

ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 629.7.025: 539.3

DOI: 10.34759/vst-2019-4-216-229

ИСПЫТАНИЯ НИЗКОСКОРОСТНЫМ УДАРОМ РАЗЛИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Беззаметнов О.Н.* , Митряйкин В.И.** , Халиулин В.И.***

*Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева — КАИ,
КНИТУ-КАИ, ул. К. Маркса, 10, Казань, 420111, Россия*

* e-mail: bezzametnovoleg@mail.ru

** e-mail: vmitryaykin@bk.ru

*** e-mail: pla.kai@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.07.2019

Данная работа посвящена изучению характера ударных повреждений различных полимерных композиционных материалов (ПКМ). Дано описание технологии изготовления образцов для испытаний, имеющих различную природу материала и тип переплетения. Отработана методика нанесения и регистрации параметров удара на стенде с вертикально падающим грузом. С целью сравнения ударостойкости, была выбрана энергия удара 10, 20, 30 Дж для всех исследуемых материалов. Размеры ударных повреждений регистрировались визуально, а глубина вмятин определялась цифровым индикатором. Исследованы ультразвуковым дефектоскопом площади внутренних расслоений. Построены графики зависимости средних показателей площадей внутренних повреждений от энергии удара для разных материалов. Для послойной оценки характера повреждений применялась рентгеновская компьютерная томография.

Ключевые слова: композиционные материалы, ударные воздействия, повреждения, неразрушающий контроль, ультразвуковой эхо-импульсный контроль, компьютерная томография.

Введение

В настоящее время в конструкциях авиационной техники широко применяются полимерные композиционные материалы (ПКМ) [1–3]. Это способствует снижению массы и повышению экономической эффективности летательных аппаратов. В то же время большим ограничением применения ПКМ в силовых конструкциях является их низкая ударостойкость. Проблема ударных по-

вреждений композиционных материалов — одна из основных при оценке эксплуатационной прочности современных самолетов. Эти повреждения внешне малозаметны, но вызывают самые разные варианты внутренних разрушений и значительное снижение прочности [4, 5].

Согласно требованиям нормативных документов, ударное повреждение должно надежно обнаруживаться при стандартных формах обслужива-

ния либо не должно снижать прочность конструкции ниже расчетных значений [6]. Характер повреждений для различных композиционных материалов существенно различается, поскольку у каждого производителя собственная технология изготовления, которая сертифицирована для конкретного летательного аппарата. В качестве меры обнаружения повреждения в ПКМ принимается глубина визуально наблюдаемой вмятины. Обычно за размер BVID (порог визуальной контролепригодности) принимаются глубины от 0,2 до 0,5 мм, например от 0,3 до 0,5 мм у Boeing. Считается, что энергия удара при вмятине глубиной 0,3 мм вызывает едва видимые расслоения, без пробоя материала. Однако теоретические и экспериментальные исследования [7] показывают, что для ПКМ размеры внутренних повреждений слоев могут значительно превышать визуально обнаруживаемые размеры вмятин. Поэтому наибольшую опасность представляют удары небольшой интенсивности, не оставляющие видимых следов на поверхности, но приводящие к возникновению существенных внутренних повреждений (нарушение структуры материала, расслоения, разрывы волокон и т.д.).

Решение этой проблемы требует привлечения современных ударных стендов, высокотехнологичных средств регистрации удара и наиболее совершенных средств неразрушающего контроля (НК) повреждений. В работе с применением акустических методов диагностики, компьютерной томографии установлена зависимость оценки значений интенсивности энергии удара по размерам нанесенных повреждений, которые могут снижать прочность деталей из композиционных материалов.

Технология изготовления образцов для испытаний

В ходе данного исследования была проведена оценка ударостойкости композитов с различными конфигурацией состава армирующего материала, типом переплетения и связующего. Методика эксперимента разрабатывалась с учетом ГОСТ 33496-2015 «Метод испытания на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом». В качестве объектов исследования были выбраны 14 типов тканей с различными схемами переплетения: плотно, саржа, сатин, рогожа, мультиаксиальная ткань — и природой волокон: стеклоткани, углеткани, гибридные ткани, кевлар и высокомолекулярный полиэтилен. Ткани различаются по толщине нитей и способу плетения. Основные характеристики тканей приведены в табл. 1.

При плотном переплетении перекрытия нитей идут под углом 90° . Ткани такого типа являются равнопрочными и имеют высокую прочность и жесткость, обычно применяются для армирования сильнонагруженных участков конструкции. Саржевое («диагональное») переплетение создается переплетением одного или более элементов основы двумя или более элементами утка в правильном чередовании. В сатиновом переплетении одна нить основы перекрыта четырьмя нитями утка сверху и одной нитью снизу с образованием нерегулярного рисунка. Эта ткань, имеющая высокую плотность по утку и основе, обладает максимальной изотропной прочностью в композите. Мультиаксиальные ткани — это ткани, состоящие из нескольких слоев нитей, ориентированных в различных направлениях в соответствии с заданной схемой армирования, они позволяют изготовить конструкции с заданными механическими характеристиками в определенном направлении.

Для оценки влияния типа наполнителя на ударопрочность композиционных материалов необходимо было использовать эпоксидное связующее, обладающее высокой технологичностью [8]. В этом случае в качестве связующего была выбрана эпоксидная смола SICOMIN SR 8500 и отвердитель SICOMIN SZ 8525. Данная эпоксидная система обладает низкой вязкостью, коротким временем отверждения.

Изготовление стандартных образцов проводилось с применением метода прессового формования, заключающегося в сжатии в полости пресс-формы оснастки с формуемым изделием. Важным параметром формования композитов является режим нагрева, для данного исследования был выбран единый температурный режим для всех образцов в соответствии с требованиями к условиям полимеризации связующего (рис. 1). Пластины формовались сразу для серии испытаний для трех уровней энергии. Размеры формуемой пластины: $950 \times 330 \times 4$ мм. Образцы для испытаний размерами $150 \times 100 \times 4$ мм вырезались фрезой и лазерной резкой [9, 10].

Результаты исследования параметров удара

Ударное воздействие на образцы осуществлялось с помощью ударной машины с вертикально падающим грузом Instron Dunatup 9250HV. Испытательная машина имеет ряд характерных особенностей, позволяющих значительно повысить качество проведения эксперимента, она оснащена высокочувствительным пьезометрическим датчиком нагрузки с ударным наконечником диаметром 16 мм,

Таблица 1

Основные характеристики тканей и состав пакета образцов

№ серии	Природа материала	Наименование	Тип переплетения	Поверхностная масса, г/м ²	Толщина монослоя, мм	Количество слоев n, шт.
1	Стеклопластик	BX 450	Мульти-аксиальная	450	0,37	11
2		ТС-26П	Полотно	285	0,25	16
3		ORTEX 360	Полотно	330	0,286	14
4		ЕЕ 106	Сатин	105	0,095	42
5		ЕЕ 380	Саржа	375	0,333	12
6		Т-10-14	Сатин	290	0,25	16
7		Т-13П	Полотно	285	0,25	16
8	Углеродистый	СВХ 300 6К	Мульти-аксиальная	300	0,364	11
9		СВХ 301 12К	Мульти-аксиальная	300	0,364	11
10		СС 201	Полотно	194	0,25	16
11		СК 204	Саржа	203	0,286	14
12	Кевлар	Style 282	Саржа	173	0,267	15
13	Гибрид	Полиэтилен + СК 204	Саржа	280	-	13(4/9)
14	ПЭ	ВМП	Полотно	220	0,5	8

