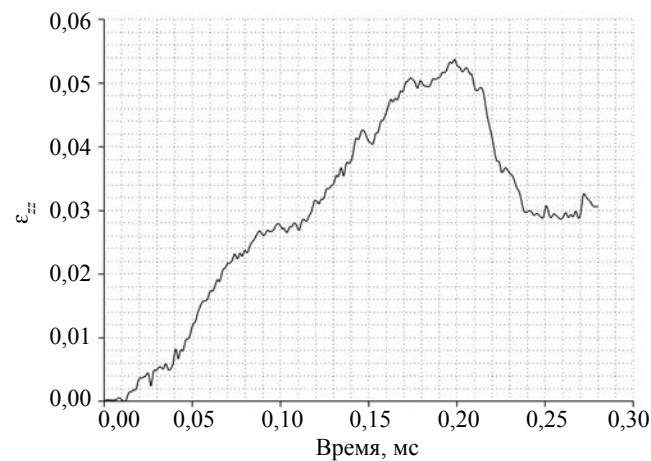


Рис. 4. Зависимость изменения компоненты деформации ϵ_{zz} от времени нанесения ударного повреждения.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальное исследование ударных повреждений низкой энергии проводили на пластинах из углепластика, разделенных на три группы по воздействию на композит: 1 — одиночные ударные воздействия; 2 — цикл последовательных ударов с нарастанием энергии; 3 — цикл последовательных ударов с понижением энергии.

В первой группе образцов были исследованы повреждения, полученные в результате нанесения ударов энергией от 1 до 10 Дж с шагом 1 Дж. Измерение вибраций, возникающих в процессе акустической стимуляции материалов, проводили в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц в режиме быстрого преобразования Фурье, что также соответствовало диапазону частотной модуляции поступающего на пьезопреобразователь сигнала. В результате анализа данных вибросканирования были идентифицированы области повреждений композитов и измерена их площадь (см. табл. 1). Полученная зависимость «видимой» площади дефектов на фронтальной (S_f) и тыльной поверхностях (S_b) образцов от энергии удара приведена на рис. 5.

Таблица 1

Зависимость изменения видимой площади дефекта на фронтальной и тыльной поверхностях пластины от энергии одиночных ударов

Энергия удара, Дж Площадь дефекта на стороне	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S_f , мм ²	0	200	290	370	430	650	1010	1190	1300	1690
S_b , мм ²	0	220	310	390	450	670	1080	1210	1340	1770
r , %*	0	10	6,9	5,4	4,7	3,1	6,9	1,7	3,1	4,7

* Относительное различие величин S_f и S_b .

Как и ожидалось, эксперименты продемонстрировали увеличение площади повреждения с ростом энергии удара. Зависимость площади дефекта от энергии имеет одинаковый вид как для передней, так и для задней сторон изделия, что определяется малой толщиной (1 мм) исследованного композита. После нанесения удара с энергией 1 Дж повреждений в структуре композита обнаружено не было, в то время как при с увеличением энергии до 2 Дж площадь образовавшегося дефекта составила 200 мм² (на передней поверхности) и 220 мм² (на задней поверхности). При дальнейшем увеличении энергии удара площадь дефекта возрастала нелинейно, составив 430 мм² при энергии 5 Дж и более 1190 мм² при энергии 8 Дж и т.д. (см. рис. 5).

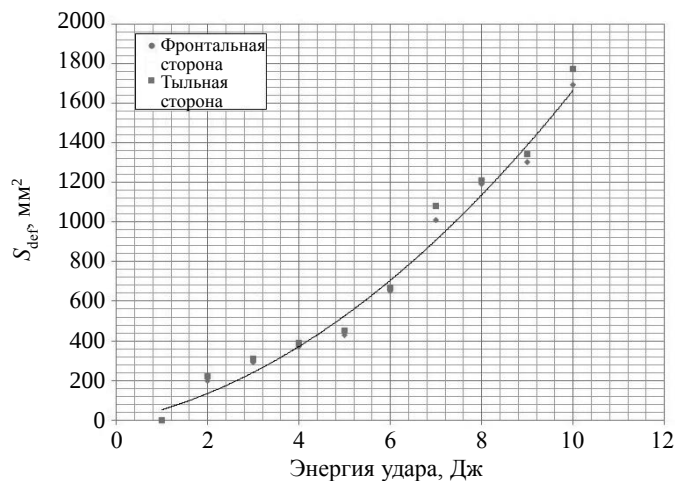


Рис. 5. Зависимость видимой площади ударных повреждений в углепластике толщиной 1 мм от энергии одиночного удара.

