

УДК 678.067.5

Д.А. Мельников¹, А.П. Петрова¹, А.А. Громова¹, И.И. Соколов¹, А.Е. Раскутин¹

РАСЧЕТ СООТНОШЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ПРЕПРЕГА МАРКИ ВПС-53/120, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕКЛОПЛАСТИКА

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-92-104

Описан процесс подбора соотношения компонентов препрега. Приведены сведения по электрохимической коррозии в зоне контакта «металл–углепластик» и описан способ защиты от контактной коррозии путем изолирования углепластика от металла слоем препрега стеклопластика. Подобраны исходные компоненты препрега стеклопластика марки ВПС-53/120, предназначенного для предотвращения контактной коррозии между металлом и углепластиком. Описаны два метода расчета поверхностной плотности связующего и препрега. Рассчитаны диапазоны допустимых разбросов поверхностных плотностей пленки связующего и препрега с учетом разброса поверхностной плотности стеклоткани и выбранного диапазона содержания связующего в препреге. Определены фактические значения характеристик препрега марки ВПС-53/120 и проведен их статистический анализ, показана высокая сходимость фактических значений с расчетными. Определены физико-механические и эксплуатационные характеристики стеклопластика марки ВПС-53/120.

Ключевые слова: стеклопластик, контактная коррозия, препрег, ПКМ, физико-механические и эксплуатационные характеристики.

D.A. Melnikov¹, A.P. Petrova¹, A.A. Gromova¹, I.I. Sokolov¹, A.E. Raskutin¹

THE CALCULATION OF THE RATIO OF THE COMPONENTS OF THE PREPREG STAMPS VPS-53/120, DETERMINATION OF PHYSICO-MECHANICAL AND OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF GRP

Process of selection of ratio of components of prepreg is described. The data on electrochemical corrosion in the contact zone of «metal–carbon» fiber and describes a method of protection against contact corrosion by isolating the carbon-plastic metal layer prepreg GRP. The initial components of prepreg GRP VPS-53/120, designed to prevent contact corrosion between metal and carbon fiber, were selected. Two methods for calculating the surface density of the binder and prepreg are described. The ranges of permissible dispersion of the surface densities of the binder and prepreg film are calculated taking into account the dispersion of the surface density of GRP and the selected range of the binder content in the prepreg. The actual values of the prepreg characteristics of the VPS-53/120 brand are determined and their statistical analysis is carried out, the high convergence of the actual values with the calculated ones is shown. Physical-mechanical and operational characteristics of GRP of the VPS-53/120 brand are defined.

Keywords: GRP, contact corrosion, prepreg, PCM, physical and mechanical, performance characteristics.

¹Федеральное 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

Начиная с 30-х годов прошлого века полимерные композиционные материалы (ПКМ) начали применять для производства деталей авиационной техники. В настоящее время объемы и области их применения увеличились многократно и продолжают расти. Существенный вклад в этот процесс внесли работы ФГУП «ВИАМ» [1–4].

В качестве армирующих наполнителей в ПКМ широкое применение нашли стеклянные волокна, материалы на их основе получили общее название – стеклопластики. Высокая механическая прочность, хорошие электро- и теплоизоляционные свойства, стойкость к воздействию агрессивных сред в различных климатических условиях, возможность конструирования изделий с учетом действующих нагрузок путем выбора рациональной структуры армирования, разнообразие и простота технологических методов изготовления изделий, доступность и относительно низкая стоимость стеклянных наполнителей – все это позволило широко применять стеклопластики для деталей и агрегатов летательных аппаратов, создавать изделия с необходимыми летно-техническими характеристиками [5]. Стеклопластик является эффективным решением одной из распространенных проблем, связанных с прямым контактом металлических материалов и углепластика [6].

Коррозионное поведение алюминиевых сплавов в значительной мере может осложняться при их взаимодействии с различными материалами. Наиболее опасным является контакт с материалами, катодными по отношению к алюминиевым сплавам. Значительный гальванический эффект может давать взаимодействие алюминия со всеми сплавами на основе меди, никеля, олова и т. д. К группе опасных контактных материалов относится также графит [7]. При прямом контакте углеродных волокон с металлом возникает электрохимическая коррозия – типичный случай представлен на рис. 1.

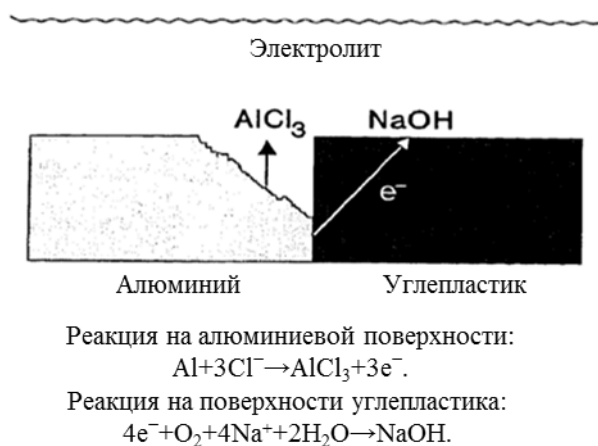


Рис. 1. Электрохимическая коррозия при контакте алюминия и углепластика в среде электролита [8]

