

УДК 699.81:629.7.042.2

С.Л. Барботько<sup>1</sup>, О.С. Вольный<sup>1</sup>, В.И. Постнов<sup>1</sup>, Е.Н. Шуркова<sup>1</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ АРМИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКА

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-108-120

*Исследовано влияние структуры армирования стеклопластика на основе фенолформальдегидного связующего и равнопрочной стеклоткани на характеристики пожарной опасности, определяемые в соответствии с требованиями авиационных норм.*

*По характеристике дымообразования не установлено однозначного влияния структуры армирования на регистрируемые значения оптической плотности дыма.*

*По характеристикам горючести и тепловыделения для данного типа материала получено, что при толщине ~2 мм наихудшие значения имеет материал с однонаправленной структурой армирования.*

**Ключевые слова:** полимерный композиционный материал, стеклопластик, пожаробезопасность, горючесть, дымообразование, тепловыделение, укладка, структура армирования.

S.L. Barbotko<sup>1</sup>, O.S. Volnyj<sup>1</sup>, V.I. Postnov<sup>1</sup>, E.N. Shurkova<sup>1</sup>

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF REINFORCEMENT STRUCTURES ON FIRE HAZARD CHARACTERISTICS OF THE FIBERGLASS

The influence of reinforcement scheme for fiberglass based on phenol-formaldehyde binder and equal-strength fiberglass on fire hazard characteristics determined in accordance with the requirements of aviation standards is investigated.

There is no unambiguous effect of the reinforcement scheme on the recorded values of the optical density of smoke was established.

According to the characteristics of flammability and heat release for this type of material, it was obtained that at a thickness of about 2 mm the material with a unidirectional reinforcement structure has the worst values.

**Keywords:** polymeric composite material, fiberglass, fire safety, flammability, smoke density, heat release, scheme of laying, reinforcement structure.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

### Введение

Во всем мире происходит постепенное расширение применения полимерных материалов, они вытесняют такие конструкционные материалы, как сталь или алюминий, которые во многих отраслях промышленности до последнего времени считались незаменимыми. Это происходит за счет того, что полимерные композиционные материалы (ПКМ) обеспечивают лучшие характеристики по соотношению «прочность–масса». Работы по внедрению конструкционных ПКМ наибольшую актуальность имеют в авиационно-космической отрасли. Для обеспечения наилучшей весовой эффективности

ПКМ в зависимости от видов нагружения в конкретных условиях работы применяют различные виды наполнителей и разные схемы их укладки (структуры армирования). В ВИАМ за его 85-летнюю историю разработаны многие десятки различных полимерных материалов, эта работа не прекращается и в последние годы [1–5].

Подавляющее большинство полимерных материалов из-за своей органической природы в той или иной степени являются пожароопасными, так как способны к воспламенению, самостоятельному горению с выделением тепла, распространению пламени по поверхности, образованию дыма и токсичных продуктов термодеструкции. Сопоставление характеристик пожарной опасности различных типов полимерных материалов авиационного назначения приведено, например, в работе [6].

Определение характеристик пожарной опасности материалов авиационного назначения проводят в обязательном порядке, однако оценке влияния структуры наполнителя до последнего времени практически не уделялось внимания. Например, в книге [7] отмечается влияние структуры наполнителя на механические характеристики ПКМ, в том числе после воздействия огня, но совершенно не рассматривается влияние структуры армирования на пожаробезопасность.

Ранее проведенными исследованиями, например в работе [8], показано, что на характеристики пожарной опасности ПКМ влияет не только вид и содержание полимера, но также вид и поверхностная плотность наполнителя.

В данной работе сделана попытка оценить влияние структуры армирования на характеристики пожарной опасности. Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» комплексной научной проблемы 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [9–11].

### Материалы и методы

В качестве объекта исследований выбран стеклопластик ВПС-42П/Т-64, изготавливаемый из препрега на основе фенолформальдегидного связующего ВСМ-16М и стеклоткани Т-64(ВМП).

При изготовлении образцов изменяли следующие параметры:

- количество слоев стеклоткани – соответственно толщину и поверхностную плотность материала;
- укладку стеклоткани.

Количество слоев стеклоткани в образцах меняли от 5 до 21.

Стеклоткань Т-64(ВМП) изготавливается по ТУ5952-009-16319666–98 и имеет следующие характеристики:

- тип переплетения – сатин 8/3;
- толщина  $0,09 \pm 0,01$  мм;
- плотность ткани – по основе  $22 \pm 1$  нитей/см, по утку  $24 \pm 1$  нитей/см;
- разрывная нагрузка – по основе 882 Н, по утку 490 Н;
- поверхностная плотность  $95 \pm 5$  г/м<sup>2</sup>.