Подверженность углепластика малой толщины (1 мм) существенному разрушению (площадью до 450 мм²) даже при небольших ударных нагрузках (около 5 Дж) определяет необходимость детальных исследований устойчивости композитов к низкоэнергетическим ударным нагрузкам в диапазоне от 1 до 5 Дж.

Известно, что структура дефектов в слоистых композитах имеет форму пирамиды и размеры отдельных расслоений зависят от количества слоев композита [21]. Соответственно, в наших экспериментах по контролю трехслойного композита площадь повреждения, определенная на задней поверхности, незначительно превышает площадь дефекта, оцененную на фронтальной поверхности.

Для сравнения результатов измерений на обеих поверхностях изделия была рассчитана величина расхождения (r , %), равная отношению измеренных площадей дефектных отметок на фронтальной (S_f) и тыльной (S_b) поверхностях: $r = |S_b - S_f| / S_f$. В нашем случае расхождение не превысило 10 %, что говорит о незначительном различии в площади дефектных отметок.

Композит в двух партиях был подвергнут последовательному повреждению с изменяющейся энергией ударов от 1 до 5 Дж и от 5 до 1 Дж соответственно. Нанесение каждого последующего удара с шагом в 1 Дж сопровождалось измерением вибраций на поверхности материала и оценкой видимой площади дефекта. Установлено, что разрушение композита происходит при энергии 10 Дж, поэтому дальнейшее увеличение энергии удара было признано нецелесообразным.

На рис. 6 приведены экспериментальные результаты при последовательных ударах с повышением энергии. Видно, что удар с энергией 1 Дж не вызвал заметного повреждения композита, тогда как следующий удар с энергией в 2 Дж привел к образованию дефекта площадью 210 мм² на фронтальной и 220 мм² на тыльной поверхностях. При следующем ударе с энергией 3 Дж площадь повреждения увеличилась до 260 мм², что примерно в три раза меньше площади дефекта (более 1020 мм²), появившегося в результате последовательных ударов с энергией от 1 до 5 Дж. Следует отметить, что три последовательных удара с энергией от 1 до 3 Дж приводят к повреждению композита, сопоставимого по площади со случаем одиночного удара от 3 до 4 Дж. Четвертый удар, в свою очередь, привел к трехкратному увеличению площади дефекта (1080 мм² на тыльной поверхности) по сравнению с тремя последовательными ударами 1+2+3 Дж. Аналогичным образом, дефект, образованный в ходе последовательных ударов с увеличением энергии до 4 Дж, сопоставим по площади с дефектом, образованным в результате нанесения одиночного удара с энергией 7 Дж. Соответственно, площадь повреждения, образованного пятью последовательными ударами 1+2+3+4+5 Дж, приблизительно равна площади дефектной отметки от удара 10 Дж. Удар такой энергии нарушает упругие свойства композита и приводит к его разрушению.

