

поглощение после трех месяцев камеры тропиков составляет 1,28%, что на 38% ниже, чем после экспозиции при $T=70^{\circ}\text{C}$ и $\phi=98\%$. Испытания при повышенной температуре показали, что после экспозиции в камере тропиков прочность остается на уровне исходной прочности, а после 3 мес экспозиции при $T=70^{\circ}\text{C}$ и $\phi=98\%$ сохранение прочности при изгибе составляет лишь 77% от исходной прочности при повышенной температуре.

Таким образом, исследование конструкционных и эксплуатационных характеристик органопластиков на основе нового арамидного волокна Русар показало, что органопластики второго поколения имеют пониженное водопоглощение, повышенную стабильность свойств в тепловлажностных условиях и повышенные на 20–30% прочность и модуль упругости при растяжении.

Использование органопластиков на основе волокна Русар для изготовления средне- и слабонагруженных деталей планера самолетов (например, Ту-334: обшивки зализа крыла; элементы закрылка; форкиль; обшивки нижней части киля; обшивки носков крыла и др.) позволит увеличить эксплуатационную надежность авиационных конструкций, в том числе в условиях теплого влажного климата.

*Ю.О. Попов, Т.В. Колокольцева,
Л.С. Беспалова, А.В. Хрульков, Д.И. Коган*

СТЕКЛОПЛАСТИК ВПС-31 И ГИБРИДНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ВКГ-5 ИЗ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ ПРЕПРЕГОВ НА ОСНОВЕ РАСПЛАВНОГО СВЯЗУЮЩЕГО И ЖГУТОВЫХ УГЛЕ-, СТЕКЛОПОЛНИТЕЛЕЙ

В зарубежной практике достаточно широкое применение получила технология «сухой» намотки деталей летательных аппаратов из однонаправленных лент (препрегов) на основе армирующих наполнителей в виде непрерывных стекло-, угле-, органо-волокон и различных связующих [1–3]. В отечественной промышленности с середины 70-х годов прошлого века, в изделиях последнего поколения разработки ОАО «МВЗ им. М.Л. Миля» применяется технология намотки лонжеронов лопастей несущих и рулевых винтов вертолетов. Казанским вертолетным заводом, ОАО «Роствертол» и заводом «Вперед» освоена серийная технология производства лопастей с лонжеронами из ПКМ методом «сухой» спиральной намотки.

Базовыми технологиями производства таких лонжеронов являются:

- получение однонаправленных лент препрегов на установках типа УЛС;
- намотка заготовок лонжеронов на станках типа НЛ;
- формование лонжеронов в ступельных пресс-формах или автоклаве.

Использование технологии намотки лонжеронов лопастей на станках с ЧПУ позволяет механизировать процесс сборки заготовок, сократить влияние человеческого фактора на качество сборки и тем самым стабилизировать свойства получаемых деталей.

Опыт применения гибридного материала на основе препрега ВМПС/УКН-М-3К/УП2227 на Казанском вертолетном заводе для изготовления лонжеронов позволил значительно повысить крутильную жесткость лонжеронов и увеличить подъемную силу винтов. Так, на вертолете Ми-38МТ использование гибридных материалов в лонжеронах лопастей позволило увеличить подъемную силу винта более чем на 1 тс.

Слабым звеном лопастного производства являются «недолгоживущие» препреги (5–12 дней при 20°C), низкопроизводительная, экологически опасная, энергоемкая рас-

творная технология их производства. К недостаткам этой технологии также следует отнести то, что препреги необходимо производить на месте потребления, что, в силу специфики производства, нежелательно на авиационных предприятиях по многим причинам.

В 2001 г. по заданию ОКБ им. М.Л. Миля перед авторами была поставлена задача по разработке однонаправленных препрегов с повышенной жизнеспособностью (не менее 1 мес при 20°C) и ПКМ на их основе: стеклопластика с уровнем физико-механических свойств не ниже, чем у однонаправленного стеклопластика ВПС-18 (на связующем ЭДТ-10П), и с температурой эксплуатации материала не менее 100°C, а также гибридного стеклоуглепластика с модулем упругости при растяжении не менее 80 ГПа.

При разработке препрегов авторами принята концепция так называемой «расплавной технологии», основанной на совмещении лент сухого наполнителя с пленкой расплавного связующего, нанесенного на бумажную подложку. Для реализации этой технологии была модернизирована установка УЛС-3М под производство расплавных препрегов шириной до 70 мм (рис. 1).

