

АРАМИДНЫЕ ОРГАНОТЕКСТОЛИТЫ ДЛЯ УДАРОСТОЙКИХ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

© Г. Ф. Железина, С. И. Войнов, Н. А. Соловьева, Г. С. Кулагина

Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов
Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»), Москва
E-mail: jelezina@yandex.ru, voinovviam@mail.ru

Поступила в Редакцию 11 октября 2018 г.

После доработки 26 ноября 2018 г.

Принята к публикации 10 декабря 2018 г.

Исследована стойкость к воздействию высокоскоростного удара органотекстолитов, армированных арамидными тканями, и слоистых металло-органотекстолитов, состоящих из чередующихся металлических листов и слоев арамидного органотекстолита. Приведены зависимости стойкости к воздействию высокоскоростного удара композитов от типа армирующего наполнителя, связующего, структуры материала. Показано преимущество арамидных органотекстолитов на основе фенольно-каучукового связующего ВК-3 и перспективность магниевых сплавов как компонентов для слоистых металло-органотекстолитов.

Ключевые слова: слоистые металлополимерные композиционные материалы, органотекстолиты, органопластики, металлополимеры, композиты.

DOI: 10.1134/S0044461819030101

При эксплуатации авиационной техники элементы конструкций подвергаются воздействию механических ударов различного вида и интенсивности (например, соударение с мелкими камнями и посторонними предметами при взлете и посадке самолетов и вертолетов [1–3]), при возникновении нештатной ситуации возможны удары осколками разрушенных механизмов и взрывных устройств. Следовательно, стойкость к ударному воздействию — важное требование, предъявляемое к авиационным материалам. Лидирующее положение по стойкости к механическим повреждениям при ударных воздействиях занимают конструкционные органотекстолиты — полимерные композиционные материалы, армированные тканями из арамидных нитей [4].

Наиболее эффективное применение арамидных органотекстолитов в авиационной технике, суще-

ственно повышающих стойкость конструкций к эрозии и ударам, — это обшивка планера и несущих винтов вертолетов, элементов внешнего контура самолетов, пылезащитных устройств вертолетных двигателей и т. п. [5]. Также органотекстолиты используются для усиления корпуса вентилятора в авиационных двигателях с целью обеспечения его непробиваемости в случае разрушения лопатки [6]. Еще одной областью применения органотекстолитов в авиационной технике являются специальные экраны, обеспечивающие защиту от пуль и осколков взрывных устройств. Так, например, в самолете «Сухой Супер Джет-100» для защиты экипажа от несанкционированного вторжения перегородка кабины экипажа выполнена из стойкого к воздействию высокоскоростного удара органотекстолита марки ВКО-2ТБ [7].

Арамидные органотекстолиты могут использоваться как самостоятельные материалы, так и в сочетании с другими полимерными композитами (стекло- и углепластиками) [8, 9] и металлическими сплавами в составе гибридных конструкций. Алоры — первые российские слоистые металлополимерные композиционные материалы, в которых адгезионно соединены слои арамидного органотекстолита и алюминиевого сплава Д16чАТ [10]. Алоры, а также их зарубежные аналоги — композиты марки ARALL [11] обладают высокой трещиностойкостью: скорость роста усталостных трещин в этих материалах в 5–10 раз меньше, а усталостная долговечность и акустическая выносливость в 2–10 раз выше, чем в алюминиевых сплавах [12–15].

Помимо авиационной техники стойкие к воздействию высокоскоростного удара органотекстолиты используются для изготовления средств индивидуальной бронезащиты и защиты наземных технических устройств [16, 17]. За рубежом органотекстолиты на основе тканей Кевлар используются, в частности, для защиты салона бронемашин М113 от осколков, для бронирования автотранспорта миротворческих сил и полиции Великобритании [18, 19].

Требования к современным техническим средствам постоянно возрастают. Для их удовлетворения необходимо совершенствование характеристик материалов, используемых в конструкциях. Это особенно актуально для авиационной техники, весомое преимущество которой зависит от применения новых материалов [20–22].