Существует пять необходимых условий, при одновременном выполнении которых возникает электрохимическая коррозия соединения «композиционный материал–металл»: 1) наличие активного металла; 2) взаимодействие с электропроводящим композиционным материалом (углепластиком); 3) электрический контакт между активным металлом и электропроводящим композиционным материалом; 4) присутствие электролита (растворы солей, кислот и оснований, морская вода, влага атмосферы и т. д.); 5) воздействие кислорода. Однако, если одно из этих условий не выполняется, электрохимическая коррозия не происходит [8]. Наиболее уязвимыми к такому типу коррозии являются алюминиевые и магниевые сплавы, оцинкованные и кадмированные стали

[6]. В ряде случаев эффективным способом предотвращения контактной коррозии является изоляция углепластика от металла путем помещения дополнительного слоя стеклопластика. Распространенным примером применения стеклопластика в качестве разделительного слоя является изоляция сотового заполнителя из алюминиевого сплава от углепластиковых обшивок в сотовых конструкциях. Данный способ защиты может быть реализован путем применения препрегов стеклопластиков. Материалы такого типа способны обеспечить высокую степень защиты от коррозии, а также, что немаловажно, защитить углеродное волокно в составе обшивки от механического воздействия острых кромок сотовых ячеек в случае одновременного формования трехслойных панелей под давлением.

С целью импортозамещения материалов зарубежных фирм Hexcel и Cusom (США) перед ФГУП «ВИАМ» была поставлена задача разработать линейку препрегов для изготовления элементов механизации самолета на основе альтернативных углеродных и стеклянных наполнителей и полимерного связующего с температурой отверждения до 140°C, с возможностью обеспечения совместного формования препрегов за единый технологический цикл. В том числе было необходимо разработать стеклопластик с толщиной монослоя (толщина одного слоя) не более 0,1 мм для защиты углепластика в местах контакта с металлическими элементами конструкций (кронштейны, накладки, упоры и др.), а также алюминиевым сотовым заполнителем. Одновременно с этим разрабатываемый стеклопластик должен быть пригоден для изготовления криволинейных монолитных панелей и обеспечивать прочность при растяжении по основе при 20°C не менее 400 МПа (среднее значение). Препрег стеклопластика должен перерабатываться автоклавным методом.

Для разработки стеклопластика, соответствующего поставленным требованиям, необходимо было подобрать стеклоткань, связующее, определить их оптимальное соотношение, отработать технологию изготовления и режимы формования стеклопластика.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

В качестве связующего выбрано современное расплавное эпоксидное связующее марки ВСЭ-34 (ТУ1-595-12-1424–2014) с максимальной температурой отверждения 140°C. Основные свойства отвержденного связующего приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Физико-механические свойства (средние значения)
отвержденного связующего ВСЭ-34**

Свойства	Значения свойств	Стандарт испытания
Прочность при растяжении, МПа	75	ГОСТ 11262–80
Относительное удлинение при разрыве, %	2,9	
Модуль упругости при растяжении, ГПа	3,4	ГОСТ 9550–81
Температура стеклования (ДМА), °С	145	ASTM E1640–09
Плотность, г/см ³	1,22	ГОСТ 15139–69

Степень наполнения ПКМ может быть задана в массовых или объемных долях, чаще всего степень наполнения представляют в виде массовой доли связующего/матрицы (M_m) или объемной доли наполнителя (V_n). Массовыми частями удобнее пользоваться при разработке и проведении технологических процессов, а объемными – при теоретических расчетах и моделировании свойств ПКМ. Связь между массовым и объемным содержанием компонентов (без учета пористости) выражается соотношениями

$$M_H = \frac{V_H \cdot \rho_H}{V_H \cdot \rho_H + V_M \cdot \rho_M}; \quad V_H = \frac{M_H \cdot \rho_M}{M_H \cdot \rho_M + M_M \cdot \rho_H}; \quad M_M = 1 - M_H; \quad V_M = 1 - V_H, \quad (1)-(4)$$

где V_H – объемное содержание наполнителя; V_M – объемное содержание связующего; M_H – массовое содержание наполнителя; M_M – массовое содержание матрицы; ρ_H – плотность наполнителя; ρ_M – плотность матрицы.

Зависимости M_M и V_H от толщины монослоя (δ), без учета пористости, могут быть рассчитаны по формулам

$$M_M = \frac{\delta \cdot S_H}{\left(\delta \cdot \frac{S_H}{\rho_H}\right) + \frac{S_H}{\rho_M}}; \quad V_H = \frac{S_H}{\rho_H \cdot \delta}; \quad \delta = \frac{\rho_H \cdot M_M \cdot S_H - M_M \cdot \rho_M \cdot S_H + \rho_M \cdot S_H}{\rho_H \cdot \rho_M - \rho_H \cdot M_M \cdot \rho_M}; \quad \delta = \frac{S_H}{\rho_H \cdot V_H}, \quad (5)-(8)$$

где S_H – поверхностная плотность наполнителя.

Для учета пористости ПКМ при расчете толщины монослоя можно использовать формулу

$$\delta = \frac{S_H}{(1 - V_n) \cdot (\rho_H \cdot V_H)}, \quad (9)$$

где V_n – объемная доля пор.

Для подбора стеклоткани рассмотрим зависимости поверхностной плотности тканого наполнителя от толщины монослоя в ПКМ, рассчитанную на 20, 30, 40, 50 и 60% массового содержания связующего ВСЭ-34 без учета пористости, так как ее ожидаемые значения находятся в диапазоне от 0,5 до 1,5% объемной доли, что незначительно повлияет на толщину монослоя.