Хотя ткань формально считается равнопрочной, тем не менее существуют значительные (почти двукратные) различия по прочности в продольном и поперечном направлениях. В связи с этим при изготовлении материалов используются различные схемы укладки (структуры армирования): однонаправленная (все слои стеклоткани имеют одинаковое направление по основе), ортотропное (чередование слоев стеклоткани в одном направлении по основе и по утку) или квазиизотропное (чередование слоев

стеклоткани с укладкой продольной, поперечной и под углом 45 градусов). Различия в толщине и плотности нитей по основе и утку, а также их пространственная ориентация в схеме укладки оказывают влияние на теплофизические свойства материала, а соответственно – на его прогрев, образование и выход на поверхность газообразных продуктов термодеструкции. Влияние анизотропного наполнителя на теплофизические свойства композиционного материала отмечено в работе [12].

Поэтому в процессе исследования определены характеристики пожарной опасности при различных вариантах укладки – использованы следующие варианты укладки стеклоткани:

- однонаправленная ( $0^\circ$  или  $90^\circ$ );
- ортотропная ( $\pm 45^\circ$  или  $0-90^\circ$ );
- квазиизотропная ( $0^\circ-90^\circ-\pm 45^\circ$ ).

Содержание полимерной матрицы в составе образцов варьировали от 40,1 до 48,4% (по массе).

Огневые испытания образцов материалов для определения характеристик пожарной опасности проводили в соответствии с требованиями и методами, описанными в Авиационных правилах (АП-25, Приложение F, Части I, IV и V) [13]:

– метод определения горючести (АП-25, Приложение F, Часть I, ГОСТ Р 57924–2017, ОСТ1 90094–79). Испытания проводили на оборудовании марки AA07 производства фирмы Noselab (Италия) по методу 2 (вертикальная ориентация образца, продолжительность экспозиции пламенем горелки 60 с). В процессе испытания регистрировали продолжительность остаточного (самостоятельного) горения и длину прогорания образца;

– метод определения тепловыделения при горении (АП-25, Приложение F, Часть IV, ГОСТ Р 57928–2017). Испытания проводили в проточном калориметре типа OSU (модификация оборудования для испытаний авиационных материалов – ASTM E906 Configuration A) при падающем тепловом потоке на образец, равном  $35 \text{ кВт/м}^2$ . По результатам испытаний регистрировали следующие показатели: максимальная интенсивность выделения тепла (MHRR),  $\text{кВт/м}^2$ ; время достижения максимальной интенсивности тепловыделения, с; общее количество выделившегося тепла за первые 2 мин испытания (THR2),  $(\text{кВт}\cdot\text{мин})/\text{м}^2$ ;

– метод определения дымообразующей способности (АП-25, Приложение F, Часть V, ГОСТ 24632–81). Испытания по определению дымообразования проводили в двух режимах: «горение» (одновременное воздействие теплового потока и пламени) и «спироллиз» (только воздействие теплового потока). Испытания проводили на оборудовании марки SD#1 производства фирмы Govmark (США), соответствующем стандартам ASTM E662 и ASTM F814, при вертикальном положении образца и падающем тепловом потоке на образец, равном  $25 \text{ кВт/м}^2$ . В процессе испытания регистрировали оптическую плотность дыма через 2 мин (D2), 4 мин (D4) и максимально достигаемую в процессе эксперимента ( $D_{\text{max}}$ ).

Для каждого вида/режима огневых испытаний в соответствии с принятой практикой испытаний материалов авиационного назначения на пожаробезопасность [13–16] испытывали по три параллельных образца.

На образцах для измерения тепловыделения при горении (размер  $150 \times 150 \text{ мм}$ ) определяли массу и рассчитывали поверхностную плотность материала в  $\text{г/см}^2$ .

Данные по образцам, предназначенным для определения характеристик пожарной опасности, приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры образцов из стеклопластика ВПС-42П/Т-64  
для проведения огневых испытаний**

Направление укладки	Условный номер образца	Количество слоев стеклоткани	Толщина образца, мм	Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	Содержание связующего, % (по массе)
[0°]	1	6	0,65–0,68	1023	41,5
	2	10	1,04–1,05	1673	41,8
	3	20	2,00–2,01	3339	41,7
[0°; 90°]	4	5	0,54–0,56	875	42,5
	5	11	1,18–1,19	1934	43,0
	6	19	1,81–1,86	3166	40,1
[±45°]	7	5	0,59–0,62	929	44,8
	8	11	1,20–1,30	1983	45,0
	9	21	2,51–2,58	4031	48,4
[0°; 90°; ±45°]	10	6	0,60–0,67	1017	41,7
	11	12	1,21–1,25	2057	41,2
	12	18	1,89–1,91	3171	43,6

### Результаты и обсуждение

Полученные данные по характеристикам пожарной опасности образцов из стеклопластика ВПС-42П/Т-64 приведены в табл. 2–4.