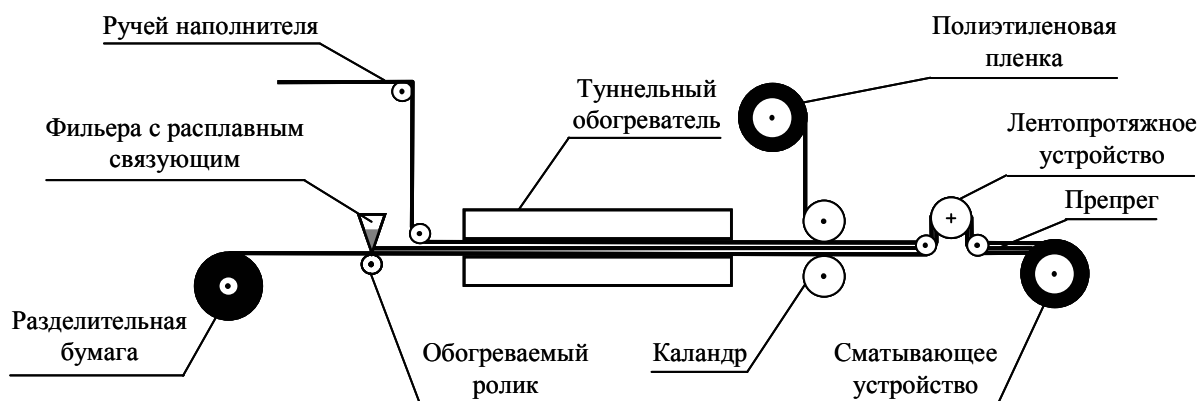


Рис. 1. Принципиальная схема пропитки однонаправленных наполнителей расплавом связующего на модернизированной установке УЛС-3М

Поливочный узел установки позволяет формировать пленку связующего с поверхностной плотностью от 50 до 250 г/м² из различных расплавных связующих при температуре от 50 до 120°C с динамической вязкостью от 15 до 60 Па·с.

В качестве «модельного» связующего, на котором отработывалась технология полива связующего на подложку и совмещения его с волокнистым наполнителем при приемлемых температурных режимах, выбрано эпоксидное расплавное связующее типа ВСП-3, рецептура которого корректировалась в процессе отработки технологии изготовления однонаправленных препрегов с оптимальными технологическими свойствами, обеспечивающими качественную, «комфортную» ручную сборку и намотку заготовок деталей.

На следующем этапе работы проводилась оптимизация рецептуры связующего ВСП-3 с целью повышения теплостойкости матрицы и снижения ее очень высокой реакционной активности при сохранении оптимальных технологических свойств препрегов на его основе.

Задачи прикладного материаловедения, связанные с разработкой материалов, решаются, как правило, в два этапа. На первом этапе выбирается принципиальная композиция материала (в данном случае эпоксидное расплавное связующее типа ВСП-3) и намечаются пределы возможного содержания компонентов в выбранной композиции. На втором этапе определяется оптимальное содержание в материале отдельных компонентов. При исследовании и оптимизации сложных систем, в частности многокомпонентных материалов, наиболее эффективными методами выбора оптимальных концен-

траций компонентов являются методы, связанные с использованием идей математической теории эксперимента, получивших названия методов *статистического планирования эксперимента* [4]. Планирование эксперимента (ПЭ) сводится к моделированию исследуемой системы, получению математического описания общих закономерностей этой системы на уровне статистических моделей и к последующему их анализу. В данной работе в качестве исследуемой системы рассматривали состав эпоксидного расплавного связующего, защищенный патентом РФ № 2176255.

В качестве независимых факторов, определяющих свойства самого связующего, а также ПКМ на его основе, были выбраны:

X_1 – содержание отвердителя, %;

X_2 – содержание ускорителя, %.

Содержание «смоляной» части связующего (X_3) поддерживали на постоянном уровне и равным: $100-(X_1+X_2)$, %.

В терминах планирования эксперимента исследуемые свойства материала принято называть *функциями отклика* системы и обозначать как Y_i , где i – любой показатель свойств системы.