В данной работе исследована стойкость конструкционных органо- и металло-органотекстолитов раз-

личного состава к воздействию высокоскоростного удара с целью определения путей оптимизации баллистических, эксплуатационных и весовых характеристик этих материалов.

Экспериментальная часть

Объектами исследования в данной работе являются композиционные материалы — арамидные органотекстолиты и слоистые металло-органотекстолиты.

Органотекстолиты выполнены на основе тканей из арамидных нитей марки Русар (в настоящее время — это торговая марка Руслан), различающихся способом переплетения. В качестве полимерной матрицы использовали эпоксидное связующее марки ЭДТ-69Н(М) растворного типа [23] и пленочное фенольнокаучуковое связующее марки ВК-3. Характеристики армирующих тканей и состав исследуемых органотекстолитов представлены в табл. 1 и 2.

Слоистые металло-органотекстолиты представляют собой чередующиеся слои листов металлических сплавов и арамидного органотекстолита. Использовали три типа металлических сплавов: титановый ВТ-23 (плотность $4570 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$), магниевый Ма-8 (плотность $1780 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$) или алюминиевый Д16АТ (плотность $2800 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$). Слои органотекстолитов в составе слоистого металлокомпозита выполнены с использованием арамидной ткани марки СВМ (арт. 56313) сатинового переплетения и либо растворного эпоксидного связующего ЭДТ-10П, либо пленочного эпоксикаучукового связующего ВК-51. Массовое соотношение металла и органотек-

Таблица 1

Характеристики арамидных тканей, использованных для армирования органотекстолитов

ТУ, артикул ткани	Переплетение	Марка нити/линейная плотность, текс	Поверхностная плотность ткани, $\text{г}\cdot\text{м}^{-2}$
ТУ 17ВНИИПХВ-350–88 арт. 56313	Атлас 8/3	СВМ/14.3 текс	88 ± 5
ТУ 8378-011-00321069–2003 арт. 86-130-02	Атлас 8/3	Руслан/58.8 × 2	350 ± 15
ТУ 8378-026-00321069–2004 арт. 86-153-04Н	Атлас 8/3	Руслан/14.3	88 ± 5
ТУ 8378-010-00321069–2005ЛУ арт. 8353/11	Полотно	Руслан/100	Не менее 225
ТУ 8378-037-00321069–2006ЛУ арт. 8353/15	Полотно	Руслан/58.8	Не менее 180

Таблица 2
Состав и характеристики арамидных органотекстолитов

Марка органотекстолита	Состав органотекстолита			Поверхностная плотность органотекстолита, кг·м ⁻²
	ткань		связующее	
	артикул	количество слоев		
ВКО-20	8353/11	16	ВК-3	4.60
	8353/11	32	ВК-3	9.20
	8353/11	48	ВК-3	13.80
ВКО-2ТБ	86-130-02	11	ВК-3	4.76
	86-130-02	13	ВК-3	5.24
Экспериментальные образцы	5363/19	16	ВК-3	4.85
	8353/15	18	ВК-3	4.35
	8353/11	16	ЭДТ-69(Н)М	6.54
Органит 12ТМ-Рус	86-153-04Н	16	ЭДТ-69(Н)М	2.62
	86-153-04Н	70	ЭДТ-69(Н)М	12.12

Таблица 3
Состав и структура слоистых металло-органотекстолитов на основе титанового сплава ВТ-23

Структура слоистого металлокомпозиата*	Толщина слоев, мм		Поверхностная плотность, кг·м ⁻²
	сплав ВТ-23	органотекстолит	
1 слой Тi и 1 слой ОТ	0.5	1.38	3.9
2 слоя Тi и 2 слоя ОТ	0.5	1.38	7.9
3 слоя Тi и 3 слоя ОТ	0.5	1.38	11.9
4 слоя Тi и 4 слоя ОТ	0.5	1.38	16.0
1 слой Тi и 1 слой ОТ	2.0	2.07	11.9
1 слой Тi и 1 слой ОТ	2.0	6.44	18.0
Органотекстолит	Отсутствует	1.92	2.60
Органотекстолит	Отсутствует	8.90	12.0

* Обозначение: Тi — титановый сплав, ОТ — органотекстолит.