Все испытанные образцы по дымообразующей способности относились ко второй группе (слабодымящие) или незначительно ее превышали – оптическая плотность дыма (в зависимости от толщины образцов) за первые 2 и 4 мин составляла 0–39 ед., а максимальная – от 5 до 53 ед. Зарегистрированный разброс значений оптической плотности дыма при параллельных испытаниях сопоставим с регистрируемыми значениями оптической плотности дыма. В связи с этим оценить влияние различных факторов строения на характеристики дымообразующей способности для данного типа материала не представляется возможным. Поэтому в последующем проводился анализ влияния структуры (схемы укладки) только на характеристики горючести и тепловыделения.

Авторами данной статьи была сделана попытка оценить влияние укладки на характеристики горючести и тепловыделения. Как было показано ранее, например в работе [17], характеристики пожарной опасности, определяемые в соответствии с требованиями авиационных норм, существенным образом зависят от таких факторов, как количество слоев наполнителя, толщина образца и содержание полимерного связующего. Поскольку в связи с различными вариантами структур армирования использовалось различное количество слоев наполнителя и образцы несколько различались по содержанию связующего, то для получения объективной информации опробованы несколько вариантов построения зависимостей характеристик пожарной опасности: с изменением толщины, поверхностной плотности, массы полимера и количества слоев наполнителя.

На рис. 1 и 2 приведены зависимости изменения характеристик горючести – длины прогорания и продолжительности остаточного (самостоятельного) горения.

**Данные по характеристикам горючести стеклопластика ВПС-42П/Т-64  
при времени экспозиции 60 с**

Условный номер образца – см. табл. 1	Продолжительность остаточного горения, с	Длина обугливания, мм
1	2	74
	2	78
	1	76
Среднее значение	2	76
2	3	82
	3	93
	1	76
Среднее значение	2	84
3	10	45
	17	56
	16	54
Среднее значение	14	52
4	1	112
	1	89
	2	99
Среднее значение	1	100
5	2	73
	5	83
	10	92
Среднее значение	6	83
6	11	55
	6	53
	4	44
Среднее значение	7	51
7	1	87
	2	102
	2	99
Среднее значение	2	96
8	1	84
	3	74
	10	75
Среднее значение	5	78
9	8	42
	7	33
	0	44
Среднее значение	5	40
10	1	88
	2	94
	1	90
Среднее значение	1	91
11	2	71
	1	86
	0	70
Среднее значение	1	76
12	0	53
	10	54
	0	60
Среднее значение	3	56

Таблица 3

## Данные по характеристикам тепловыделения стеклопластика ВПС-42П/Т-64

Условный номер образца – см. табл. 1	Максимальная интенсивность выделения тепла (пик), кВт/м <sup>2</sup>	Время достижения максимума, с	Общее количество выделившегося тепла за первые 2 мин, кВт·мин/м <sup>2</sup>
1	65	28	43
	78	34	47
	47	27	42
Среднее значение	63	–	44
2	46	79	51
	74	35	59
	65	60	61
Среднее значение	62	–	57
3	109	69	86
	78	117	70
	86	66	87
Среднее значение	91	–	81
4	65	27	39
	110	22	44
	80	29	47
Среднее значение	85	–	43
5	67	65	66
	58	76	67
	78	61	73
Среднее значение	68	–	69
6	49	178	30
	52	141	34
	48	189	20
Среднее значение	50	–	28
7	97	28	56
	97	28	47
	87	28	52
Среднее значение	94	–	52
8	90	56	87
	78	57	80
	78	67	87
Среднее значение	82	–	85
9	64	151	42
	56	213	8
	77	175	20
Среднее значение	66	–	23
10	73	33	52
	104	30	51
	47	33	42
Среднее значение	75	–	48
11	53	79	62
	83	64	76
	72	64	78
Среднее значение	69	–	72
12	84	102	82
	57	153	24
	75	125	43
Среднее значение	72	–	50

