

АКТИВНЫЙ ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ УДАРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

© 2020 г. Б.И. Шагдыров¹, А.О. Чулков^{1*}, В.П. Вавилов¹, В.О. Каледин², М. Омар³

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30

²Новокузнецкий институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Кемеровский государственный университет», Россия 654041 Новокузнецк, ул. Циолковского, 23

³Отделение индустриальных и инженерных систем Института Масдар Университета науки и технологий Халифы, 54224 Абу-Даби, Объединенные Арабские Эмираты

*E-mail: chulkovao@tpu.ru

Поступила в редакцию 17.09.2020; после доработки 20.10.2020

Принята к публикации 20.10.2020

Используя метод ультразвуковой инфракрасной термографии, показано, что технология 3D-печати позволяет избежать растрескивания краев технологических отверстий в композитах, возникающего при их механической обработке. Прочность композитов к ударным воздействиям целесообразно оценивать по относительному изменению теплофизических характеристик в зонах ударных повреждений, исходя из предположения, что большая энергия удара приводит к более развитым дефектам и большим относительным изменениям тепловой инерции и температуропроводности соответственно. Выполнено сравнение устойчивости к ударным воздействиям образцов из кевлара и углеволокнистого композита, а также их гибрида. Наилучшую стойкость к ударным воздействиям проявил гибридный образец из кевлара и углеволокнистого композита, в котором изменение тепловой инерции и температуропроводности после ударного воздействия с энергией 15 Дж составило соответственно 4 и 8 % по сравнению с 10 и 9 % у углепластика и 15 и 11 % у кевлара.

Ключевые слова: активный тепловой контроль, 3D-напечатанные композиты, углеволокнистый композит, кевлар, гибридный композит, ударное повреждение, температуропроводность, тепловая инерция.

DOI: 10.31857/S0130308220120088

1. ВВЕДЕНИЕ

Ударные повреждения являются характерными эксплуатационными дефектами в полимерных композиционных материалах (ПКМ). Наиболее опасны дефекты, визуально не обнаруживаемые на поверхности удара (BVID-Barely Visible Impact Damage), но приводящие к глубинному растрескиванию композитов и снижению их предела прочности [1]. Ударные повреждения рассматривают как конгломерат зон растрескивания, расслоений и смятий ПКМ, который напоминает по форме пирамиду, обращенную вершиной к точке удара. Максимальная площадь дефектных зон приходится на заднюю поверхность композиционной панели толщиной до нескольких миллиметров, что делает односторонний тепловой контроль (ТК) затруднительным (например, в углепластике предельная глубина выявления дефектов площадью 10 мм² составляет около 4 мм), поэтому наиболее эффективна двухсторонняя процедура ТК или односторонний контроль на стороне, противоположной ударному воздействию. Прочностные характеристики композитов при ударных воздействиях различной энергии и скорости впервые были исследованы в 1980-х годах [2]. Степень повреждения ПКМ может быть оценена по размеру дефектной зоны, например, методом ширографии (shearography) [3]. Одно- и двухсторонний ТК ударных повреждений наглядно демонстрирует форму и размеры ударных повреждений, а в ряде случаев удается заполнить их томографическое представление по слоям, используя принципы временной и фазовой тепловой томографии [4]. В работе [5] была предложена концепция связи энергии удара и локального изменения теплофизических характеристик композитов, опробованная на большом количестве образцов из угле- и стеклопластика. Затем та же концепция была применена для испытаний гибридных композитов лен—углепластик, в результате чего было продемонстрировано повышенная устойчивость к ударным повреждениям композиций лен—углепластик—лен.

Классификация дефектов ПКМ является актуальной задачей ТК, которую решают путем анализа температурных сигналов во времени, а также форм температурных аномалий. Наиболее простыми с точки зрения классификации являются дефекты в виде инородных включений, теплофизические характеристики которых резко отличаются от свойств основного материала, например, влага в сотовых конструкциях [6]. Ударные повреждения при одностороннем ТК начи-

нают проявляться в виде температурных аномалий уже с момента начала тепловой стимуляции (подповерхностные повреждения), а в ходе распространения тепла внутрь объекта приобретают специфическую форму, которая зависит от схемы укладки слоев композита [7]. Активный ТК с использованием оптического нагрева наиболее эффективен для выявления расслоений значительной площади, расположенных параллельно основной поверхности изделия. Разрывы волокон композита и узкие трещины целесообразно выявлять с помощью метода ультразвуковой (УЗ) инфракрасной (ИК) термографии, при котором наиболее интенсивная генерация тепла происходит в зонах «слипнутых» дефектов [8]. Отдельным направлением применения теплового метода при контроле композитов является анализ динамических температурных полей, возникающих в момент нанесения ударных повреждений [7, 9].