В данной работе в качестве таких функций отклика рассматривали характеристики связующего, получаемые методами термического анализа (ТА). Все определения проводили на приборах термоаналитического комплекса швейцарской фирмы «Mettler Toledo».

Реакционную способность неотвержденного связующего исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) при нагревании образцов со скоростью 10 град/мин в интервале температур от 20 до 300°C. При этом снимались термограммы, основными «характеристическими» точками которых являлись: температуры начала и окончания реакции отверждения T_0 и T_e , температура максимума (пика) реакции T_m . Тепловой эффект ΔH реакции отверждения рассчитывали интегрированием аппроксимированной кривой ДСК в температурном интервале от T_0 до T_e . В качестве критерия оценки реакционной активности (или «латентности») связующего по термограммам ДСК использовали такую расчетную характеристику, как

$$L=h/(\Delta T \cdot m),$$

где h – величина теплового потока при температуре T_m , мВт; $\Delta T=T_e-T_0$, °C; m – масса навески образца, мг.

Важным показателем работоспособности конструкционного материала является его *деформационная теплостойкость*, определяемая температурой стеклования T_c и величиной относительной деформации отвержденной матрицы при переходе ее из стеклообразного состояния в высокоэластическое при воздействии механических напряжений. Температурную зависимость деформации при воздействии механической нагрузки определяли с помощью термомеханического анализа (ТМА) в режиме «пенетрации». Температуру стеклования T_c определяли по термограмме ТМА как температуру, соответствующую точке пересечения касательной к линейному участку термомеханической кривой, предшествующему переходу из стеклообразного в высокоэластическое состояние, с касательной, проведенной в точке максимальной скорости деформации.

Таким образом, в качестве откликов Y_i системы при поиске оптимального состава связующего использовали следующие показатели: T_0 , T_m , ΔH , T_c , L .

Далее задача разработки нового материала свелась к исследованию и решению системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} T_0 &= f(X_1, X_2) \\ T_m &= f(X_1, X_2) \\ \Delta H &= f(X_1, X_2) \\ T_c &= f(X_1, X_2) \\ L &= f(X_1, X_2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

При использовании ПЭ эти зависимости с достаточной степенью точности (в ограниченных областях изменения независимых переменных) аппроксимируются многочленами вида:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + \dots \quad (2)$$

Процедуры, применяемые при решении задач с помощью ПЭ, позволяют вычислить коэффициенты b_i и получить модельные зависимости вида (1).

Выбор *плана эксперимента* проводился с учетом так называемой «априорной» информации: предварительно методами ТА были исследованы 6 составов (варианты 1, 2, 3, 4, 5, 6 – табл. 1) расплавленного связующего с различным содержанием отвердителя и ускорителя. Результаты исследования свойств различных вариантов связующих представлены в табл. 1. Анализ этих результатов показал, что в качестве плана эксперимента целесообразно выбрать *ортогональный план второго порядка*, близкий к *D-оптимальному* и позволяющий получить взаимно независимые оценки коэффициентов моделей (2).

Таблица 1

Условный номер состава	Показатели реакционной способности связующих			ΔH , Дж/г
	T_0	T_m °C	T_c	
1	181	198	126,3	348,6
2	137	156	145,4	240,3
3	131	150	150,2	354,7
4	138	157	151,7	373,3
5	136	150	146,7	383,6
6	137	153	149,8	375,2

Для реализации выбранного плана необходимо было осуществить выбор уровней варьирования независимых переменных, т. е. определить пределы изменения содержания отвердителя X_1 и ускорителя X_2 в рецептуре связующего при установлении зависимостей «состав–свойство». Критериями оценки целесообразности исследования свойств связующего данного состава выступали следующие требования к связующему:

- $\Delta H \geq 400$ Дж/г, что должно свидетельствовать о достаточно полном прохождении реакции отверждения (степень конверсии $\geq 95\%$);
- $T_0 \geq 120^\circ\text{C}$, что способствует более качественному распределению отверждающей системы в сплаве смол;
- реакционная активность связующего, характеризуемая величиной L , не должна быть очень высокой, т. е. оптимальный состав должен иметь достаточно большой температурный интервал прохождения реакции ($T_c - T_0$), что делает связующее более технологичным в процессе формирования ПКМ;
- температура стеклования отвержденного связующего $T_c \geq 145^\circ\text{C}$.