Данные по характеристикам дымообразования стеклопластика ВПС-42П/Т-64

Условный номер образца – см. табл. 1	Дымообразование при горении/пиролизе		
	D <sub>2</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>max</sub>
1	4/0	4/1	5/23
	8/1	12/7	39/17
	3/0	6/1	53/6
Среднее значение	5/1	7/3	32/15
2	0/1	1/3	12/13
	8/1	10/5	10/14
	1/1	6/5	12/10
Среднее значение	3/1	6/4	11/12
3	1/1	3/6	15/19
	1/1	3/2	13/11
	1/0	5/2	15/13
Среднее значение	1/1	4/3	14/14
4	9/1	10/2	16/6
	1/1	2/3	9/6
	1/1	4/2	10/5
Среднее значение	4/1	5/2	12/6
5	4/0	7/1	11/7
	13/0	17/0	17/6
	21/1	26/2	27/7
Среднее значение	12/1	17/1	18/7
6	1/1	3/4	14/17
	0/2	2/7	9/24
	1/1	5/2	15/16
Среднее значение	1/1	3/4	13/19
7	4/2	4/6	7/9
	4/2	5/4	9/7
	3/3	4/5	6/7
Среднее значение	4/2	4/5	7/8
8	23/2	39/7	39/15
	22/1	27/2	27/10
	2/1	6/2	13/9
Среднее значение	16/1	24/4	26/11
9	1/1	6/1	16/7
	1/2	1/3	9/11
	1/0	11/2	17/12
Среднее значение	1/1	6/2	14/10
10	6/2	7/5	12/10
	1/2	3/5	9/10
	1/1	3/4	8/8
Среднее значение	3/2	4/5	10/9
11	1/0	3/2	9/7
	17/0	19/1	19/8
	29/0	29/2	30/8
Среднее значение	16/0	17/2	19/8
12	1/3	3/3	10/4
	0/1	2/1	17/13
	1/0	3/1	17/17
Среднее значение	1/1	3/2	15/11