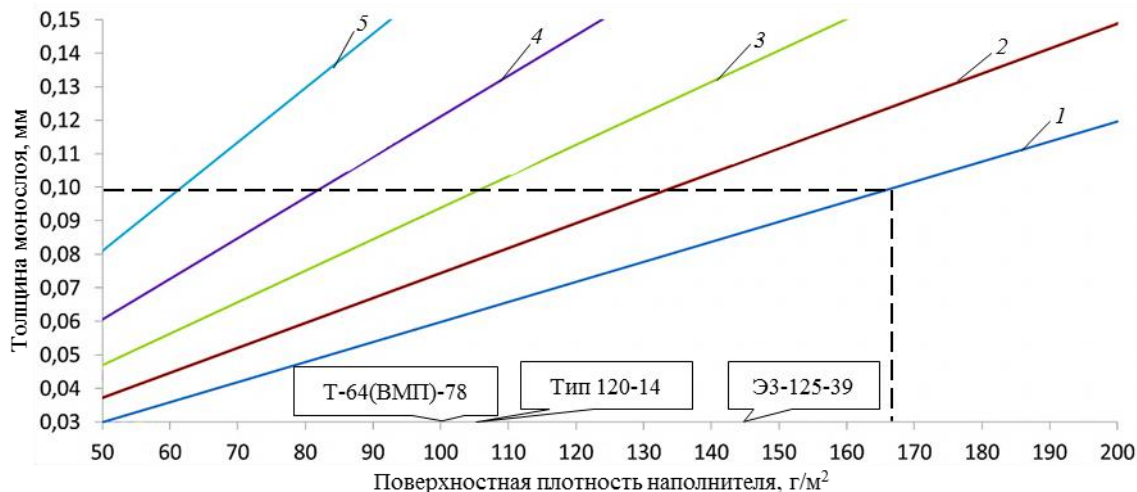


Рис. 2. Зависимости толщины монослоя от поверхностной плотности наполнителя для 20 (1), 30 (2), 40 (3), 50 (4) и 60% массовой доли (5) связующего в ПКМ (пунктиром отмечена область, где монослой удовлетворяет требованиям – менее 0,1 мм)

Как видно из данных рис. 2, для каждого массового содержания связующего диапазон допустимой поверхностной плотности наполнителя значительно отличается, если при наполнении $M_M=60\%$ для выполнения требований по толщине монослоя необходимо применить наполнитель с S_H – не более 60 г/м², то для $M_M=30\%$ – не более 135 г/м². Для нахождения оптимального решения при подборе стеклоткани необходимо

также учесть ряд факторов, влияющих на конечную стоимость препрега: цену стеклоткани, содержание стеклоткани, поверхностную плотность стеклоткани. Ориентируясь на требования заказчика и учитывая фактор стоимости конечного препрега, отобраны три стеклоткани: Тип 120-14 (ТУ ВУ 300059047.010–2017); Э3-125-39 (ГОСТ 19907–2015); Т-64(ВМП)-78 (ТУ5952-009-1631666–98), характеристики которых указаны в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики стеклотканей Тип 120-14, Э3-125-39 и Т-64(ВМП)-78

Стеклоткань	Поверхностная плотность, г/м ²	Доля волокон в направлении основы	Тип переплетения	Тип нитей		Ориентировочная стоимость, руб./м ²
				основа	уток	
Тип 120-14	105±10	0,51	Четырехремизный сатин	ЕС5 11×2 Z 100-14 или ЕС5 11×2 S 100-14	ЕС5 11×2 Z 100-14 или ЕС5 11×2 S 100-14	250
Э3-125-39	145±12	0,50	Плотняное	ЕС7 22×1×2	ЕС7 22×1×2	65
Т-64(ВМП)-78	100±5	0,65	Четырехремизный сатин или саржа 2/2	ВМПС6 14,4×2 Z 100-78 или ВМПС6 14,4×1 S 50-78	ВМПС6 14,4×1 S 50-78 или ВМПС6 7,2×2 Z 100-78	800

Для предварительной оценки возможности выполнения требований к стеклопластику по параметру прочности при растяжении для каждой из выбранных стеклотканей произведен теоретический расчет. Подробно метод теоретического расчета прочности при растяжении [9–16] описан на примере стеклоткани Тип 120-14 и связующего ВСЭ-34 в работе [17]. По результатам расчетов построены зависимости теоретической прочности стеклопластиков при растяжении от массовой доли связующего в диапазоне 20–60% (рис. 3). Видно, что стеклопластики на основе связующего ВСЭ-34 и выбранных стеклотканей позволяют достичь требуемой прочности при растяжении при широком диапазоне содержания связующего.