На следующем этапе составляли матрицу плана эксперимента. В ПЭ принято пользоваться символикой матричной алгебры [4] и планом эксперимента называть некоторую прямоугольную матрицу, задающую своими строками и столбцами число и условия проведения опытов, необходимых и достаточных для последующей оценки ко-

эффициентов выбранной модели исследуемой системы. При этом принято оперировать не натуральными значениями независимых переменных, а *нормированными*. Минимальному значению независимой переменной присваивается значение -1, максимальному +1, среднее значение в нормированном виде обозначается как 0.

В работе в соответствии с выбранным планом второго порядка исследовали девять составов связующего с содержанием ускорителя X_1 и отвердителя X_2 . Матрица плана и средние значения показателей (отклики), полученных методами ДСК и ТМА, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Ортогональный центральный композиционный план (ОЦКП) типа 2^2							
Условный номер состава	Матрица плана		Отклики				
	X_1	X_2	ΔH	T_0	T_m	T_c	L
18-1	-1	-1	459	170	185	165	114
18-2	+1	-1	439	155	173	174	79
18-3	-1	+1	432	171	185	141	152
18-4	+1	+1	417	156	174	160	100
18-5	+1	0	417	156	174	168	89
18-6	-1	0	418	170	185	179	118
18-7	0	+1	417	162	178	167	113
18-8	0	-1	402	160	178	176	70
18-9	0	0	423	162	179	173	97

Анализ результатов табл. 2 показывает, что область изменения содержания отвердителя и ускорителя для решения поставленных задач выбрана верно, так как в этой области свойства связующего существенно зависят от его состава. В зависимости от содержания X_1 и X_2 показатели ТА менялись в следующих пределах:

$$\Delta H=402\div 461 \text{ Дж/г}; T_0=131\div 170^\circ\text{C}; T_m = 150\div 198^\circ\text{C}; T_c = 128\div 176^\circ\text{C}.$$

Реализация плана эксперимента позволила получить необходимые данные для расчета модельных зависимостей (1) свойств эпоксидного связующего от соотношения в нем отвердителя и ускорителя. Функции отклика системы на изменение ее состава имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} T_c &= 181,74 + 2,83X_1 - 7,83X_2 + 2,5X_1X_2 - 10X_1^2 - 12X_2^2 \\ T_0 &= 163,7 - 7,3X_1 + 0,67X_2 - 0,77X_1^2 - 2,77X_2^2 \\ T_m &= 182,3 - 5,67X_1 + 0,17X_2 + 0,25X_1X_2 - 1,73X_1^2 - 3,19X_2^2 \\ \Delta H &= 417 - 6X_1 - 5,67X_2 - 1,25X_1X_2 + 9,96X_1^2 + 1,96X_2^2 \\ L &= 93 - 19X_1 + 17X_2 - 4X_1X_2 + 14X_1^2 + 2,2X_2^2 \end{aligned} \quad (3)$$

В трехмерной системе координат X_1, X_2, Y_i любой из этих функций соответствует «поверхность отклика», характеризующая закономерность изменения данного свойства (T_0, T_m и т. п.) в зависимости от содержания в связующем ускорителя и отвердителя X_1 и X_2 .

Если эту поверхность рассечь системой плоскостей $T_0=\text{const}, T_m=\text{const}$ и т. д. и спроецировать линии пересечения на плоскость $X_1O X_2$, точки которой соответствуют возможным сочетаниям содержаний ускорителя и отвердителя в связующем, получим

некоторую систему линий – «линий уровня». На каждой такой линии исследуемое свойство (T_0 , T_m , ΔH и т. д.) постоянно. При переходе с линии на линию свойство меняется и может достигать экстремального значения.

На рис. 2–6 представлена графическая интерпретация зависимостей в виде линий уровня. Полученные зависимости позволяют вычислить значения функций для любого состава связующего в пределах исследованной области изменения независимых переменных.

Например, функция T_c (температура стеклования связующего) достигает максимума (186°C) при следующих нормированных значениях ускорителя и отвердителя: $X_1=0,1$ и $X_2=-0,36$. Однако при выборе оптимальной рецептуры связующего в расчет принимались также остальные показатели реакционной активности разрабатываемого связующего. С учетом заданных значений T_0 , T_m и ΔH в качестве оптимальной была выбрана рецептура, характеризующаяся следующими значениями ускорителя и отвердителя $X_1=0$ и $X_2=-0,8$ (нормированные значения).