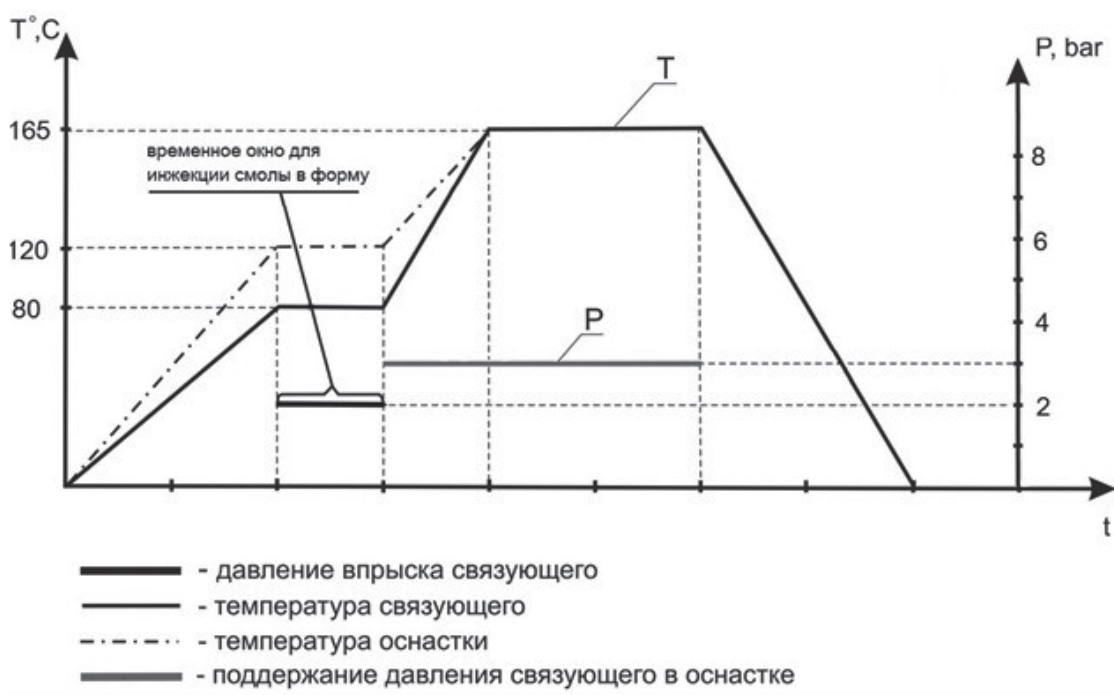


Рис. 1. График технологических параметров процесса

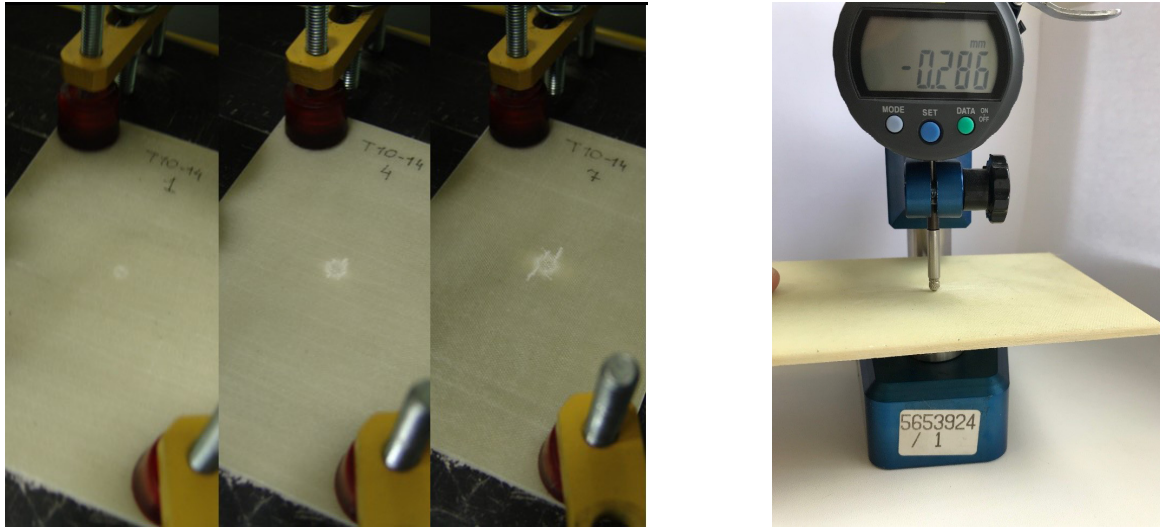


Рис. 2. Характер вмятины стеклопластика Т10-14 без пробоя

который регистрирует нагрузку с точностью $\pm 1\%$, машина имеет пневматическую систему предотвращения повторного удара, необходимая энергия удара обеспечивается подъемом взвешенного груза на заданную высоту. Диапазон энергий удара составляет 4,6–945 Дж. Образцы закрепляются в приспособлении с прямоугольным отверстием, зажим осуществляется в четырех углах. В стандартах [11, 12] испытания рекомендовано проводить в диапазоне энергий удара от 9 до 40 Дж.

Для некоторых образцов первоначально находилась энергия инициации повреждения, которая соответствовала едва видимому повреждению и вмятине глубиной $\sim 0,3$ мм. Она находилась в диапазоне 2,5–5 Дж. При данных энергиях удара происходило расслоение ПКМ без пробоя материала. С целью сравнения ударостойкости различных материалов, образцы из каждой серии были испытаны на удар энергией 10 20, 30 Дж. Чаще всего

при таких энергиях происходил пробой образцов, толщина которых составляла 4 мм. На рис. 2 показаны характер вмятины после удара 2,0 Дж по образцу стеклопластика на основе ткани Т10-14 и оценка глубины отпечатка повреждения цифровым индикатором, которая составляет 0,286 мм.

Результаты обрабатывались с помощью программного обеспечения «IMPULSE». При испытаниях записывалась зависимость контактной силы F от продолжительности контакта и внедрения ударника в образец δ . Схематичное изображение внедрения ударника в образец при низкоскоростном ударе показано на рис. 3,а.

В ходе испытаний установлена последовательность разрушения образцов при ударном взаимодействии.

На первой стадии, в момент контакта панели и ударника происходит упругое взаимодействие. Область под местом удара подвергается упругому