В последние годы приобрели популярность аддитивные технологии производства композиционных материалов, которые позволяют изготавливать изделия со сложной геометрией при относительно высоком качестве и производительности [10]. Однако прочностные характеристики таких ПКМ в сравнении с композитами, изготовленными по «классическим» технологиям, исследованы слабо, в особенности, с использованием методов неразрушающих испытаний.

В настоящем исследовании выполнено сравнение образцов из кевлара (предел прочности 3640 МПа) и углеродволоконистого композита (УВК, предел прочности до 1000 МПа), а также их гибрида, изготовленных методом 3D-печати и подвергнутых последовательным ударным воздействиям различной энергии. Исходным пунктом явилось предположение, что большая энергия удара приводит к большим относительным изменениям тепловой инерции и теплопроводности.

2. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТЕРМОГРАФИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТВЕРСТИЙ

При сверлении технологических отверстий в традиционных композитах возможно возникновение краевых дефектов в виде растрескиваний и расслоений, которые могут быть зародышами более опасных эксплуатационных дефектов. При изготовлении композитов методом 3D-печати появления дефектов такого вида можно избежать. На рис. 1 приведены результаты ультразвукового ТК качества исполнения отверстия в двух образцах: изготовленных по традиционной технологии из препрега (рис. 1а), а также методом 3D-печати с использованием угленаполненного филамента FormaX (рис. 1б). В первом образце, представляющем собой имитатор самолетной нервюры, были выполне-

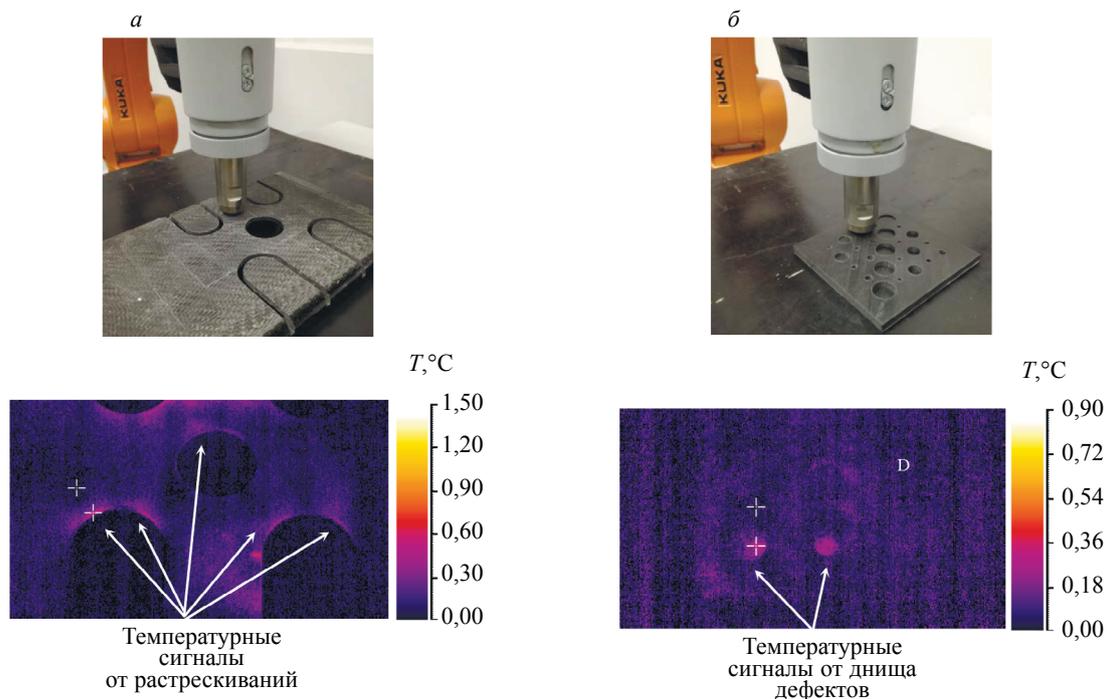


Рис. 1. Результаты УЗ ИК термографии качества отверстий в углепластике, выполненных путем фрезерования (а) и методом 3D-печати (б).