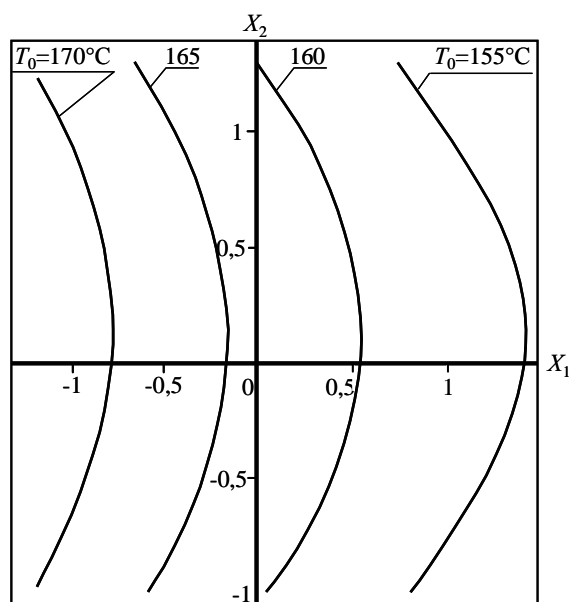


Рис. 2. Зависимость температуры начала активной реакции отверждения связующего (T_0 , $^\circ\text{C}$) от содержания ускорителя (X_1) и отвердителя (X_2):
 $T_0=163,7-7,3X_1+0,67X_2-0,77 X_1^2-2,77 X_2^2$

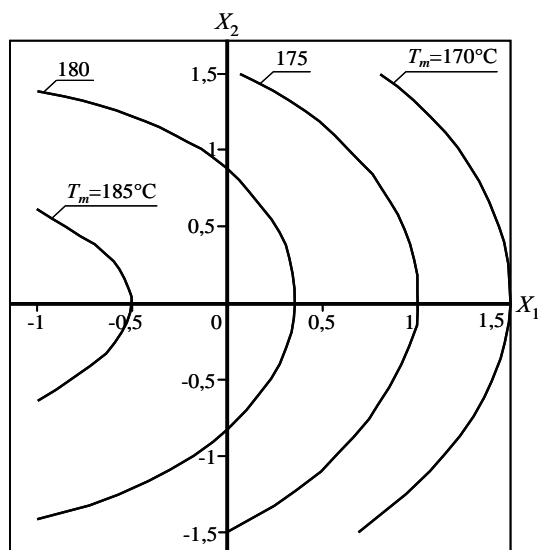


Рис. 3. Зависимость температуры пика (T_m , $^\circ\text{C}$) реакции отверждения связующего от содержания ускорителя (X_1) и отвердителя (X_2):
 $T_m=182,3-5,67X_1+0,17X_2+0,25X_1X_2-1,73 X_1^2-3,19 X_2^2$

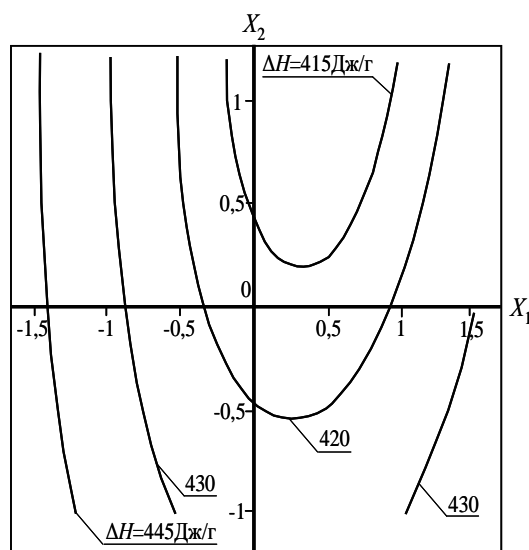


Рис. 4. Зависимость теплового эффекта (ΔH , Дж/г) реакции отверждения связующего от содержания ускорителя (X_1) и отвердителя (X_2):
 $\Delta H=417-6X_1-5,67X_2-1,25X_1X_2-9,96 X_1^2+1,96 X_2^2$