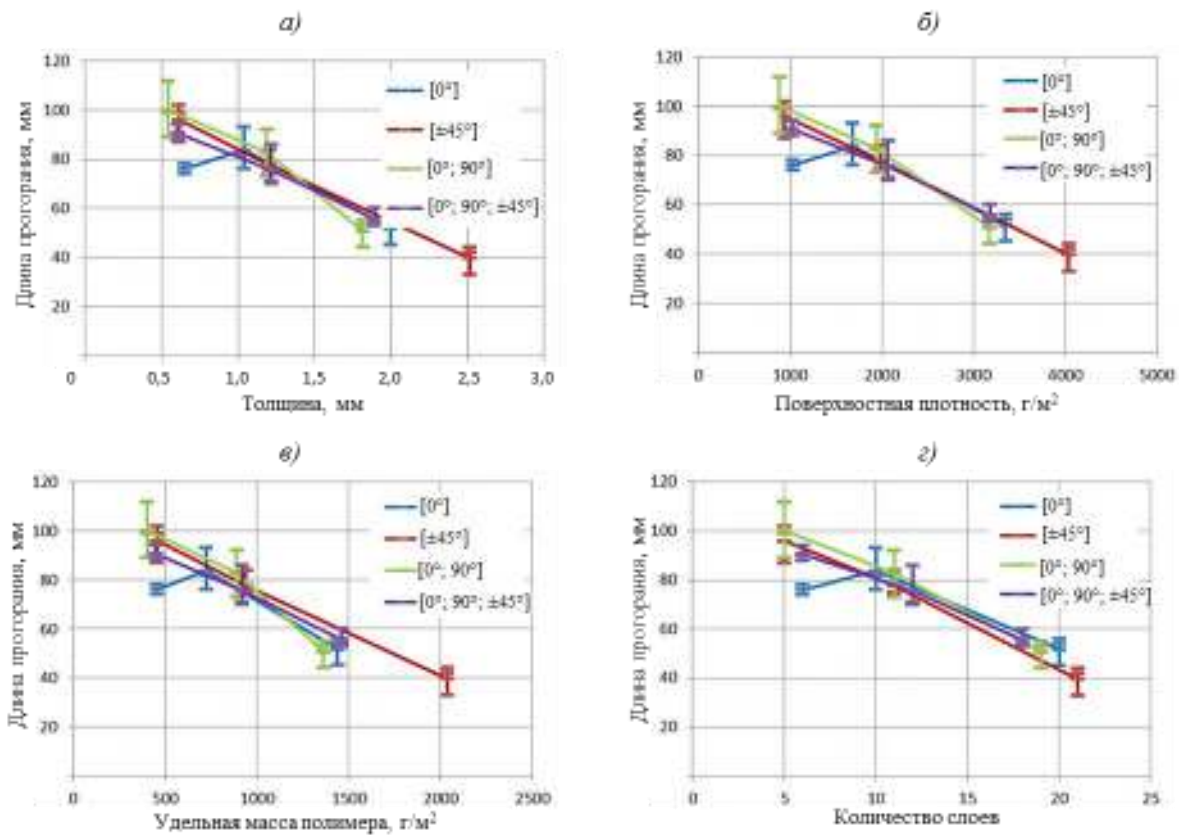


Рис. 1. Влияние структуры армирования на длину прогорания материала

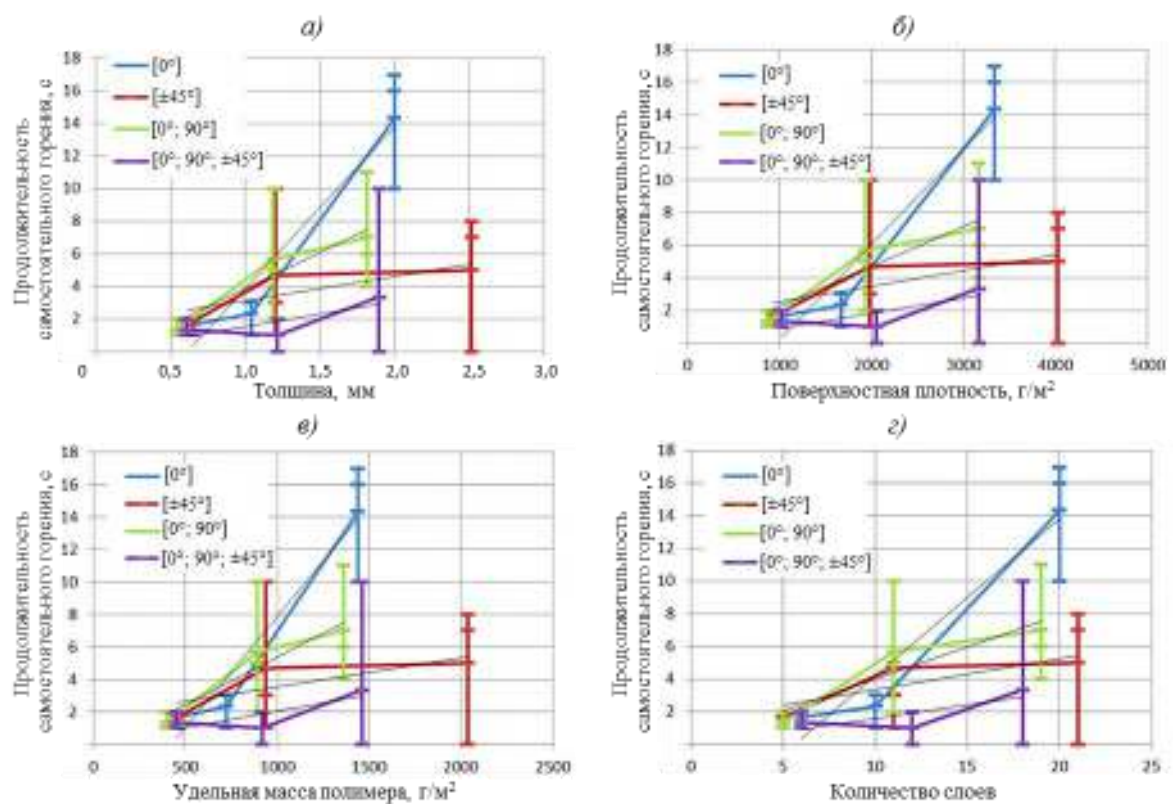


Рис. 2. Влияние структуры армирования на продолжительность остаточного (самостоятельного) горения

Известно, что длина прогорания в зависимости от толщины образца, как правило, монотонно снижается, при этом характер изменения близок к экспоненциальной функции [18]. Поэтому обычно считается, что наибольшую пожарную опасность по характеристике горючести представляют наиболее тонкие образцы [18, 19]. Полученные данные показывают монотонное снижение длины прогорания с увеличением толщины образца. Все образцы независимо от структуры армирования показывают практически идентичные результаты в различных системах координат (толщина, поверхностная плотность, масса полимера, количество слоев наполнителя), хотя наибольшее совпадение графиков наблюдается для систем координат «длина прогорания–толщина» и «длина прогорания–поверхностная плотность». Единственным зафиксированным отклонением по вариантам укладки является несколько меньшая длина прогорания для наиболее тонкого образца со схемой укладки  $[0^\circ]$  – у этого образца наблюдается длина прогорания на ~20 мм меньше по сравнению с образцами других структур армирования и аналогичной толщины.