Таблица 4

Состав и структура слоистых металло-органотекстолитов на основе титанового сплава ВТ-23, магниевого сплава Ма-8 и алюминиевого сплава Д16чАТ

№ образца	Структура слоистого металлокомпозиата*	Марка сплава	Толщина, мм		Поверхностная плотность, кг·м ⁻²
			слой металла	органотекстолит	
1	 2 слоя металла и 2 слоя ОТ	ВТ-23	0.45	1.43	7.9
2		Ма-8	1.43	1.82	9.9
3	 4 слоя металла и 4 слоя ОТ	Д16чАТ	0.8	1.56	9.5
4		ВТ-23	0.45	1.43	15.8
5		Ма-8	1.43	1.82	18.2
6		Д16чАТ	0.8	1.56	18.5

* Обозначение:  — металлический слой,  ОТ — органотекстолит.

столита в составе слоистого материала составляет приблизительно 1:1. В табл. 3, 4 представлены составы и структура слоистых материалов, исследуемых в работе.

Органотекстолиты и металло-органотекстолиты для проведения исследований изготавливали методом автоклавного формования с использованием препрегов. Препреги органотекстолитов готовили путем пропитки арамидной ткани растворными связующими на установке УПСТ-1000 или путем нанесения на арамидную ткань клевого пленочного связующего на установке Coatema BL-2800. В процессе автоклавного формования слоистых металло-органотекстолитов происходило одновременное отверждение слоев органотекстолита и адгезионное соединение металлических и полимерных слоев композита.

Испытания органотекстолитов и металло-органотекстолитов на стойкость к высокоскоростному ударному воздействию осуществляли путем удара стальным шариком с определением значения V_{50} — скорости шарика, при которой вероятность непробития композита составляет 50%. При ударе использовали стальные шарики массой ~1 г (диаметр 6.35 мм) и ~7 г (диаметр 12 мм).

Обсуждение результатов

На рис. 1 представлены результаты определения стойкости к воздействию высокоскоростного удара органотекстолитов в зависимости от поверхностной плотности и состава органотекстолита. По характеру кривых наблюдается закономерный эффект возрастания стойкости материала к ударному воздействию с ростом его поверхностной плотности, реализуемой

за счет увеличения количества слоев в органотекстолите. При этом показано, что использование связующих различного типа — растворного эпоксидного связующего ЭДТ-69Н(М) или пленочного фенольно-каучукового связующего ВК-3 — позволяет сформировать структуру полимерного композита, различающуюся по своим баллистическим свойствам. Так, растворное связующее ЭДТ-69Н(М) с низкой вязкостью обладает высокой проникающей способностью в межволоконное пространство арамидной ткани, и органотекстолит на его основе имеет типичную для конструкционного материала монолитную структуру с равномерным распределением полимерной матрицы в объеме композита. В органотекстолите

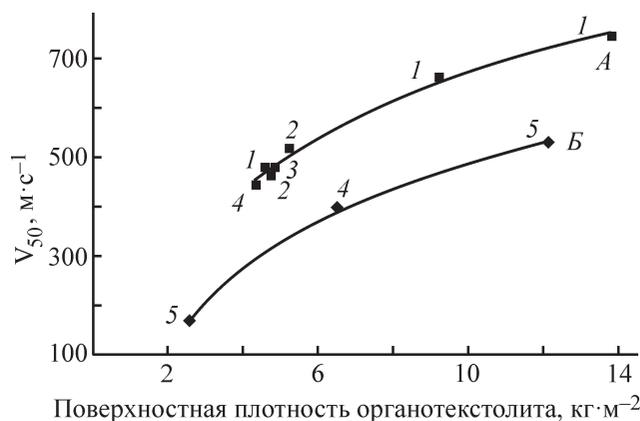


Рис. 1. Стойкость к воздействию высокоскоростного удара при ударе стальным шариком массой 1 г органотекстолитов на основе арамидных тканей и связующих.