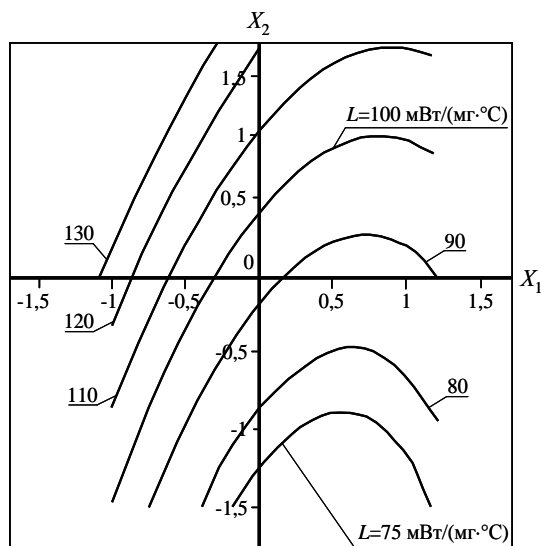


Рис. 5. Зависимость «латентности» (L , мВт/(мг·°C)) связующего от содержания ускорителя (X_1) и отвердителя (X_2):
 $L=93 - 19X_1 + 17X_2 - 4X_1X_2 + 14 X_1^2 + 2,2 X_2^2$

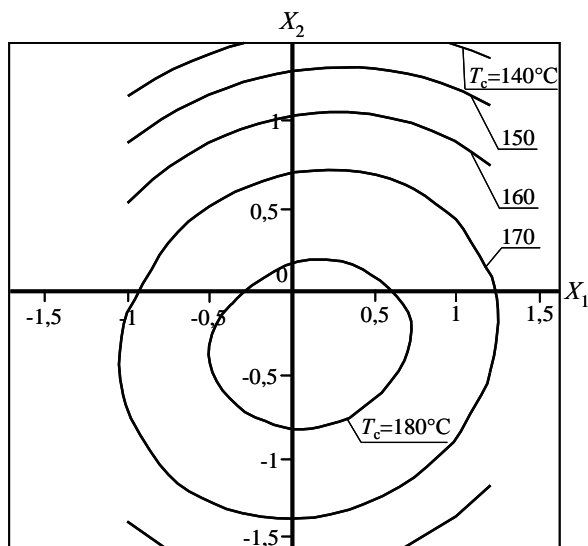


Рис. 6. Зависимость температуры стеклования (T_c , °C) отвержденного связующего от содержания ускорителя (X_1) и отвердителя (X_2):
 $T_c=181,74+2,83X_1-7,83X_2+2,5X_1X_2-10 X_1^2 -12 X_2^2$

Связующее при этом обладало следующими свойствами:

$$\Delta H=424 \text{ Дж/г}; T_0=162^\circ\text{C}; T_m = 179^\circ\text{C}; T_c = 176^\circ\text{C}.$$

Таким образом, была выбрана оптимальная отверждающая система, позволяющая обеспечить температуру стеклования связующего $\sim 170^\circ\text{C}$ и теплостойкость пластика $155\text{--}160^\circ\text{C}$.

В табл. 3 представлены физико-химические свойства разработанного связующего ВСП-3М (патент РФ № 2263690).

Таблица 3

Свойства связующего ВСП-3М (ТУ 1-595-732–2003)

Наименование показателя	Значения свойств
Время желатинизации при температуре 120°C , мин	70–85
Температура начала активной реакции отверждения (скорость нагрева $10^\circ\text{C}/\text{мин}$), °C	160–165
Температура пика ДСК (скорость нагрева $10^\circ\text{C}/\text{мин}$), °C	178–182
Тепловой эффект при отверждении (скорость нагрева $10^\circ\text{C}/\text{мин}$), Дж/г	390–415
Температура стеклования, °C	173–179

На следующем этапе обрабатывали технологию получения на связующем ВСП-3М и жгутовых наполнителях однонаправленных препрегов с заданным уровнем физико-технологических свойств и геометрических параметров. В процессе работы устанавливали модели зависимости этих показателей от технологических параметров процесса получения пленки расплавленного связующего на установке УЛС-3М. Исследования проводили с использованием ПЭ.

В качестве независимых переменных (технологических факторов) процесса получения пленок расплава связующего были выбраны:

- x_1 – температура перевалочного ролика T_p ;
- x_2 – зазор t между соплом фильеры и перевалочным роликом;
- x_3 – скорость протяжки подложки v .