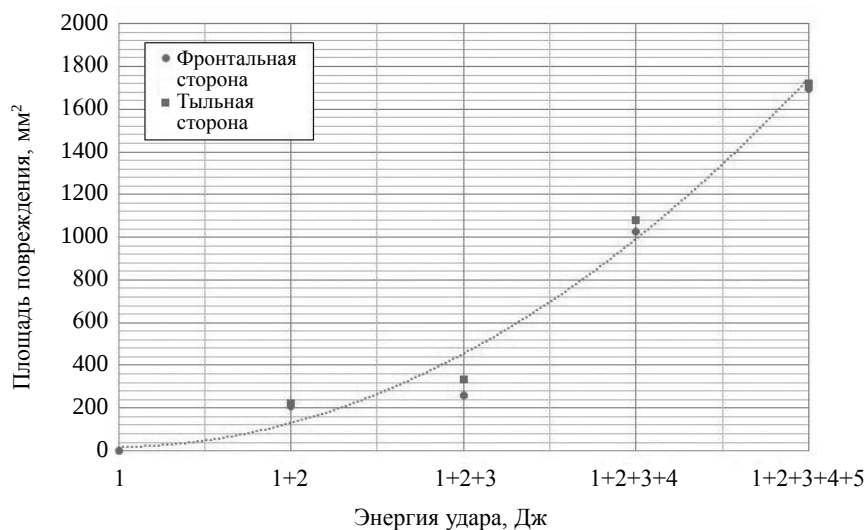


Рис. 6. Изменение видимой площади дефектов в углепластике толщиной 1 мм в результате применения последовательных ударов 1+2+3+4+5 Дж.

На рис. 7 приведены комбинации фотографий углепластиковых образцов и результатов вибросканирования, полученных на фронтальной и тыльной поверхностях изделий с последовательными ударными повреждениями 1+2+3+4+5 Дж.

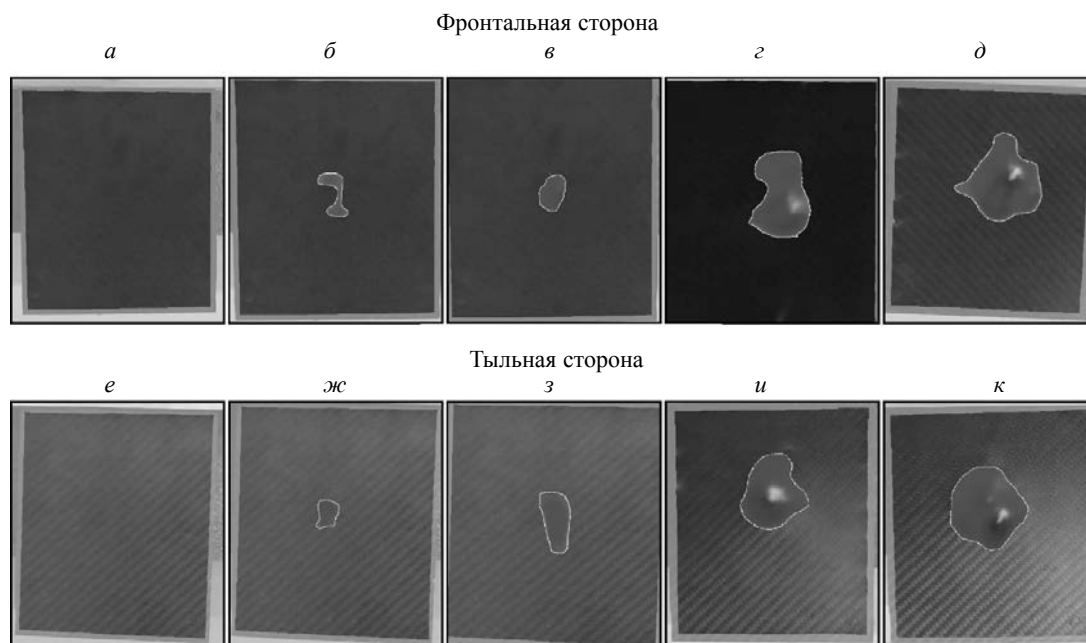


Рис. 7. Комбинирование фотографий углепластиковых образцов толщиной 1 мм и результатов вибросканирования на фронтальной и тыльной поверхностях изделий после нанесения последовательных ударов (белой линией обозначены видимые границы дефектов):

a, e — 1 Дж; *б, ж* — 1+2 Дж; *в, з* — 1+2+3 Дж; *г, и* — 1+2+3+4 Дж; *д, к* — 1+2+3+4+5 Дж.