ны сквозные отверстия путем фрезерования, второй образец содержал глухие плоскостные отверстия различной глубины. Известно, что эффективным методом выявления «слипнутых» («сомкнутых») дефектов является УЗ ИК термография, осуществляемая с помощью магнитострикционной или пьезоэлектрической стимуляции [7]. В частности, на рис. 1 показан процесс стимуляции композита с помощью магнитострикционной головки, установленной на роботе Кука, что позволило обеспечить постоянный прижим шарового индентора к изделию. Электрическая мощность на магнитострикторе составляла 50 Вт, чтобы избежать повреждения композита в зоне контакта с индентором; длительность стимуляции была 5 с, частота ультразвука — 22 кГц. При вводе в изделие УЗ колебаний температура в дефектных областях повышается вследствие трения берегов микротрещин на фоне ненагреваемого бездефектного материала. Термограмма рис. 1а показывает, что изделие остается «холодным», тогда как поверхности фрезерованных отверстий генерируют температурные сигналы амплитудой около 0,5 °С. Во втором образце генерация тепла наблюдалась только по всей площади отверстий с остаточной стенкой малой толщины (см. теплые зоны круглой формы с избыточной температурой около 0,25 °С на рис. 1б), в то время как края отверстий оставались холодными. Применение данного способа ТК иллюстрирует преимущество изготовления технологических отверстий на 3D-принтере, при котором микротрещины на поверхности отверстий не образуются.

3. ОБРАЗЦЫ ПКМ С УДАРНЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

Три образца размерами 90×80×3,2 мм и массой около 27 г (рис. 2) были изготовлены методом 3D-печати на принтере Markforged, модель Mark Two, на подложке из двух слоев нейлона. Пластины были армированы нитями на основе непрерывных волокон из кевлара и углерода по схеме [0°/45°/90°/-45°] и далее через 45°. Образец из УВК (рис. 2а) состоял из 23 слоев, образец из кевлара (рис. 2б) — из 28 слоев, образец из гибридного композита (рис. 2в) содержал 2 слоя нейлона, 15 слоев кевлара, 10 слоев углерода и 4 слоя кевлара.

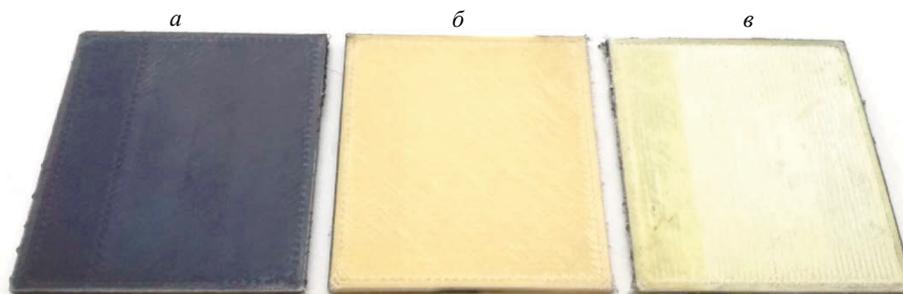


Рис. 2. Образцы ПКМ:
а — УВК; б — кевлар; в — кевлар + УВК.

Перед испытаниями образцы с двух сторон были окрашены черной матовой краской для того, чтобы исключить частичную оптическую прозрачность материалов, а также для унификации коэффициентов поглощения поверхностей образцов до уровня 0,96.

Искусственные дефекты в виде ударных повреждений наносили при помощи копра с ударником в виде стального шарика [3]. По центру каждого образца было нанесено по 5 ударов с энергией от 1 до 5 Дж: первый удар наносили с энергией 1 Дж, второй удар с энергией 2 Дж и т.д., с одной и той же стороны (далее — сторона *F*). Таким образом, суммарная энергия 5 ударов по каждому образцу составила 15 Дж. Следует заметить, что для образца из комбинированного композита удары наносили со стороны большего количества слоев, армированных кевларом. Перед нанесением ударных повреждений, а также после каждого удара, образцы были проконтролированы методом одно- и двухстороннего ТК для анализа изменения теплофизических характеристик (ТФХ) пластин в зоне удара.

4. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБОРУДОВАНИЕ

Схема одно- и двухстороннего ТК приведена на рис. 3. Для создания импульса нагрева использовали ксеноновые лампы-вспышки суммарной мощностью 12 кДж при длительности импульса 16 мс. Температуру образцов регистрировали тепловизионным модулем Opttris PI450 с частотой записи ИК термограмм 25 Гц.