Артикул: 1 — 8353/11, 2 — 86-130-02, 3 — 5363/19, 4 — 8353/11, 5 — 86-153-04Н.
А — ВК-3, Б — ЭДТ-69Н(М).

на основе связующего ВК-3, характеризующегося высокой вязкостью, полимерная матрица располагается преимущественно между слоями армирующей ткани и практически не проникает в межволоконное пространство.

Из представленных на рис. 1 данных видно, что органотекстолиты на основе фенольно-каучукового связующего ВК-3 проявляют высокую деформативность при высокоскоростном ударном воздействии, что способствует поглощению энергии и достижению более высокого уровня стойкости к воздействию высокоскоростного удара (приблизительно в 1.5 раза выше) по сравнению с конструкционными органотекстолитами на основе эпоксидного связующего ЭДТ-69Н(М) с типовой монокристаллической структурой.

На рис. 2 представлены результаты определения стойкости к воздействию высокоскоростного удара (при ударе стальным шариком массой 1 г) слоистых металло-органотекстолитов, содержащих в своем составе листы титанового сплава ВТ-23 и слои органотекстолита на основе арамидной ткани СВМ и эпоксидного связующего ЭДТ-10П. Для сравнения

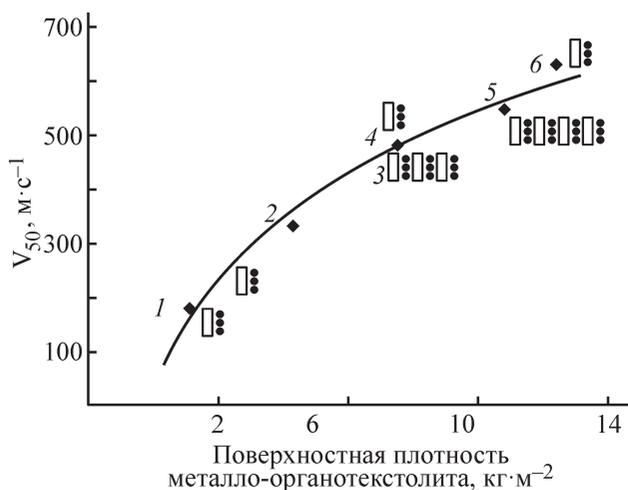


Рис. 2. Стойкость к воздействию высокоскоростного удара при ударе стальным шариком массой 1 г слоистых металло-органотекстолитов на основе титанового сплава ВТ-23.

Структура металло-органотекстолитов: 1 — один слой ВТ-23 толщиной 0.5 мм и один слой органотекстолита толщиной 1.38 мм, 2 — два слоя ВТ-23 толщиной 0.5 мм и два слоя органотекстолита толщиной 1.38 мм, 3 — три слоя ВТ-23 толщиной 0.5 мм и три слоя органотекстолита толщиной 1.38 мм, 4 — один слой ВТ-23 толщиной 2.0 мм и один слой органотекстолита толщиной 2.07 мм, 5 — четыре слоя ВТ-23 толщиной 0.5 мм и четыре слоя органотекстолита толщиной 1.38 мм, 6 — один слой ВТ-23 толщиной 2.0 мм и один слой органотекстолита толщиной 6.44 мм.

приведены значения стойкости к воздействию высокоскоростного удара органотекстолита аналогичного состава (СВМ и ЭДТ-10П) без металлических слоев. Как видно из приведенных зависимостей, стойкость к воздействию высокоскоростного удара исследуемых металло-органотекстолитов зависит главным образом от величины поверхностной плотности композита — с ростом поверхностной плотности наблюдается возрастание стойкости к ударным воздействиям. При этом толщина листов титанового сплава и порядок чередования слоев металла и органотекстолита не оказывают существенного влияния на стойкость к воздействию высокоскоростного удара материала. При одинаковой поверхностной плотности стойкость к воздействию высокоскоростного удара органотекстолита превышает стойкость к воздействию высокоскоростного удара металло-органотекстолита на основе листов титанового сплава.