На рис. 8 приведен график зависимости видимой площади повреждений композита от величины энергии удара при последовательных ударах с понижением энергии: 5+4+3+2+1 Дж. Видно, что при первом ударе с энергией 5 Дж образуется дефект площадью 450 мм² (см. рис. 7). Площадь повреждений после второго удара (940 мм²) вдвое больше и сопоставима с одиночным ударом 10 Дж, в то время как суммарная энергия последовательных ударов в данном случае равна 9 Дж.

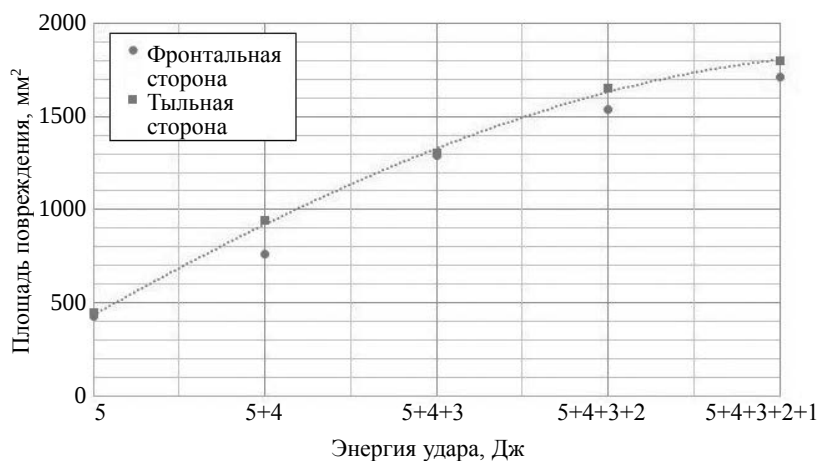


Рис. 8. Изменение площади «видимых» ударных повреждений углепластика толщиной 1 мм при нанесении последовательных ударов с понижением энергии 5+4+3+2+1 Дж.

Площадь дефекта, образованного в результате третьего удара (1300 мм²), почти в три раза превышает площадь дефекта, вызванного одиночным ударом 5 Дж. Количественно площадь последнего дефекта сопоставима с площадью повреждения, полученного в результате одиночного удара 9 Дж. Фотографии углепластиковых образцов в комбинации с результатами вибросканирования, полученными на фронтальной и тыльной поверхностях пластин с последовательными ударными повреждениями при понижении энергии удара, приведены на рис. 9.

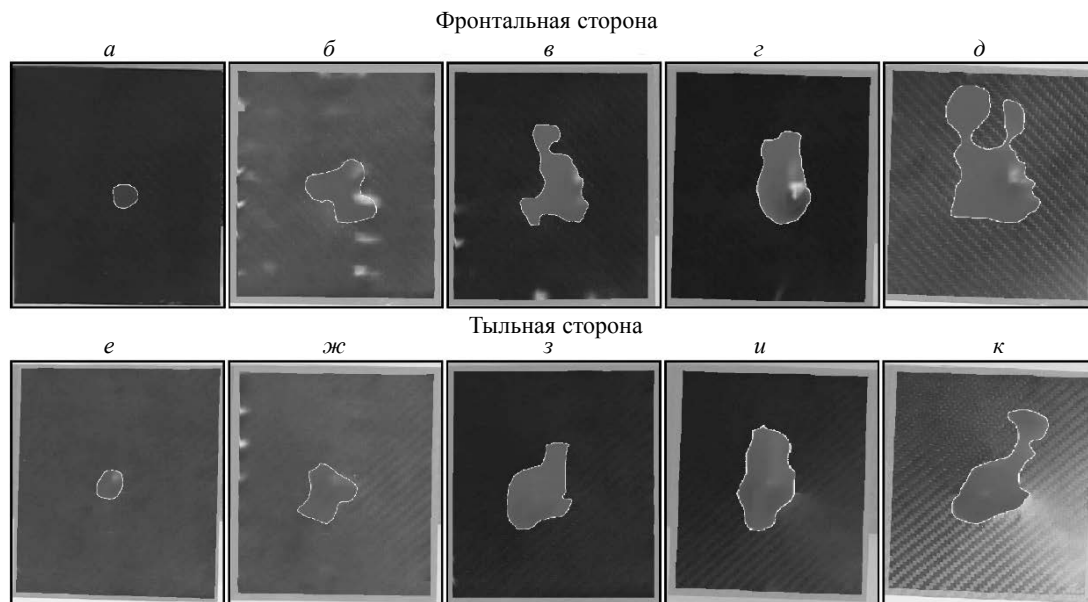


Рис. 9. Комбинирование фотографий углепластиковых образцов и результатов вибросканирования на фронтальной и тыльной поверхностях изделий после нанесения последовательных ударов (белой линией обозначены видимые границы дефектов):