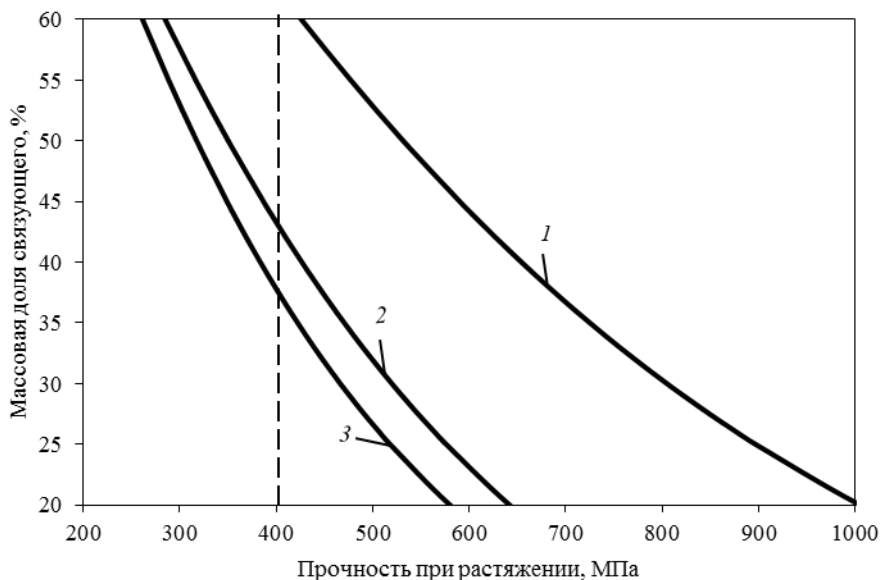


Рис. 3. Зависимости теоретически рассчитанной прочности от массовой доли связующего для стеклопластиков на стеклотканях Т-64(ВМП)-78 (1), Тип 120-14 (2) и Э3-125-39 (3)

Таким образом, наиболее критичным параметром при выборе содержания связующего в препреге будет толщина монослоя. Так, для стеклоткани Т-64(ВМП)-78 массовая доля связующего не должна превышать 42%, для стеклоткани Тип 120-14: 40%, для ЭЗ-125-39: 27%.

На основании выполненных расчетов и по совокупности приведенных данных для дальнейшей разработки препрега стеклопластика выбрана стеклоткань Тип 120-14 производства ОАО «Полоцк-Стекловолокно». Стеклоткань марки Тип 120-14 является равнопрочной, имеет более высокую драпируемость по сравнению со стеклотканью ЭЗ-125-39 и стоит более чем в 3 раза дешевле стеклоткани Т-64(ВМП)-78. Препрегу и стеклопластику на основе связующего ВСЭ-34 и стеклоткани Тип 120-14 присвоена марка ВПС-53/120.

Результаты

Для создания современных так называемых «калиброванных» препрегов, имеющих минимальное отклонение по весовому составу (на уровне $\pm(1-3)\%$), необходимо применение современных прецизионных пропиточных машин. Именно такое оборудование установлено во ФГУП «ВИАМ» – это современные пропиточные машины, разработанные по техническому заданию ФГУП «ВИАМ». Эти установки уникальны – они позволяют применять в различные режимы пропитки, обладают высокой производительностью, позволяют работать с ткаными и жгутовыми наполнителями. Принцип их работы заключается в предварительном равномерном нанесении расплавленного связующего на подложку с последующим совмещением с наполнителем [18–20].

Для разработки препрега такого типа необходимо предварительно рассчитать диапазоны допустимых разбросов поверхностных плотностей пленки связующего (S_c) и препрега (S_n) с учетом разброса поверхностной плотности стеклоткани (по ТУ) и выбранного диапазона содержания связующего в препреге. В настоящее время можно выделить два принципиальных подхода к способу расчета допустимых разбросов поверхностной плотности связующего и препрега.

Первый метод основан на усреднении параметра поверхностной плотности препрега за счет массового содержания связующего, что ведет к получению более стабильных весовых характеристик препрегов, однако соотношение «наполнитель/связующее» может быть менее точным. Данный метод является весьма эффективным в тех случаях, когда к препрегу и ПКМ на его основе предъявляют высокие требования по конечной массе – например, для соблюдения баланса лопастей. Для расчета необходимо определить предельно допустимые значения S_c для выбранного диапазона M_m с учетом среднего значения S_n по ТУ и определить предельно допустимые значения S_n с учетом разброса значений S_n по ТУ по формулам

$$S_n = \frac{S_n}{1 - M_m}; \quad S_c = S_n - S_n. \quad (10)-(11)$$

Разброс по содержанию связующего в препреге устанавливается в зависимости от точности нанесения связующего на подложку (разброс поверхностной плотности пленки связующего) и поверхностной плотности наполнителя. Поскольку точность нанесения связующего на конкретном оборудовании обычно является константой, то ширина разброса по содержанию связующего будет в прямой зависимости от поверхностной плотности наполнителя: чем меньше поверхностная плотность наполнителя, тем больше необходимо установить разброс по содержанию связующего в процентном соотношении.

Результаты расчетов по данному методу для препрега марки ВПС-53/120 приведены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетные диапазоны значений характеристик препрега по первому методу

Содержание связующего в препреге M_m , %	Поверхностная плотность S_n стеклоткани Тип 120-14, г/м ²	Поверхностная плотность пленки связующего S_c , г/м ²	Поверхностная плотность препрега $S_{п\bar{p}}$, г/м ²
От 34 до 40	От 95 до 115	От 54 до 70	От 149 до 185

В результате, в случае использования стеклоткани со значением поверхностной плотности меньше, чем среднее по ТУ, на нее будет нанесено больше связующего и наоборот, а поверхностная плотность препрега всегда будет стремиться к среднему значению. На рис. 4 представлена зависимость допустимой по ТУ поверхностной плотности стеклоткани Тип 120-14 от поверхностной плотности препрега ВПС-53/120 в диапазоне массового содержания связующего от 34 до 40%, заштрихованные участки исключены из диапазона возможных значений S_n из-за рассчитанного диапазона S_c .