Уровни варьирования переменных x_1, x_2, x_3 приведены в табл. 4.

Таблица 4

Уровни варьирования независимых переменных				
Уровни варьирования переменных	Условное обозначение уровней (коды)	Значения переменных факторов (см. текст)		
		x_1 (°C)	x_2 (мм)	x_3 (м/мин)
Верхний	+1	120	0,3	2,5
Нижний	-1	90	0,2	1,3
Средний	0	105	0,25	1,9

В качестве выходных параметров процесса (откликов системы Y_i) были выбраны следующие показатели:

m – масса 1 погонного метра пленки связующего;

b – ширина пленки;

δ – толщина пленки;

ρ_s – поверхностная плотность пленки как производная величина от первых двух.

На первом этапе в качестве плана эксперимента был выбран линейный факторный план, матрица которого предполагает реализацию полного факторного эксперимента (ПФЭ) со всеми возможными комбинациями уровней исследуемых факторов, т. е. полный перебор всех возможных сочетаний значений T_p, t, v . Матрица плана предполагала проведение 9 «экспериментов» (9 различных режимов нанесения пленки связующего). Реализация программы эксперимента позволила получить необходимые данные для расчета следующих модельных зависимостей свойств пленки от технологических параметров ее нанесения:

$$\begin{aligned}
 m &= 7,18 - 0,38T_p + 2,58t - 0,63v; \\
 \rho_s &= 104,63 - 10,63T_p + 41,13t - 19 t \cdot v; \\
 b &= 70,25 + 4T_p - 3,25t - 5,5 v - 7,5 t \cdot v; \\
 \delta &= 0,085 - 0,01T_p - 0,03t - 0,015 t \cdot v.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Проверка полученных моделей на адекватность [4] показала, что на следующем этапе планирования эксперимента необходимо перейти к реализации плана второго порядка ОЦКП (ортогонального центрального композиционного плана) типа 2^3 [2], матрица которого приведена в табл. 5.

Таблица 5

Ортогональный центральный композиционный план второго порядка (ОЦКП типа 2^3)

Порядковый номер опыта	Матрица плана			Режимы расплава связующего			Параметры пленки связующего			
	x_1	x_2	x_3	$T_p, ^\circ\text{C}$	$t, \text{мм}$	$v, \text{м/мин}$	$m, \text{г}$	b	δ	$\rho_{s,2} \text{г/м}^2$
								мм		
1	-1	-1	-1	90	0,2	1,3	4,6	69,5	0,06	66
2	+1	-1	-1	120	0,2	1,3	4,3	81,5	0,04	53
3	-1	+1	-1	90	0,3	1,3	8,6	64	0,11	134
4	+1	+1	-1	120	0,3	1,3	8,3	79,5	0,09	104
5	-1	-1	+1	90	0,2	2,5	4,7	60,5	0,07	78
6	+1	-1	+1	120	0,2	2,5	3,7	68	0,04	54
7	-1	+1	+1	90	0,3	2,5	7,8	57,5	0,11	136
8	+1	+1	+1	120	0,3	2,5	6,8	62,5	0,10	109
9	-1,215	0	0	123	0,25	1,9	5,5	69,5	0,07	79
10	+1,215	0	0	87	0,25	1,9	7,5	62,5	0,09	120
11	0	-1,215	0	105	0,31	1,9	8,1	60,0	0,11	135
12	0	+1,215	0	105	0,19	1,9	4,0	65,5	0,05	61
13	0	0	-1,215	105	0,25	2,6	5,9	58,5	0,08	100
14	0	0	+1,215	105	0,25	1,2	6,9	68,0	0,09	101,5
15	0	0	0	105	0,25	1,9	5,9	60,0	0,07	97,5