а, е — 5 Дж; *б, ж* — 5+4 Дж; *в, з* — 5+4+3 Дж; *г, и* — 5+4+3+2 Дж; *д, к* — 5+4+3+2+1 Дж.

Из сравнения формы «видимых» повреждений, образованных при повышении (см. рис. 7) и понижении (см. рис. 9) энергии ударов, следует, что в первом случае разрушение композита концентрируется в центре дефектной зоны, а при понижении энергии удара участки разрушения распределяются в материале неравномерно.

ВЫВОДЫ

Исследование устойчивости углепластика толщиной 1 мм к ударным нагрузкам низкой энергии (до 10 Дж) показало, что увеличение площади видимого повреждения по мере увеличения энергии удара имеет нелинейный характер. В случае нанесения удара с энергией в 1 Дж повреждение структуры композита не установлено, а при ударе 2 Дж площадь повреждения составила 200 мм² (на фронтальной стороне) и 220 мм² (на оборотной стороне). Дальнейшее увеличение энергии удара привело к значительному увеличению видимой площади повреждения до 430 мм² при ударе 5 Дж и более 1190 мм² при ударе 8 Дж и т.д.

Для оценки устойчивости композитов к низкоэнергетическим ударным воздействиям (до 5 Дж) исследовали влияние последовательных ударов с увеличением/уменьшением энергии на изменение видимой площади дефектов. Площадь повреждений, образованных в результате нанесения пяти последовательных ударов с нарастающей энергией (~1800 мм²), превысила площадь дефектов, образованных в результате ударов с понижением энергии (~1700 мм²). Площадь повреждений композитов, образованных в результате последовательных ударов (при суммировании энергии удара), не превышает площадь дефектов, образованных в результате одиночных ударов такой же энергии. В то же время, во многих случаях площадь повреждений от одиночных ударов была сопоставима по размерам с дефектами образованными последовательными ударами, имеющих большую суммарную энергию удара.

Предложенная конечно-элементная модель позволила исследовать картину повреждения композитов толщиной 1 мм при нанесении ударных повреждений энергией от 1 до 10 Дж, а также оценить зависимость изменения компоненты деформации ϵ_{zz} от времени в процессе нанесения ударного повреждения.