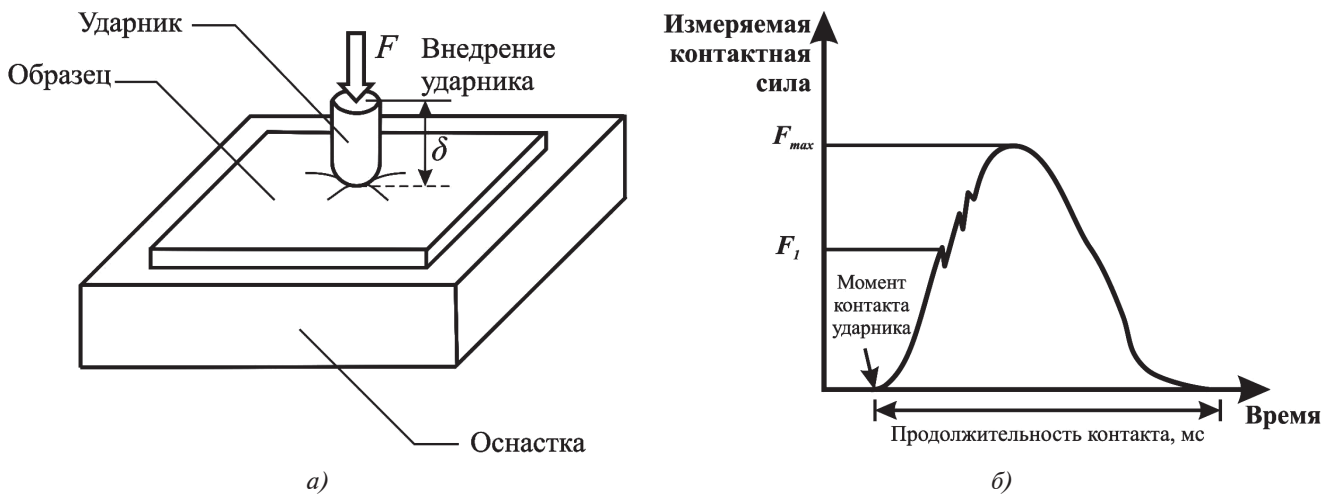


Рис. 3. Схематичное изображение внедрения ударника в образец при низкоскоростном ударе (а), график зависимости контактной силы от продолжительности контакта ударника (б)

изгибу. Продолжительность первой стадии зависит от жесткости образца и его деформационных свойств. Завершение данной стадии характеризуется внедрением ударника на величину δ и возникновением повреждения образца (рис. 3,а), которое регистрируется как пилообразное поведение контактной нагрузки F_1 на графике (рис. 3,б).

На второй стадии ударного нагружения развивается повреждение. Увеличение нагрузки до F_{max} объясняется расширением места повреждения.

Третья стадия характеризуется снижением контактного усилия. На этой стадии прекращается развитие повреждения и останавливается внедрение ударника.

На четвертой стадии удара образец частично восстанавливается. Контактная нагрузка и, соответственно, скорость выхода ударника зависят от количества упругой энергии, накопленной образцом во время внедрения ударника.

На рис. 4 представлены регистрируемые диаграммы зависимости нагрузки и энергии удара от

времени для одного из образцов стеклопластика. Кривая нагрузка—время (рис. 4,а) свидетельствует о наличии и характере разрушения в образце: ровный волнообразный график означает неполное разрушение. На рис. 4,б показаны графики зависимости энергии от времени при ударах 10 и 30 Дж. Значение поглощенной энергии характеризует затраты на внутренние разрушения образца. Асимметричный характер кривой указывает на поглощение энергии ударом образцом. Поглощенная энергия способствует инициации повреждений и внутренним межслойным разрушениям.

На рис. 5 показаны диаграммы зависимости нагрузки и энергии удара от перемещения ударника в образце. Видно, что после достижения точки максимальной нагрузки ударник возвращается в исходное положение. Гистерезис кривой (рис. 5,б) также обусловлен поглощением энергии, затраченной на внутренние разрушения образца.

Результаты испытаний на удар для отдельных образцов приведены в табл. 2.

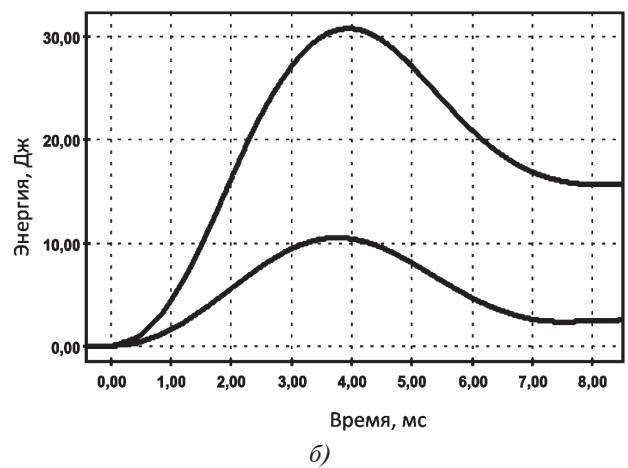
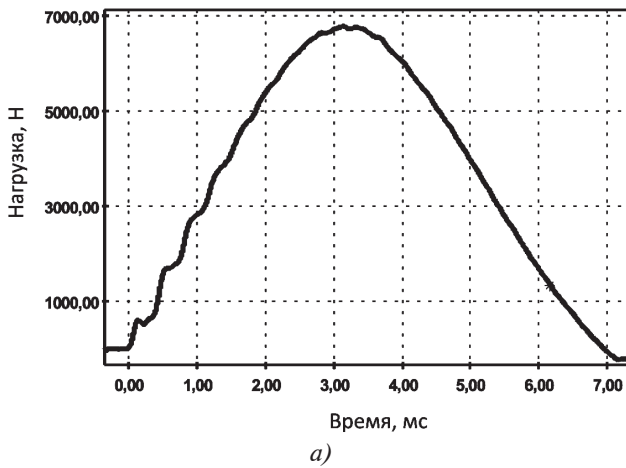


Рис. 4. Диаграмма зависимости нагрузки (а) и энергии (б) удара от времени

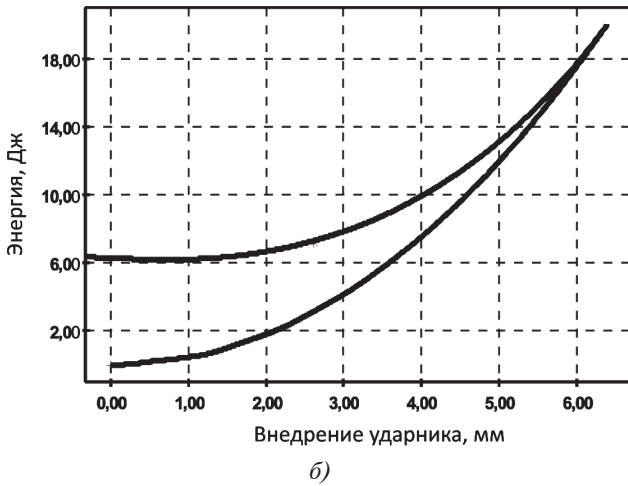
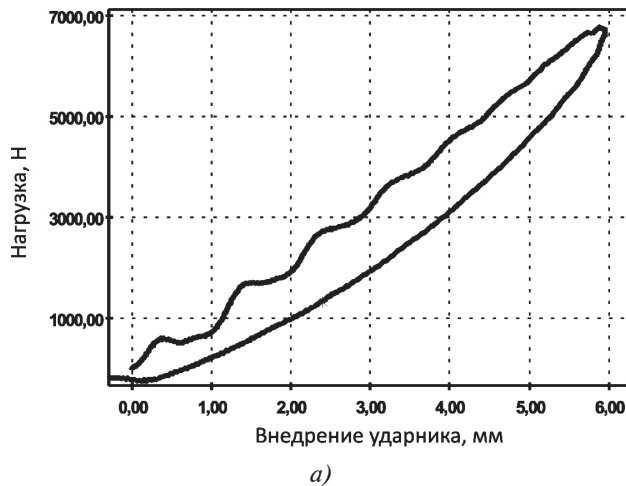