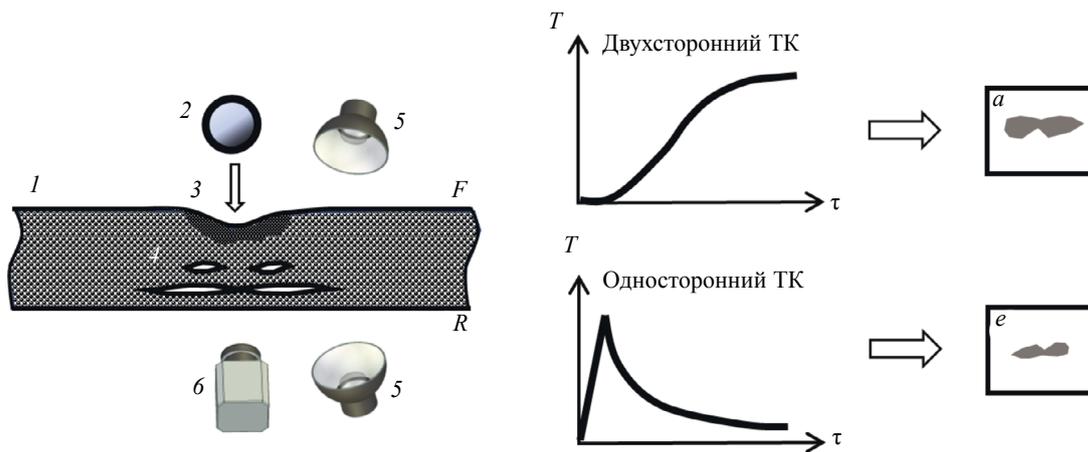


Рис. 3. Схема одно- и двухстороннего ТК ударных повреждений в ПКМ с графиками изменения температуры при одно- и двухстороннем контроле и построением карт температуропроводности a , тепловой инерции e (I — объект контроля; 2 — источник ударного повреждения; 3 — лунка в месте удара; 4 — обширные расслоения в теле композита; 5 — источники оптического нагрева; 6 — тепловизор; F — передняя поверхность; R — задняя поверхность образца).

Односторонний ТК проводили на поверхности, противоположной удару (задней R -поверхности). Предварительно проконтролировали обе поверхности образца из УВК с ударным повреждением 15 Дж, применяя метод тепловой томографии (рис. 4). На передней F -поверхности зона удара визуально обнаруживалась незначительной лункой, а томограмма приповерхностного слоя практически не содержала заметных дефектов (см. томограмму на рис. 4а). Обширная дефектная зона была выявлена при одностороннем ТК задней R -поверхности (томограмма рис. 4б). В дальнейшем односторонний ТК осуществляли только на задней поверхности образцов. Из теории ТК известно, что результаты двухстороннего ТК слабо зависят от того, на каких поверхностях объекта контроля производят нагрев и регистрацию температуры, поэтому, так же как в односторонней процедуре, тепловое поле регистрировали на задней поверхности. Последовательности ИК термограмм обрабатывали с помощью программы ThermoFit Pro (НИ ТПУ).

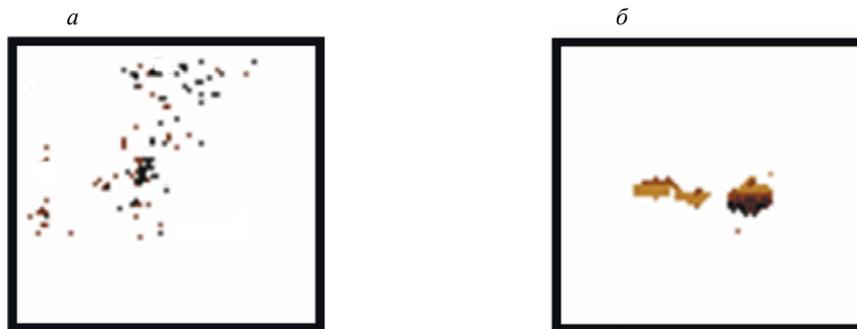


Рис. 4. Тепловые томограммы образца из УВК с ударным повреждением 15 Дж: а — слой 0—0,76 мм (отсчет от передней F -поверхности); б — слой 2,14—2,65 мм.

5. АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ТФХ В ДЕФЕКТНЫХ ЗОНАХ

Согласно схеме рис. 3, оценку дефектности образцов проводили путем анализа изменения ТФХ образцов, т.е. кажущейся тепловой инерции (в односторонней процедуре) и температуропроводности (в двухсторонней процедуре).