На рис. 3 показаны результаты определения стойкости к воздействию высокоскоростного удара (при ударе стальным шариком массой 7 г) слоистых металло-органотекстолитов, содержащих в своем составе слои органотекстолита на основе арамидной ткани и эпоксикаучукового связующего ВК-51 и листы металлических сплавов (титанового, алюминиевого или магниевого). Как видно из рис. 3, поверхностная плотность слоистого металлополимерного композита является определяющим фактором, влияющим на стойкость к воздействию высокоскоростного удара материала. Так, с увеличением поверхностной плот-

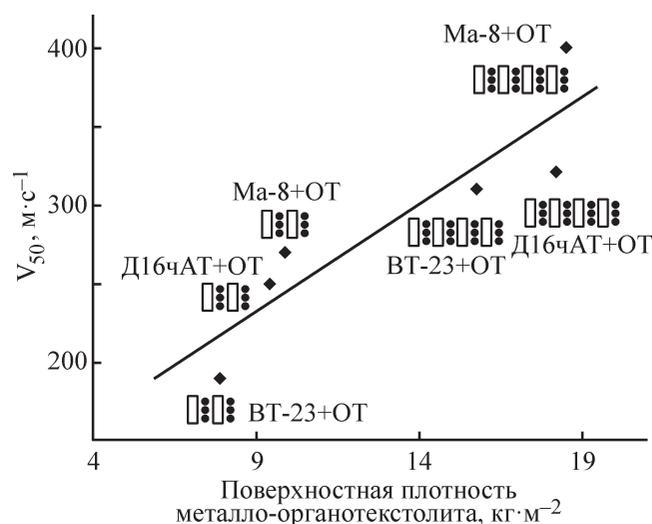


Рис. 3. Стойкость к воздействию высокоскоростного удара при ударе стальным шариком массой 7 г металло-органотекстолитов на основе титанового сплава ВТ-23, магниевого сплава Ма-8 и алюминиевого сплава Д16чАТ.

ности слоистых металло-органотекстолидов от 7.9 до 18.5 кг·м⁻² наблюдается возрастание V_{50} от 200 до 350 м·с⁻¹. Отметим, что металло-органотекстолиды на основе магниевых сплавов Ма-8 проявляют большую устойчивость к высокоскоростному воздействию, чем металло-органотекстолиды с той же поверхностной плотностью на основе титанового сплава ВТ-23 и алюминиевого сплава Д16чАТ.

Одним из путей дальнейшего совершенствования органотекстолидов и металло-органотекстолидов является использование в их составе арамидных волокон с повышенными характеристиками (в том числе арамидные волокна третьего поколения Русар НТ) в сочетании с современными высокодеформативными полимерными связующими [24, 25].

Выводы

Для обеспечения стойкости элементов авиационных конструкций к ударным воздействиям различного характера, возникающим при эксплуатации самолетов и вертолетов, высокоэффективным является применение в конструкциях органотекстолидов и металло-органотекстолидов, содержащих арамидные ткани.

Стойкость к воздействию высокоскоростного удара органотекстолидов, армированных тканями из арамидных нитей СВМ и Русар (Руслан), зависит от типа полимерной матрицы, которая отвечает за уровень взаимодействия с арамидным волокнистым наполнителем и формирование структуры композита. Наибольшую стойкость к воздействию высокоскоростного удара имеют арамидные органотекстолиды на основе фенольно-каучукового связующего ВК-3, в которых полимерная матрица практически не проникает внутрь волокнистой структуры арамидной ткани, а выступает в качестве промежуточного слоя между слоями армирующего наполнителя.

Стойкость к воздействию высокоскоростного удара металло-органотекстолидов практически не зависит от толщины и порядка чередования слоев металла и органотекстолита. Определяющее значение имеет поверхностная плотность композита. Установлено, что стойкость к ударному воздействию металло-органотекстолита на основе магниевых сплавов Ма-8 несколько выше (до 20%), чем у металло-органотекстолита на основе титанового ВТ-23 и алюминиевого Д16чАТ сплавов.