Рис. 5. Диаграмма зависимости нагрузки (а) и энергии (б) удара от перемещения

Таблица 2

Результаты испытаний на удар для отдельных образцов

Образец	Энергия удара, Дж	Поглощенная энергия, Дж	Скорость удара, м/с	Максимальная нагрузка, Н	Остаточный прогиб, мм	Энергия инициации повреждения, Дж	Прогиб при максимальной нагрузке, мм
ВХ 450	9,705	2,859	1,894	4304,100	0,574	3,353	4,663
	19,579	5,158	2,690	6785,000	0,757	6,242	6,269
	29,305	7,734	3,292	8742,800	0,956	9,576	7,637
ТС-26П	9,790	2,652	1,903	4476,000	0,493	3,149	4,515
	19,579	5,158	2,690	6785,000	0,757	6,242	6,269
	29,695	13,343	3,313	8137,500	1,349	15,167	7,561
ЕЕ 380	9,621	2,307	1,886	4446,100	0,456	2,816	4,672
	19,348	6,185	2,675	6426,300	0,735	7,289	6,354
	29,058	13,006	3,278	7412,700	1,121	14,704	7,307
Ortex 360	9,595	2,354	1,883	4222,000	0,528	2,874	4,921
	19,356	5,664	2,675	6209,600	0,679	6,848	6,743
	29,061	14,002	3,278	7367,900	1,165	15,927	7,669
Т10-14	9,486	1,817	1,873	4797,300	0,339	2,307	4,267
	19,099	6,119	2,657	6785,000	0,665	7,226	5,888
	28,797	12,210	3,263	7666,800	0,949	13,834	6,366
ЕЕ 106	9,673	1,956	1,891	4939,300	0,250	2,467	4,141
	19,547	9,537	2,688	5574,500	0,869	10,476	4,665
	28,445	18,410	3,243	6284,400	1,475	19,965	6,879
Т-13П	9,524	2,808	1,876	4296,700	0,545	3,299	4,588
	19,149	6,896	2,661	6291,800	0,839	8,000	6,354
	28,768	13,377	3,261	7405,200	1,409	15,030	7,549
ВМП	9,732	6,106	1,897	2802,200	3,123	6,644	7,922
	19,623	12,708	2,693	4386,300	4,546	13,712	10,354
	29,380	18,133	3,296	6052,700	5,302	19,595	11,705
СВХ300	9,982	4,389	1,921	4700,200	0,557	4,789	3,425
	20,159	13,551	2,730	5245,700	1,529	14,294	3,838
	30,352	29,638	3,350	4991,600	5,659	30,872	3,630
СВХ 301	10,011	2,348	1,924	5723,900	0,349	2,818	3,589
	20,206	7,871	2,733	7158,600	0,667	8,819	5,105
	30,338	15,966	3,349	8712,900	1,204	17,502	6,250
СС-201	10,019	5,601	1,925	3870,700	0,568	6,083	2,563
	20,201	13,197	2,733	4139,800	1,053	14,181	2,560
	30,359	20,304	3,350	3967,900	1,362	21,681	2,439

Образец	Энергия удара, Дж	Поглощенная энергия, Дж	Скорость удара, м/с	Максимальная нагрузка, Н	Остаточный прогиб, мм	Энергия инициации повреждения, Дж	Прогиб при максимальной нагрузке, мм
Style 282	9,913	4,752	1,914	3661,500	1,154	5,250	4,840
	20,020	13,065	2,721	4588,100	2,058	14,107	7,518
	29,986	21,327	3,330	4349,000	3,041	22,531	8,651
Кевлар+ уголь	9,747	5,885	1,898	2802,2	1,194	6,272	3,381
	19,599	20,104	2,692	3205,7	10,210	20,539	4,904
	29,475	21,964	3,301	2966,6	18,830	20,109	3,530
СК 204	9,768	4,285	1,900	3915,600	0,538	4,716	4,320
	19,737	12,323	2,701	4102,400	1,263	13,174	6,245
	29,674	21,119	3,312	4117,300	2,263	22,309	7,136
ВМП+ СК204	9,700	4,903	1,894	4094,900	0,979	5,349	4,351
	19,563	10,592	2,689	5843,500	1,526	11,587	6,322
	29,457	15,565	3,300	7704,100	2,144	17,192	7,916

Исследование повреждений методом ультразвукового контроля

Для контроля качества монолитных изделий из ПКМ в России и во всем мире в настоящее время широко используются ультразвуковой эхо-импульсный метод неразрушающего контроля [13, 14]. В России на предприятиях для реализации данного метода контроля ПКМ в основном используются обычные ручные дефектоскопы с одноэлементными пьезоэлектрическими преобразователями. Общий недостаток этих приборов заключается в сравнительно низкой производительности и невысокой достоверности результатов контроля. Сюда также можно отнести сложную интерпретацию результатов контроля. В данной работе для оценки размеров ударных повреждений применялся метод ультразвукового контроля на фазированных решетках и рентгеновской компьютерной томографии [15, 16].

Зона повреждений образцов оценивалась ультразвуковым томографом. Результаты сканирования позволили определить площадь 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). Данный комплекс оснащен

системой 2-координатного позиционирования датчика Glider, который позволяет точно определить положение дефекта.

При обработке массива А-сканов строятся следующие 2-координатные пространственные сканы (рис. 6): С-скан (вид сверху); S-(D-)скан (вид с торца); В-скан (вид сбоку).

Для анализа площади повреждений образцов после удара регистрировался С-скан, который отображает область сканирования под датчиком. Данный тип скана обладает координатной линейкой для точного определения местоположения дефекта и его геометрических характеристик. При наличии внутренних разрушений на скане появляется область с цветовым градиентом изменения уровня амплитуды УЗ эхо-сигнала. На рис. 7 представлены результаты сканирования образцов, имеющих различную схему переплетения волокон, после удара 20 Дж: *a* – стеклопластик на основе ткани сатинового переплетения Т10-14; *б* – углепластик СВ3-300 на основе ткани мультиаксиального переплетения; *в* – углепластик на основе ткани саржевого переплетения С204.

Результаты определения площадей повреждений образцов после ударного воздействия приведены в табл. 3.