Другой характеристикой при оценке горючести является продолжительность остаточного горения. Во всех использованных вариантах систем координат можно наблюдать идентичное изменение продолжительности остаточного горения. При этом наибольшей крутизной роста отличается вариант материала с однонаправленной укладкой наполнителя. Но необходимо прокомментировать полученные результаты:

– все варианты образцов имели значительный разброс значений при параллельных испытаниях, поэтому отклонения разбросов значений достаточно широки и зачастую пересекаются;

– ранее показано [20], что с увеличением толщины образца продолжительность горения имеет ярко выраженный максимум. Так, величина максимума при продолжительности экспозиции пламенем горелки 60 с находится в области толщины ~2 мм, поэтому не исключен вариант, что при испытаниях образцов из материала с укладкой  $[\pm 45^\circ]$  максимальные значения продолжительности остаточного горения не были экспериментально зафиксированы, так как изготовлены образцы несколько большей толщины.

Большие отклонения разброса данных свидетельствуют о близости значений толщины испытываемого образца к «критическим» значениям толщины, при которых наблюдается максимум продолжительности остаточного горения и они могут относиться как к восходящей, так и к нисходящей ветвям кривой. Поэтому сразу невозможно сделать вывод об однозначном различии по значениям характеристики горючести для наполнителя из равнопрочной ткани между вариантом укладки  $[0^\circ]$  и остальными вариантами. Однако если для сравнительной оценки характеристики горючести при различных структурах армирования использовать комплексный индекс, описываемый по формуле среднего степенного (квадратичного) из относительной продолжительности остаточного горения и относительной длины прогорания [21], то видно существенное отличие однонаправленного материала от материалов с другими схемами укладки – материалы, имеющие перекрестное армирование, с увеличением толщины имеют небольшое уменьшение индекса, в то время как однонаправленный материал показывает значительное возрастание индекса горючести (рис. 3).

Для характеристик тепловыделения полученные зависимости приведены на рис. 4. Все графики, независимо от использованной системы координат (толщина, поверхностная плотность, масса полимера, количество слоев стеклоткани) имели идентичный характер, поэтому на рисунках приведены только зависимости от толщины образца.

Все результаты по времени достижения максимальной интенсивности выделения тепла независимо от структуры армирования практически совпадали (рис. 4, а).