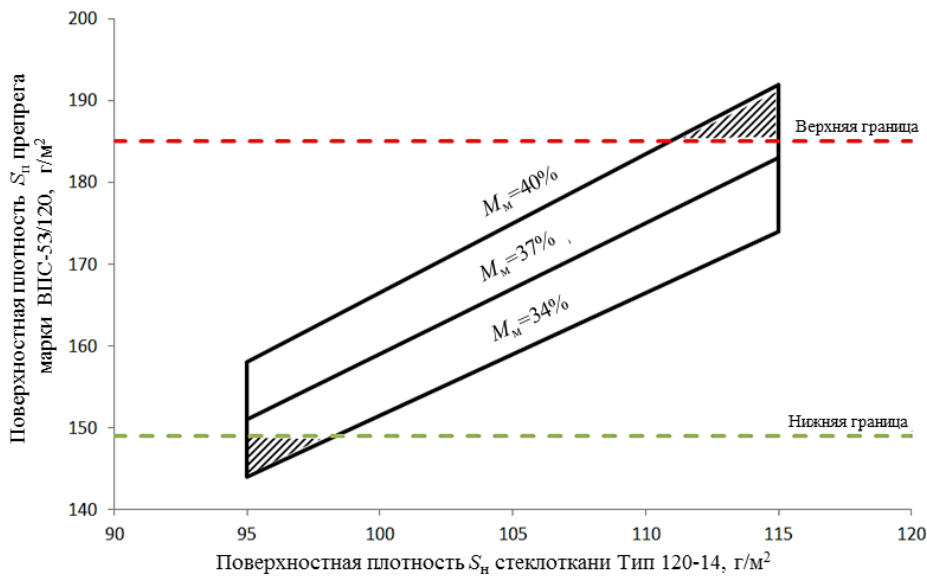


Рис. 4. Зависимость поверхностной плотности стеклоткани Тип 120-14 от поверхностной плотности препрега ВПС-53/120 в диапазоне массового содержания связующего от 34 до 40%

Второй метод расчета допустимых разбросов при пропитке препрегов направлен на усреднение массового содержания связующего за счет поверхностной плотности препрега, что позволяет достичь более точного соотношения «наполнитель/связующее», вне зависимости от того, насколько поверхностная плотность стеклоткани отличалась от среднего значения по ТУ. По формулам (10) и (11) необходимо провести расчет для каждого целого значения поверхностной плотности наполнителя из диапазона допустимых значений по ТУ. Результаты расчетов диапазонов значений характеристик препрега приведены в табл. 4.

Таблица 4

Расчетные диапазоны значений характеристик препрега по второму методу

Содержание связующего в препреге M_m , %	Поверхностная плотность S_n стеклоткани Тип 120-14, г/м ²	Поверхностная плотность пленки связующего S_c , г/м ²	Поверхностная плотность препрега $S_{п\bar{p}}$, г/м ²
От 34 до 40	От 95 до 115	От 49 до 77	От 144 до 192

Перед пропиткой необходимо определить S_n стеклоткани в рулоне и на его основе по формулам (10) и (11) рассчитать диапазоны S_c и $S_{п\bar{p}}$. Например, в случае если S_n

в рулоне стеклоткани составит 109 г/м^2 , диапазон S_c составит от 56 до 73 г/м^2 , а S_n – от 165 до 182 г/м^2 .

Поскольку основное назначение стеклопластика ВПС-53/120 связано с протекторной защитой углепластиков от контактной коррозии, приоритетной задачей при разработке препрега выбран второй метод, обеспечивающий более точное соотношение компонентов «связующее/наполнитель».

После расчета допустимых разбросов разработаны режимы пропитки препрега ВПС-53/120 и изготовлена партия препрега в количестве 125 м^2 . Описание подходов к процессу разработки режимов пропитки при изготовлении препрега будет рассмотрено в отдельной работе.

В табл. 5 приведены результаты анализа изготовленной партии препрега методом выжигания по ГОСТ Р 56796–2015.

Таблица 5

Характеристики препрега марки ВПС-53/120

Расстояние от начала рулона, м	Содержание связующего, % (по массе)			Поверхностная плотность, г/м^2					
				препрега			стеклоткани		
	Левый край	Сере-редина	Правый край	Левый край	Сере-редина	Правый край	Левый край	Сере-редина	Правый край
1	37,29	37,30	38,16	169	168	169	106	105	105
25	36,76	38,76	38,40	166	171	170	105	105	105
50	37,23	37,18	37,04	165	164	165	104	103	104
75	36,33	38,42	38,20	165	171	170	105	105	105
100	35,85	37,71	37,26	161	165	164	104	103	103
125	36,16	38,47	37,97	164	169	172	105	104	106
Минимальное значение	35,85			161			103		
Максимальное значение	38,76			172			106		
Среднее значение	37,47			167			105		
Стандартное отклонение	0,85			3,03			0,97		
Коэффициент вариации, %	2,27			1,81			0,93		
Допустимый диапазон*	$\frac{34-40}{37}$			$\frac{144-191}{167,5}$			$\frac{95-115}{105}$		

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Отдельно необходимо отметить важность определения параметра поверхностной плотности наполнителя в препреге. Данный параметр может характеризовать точность определения содержания связующего в препреге и впоследствии его необходимо взять за основу при построении зависимостей содержания связующего от толщины монослоя стеклопластика.