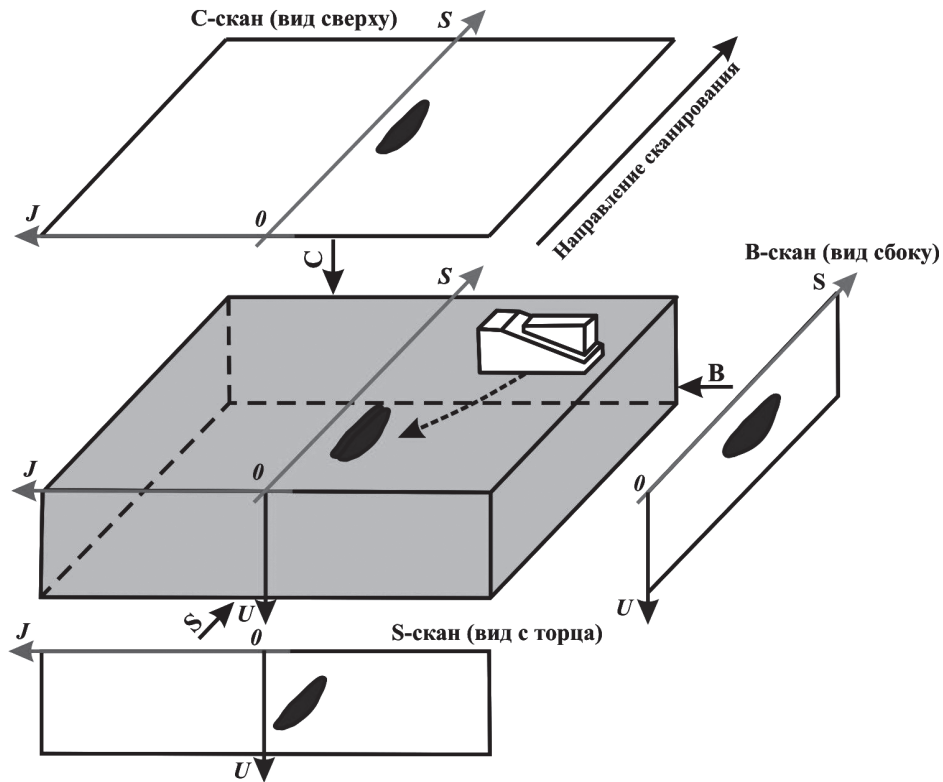


Рис. 6. Схематичное изображение сканов УЗК

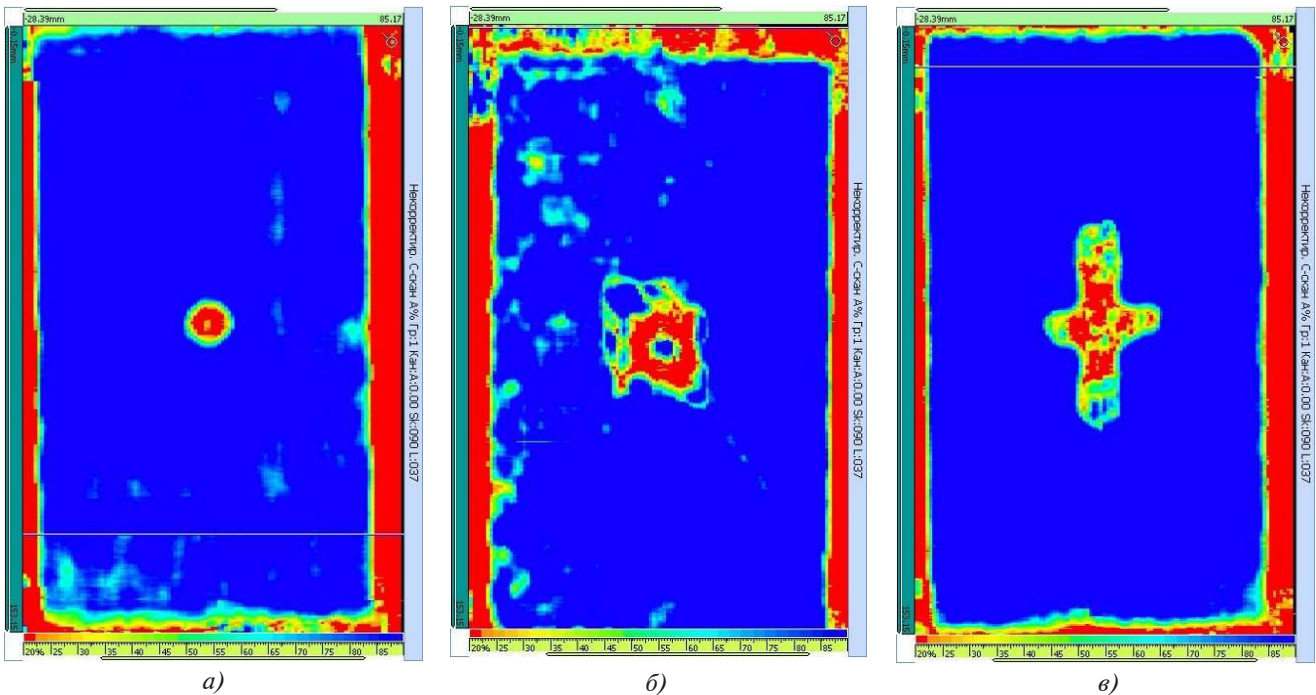


Рис. 7. Результаты сканирования образцов, имеющих различную схему переплетения волокон, после удара 20 Дж

Исследование повреждений методом рентгеновской компьютерной томографии

В данной работе для неразрушающего контроля ударных повреждений применялась компьютерная томография (КТ).

Принцип КТ основан на реконструкции и визуализации внутренней структуры тонких слоев контролируемых изделий посредством вычислительной обработки набора теневых проекций, полученных при рентгеновском просвечивании объекта контроля.

Таблица 3

Результаты определения площадей повреждений образцов после удара

Тип материала	Площадь повреждения после удара, мм ²		
	Энергия удара		
	10 Дж	20 Дж	30 Дж
СВХ-300	233,95	479,831	673,505
СВХ-301	137,87	410,221	482,091
С204+сетка	330,042	821,679	1118,268
СК204	351,718	469,634	707,914
СС201	340,976	1001,646	1261,985
ЕЕ 106	86,989	313,906	486,12
Т10-14	94,037	137,381	302,982
ВХ 450	307,44	314,414	420,459
Ortex 360	97,59	192,247	262,16

Влияние скрытых дефектов и структурных неоднородностей на прочностные характеристики композиционных материалов и конструкций отличается неопределенностью. Томографические исследования образцов, подвергающихся механическим или иного рода нагрузениям, могут дать важную информацию о специфике процессов деформирования, разрушения и предразрушения интересующих нас объектов [17].

Исследования проводились на системе радиографического анализа и рентгеновской компьютерной томографии NSI (США), модель X5000. Она применяется для оперативного и высокопроизводительного поиска дефектов в изделии, визуализации внутренних дефектов объекта. Данная система оснащена рентгеновской трубкой с максимальным ускоряющим напряжением 450 кВ мощностью 1500 Вт. Съёмка проводилась при ускоряющем напряжении 213 кВ и токе 3,3 мА. Разрешение при съёмке – 100 мкм.

Полученные данные позволили с высокой точностью определить размеры повреждения образца. Размеры визуальной регистрируемой вмятины на поверхности значительно меньше зоны разрушения внутри образца. Там наблюдаются разрушение волокон, повреждение волокон с расслоениями, расслоения без повреждения волокон. Все эти повреждения изменяют структуру материала, повы-

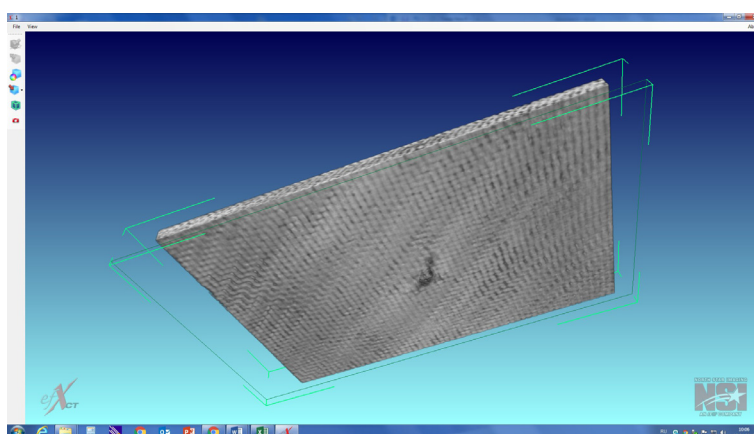


Рис. 8. 3D-реконструкция исследуемого образца

шают пористость в зоне повреждения, что снижает механические характеристики.

В ходе эксперимента был установлен характер изменения пустотного пространства по толщине образцов. На рис. 8 представлена 3D-реконструкция томографического исследования образца стеклопластика ЕЕ380 после удара 20 Дж.

На рис. 9 показаны томограммы образцов стеклопластика в продольном сечении. Видно явное увеличение площади повреждения образца в зависимости от глубины сканирования. По найденным размерам повреждений возможно провести расчет напряженно-деформированного и предельного состояния конструкции из ПКМ при различных условиях эксплуатации [18–20].