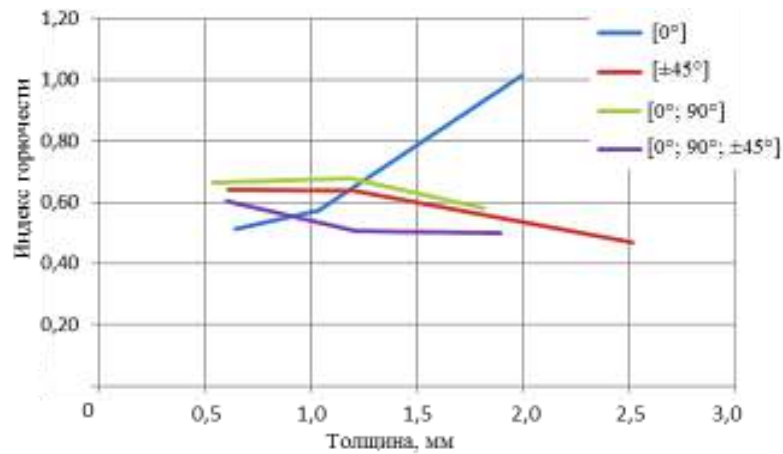


Рис. 3. Влияние структуры армирования на величину комплексного индекса горючести

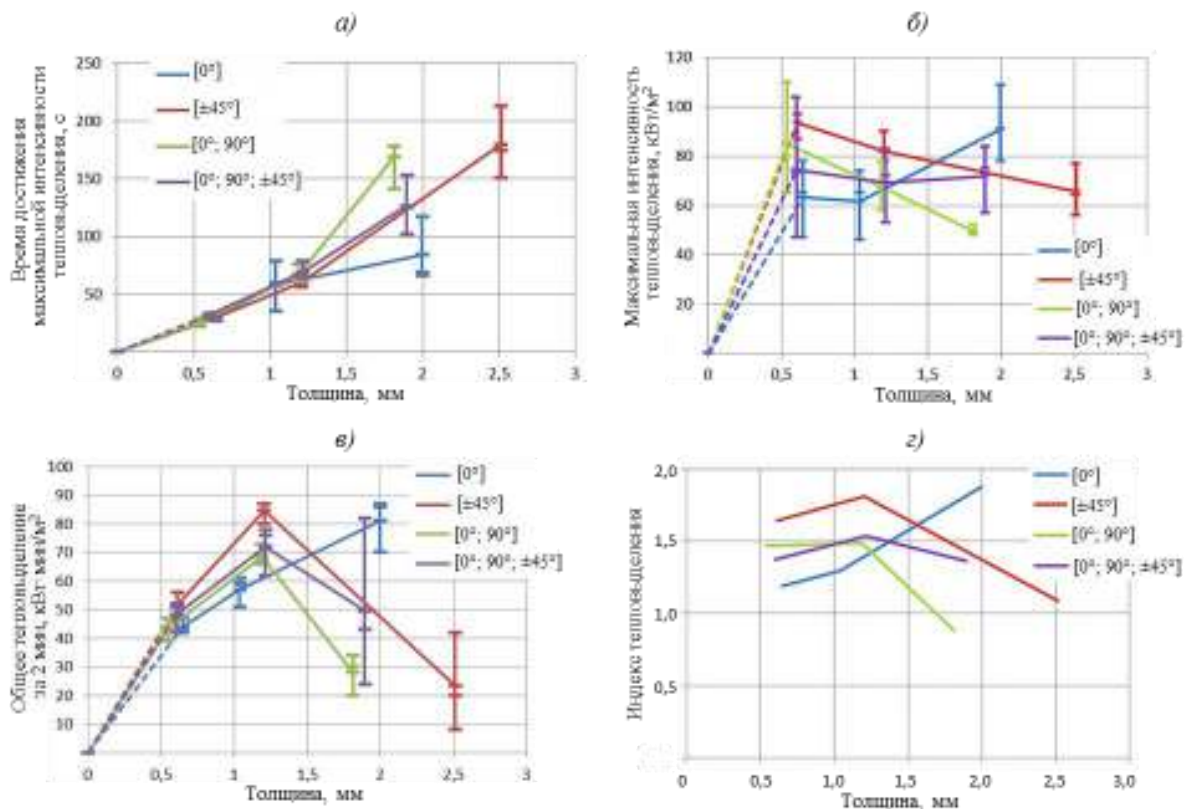


Рис. 4. Влияние структуры армирования на время достижения максимальной интенсивности тепловыделения (а), максимальную интенсивность тепловыделения (б), величину общего тепловыделения при горении (в) и комплексный индекс тепловыделения (г)

При испытании на тепловыделение образец подвергается воздействию теплового потока, действующего в трансверсальном направлении относительно плоскости материала, поэтому различия в ориентации образца ( $0-90^\circ$  или  $\pm 45^\circ$ ) не должны сказываться на полученных результатах. Имеющиеся отличия должны быть отнесены к статистическому разбросу данных. На основании этого можно сделать заключение, что не существует различий в характеристиках тепловыделения для ортотропной и квазиизотропной структур армирования (рис. 4, б, в).

Для однонаправленной схемы укладки есть небольшие отличия в характеристиках тепловыделения (максимальная интенсивность и общее количество выделившегося

тепла за первые 2 мин), но отклонения ошибок между данными для однонаправленной и ортотропной структурами близки. До толщины от 0 до 1 мм схема укладки наполнителя практически не влияет на зависимости «толщина–максимальная интенсивность тепловыделения» и «толщина–общее количество выделившегося тепла». При толщинах >1 мм наблюдается небольшое превышение значений тепловыделения для однонаправленной схемы укладки над аналогичными значениями для материалов с другими структурами армирования (рис. 4, б, в). Этот же вывод подтверждается и при расчете комплексного индекса тепловыделения (рис. 4, г).

В результате проведенного исследования установлено небольшое отличие по показателям пожарной опасности однонаправленной структуры армирования от ортотропной и квазиизотропной. Малые различия в зарегистрированных характеристиках пожарной опасности для различных структур армирования могут быть объяснены тем, что для испытаний выбрали равнопрочный тканый наполнитель. Для однонаправленного наполнителя (ровинга) эти различия могут быть значительными.

### Заключения

Проведены исследования по влиянию схемы укладки тканого наполнителя (равнопрочная стеклоткань Т-64) на характеристики пожарной опасности стеклопластика на фенолформальдегидном связующем. Изучено влияние однонаправленной [0°], ортотропной [0°/90°] или [±45°] и квазиизотропной [0°/-45°/90°/+45°] структур армирования на характеристики горючести (длина прогорания и продолжительность остаточного горения), дымообразования (оптическая плотность дыма за 2, 4 мин и максимальная) и тепловыделения при горении (максимальная интенсивность выделения тепла, время достижения максимальной интенсивности и общее количество выделившегося тепла за первые 2 мин), определяемые в соответствии с требованиями авиационных норм. Исследования проведены для стеклопластиков в интервале толщин от 0,65 до 2,5 мм.

По характеристике дымообразования не установлено однозначного влияния структуры армирования на регистрируемые значения оптической плотности дыма.