5.1. Определение кажущейся тепловой инерции

На рис. 5 показаны карты кажущейся тепловой инерции трех образцов до нанесения ударных повреждений (рис. 5а—с), а также после серии из пяти ударов с суммарной энергией 15 Дж (рис. 5д—е). Расчет значений кажущейся тепловой инерции e/W ($\text{Вт} \cdot \text{с}^{1/2}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) для любого момента времени проводили по следующей формуле [5]:

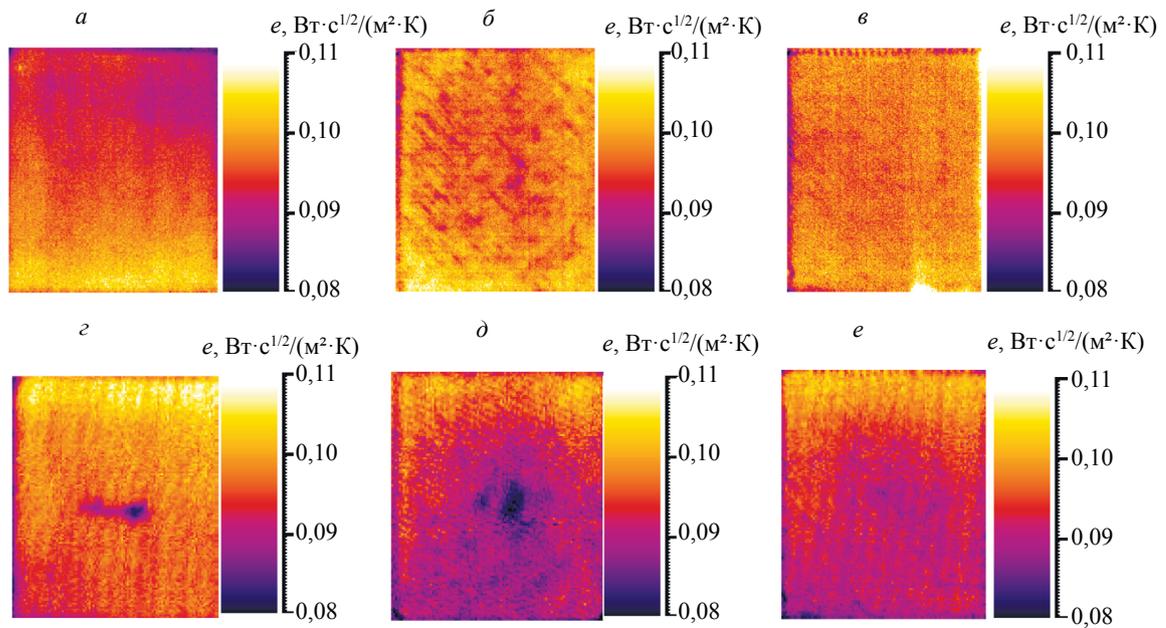


Рис. 5. Карты кажущейся тепловой инерции (односторонний ТК задней поверхности): *a* — УВК (бездефектный образец); *b* — кевлар (бездефектный образец); *c* — кевлар + УВК (бездефектный образец); *d* — УВК (ударные повреждения суммарной мощности 15 Дж); *e* — кевлар (ударные повреждения суммарной мощности 15 Дж); *e* — кевлар + УВК (ударные повреждения суммарной мощности 15 Дж).

$$\frac{e}{W} = \frac{1}{T(\tau^*)\sqrt{\pi\tau^*}}, \quad (1)$$

где e — коэффициент тепловой инерции; W — поглощенная энергия, Вт·с/м²; $T(\tau^*)$ — температура поверхности для конкретного момента времени, °С; τ^* — время, с. Заметим, что формула (1) не требует измерять поглощенную энергию в каждой точке поверхности, что на практике представляет значительные трудности. Кроме того, поскольку кажущаяся тепловая инерция является функцией времени, в расчет принимали максимальные величины абсолютных ($\Delta e = e_{nd} - e_d$) и относительных ($\Delta e/e_{nd}$) изменений этого параметра (индексы «*nd*» и «*d*» относятся к бездефектной и дефектной зонам).

После серии из 5 ударов наибольшие повреждения на задней поверхности визуально наблюдались в образцах из кевлара и УВК (рис. 5*d*, *e*). При этом в образце из УВК образовалась трещина, а у образца из кевлара — внутреннее расслоение круглой формы. Гибридный образец также характеризовался снижением величин кажущейся тепловой инерции в зоне удара, но в меньшей степени.

Величины параметров e_d , e_{nd} , Δe и $\Delta e/e_{nd}$, определенные по e -картам рис. 5, приведены в табл. 1. Видно, что образец из кевлара характеризуется наибольшим изменением кажущейся тепловой инерции с увеличением энергии удара, а именно, $\Delta e/e_{nd} \sim 15\%$ после 5 ударов. Для образца из УВК величина $\Delta e/e_{nd}$ после 5 ударов составила 10 %.

Характер изменения величин $\Delta e/e_{nd}$ с ростом энергии удара проиллюстрирован на рис. 6. Все кривые были аппроксимированы полиномами 2-й степени. В частности, видно, что ТФХ (тепловая инерция) гибридного образца начинают изменяться после ударного воздействия с суммарной энергией 10 Дж, а после ударов с полной энергией 15 Дж изменение величины $\Delta e/e_{nd}$ в гибридном композите в 4 раза ниже, чем в кевларе.