На рис. 10 изображены томограммы образцов стеклопластика в поперечном сечении.

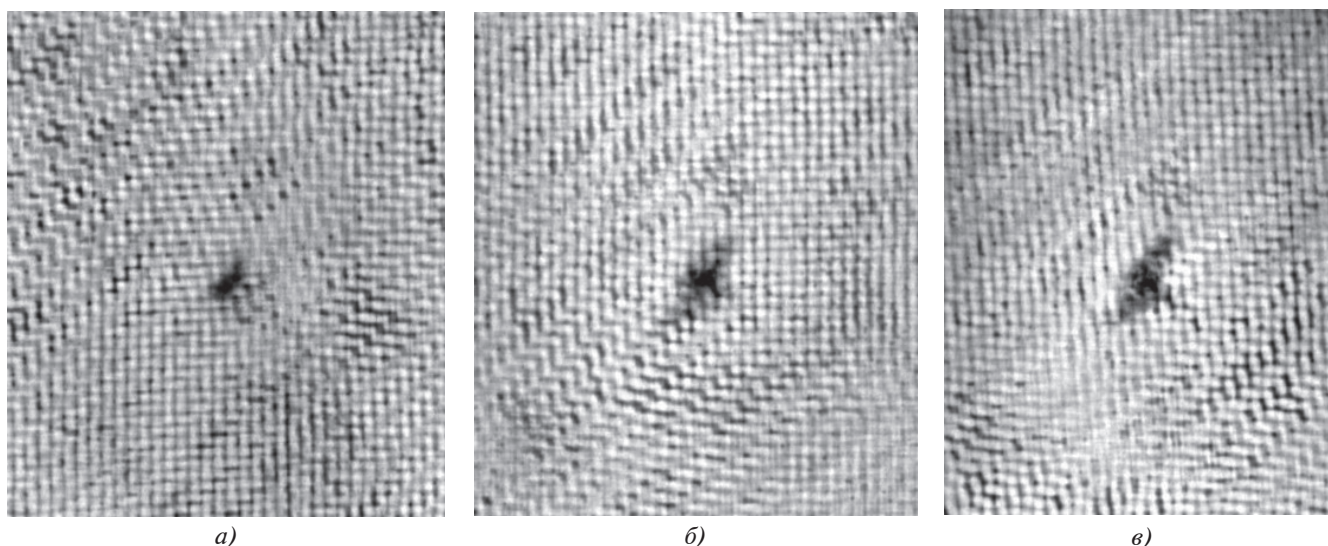


Рис. 9. Томограммы образцов стеклопластика в продольном сечении на расстоянии от поверхности удара: *a* – 2,3 мм; *б* – 2,8 мм; *в* – 3,5 мм

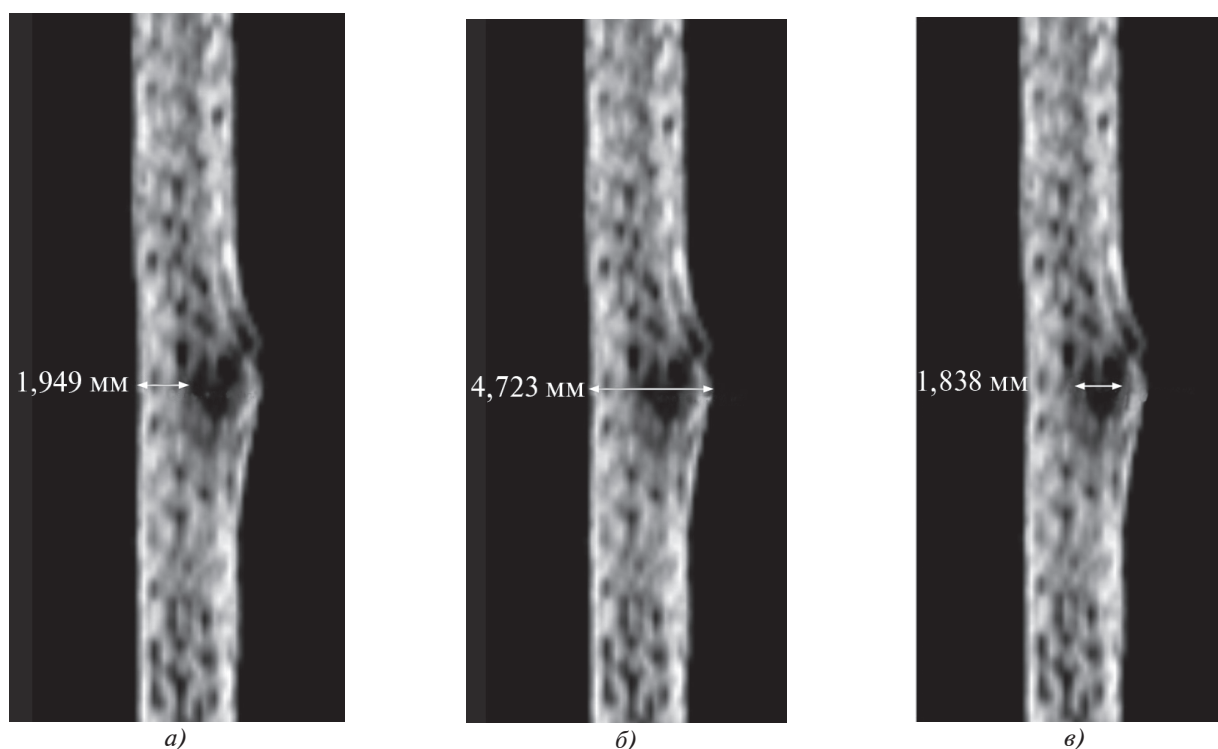


Рис. 10. Томограммы образца стеклопластика в поперечном сечении: *a* – расстояние до внутреннего разрушения 1,9 мм; *б* – расстояние от места удара до конца образца 4,7 мм; *в* – глубина внутреннего расслоения 1,8 мм

Сравнительная оценка ударостойкости композиционных материалов

Энергия инициации повреждения — предельное значение энергий удара, которое может выдержать материал без повреждения, т.е. она является одним из критериев оценки ударостойкости. Данный параметр важен при расчете несущей способности пластины. Поглощенная энергия — количество энергии, которое пластина отбирает у ударника на свое повреждение, т.е. фактическая энергоемкость.

Наибольшую энергию инициации повреждения показали образцы из гибридной ткани, а именно образец с составом армирующего материала кевлар — уголь. Это указывает на высокий уровень стойкости к удару данного типа материала. Наименьшую энергию инициации повреждения показали образцы из стеклоткани, минимальную — образцы, выполненный из ткани ВХ 450.