Полученные значения показателей препрега из табл. 5 и их статистический анализ позволяют сделать выводы об успешной верификации расчетов, после чего разработаны и выпущены технические условия на препрег стеклопластика марки ВПС-53/120 – ТУ1-595-10-1642–2016, а также изготовлены дополнительные партии препрега со значениями массового содержания связующего, близкими к верхней и нижней границам ТУ.

Для определения физико-механических и эксплуатационных характеристик стеклопластика ВПС-53/120 изготовлены плиты из трех партий препрега с различным содержанием связующего. Из этих плит выборочно методом выжигания определено массовое содержание связующего по ГОСТ Р 56682–2015. Полученные данные приведены на рис. 5 – показана линия тренда по фактическим результатам в сравнении с теоретически рассчитанными значениями массового содержания связующего от толщины монослоя.

Значения показали высокую сходимость и в дальнейшем при определении массового содержания связующего из стеклопластика на основе изготовленного препрега можно использовать полученную зависимость l (рис. 5). С достаточной для инженерных расчетов точностью можно использовать также теоретически рассчитанную по формуле (5) зависимость, однако следует учесть, что для ее расчета необходимо определять S_H с высокой степенью достоверности.

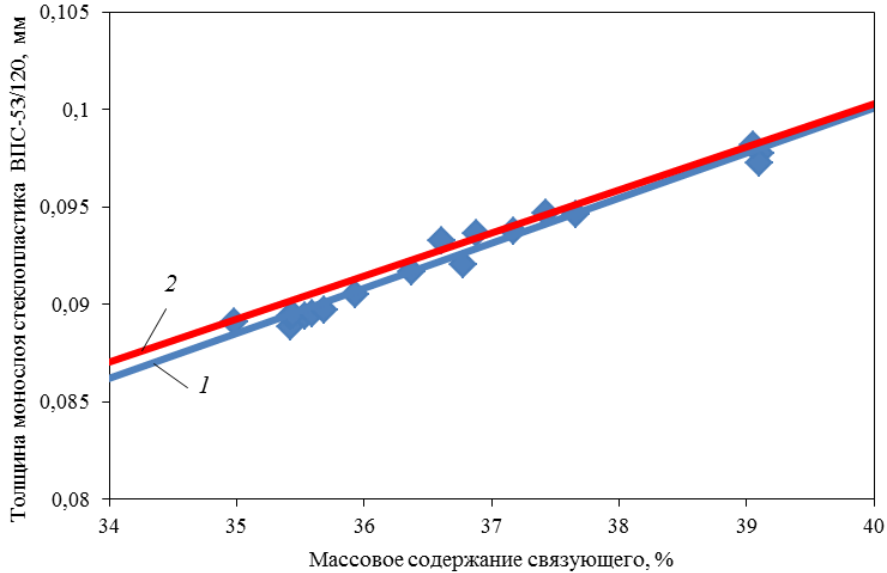


Рис. 5. Зависимость толщины монослоя от содержания связующего стеклопластика марки ВПС-53/120 по фактическим значениям (1) и теоретически рассчитанным (2)

Как указано во введении, одним из планируемых применений стеклопластика является изоляция углепластика от контакта с алюминиевым сотовым наполнителем при совместном формовании трехслойных панелей. Для оценки прочности соединения углепластиковых обшивок с протекторным слоем стеклопластика с сотовым наполнителем, проведены испытания на определение прочности при растяжении (нормальном отрыве) образцов трехслойной панели по ГОСТ Р 56783–2015. Для испытаний изготовлены образцы двух типов (рис. 6), результаты испытаний приведены в табл. 6.

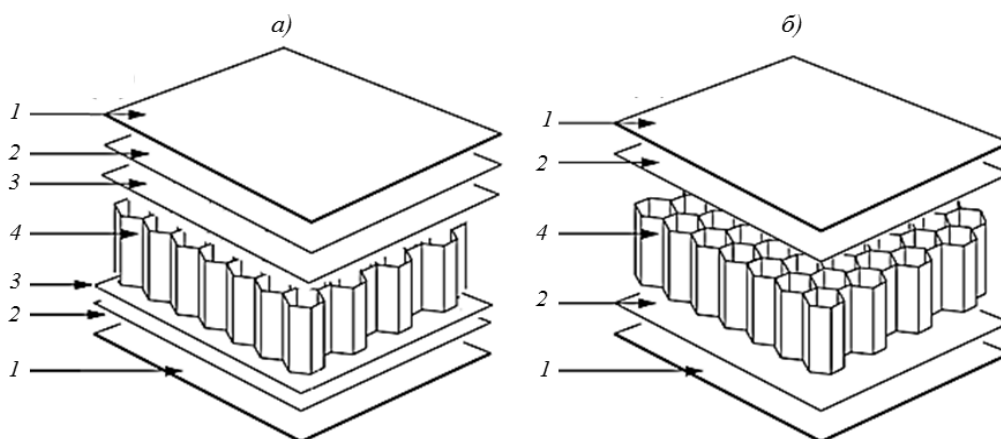


Рис. 6. Схема сборки образцов трехслойных панелей двух типов – с клеевой пленкой (а) и без клеевой пленки (б):

1 – обшивка из препрега углепластика марки ВКУ-45/УМТ-3К.РТН; 2 – слой препрега стеклопластика марки ВПС-53/120; 3 – слой клеевой пленки на основе клеевого связующего ВСК-48; 4 – сотовый наполнитель АМг2-Н-2.5-30 (высота 20 мм)