5.2. Определение температуропроводности

Карты температуропроводности рассчитывали по формуле Паркера [5]:

$$a = \frac{1,388 \cdot l^2}{\pi^2 \cdot \tau_{1/2}} = 0,139 \cdot \frac{l^2}{\tau_{1/2}}, \quad (2)$$

где l — толщина образцов, м; $\tau_{1/2}$ — время достижения половины максимума температурного отклика, с.

Таблица 1

Характеристики кажущейся тепловой инерции в дефектных и бездефектных областях образцов ПКМ

Материал образца	Параметр тепловой инерции, Вт·с ^{1/2} /(м ² ·К)	Суммарная энергия ударного воздействия, Дж			
		3	6	10	15
УВК	e_{nd}	0,103	0,101	0,086	0,103
	e_d	0,102	0,101	0,082	0,093
	Δe	0,001	0	0,004	0,01
	$\Delta e/e_{nd}$ %	1,0	0,0	4,7	9,7
Кевлар	e_{nd}	0,091	0,084	0,087	0,093
	e_d	0,09	0,077	0,076	0,079
	Δe	0,001	0,007	0,011	0,014
	$\Delta e/e_{nd}$ %	1,1	8,3	12,6	15,1
Кевлар + УВК	e_{nd}	0,1	0,08	0,08	0,092
	e_d	0,1	0,08	0,077	0,088
	Δe	0	0	0,003	0,004
	$\Delta e/e_{nd}$ %	0,0	0,0	3,8	4,4

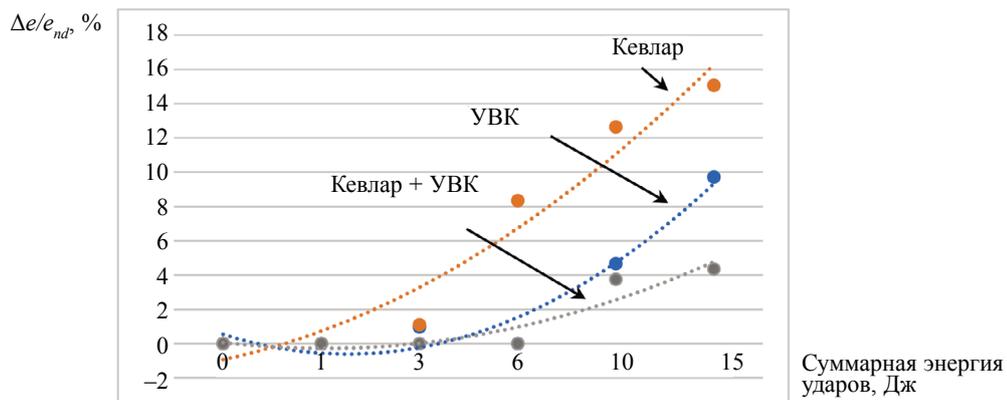


Рис. 6. Зависимость относительного изменения кажущейся тепловой инерции от энергии ударного воздействия.

Карты температуропроводности образца из кевлара (рис. 7) показывают, что с ростом энергии удара величина температуропроводности снижается, что обусловлено микрорастрескиванием композита и соответствующим затягиванием температурного фронта на поверхности, противоположной нагреву. Заметим, что, в отличие от определения тепловой инерции, где каждая термограмма последовательности $T(i, j, \tau)$ преобразуется в карту $e(i, j, \tau)$, карта температуропроводности $a(i, j)$ является единственной для каждой последовательности.

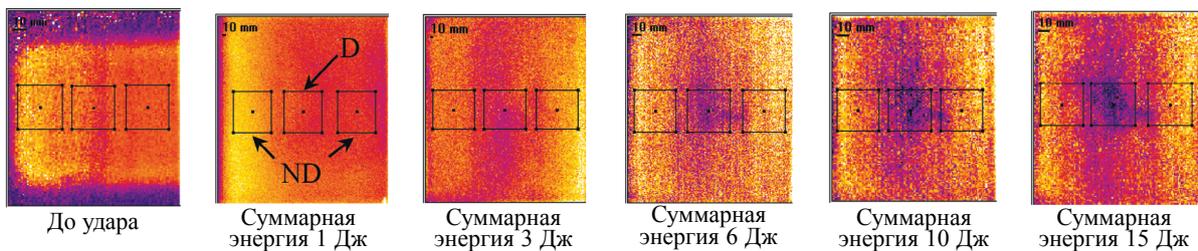


Рис. 7. Карты температуропроводности образца из кевлара (двухсторонний ТК при нагреве задней поверхности).