Гибридные ткани также показали высокий уровень поглощения энергии, что может отразиться на лучшем образом на остаточной прочности данного

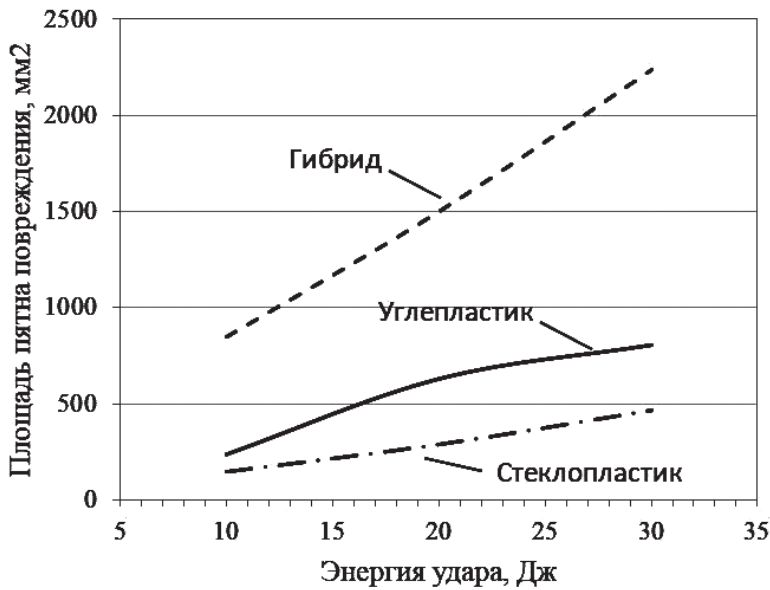


Рис. 11. Графики зависимости средних показателей площади повреждения от энергии удара образцов стеклоткани, углеткани и гибридной ткани

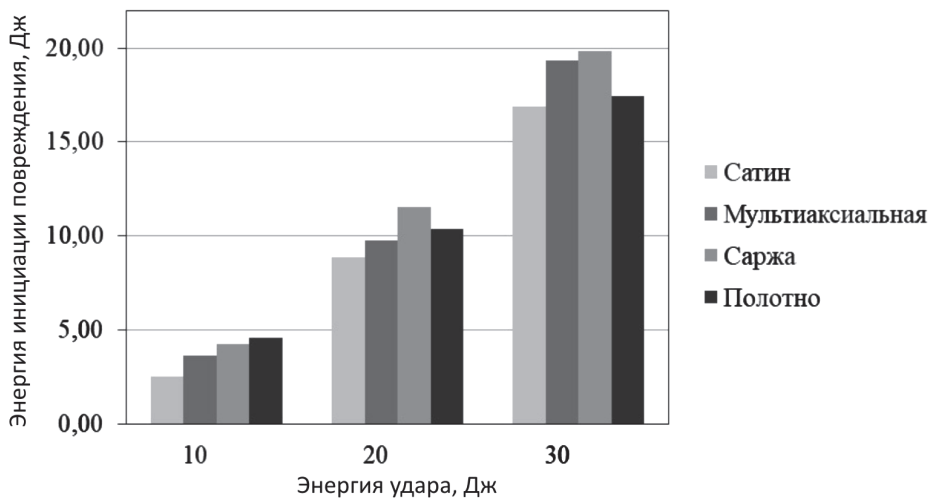


Рис. 12. Диаграммы зависимости средних показателей энергии инициации повреждения от энергии удара у образцов из тканей различного переплетения

типа материала. Этот факт подтверждается и относительно большими площадями повреждения внутренней структуры гибридных тканей. Наименьший уровень поглощенной энергии показали образцы из стеклотканей.

Все образцы после нанесения удара исследовались на наличие расслоений и повреждений методом ультразвукового контроля. На рис. 11 представлены графики зависимости средних показателей площади пятна повреждения от энергии удара образцов из стекло-, угле- и гибридной ткани.

Было также показано влияние схемы укладки волокон на поведение материала при ударе. На рис. 12 изображены диаграммы зависимости энер-

гии инициации повреждения от энергии удара у образцов из тканей различного переплетения.

Наибольший уровень энергии инициации повреждения показали образцы из тканей саржевого и мультиаксиального переплетения. Наименьший показатель энергии инициации повреждения имеют образцы из сатиновой ткани.

Выводы

Образцы материала, имеющие гибридную схему пакета, а именно сочетание волокон кевлара и угля, показали высокие значения стойкости к ударным воздействиям во всем диапазоне энергий.

Наименьшая площадь повреждения у образцов, изготовленных из стеклоткани. Такой результат может положительно

сказаться на остаточной постударной прочности материала.

Характер распространения повреждений в образцах зависит от типа переплетения волокон композита.

Послойный анализ образцов композита методом рентгеновской компьютерной томографии показал, что размеры визуально регистрируемой вмятины на поверхности значительно меньше зоны реального разрушения внутри образца. Там наблюдаются разрушение волокон, повреждение волокон с расслоениями, расслоения без повреждения волокон.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-08-00577).

Библиографический список

1. *Климов В.Г., Никитин В.И., Никитин К.В., Жаткин С.С., Когтева А.В.* Применение износостойких естественных композитов в технологии ремонта и модифицирования лопаток ротора газотурбинных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 1. С. 251-266.
2. *Солошенко В.Н., Попов Ю.И.* Концептуальное проектирование конструкции кессона крыла из композиционных материалов среднемагистрального самолета // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 1. С. 16-30.
3. *Митрофанов О.В.* Проектирование панелей крыла минимальной массы из композитных материалов с учетом закритического поведения обшивки // Вестник Московского авиационного института. 2002. Т. 9. № 1. С. 35-42.
4. *Небелов Е.В., Потоцкий М.В., Родионов А.В., Горский А.Н.* Механизм развития повреждений лопатей воздушного винта из композиционных материалов при воздействии поражающих элементов // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 26-31.
5. *Полянский В.В., Нестеров В.А.* Оценка изменения надежности конструкции планера с механическими повреждениями // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 5. С. 32-39.
6. *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. — 228 с.
7. *Колесников Ю.В., Морозов Е.М.* Механика контактного разрушения. — Изд. 4-е. — М.: Изд-во ЛКИ, 2012. — 224 с.
8. *Кулик Т.А., Кочергин Ю.С., Зайцев Ю.С., Пактер М.К., Аскадский А.А.* Влияние жидких каучуков на физико-механические свойства эпоксидных полимеров // Пластические массы. 1985. № 4. С. 25-26.
9. *Shanmugam D., Chen F., Siores E., Brandt M.* Comparative study of jetting machining technologies over laser machining technology for cutting composite materials // Composite Structure. 2002. No. 57, pp. 289–296.
10. *Третьякова О.Н., Светушков Н.Н.* Проблемы моделирования взаимодействия лазерного излучения с анизотропными средами и композиционными материалами // Труды МАИ. 2010. № 40. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=22821>
11. ГОСТ 33496-2015. Композиты полимерные. Метод испытаний на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом. — М.: Стандартинформ, 2016. — 15 с.
12. ASD-STAN prEN 6038 P1 «Fiber Reinforced Plastics — Test Method — Determination of the Compression Strength after Impact».
13. *Бойчук А.С., Генералов А.С., Далин М.А., Степанов А.В.* Неразрушающий контроль технологических нарушений сплошности Т-образной зоны интегральной конструкции из ПКМ с использованием ультразвуковых фазированных решеток // Все материалы: Энциклопедический справочник. М.: ВИАМ, 2012. №10. С. 38-44.
14. *Бойцов Б.В., Васильев С.Л., Громашев А.Г., Юргенсон С.А.* Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций изперспективных композиционных материалов // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: http://trudymai.ru/published.php?ID=28061&PAGEN_2=2
15. *Митряйкин В.И., Михайлов С.А., Бугаков И.С., Закиров Р.Х.* Неразрушающий контроль композиционных конструкций компьютерным томографом. — Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2011. — 192 с.
16. *Крылов А.А., Москаев В.А.* Методика проведения рентгеноскопического контроля и анализа технического состояния элементов конструкции воздушного судна с сотовым наполнителем // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 2. С. 139-146.
17. *Зайцева Т.А., Митряйкина Е.В.* Внедрение спиральной компьютерной томографии для определения механических характеристик материала путем исследования его внутренней структуры // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 311-315.
18. *Сидоров И.Н., Митряйкин В.И.* Исследование прочности лопасти вертолета с ударными повреждениями // Избранные труды XXXXVIII Всероссийского симпозиума по механике и процессам управления. М.: РАН, 2018. — 253 с.
19. *Богданов В.Р., Сулим Г.Т.* Моделирование роста пластических деформаций при ударе на основе численного решения задачи плоского напряженного состояния // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 3. С. 196-204.
20. *Горшков А.Г.* Механика взаимодействия деформируемых конструкций со сплошными средами и физико-механическими полями // Вестник Московского авиационного института. 2005. Т. 12. № 2. С. 156-163.