Таблица 6

**Результаты испытаний по ГОСТ Р 56783–2015 на определение прочности
при растяжении трехслойных панелей**

Свойства		Температура испытания, °С	Значения свойств для образцов	
			с клеевой пленкой	без клеевой пленки
Прочность при растяжении, МПа	\bar{x}	20	6,3	3,8
	$i_{\min}-i_{\max}$		6,0–6,8	3,2–4,4
	CV		5,2	12,0
	\bar{x}	80	5,8	3,7
	$i_{\min}-i_{\max}$		5,7–5,9	3,3–4,5
	CV		1,7	12,8
Характер разрушения образцов			Разрушение по сотовому заполнителю	Адгезионное разрушение между обшивкой и сотовым наполнителем

* Примечание: \bar{x} – среднее арифметическое значение; $i_{\min}-i_{\max}$ – минимальное и максимальное значения; CV – коэффициент вариации, %.

Наличие клеевой пленки увеличивает прочность при нормальном отрыве обшивки от сотового заполнителя до уровня, превосходящего прочность сотового заполнителя АМГ2-Н-2.5-30 высотой 20 мм.

Для определения механических характеристик на растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг в направлении основы и утка изготовлены образцы и проведены испытания на трех партиях стеклопластика. Полученные характеристики одной партии стеклопластика в направлении основы приведены в табл. 7.

Таблица 7

Механические свойства партии стеклопластика ВПС-53/120 в направлении основы

Свойства		Значения свойств при температуре испытания, °С			
		-60	20	80	100
Прочность при растяжении, МПа (ГОСТ Р 56785–2015)	\bar{x}	560	450	430	400
	$i_{\min}-i_{\max}$	530–580	425–470	420–435	380–420
	CV	3,9	4,1	1,5	4,4
	M_M	36,9	36,9	36,9	36,9
Модуль упругости при растяжении, ГПа (ГОСТ Р 56785–2015)	\bar{x}	28	25	23	22
	$i_{\min}-i_{\max}$	27–30	24–26	23–23	22–23
	CV	4,6	3,3	–	2,0
	M_M	36,9	36,9	36,9	36,9
Прочность при сжатии, МПа (ГОСТ Р 56812–2015)	\bar{x}	480	500	420	360
	$i_{\min}-i_{\max}$	440–515	485–510	395–445	340–380
	CV	6,9	1,8	4,3	4,8
	M_M	36,0	37,6	37,6	36,0
Прочность при изгибе, МПа (ГОСТ Р 56805–2015)	\bar{x}	840	690	580	530
	$i_{\min}-i_{\max}$	780–860	680–700	560–590	415–590
	CV	3,9	1,6	2,0	12,6
	M_M	38,0	37,5	37,5	38,0
Прочность при межслойном сдвиге (короткая балка), МПа (РД 50-675–88)	\bar{x}	79	63	57	50
	$i_{\min}-i_{\max}$	77–81	61–64	55–58	49–51
	CV	2,1	1,9	2,1	1,7
	M_M	36,9	36,9	36,9	36,9
Предел прочности при сдвиге в плоскости армирования, МПа, при деформации сдвига 5% (ГОСТ 32658–2014)	\bar{x}	–	71	56	–
	$i_{\min}-i_{\max}$	–	69–74	55–57	–
	CV	–	2,7	1,5	–
	M_M	–	36,5	36,5	–

Примечание: \bar{x} – среднее арифметическое значение; $i_{\min}-i_{\max}$ – минимальное и максимальное значения; CV – коэффициент вариации, %; M_M – массовое содержание связующего, %.

Для оценки влияния эксплуатационных факторов на механические свойства стеклопластика проведены ускоренные испытания на воздействие агрессивных сред: воды, влаги, топлива и масла. Результаты испытаний на определение прочности при сжатии после выдержки в различных средах в сравнении с исходными образцами приведены на рис. 7. Для повышения сходимости результатов и снижения возможной ошибки исходные образцы и образцы для экспонирования в различных средах изготавливали из одной плиты стеклопластика. Образцы выдерживали в агрессивных средах в соответствии с ГОСТ 12020–72 в течение 90 сут. Испытания на сжатие проводили в соответствии с ГОСТ Р 56812–2015.

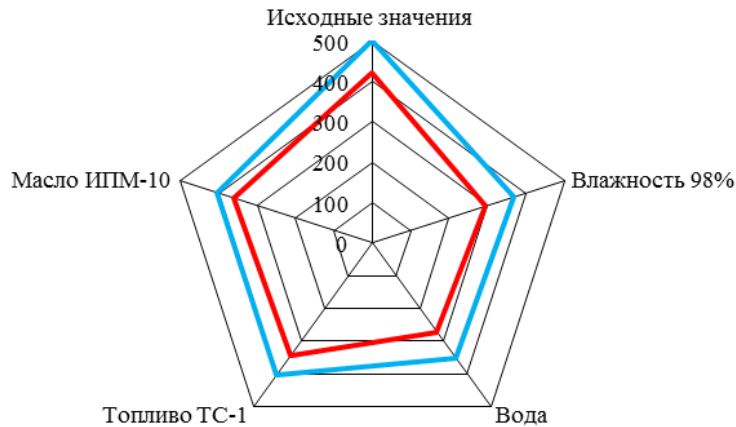


Рис. 7. Прочность при сжатии (средние значения) при 20 (—) и 80°C (—) образцов из стеклопластика ВПС-53/120 после экспонирования в течение 90 сут в агрессивных средах в сравнении с исходными значениями

Помимо приведенных характеристик, для стеклопластика марки ВПС-53/120 проведены исследования свойств в объеме общей квалификации (паспортизации). Физические, механические, диэлектрические, эксплуатационные и другие свойства могут быть предоставлены по запросу в виде выписки из дополнения №3 к паспорту №1910.