Параметры, характеризующие температуропроводность ПКМ, приведены в табл. 2. Температуропроводность в дефектных (a_d) и бездефектных (a_{nd}) областях усредняли по зонам квадратной формы (см. рис. 6). Как и в случае тепловой инерции, образец из гибридного композита характеризовался наименьшим изменением температуропроводности (около 8 % после 5 ударов). Для образцов из УВК и кевлара величины $\Delta a/a_{nd}$ после 5 ударов составили 9 и 11 % соответственно.

Таблица 2

Характеристики температуропроводности в дефектных и бездефектных областях образцов ПКМ

Материал образца	Параметр, $\text{м}^2/\text{с} \times 10^{-7}$	Суммарная энергия ударного воздействия, Дж			
		3	6	10	15
Углепластик	a_{nd}	1,88	1,82	1,92	1,84
	a_d	1,86	1,76	1,83	1,67
	Δa	0,02	0,06	0,09	0,17
	$\Delta a/a_{nd}, \%$	1,1	3,3	4,7	9,2
Кевлар	a_{nd}	1,12	1,09	1,16	1,16
	a_d	1,09	1,02	1,07	1,03
	Δa	0,03	0,07	0,09	0,13
	$\Delta a/a_{nd}, \%$	2,7	6,4	7,8	11,2
Кевлар—Углепластик	a_{nd}	1,24	1,25	1,29	1,29
	a_d	1,23	1,22	1,21	1,19
	Δa	0,01	0,03	0,08	0,1
	$\Delta a/a_{nd}, \%$	0,8	2,4	6,2	7,8

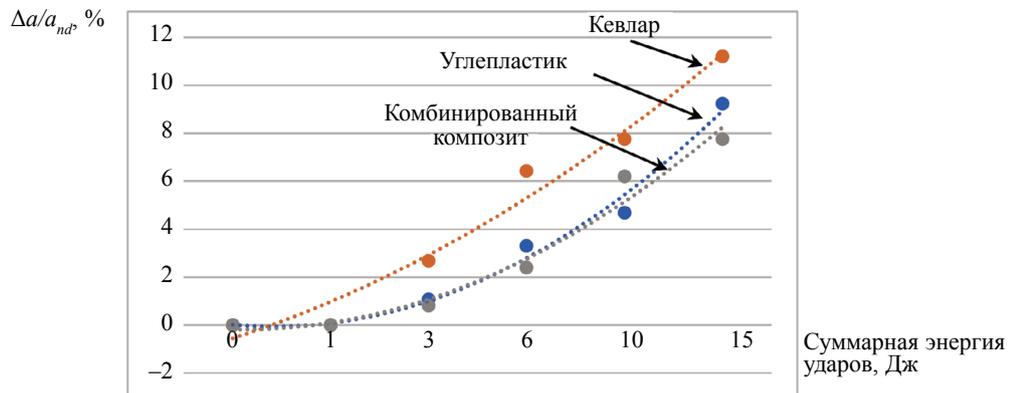


Рис. 8. Зависимость относительного изменения температуропроводности от энергии ударного воздействия.

Данные табл. 2 использованы при построении графиков зависимостей $\Delta a/a_{nd}$ от энергии ударов (рис. 8), аппроксимированных полиномами 2-й степени. В частности, для кевлара эта зависимость близка к линейной. В целом, графики рис. 6 и 8 показывают, что исследованные ПКМ характеризуются приблизительно одним и тем же относительным изменением ТФХ, будь то тепловая инерция или температуропроводность.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Композитный материал, изготовленный методом 3D-печати и армированный непрерывными волокнами, имеет более сложную микроструктуру, чем традиционный композит: нить непосредственно контактирует с термореактивным связующим, которое окружено термопластичным

связующим с высоким предельным удлинением. При ударном воздействии на начальной волновой стадии действуют преимущественно сжимающие напряжения; далее в пластине возникают волны изгиба, при которых доминируют напряжения растяжения—сжатия в плоскости образца. Энергия акустической волны переходит в работу разрушения волокон и связующего. Отметим, что высокомодульные углеродные волокна с модулем упругости не менее 200 ГПа имеют низкую предельную деформацию (порядка 0,6 %) и хрупки, поэтому уже на начальной стадии удара возможно повреждение волокон, а в дальнейшем при изгибных колебаниях разрывы волокон более вероятны, чем трещины в термореактивном связующем с предельной деформацией порядка 1,5 %. Нити из кевлара имеют меньший модуль упругости (70—112 ГПа) и высокую предельную деформацию (2,6 % и выше), в связи с чем напряжения в них меньше по сравнению с напряжениями в связующем; можно прогнозировать преимущественное появление дефектов в виде трещин в термореактивном связующем и нарушений адгезионной связи между связующим и волокнами. Поскольку разрушение углеродных волокон, в силу их большей жесткости, требует большей удельной работы на единицу объема, чем при разрушении связующего, акустическая волна в углеволокнистом материале затухает в локальной зоне удара с образованием нескольких небольших по размерам трещин. Напротив, в кевларе очаги разрушения в виде зон растрескивания термореактивного связующего должны быть протяженными вдоль направления армирования. Это хорошо согласуется с результатами, представленными на рис. 5—8. Уменьшение проявлений дефектов в гибридном образце объясняется разгрузкой кевларовых слоев более жесткими слоями углепластика.