По характеристикам горючести для данного типа материала не выявлено влияния структуры армирования на длину прогорания. Продолжительность остаточного горения тонких образцов (толщина – до 1,2 мм) практически не зависит от схемы укладки, для однонаправленных образцов толщиной ~2 мм зарегистрирована большая продолжительность остаточного горения.

По характеристикам тепловыделения при горении для данного типа материала не выявлено влияния схемы укладки на время наступления максимальной интенсивности выделения тепла. Аналогично характеристикам горючести характеристики тепловыделения (максимальная интенсивность выделения тепла и общее количество выделившегося тепла за первые 2 мин испытания) для тонких образцов данного материала практически не различаются при варьировании структуры армирования, а при большей толщине (~2 мм) наихудшие значения имеет материал с однонаправленной структурой армирования.

Несколько более высокая пожарная опасность при толщине образца 2 мм у однонаправленного материала, по сравнению с материалом, имеющим ортотропную или квазиизотропную структуру армирования, подтверждена при помощи расчета комплексных индексов горючести и тепловыделения.

Несколько худшие значения по пожарной опасности, зарегистрированные для материала с однонаправленной структурой армирования, могут объясняться различиями в условиях прогрева и выхода образующихся газообразных продуктов. В результате этого так называемая «критическая» толщина, при которой регистрируются наихудшие

значения пожарной опасности, для однонаправленного материала наблюдается при несколько больших величинах толщины образцов, чем для других схем укладки.

Сравнительно небольшое влияние схемы укладки на характеристики пожарной опасности стеклопластика может объясняться тем, что для данных исследований выбран наполнитель из равнопрочной ткани, имеющей небольшие различия в своих теплофизических свойствах в продольном и поперечном направлениях. Планируется продолжить данные исследования с наполнителем другой структуры – например, ровингом или жгутом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. На перекрестке науки, образования и промышленности // Эксперт. 2015. №15 (941). С. 49–53.
2. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
3. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
4. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф., Тюменева Т.Ю. Клеевые препреги – перспективные материалы для деталей и агрегатов из ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 379–387. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-379-387.
5. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
6. Mouritz A.P. Fire Safety of Advanced Composites for Aircraft // ATSB Research and Analysis Report. Aviation Safety Research Grant – B2004/0046. 2006. 39 p. URL: [http://www.atsb.gov.au/grant\\_20040046](http://www.atsb.gov.au/grant_20040046) (дата обращения: 08.11.2018).
7. Mouritz A.P., Gibson A.G. Fire Properties of Polymer Composite Materials. Springer, 2006. 398 p.
8. Шуркова Е.Н., Вольный О.С., Изотова Т.Ф., Барботько С.Л. Исследование возможности снижения тепловыделения при горении композиционного материала за счет изменения его структуры // Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 27–30.
9. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
10. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №5. С. 7–27.
11. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2001. №1. С. 3–8.
12. Staggs J.E.J. Modeling the Endothermic Decomposition of Hydrated Solids / In: Polymer Green Flame Retardants. Elsevier, 2014. P. 323–365.
13. Нормы летной годности самолетов транспортной категории: АП-25: утв. Постановлением 35-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 23.10.2015. 5-е изд. с поправками 1–8. М.: Авиаиздат, 2015. 290 с.
14. Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes. CS-25. Amendment 15. July 21, 2014. 921 p.
15. Federal Regulations. Part 25 – Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes. URL: <http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=d7f8803c7bd1d50b6d68749e0b42d848&node=14:1.0.1.3.11&rgn=div5> (дата обращения: 08.11.2018).
16. Aircraft Materials Fire Test Handbook // DOT/FAA/AR-00/12. 2000. 235 p. URL: <http://www.fire.tc.faa.gov/handbook.stm> (дата обращения: 08.11.2018).

17. Барботько С.Л. Прогнозирование на основе математической модели изменения кинетики тепловыделения при горении стеклопластика // Пожаровзрывобезопасность. Т. 17. 2008. №5. С. 23–28.
18. Cambell S., Jensen M., Sattayatham P. Flammability Standardization Task Group – Final Reports: Federal Aviation Administration Draft Policy Memo. August 20, 2009. FAA Report DOT/FAA/TC-12/10. 2012. 881 p.
19. Flammability Testing of Interior Materials: Policy Statement No: PS-ANM-25.853-01-R2 / U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. 2013. 28 p.
20. Барботько С.Л., Вольный О.С., Шуркова Е.Н. Построение феноменологической модели, описывающей изменение характеристики горючести (продолжительность остаточного горения) в зависимости от толщины полимерного материала // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №10 (70). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-107-116.
21. Барботько С.Л., Голиков Н.И. О комплексной оценке пожарной опасности материалов // Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 17. №6. С. 16–24.