Обсуждение и заключения

В результате проведенной работы осуществлен выбор параметров и рассчитаны соотношения компонентов препрега стеклопластика марки ВПС-53/120. Изготовлены и исследованы партии препрега и образцы стеклопластика марки ВПС-53/120. В табл. 8 приведены основные сравнительные свойства стеклопластика марки ВПС-53/120 и аналогов иностранного производства в направлении основы, значения характеристик упруго-прочностных свойств нормализованы по ГОСТ Р 57865–2017 на $V_H=45\%$.

Таблица 8

Сравнительные свойства стеклопластиков на основе эпоксидных связующих и стеклянной ткани тип (арт.) 120

Свойства	Значения свойств стеклопластика								
	ВПС-53/120		на основе эпоксидных связующих фирмы Hexcel (США)						
			F155		F161	F185	F263	913	
Температура испытания, °С	20	80	20	93	20	177	20	20	20
Прочность при растяжении, МПа	450	430	465	380	460	405	385	435	485
Модуль упругости при растяжении, ГПа	25	23	25	21	21	18	26	28	21
Прочность при сжатии, МПа	510	430	525	360	490	300	350	–	–

Стеклопластик марки ВПС-53/120 предназначен для создания слабо- и средненагруженных конструкций летательных аппаратов, в том числе в качестве изолирующего слоя в зоне контакта «металл–углепластик» при изготовлении агрегатов механизации самолета. Материал может эксплуатироваться при температурах от -60 до +80°С.

Во ФГУП «ВИАМ» изготавливают и поставляют препрег стеклопластика марки ВПС-53/120 по ТУ1-595-10-1642–2016.

Благодарности

Авторский коллектив выражает благодарность за консультации ведущему инженеру ФГУП «ВИАМ» Л.И. Авдюшкиной.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Методы исследования конструкционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системой // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. №4. С. 17–20.
3. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №4. С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
4. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ // *Авиационная промышленность*. 2009. №4. С. 36–46.
5. Мельников Д.А., Ильичев А.В., Вавилова М.И. Сравнение стандартов для проведения механических испытаний стеклопластиков на сжатие // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. №3 (51). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-6-6.
6. Каримова С.А., Павловская Т.Г., Чесноков Д.В., Семенова Л.В. Коррозионная активность углепластиков и защита металлических силовых конструкций в контакте с углепластиком // *Российский химический журнал*. 2010. Т. 54. №1. С. 110–116.
7. Синявский В.С., Вальков В.Д., Калинин В.Д. Коррозия и защита алюминиевых сплавов. М.: *Металлургия*, 1986. 368 с.
8. Bosze E., Nutt S. Potential for Galvanic Corrosion between Carbon Fibers and Al Wires in ACCC/TW Conductor // *Gill Foundation Composites Center University of Southern California*. 2008. URL: https://www.ctcglobal.com/ftp/Reports/Galvanic_Corrosion_Test.pdf (дата обращения: 20.09.2018).
9. Киселев Б.А. Стеклопластики. М.: Гос. науч.-технич. изд-во хим. лит. 1961. 240 с.
10. Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. М.: *Химия*, 1981. 232 с.
11. Скудра А.М., Булаве Ф.Я. Прочность армированных пластиков. М.: *Химия*, 1982. 216 с.
12. Тарнопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А. Пространственно-армированные композитные материалы: справочник. М.: *Машиностроение*, 1987. 224 с.
13. Тарнопольский Ю.М., Скудра А.М. Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков. Рига: *Издательство Зинатне*, 1966. 260 с.
14. Немец Я., Серенсен С.В., Стреляев В.С. Прочность пластмасс. М.: *Машиностроение*, 1970. 335 с.
15. Кучер Н.К., Двейрин А.З., Земцов М.П., Анкянец О.К. Характеристики упругости слоистых тканых стеклопластиков // *Проблемы прочности*. 2004. №6. С. 26–32.
16. Кучер Н.К., Двейрин А.З., Заразовский М.Н., Земцов М.П. Деформирование слоистых стеклопластиков, армированных тканью сатиновой структуры при комнатной и низких температурах // *Механика композитных материалов*. 2004. №3. С. 341–354.

17. Мельников Д.А., Громова А.А., Раскутин А.Е., Курносов А.О. Теоретический расчет и экспериментальное определение модуля упругости и прочности стеклопластика ВПС-53/120 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №1 (49). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.07.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-8-8.
18. Тимошков П.Н., Коган Д.И. Современные технологии производства полимерных композиционных материалов нового поколения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.09.2018).
19. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносов А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. и Toho Tenax // Авиационные материалы и технологии. 2018. №3 (52). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
20. Курносов А.О., Вавилова М.И., Мельников Д.А. Технологии производства стеклянных наполнителей и исследование влияния аппретирующего вещества на физико-механические характеристики стеклопластиков // Авиационные материалы и технологии. 2018. №1 (50). С. 64–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-64-70.