Таким образом, качественные различия эффектов, наблюдаемых в различных материалах, согласуются с микромеханическими представлениями.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании продемонстрированы возможности активного теплового контроля при сравнительных испытаниях ПКМ, изготовленных методом 3D-печати. Ультразвуковая ИК термография, использующая мощную УЗ стимуляцию, целесообразна при выявлении «слипнутых» и тонких дефектов, в которых существенно внутреннее трение, приводящее к локальной генерации тепловой энергии. В частности, с помощью данного метода показано, что 3D-печать позволяет избежать растрескивания технологических отверстий в композитах, возникающего при их механической обработке. Прочность ПКМ к ударным воздействиям целесообразно оценивать по относительному изменению ТФХ в зонах ударных повреждений, исходя из предположения, что большая энергия удара приводит к более серьезным дефектам и большим относительным изменениям тепловой инерции и температуропроводности ПКМ соответственно. Наилучшую устойчивость к ударным воздействиям проявил гибридный образец из кевлара и УВК, в котором изменение тепловой инерции и температуропроводности после ударного воздействия с энергией 15 Дж составило соответственно 4 и 8 % по сравнению с 10 и 9 % у углепластика и 15 и 11 % у кевлара.

Данное исследование было выполнено в рамках проекта Госзадания «Наука» № FSWW-2020-0014 (моделирование и обработка данных), грантов Российского научного фонда № 17-19-01047п (алгоритмы обработки данных и методики испытаний) и Российского Фонда фундаментальных исследований №19-29-13004/19 (экспериментальное оборудование).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Giurgiutiu V.* SHM of aerospace composites — challenges and opportunities // *CAMX Conference Proceedings*. 2015. P. 1—15.
2. *Cantwell W., Curtis P., Morton J.* An assessment of the impact performance of CFRP reinforced with high strain carbon fibers // *Composites Science and Technology*. 1986. V. 25 (2). P. 133—148.
3. *Староверов О.А., Бабушкин А.В., Горбунов С.М.* Оценка степени поврежденности углепластиковых композиционных материалов при ударном воздействии // *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2019. № 1. С. 1—12.
4. *Vavilov V., Shirayev V., Kuimova M.* Time and Phase Domain Thermal Tomography of Composites // *Photonics*. 2018. V. 5 (4). P. 1—11. <https://doi.org/10.3390/photonics5040031>
5. *Vavilov V., Chulkov A., Smotrov A., Smotrova S., Moskovchenko A.* Characterizing impact damage in GFRP/CFRP composites by determining thermal effusivity/diffusivity // *Measurement Science and Technology*. 2019. V. 30. P. 1—14. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab018e>

6. *Chulkov A.O., Vavilov V.P., Moskovchenko A.I., Pan Y.* Quantitative evaluation of water content in composite honeycomb structures by using one-sided IR thermography: Is there any promise? // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 2017. P. 1—9. <https://doi.org/10.1117/12.2262435>
 7. *Клюев В.В., Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Пичугин А.Н., Козельская С.О.* Тепловой контроль композитных конструкций в условиях силового и ударного нагружения. М.: ИД «Спектр», 2017. С. 200.
 8. *Vavilov V., Chulkov A., Derusova D.* IR thermographic characterization of low energy impact damage in carbon/carbon composite by applying optical and ultrasonic stimulation / Proc. SPIE 9105, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVI. 2014. P. 1—9. <https://doi:10.1117/12.2049810>
 9. *Козельская С.О.* Тепловой метод и средства контроля текстильных броневых преград в процессе взаимодействия с поражающими элементами / Канд. диссертация. спец. 05.11.13. М.: МНПО «Спектр», 2017. С. 197.
 10. *Nickels L.* Additive manufacturing: A user's guide // Metal Powder Report. 2016. V. 71. P.100—105. <https://doi: 10.1016/j.mprp.2016.02.045>
-