LOW-SPEED IMPACT TESTING OF VARIOUS COMPOSITES

Bezzametnov O.N.* , Mitryaikin V.I.** , Khaliulin V.I.***

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI,
KNRTU-KAI, 10, Karl Marks str., Kazan, 420111, Russia*

* e-mail: bezzametnovoleg@mail.ru

** e-mail: vmitryaykin@bk.ru

*** e-mail: pla.kai@mail.ru

Abstract

The purpose of the study consists in technique development for detecting impact damages character of composites with various nature of reinforcing material and interlacement type. A series of experiments on the presence of internal defects after impact damages inflicting was conducted while this work performing. The samples based fourteen fabric types were selected as the subject of the study, including fiberglass cloth, hybrid materials, Kevlar® and high molecular polythene. Temperature mode was developed, and technology for plates manufacturing by the compression molding technique was worked out.

The experiment technique was being developed with regard for the international Standards recommendations for damage resistance testing while the falling load impact. Evaluation of criteria on impact resistance was performed within the energy range of 10, 20 and 30 J. Initially the dent depth was determined with digital detecting head. The internal damages areas were being estimated by the semi-automated ultrasonic NDT complex with phased array. This technology allows obtaining scanning results in the form of projections onto three planes, namely C-scan (top view), S-scan (end view) and B-scan (side view). To analyze the damages areas of samples after the impact, the C-scan, depicting the scanned area below the sensor, was registered. The layer-by-layer studying of the samples damages character was performed by the X-ray computer tomography method. This method allows visualize the sample internal structure by processing shadow projections obtained while the object X-raying.

The obtained results allow determine optimum characteristics of the composite material pack content while developing the structure with the set requirements to the impact resistance. The nose part elements and high lift devices of an aircraft, helicopter blades and transmission shafts, moving parts of jet engines may be among these structures.

Based on these works results graphs of the damages areas dependence on the impact energy of each material were plotted. The less damage area was

demonstrated by the fiberglass samples, while the greatest one belonged to the fabrics of hybrid content. To evaluate the impact resistance criteria the energy of the damage initiation, maximum load of impact and absorbed energy were registered. Maximum value of the damage initiation energy was demonstrated by the samples from hybrid fabric material, and the least one by the fiberglass samples. This criterion reflects the limiting value of the impact energy which a material can sustain without being damaged.

Keywords: composites, impact actions, damage, NDT, ultrasonic pulse-echo flaw detection, computed tomography.

References

1. Klimov V.G., Nikitin V.I., Nikitin K.V., Zhatkin S.S., Kogteva A.V. Wear-resistant composites application in repair and modification technology of the GTD rotor blades. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 251-266.
2. Soloshenko V.N., Popov Yu.I. Conceptual design of composite wing box structures for a medium-range passenger airplane. *Aerospace MAI Journal*, 2013, vol. 20, no. 1, pp. 16-30.
3. Mitrofanov O.V. Composite material wing panel of minimal mass design considering supercritical skin response. *Aerospace MAI Journal*, 2002, vol. 9, no. 1, pp. 35-42.
4. Nebelov E.V., Pototskii M.V., Rodionov A.V., Gorskii A.N. Mechanism of damage propagation to the propeller blades of composite materials with exposed damaging elements. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 26-31.
5. Poliansky V.V., Nesterov V.A. Estimation of reliability alteration for airframe configuration with mechanical damage. *Aerospace MAI Journal*, 2009, vol. 16, no. 5, pp. 32-39.
6. Fegenbaum Yu.M., Dubinskii S.V., Bozhevalov D.G., Sokolov Yu.S., Metelkin E.S., Mikolaichuk Yu.A., Shapkin V.S. *Obespechenie prochnosti kompozitnykh aviatsionnykh konstrukttsii s uchetom sluchainykh ekspluatatsionnykh udarnykh vozdeystvii* (Ensuring strength of composite aircraft structures with regard to accidental operational impact), Moscow, 2018, 228 p.

7. Kolesnikov Yu.V., Morozov E.M. *Mekhanika kontaktnogo razrusheniya* (Mechanics of contact fracture), Moscow, LKI, 2012, 224 p.
8. Kulik T.A., Kochergin Yu.S., Zaitsev Yu.S., Pakter M.K., Askadskii A.A. *Plasticheskie massy*, 1985, no. 4, pp. 25-26.
9. Shanmugam D., Chen F., Siores E., Brandt M. Comparative study of jetting machining technologies over laser machining technology for cutting composite materials. *Composite Structure*, 2002, no. 57, pp. 289–296.
10. Tret'yakova O.N., Svetushkov N.N. *Trudy MAI*, 2010, no. 40. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=22821>
11. *Kompozity polimernye. Metod ispytaniy na soprotivlenie povrezhdeniyu pri udare padayushchim gruzom. GOST 33496-2015* (Polymer composites. Test method for resistance to damage when struck by falling cargo. State Standard 33496-2015), Moscow, Standartinform, 2016, 15 p.
12. ASD-STAN prEN 6038 P1 “*Fiber Reinforced Plastics - Test Method - Determination of the Compression Strength after Impact*”.
13. Boichuk A.S., Generalov A.S., Dalin M.A., Stepanov A.V. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik*. Moscow, VIAM, 2012, no. 10, pp. 38-44.
14. Boitsov B.V., Vasil'ev S.L., Gromashev A.G., Yurgenson S.A. *Trudy MAI*, 2011, no. 49. URL: http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=28061&PAGEN_2=2
15. Mitryaikin V.I., Mikhailov S.A., Bugakov I.S., Zakirov R.Kh. *Nerazrushayushchii kontrol' kompozitsionnykh konstruksii komp'yuternym tomografom* (Non-destructive testing of composite structures with computer tomograph), Kazan, Kazanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2011, 192 p.
16. Krylov A.A., Moskaev V.A. A technique for fluoroscopic control and analysis of technical condition of aircraft structural elements with honeycomb filler. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 139-146.
17. Zaitseva T.A., Mitryaikina E.V. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Povolzh'ya*, 2012, no. 6, pp. 311-315.
18. Sidorov I.N., Mitryaikin V.I. *Izbrannye trudy XXXVIII Vserossiiskogo simpoziuma po mekhanike i protsessam upravleniya*, Moscow, RAN, 2018, 253 p.
19. Bogdanov V.R., Sulym G.T. A modelling of plastic deformations growth under impact, based on a numerical solution of the plane stress state problem. *Aerospace MAI Journal*, 2013, vol. 20, no. 3, pp. 196-204.
20. Gorshkov A.G. Mechanics for interaction of deformable structures with continuum mediums and physical fields. *Aerospace MAI Journal*, 2005, vol. 12, no 2, pp. 156-163.