Проведенные исследования позволяют рассматривать магниевые сплавы как перспективный компонент слоистых металло-органотекстолидов для создания стойких к воздействию высокоскоростного

удара конструкций с оптимальными защитными и весовыми характеристиками.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 6.2. «Слоистые трещиностойкие, высокопрочные металлополимерные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [26].

Список литературы

- [1] Roberts D., Revilock D. M., Binienda W. K., Nie W. Z., Ben Mackenzie S., Todd K. B. // J. Aerosp. Eng. 2002. N 15 P. 104–110.
- [2] Железина Г. Ф. // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 272–277.
- [3] Железина Г. Ф., Соловьева Н. А., Макрушин К. В., Рысин Л. С. // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1. С. 58–63.
- [4] Шульдешова П. М., Железина Г. Ф. // Тр. ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2014. № 9. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.06.2018).
- [5] Железина Г. Ф., Соловьева Н. А., Орлова Л. Г., Войнов С. И. // Все материалы. Энциклопедический справочник. Композиционные материалы. 2012. № 12. С. 23–26.
- [6] Железина Г. Ф., Войнов С. И., Каримбаев Т. Д., Чернышев А. А. // Вопр. материаловедения. 2017. № 32 (90). С. 153–165.
- [7] Железина Г. Ф., Гуляев И. Н., Соловьева Н. А. // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 368–378.
- [8] Железина Г. Ф., Шульдешова П. М. // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. № 2. С. 9–14.
- [9] Железина Г. Ф., Войнов С. И., Плетинь П. И., Вешкин Е. А., Сатдинов Р. А. // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2012. Т. 14. № 4. С. 411–416.
- [10] Машинская Г. П., Железина Г. Ф. // Большая Российская энциклопедия. Науч. изд-во «Большая российская энциклопедия», 2015. С. 518.
- [11] Laurens B. V. // Ind. Eng. Chem. 1983. N 22 (3). P. 492–496.
- [12] Mashinskaya G. P., Zhelezina G. F., Senatorova O. G. // Chapman & Hall. 1995. P. 487–570.
- [13] Постнов В. И., Сенаторова О. Г., Железина Г. Ф., Казаков И. А., Абрамов П. А., Герасимов В. А., Постнова М. В. // Авиационные материалы и технологии. 2009. № 4. С. 8–17.
- [14] Постнов В. И., Сенаторова О. Г., Каримова С. А., Павловская Т. Г., Железина Г. Ф., Казаков И. А., Абрамов П. А., Постнова М. В., Котов О. Е. //

- Авиац. материалы и технологии. 2009. № 4. С. 23–32.
- [15] Деев И. С., Железина Г. Ф. // Композиты и наноструктуры. 2015. Т. 7. № 3. С. 162–176.
- [16] Горбунов И. М. // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2006. № 3. С. 26–28.
- [17] Валуева М. И. // Вопр. материаловедения. 2017. № 2 (90). С. 197–207.
- [18] Arun Kumar Singh, Wanhill R. J. H., Eswara N. // Aerospace Materials and Material Technologies. V. 2. Aerospace Material Technologies. 2017. N 3. P. 541–567.
- [19] Bourke P. // Ballistic impact on composite armor. 2007. P. 11.
- [20] Каблов Е. Н. // Вестн. РАН. 2012. Т. 82. № 6. С. 520–530.
- [21] Каблов Е. Н. // Металлы Евразии. 2012. № 3. С. 10–15.
- [22] Каблов Е. Н. // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
- [23] Мухаметов Р. Р., Петрова А. П., Пономаренко С. А., Долгова Е. В., Павлюк Б. Ф. // Тр. ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2018. № 4. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.06.2018).
- [24] Tikhonov I. V., Tokarev A. V., Shorin S. V., Shchetinin V. M., Chernykh T. E., Bova V. G. // Fibre Chem. 2013. N 5. P. 1–8.
- [25] Железина Г. Ф., Войнов С. И., Черных Т. Е., Черных К. Ю. // Вопр. материаловедения. 2015. № 1 (81). С. 60–72.
- [26] Каблов Е. Н. // Авиац. материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7–17.
-