Методика резонансной УЗ виброметрии и подход к контролю качества (раздел 1) разработаны Д.А. Дерусовой в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00029) в Национальном исследовательском Томском политехническом университете; раздел 2 выполнен в рамках Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета; раздел 3 выполнен при финансовой поддержке РФФИ и Томской области в рамках научного проекта № 18-41-703002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заббаров А.А., Карельских Е.А., Шафигуллин Л.Н. Применение углепластиков в машиностроении / Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы / В сб. тр. VIII международной науч.-техн. конф. Казань, 2017. С. 65—67.
2. Молчанов Б.И., Гудинов М.М. Свойства углепластиков и области их применения // Авиационная промышленность. 1997. № 3—4. С. 58—60.
3. Зеленский Э.С., Куперман А.М., Горбаткина Ю.А., Иванова-Мумжиева В.Г., Берлин А.А. Армированные пластики – современные конструкционные материалы // Российский химический журнал. 2001. № 2. С. 56—74.
4. Климакова Л.А., Половый А.О., Маркин В.О. Применение термокомпенсационных углепластиковых профилей для обеспечения точностных характеристик космического телескопа / Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов. Тр. 4-й Международной конф. М.: Знание, 2006. С. 748—754.
5. Мурашов В.В., Мишуков К.С. Оценка прочностных характеристик углепластиков акустическим методом // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 81—85.
6. Коган Д.И., Душин М.И., Борщев А.В., Вешкин Е.А., Абрамов П.А., Макрушин К.В. Свойства конструкционных углепластиков, изготовленных пропиткой под вакуумом // Известия Самарского научного центра Российской Академии Наук. 2012. Т. 14. № 4—2. С. 762—766.
7. Tariq F., Shifa M., Baloch R.A. Mechanical and Thermal Properties of Multi-scale Carbon Nanotube-Carbon Fiber-Epoxy Composite // Arabian Journal for Science and Engineering. 2018. № 43(11). P. 5937—5948.
8. Хозяшев К.Е., Осипенко М.А. Аналитическое решение контактной задачи об изгибе двухлистового упругого элемента с внутренним шарниром: приложение к исследованию протеза стопы // Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Пермь. 2015. № 2. С. 216—228.
9. Хмелев В.Н., Хмелев С.С., Абраменко Д.С., Цыганок С.Н. Применение ультразвуковых колебаний для ускорения процессов при производстве полимерных материалов / Прикладные аспекты химической технологии полимерных материалов и наносистем. Сб. материалов III Всероссийской науч.-пр. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Бийск, 2009. С. 151—154.
10. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я. Разработка и исследование аппретирующих составов для термопластичных углепластиков // Труды ВИАМ. 2016. № 12 (48). С. 9.
11. Sarasini F., Tirillò J., D'Altalia S., Valente T., Santulli C., Touchard F. Damage tolerance of carbon/flux hybrid composites subjected to low velocity impact // Compos. B Eng. V. 91. 2016. P. 144—153.
12. Umar M. Z., Vavilov V. P., Abdullah H., Ariffin A. K. Detecting Low-Energy Impact Damages in Carbon-Carbon Composites by Ultrasonic Infrared Thermography // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. V. 53. No. 7. P. 530—538.
13. Zare Y., Rhee K.Y. Evaluation and Development of Expanded Equations Based on Takayanagi Model for Tensile Modulus of Polymer Nanocomposites Assuming the Formation of Percolating Networks // Phys. Mesomech. 2018. V. 21. P. 351—357.
14. Dolmatov D., Zhvyrblya V., Filippov G., Salchak Y. and Sedanov E. Advanced ultrasonic testing of complex shaped composite structures // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. V. 135. 012010. DOI:10.1088/1757-899X/135/1/012010
15. Filippov A. V., Krasnoveikin V. A., Druzhinin N. V. & Rubtsov V. E. The use of laser-doppler vibrometry for modal analysis of carbon-fiber reinforced composite // Key Engineering Materials. 2016. № 712. P. 313—318. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.712.313>
16. Adebahr W., Solodov I., Rahammer M., Gulnizkij N., Kreutzbruck M. Local defect resonance for sensitive non-destructive testing // AIP Conference Proceedings. 2016. V. 1706. article number 050005.
17. Derusova D., Vavilov V., Sfarra S., Sarasini F., Krasnoveikin V., Chulkov A., Pawar S. Ultrasonic spectroscopic analysis of impact damage in composites by using laser vibrometry // Composite Structures. 2019. V. 211. P. 221—228. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.12.050>
18. Solodov I., Rahammer M., Kreutzbruck M. Analytical evaluation of resonance frequencies for planar defects: Effect of a defect shape // NDT and E International. 2019. V. 102. P. 274—280. DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.12.008
19. Rahammer M., Solodov I., Gulnizkij N., Kreutzbruck M. Local defect resonance for efficient defect detection in composites // ECCM 2016. Proceeding of the 17th European Conference on Composite Materials. 2016. article number 126913.
20. Riedel W., Harwick W., White D.M., Clegg R.A. Advanced Material Damage Models for Numerical Simulation Codes // Final Report. EMI-report No. 175/03. ESA Contract No. 12400/97/NL/PA(SC), CCN No. 2.
21. Derusova D.A., Vavilov V.P., Pawar S.S. Evaluation of equivalent defect heat generation in carbon epoxy composite under powerful ultrasonic stimulation by using infrared thermography // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. V. 81. Issue 1. article number 012084.