В табл. 5 представлены так называемые «отклики» системы (параметры пленки связующего), полученные в процессе осуществления эксперимента по выбранному плану. Применение математического аппарата регрессионного анализа [4] позволило получить следующие зависимости свойств пленки от технологических параметров ее нанесения:

$$\begin{aligned} m &= 6,23 + 0,84t - 0,14v - 0,18T_p \cdot v - 0,23t \cdot v; \\ \delta &= 0,079 - 0,005T_p + 0,01t + 0,0029v + 0,0025T_p \cdot t; \\ b &= 60,14 + 2,9T_p - 3,15v - 1,9T_p \cdot v + 3,9T_p^2 + 1,7t^2 + 2v^2; \\ \rho_s &= 102,8 - 4T_p + 13t + 2v - 2,5T_p \cdot t - 3,4T_p^2 - 4,4t^2 - 2,6v^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Полученные зависимости (5) параметров пленки связующего от технологических параметров процесса ее получения на установке УЛС-3М позволили выбрать оптимальные параметры технологического процесса получения однонаправленных препрегов с регулируемым наносом (весовым содержанием) расплавленного связующего ($32 \pm 2\%$), максимальной возможной шириной (не менее 60 мм) при скорости пропитки (не менее 1,5 м/мин), обеспечивающей достаточно высокую производительность процесса. На установке УЛС-3М была отработана технология изготовления препрегов из связующего ВСП-3М и жгутовых наполнителей – стеклоровинга РВМПН-10-1200-14 (для стеклопластика ВПС-31) и сочетания РВМПН-10-400-14 и углежгута УКН-М-3К (взятых в соотношении 2:1 по массе – для стеклоуглепластика ВКГ-5). Показатели свойств препрегов представлены в табл. 6.

Таблица 6

Свойства однонаправленных препрегов

Наименование свойств препрегов	Значения свойств препрегов (в состоянии поставки)	
	стеклопластика ВПС-31 (ТУ 1-595-25-869-2005)	стеклоуглепластика ВКГ-5 (ТУ 1-595-25-789-2005)
Поверхностная плотность, г/м ²	440±40	300 ± 30
Содержание связующего, % (по массе)	29–35	32–38
Содержание летучих веществ, %	Не более 0,5	
Длина ленты препрега в упаковке, м	До 250	До 300
Ширина ленты препрега, мм	От 10 до 300	От 10 до 120
Толщина монослоя пластика, мм	0,21–0,27	0,15–0,16
Жизнеспособность при 20°C, сут	90	
Гарантия хранения, мес (при -15°C)	12	

С целью оптимизации режима формования пластиков ВПС-31 и ВКГ-5 была исследована кинетика отверждения связующего ВСП-3М в разработанных препрегах. Исследование проводили согласно международным стандартам ASTM 698–2000 и ASTM 2041–2001 методом ДСК на термоаналитическом анализаторе швейцарской фирмы «Mettler Toledo». Выбор оптимального режима отверждения осуществляли с помощью специально разработанной компьютерной программы на основании предварительно рассчитанных кинетических параметров отверждения связующего в препрегах.

На следующем этапе работы методом послойной выкладки препрега с последующим формованием пакета в автоклаве по выбранному режиму были изготовлены образцы однонаправленного стеклопластика ВПС-31 и стеклоуглепластика ВКГ-5 и исследованы их физико-механические свойства. В объеме паспорта по классу А были проведены всесторонние исследования физико-механических свойств пластиков, определены их ресурсные характеристики и исследована стабильность пове-

дения под влиянием различных внешних факторов (температуры, влажности, всепогодных условий в различных климатических зонах). Стеклопластик ВПС-31 и стеклоуглепластик ВКГ-5 рекомендованы в качестве конструкционных материалов для изготовления методом намотки или выкладки силовых элементов летательных аппаратов, а также высоконагруженных изделий авиационной техники, работающих при знакопеременных нагрузках. Материалы могут эксплуатироваться при температурах от -60 до +100°C длительно и при 120°C, 2000 ч. Основные свойства пластиков представлены в табл. 7.

Таблица 7

Свойства ПКМ		
Наименование свойств ПКМ	Значения свойств	
	стеклопластика ВПС-31	стеклоуглепластика ВКГ-5
Плотность, г/см ³	1,95	1,75
Прочность при растяжении σ_b , МПа	1600	900
Модуль упругости при растяжении E , ГПа	53	88
Предел выносливости σ_R (при $R=0,1$), МПа, на базе 10^7 циклов ($f=40$ Гц)	500	650

В настоящее время разработанные препреги и пластики на их основе проходят опытное внедрение в конструкциях лопастей вертолетов ОАО МВЗ им. Миля и технологическое опробование на ТАНТК им. Г.М. Бериева. Так, материал ВКГ-5 нашел применение в конструкции композиционных подшипников сухого трения, используемых во втулках рулевых винтов вертолетов. Ведутся разработки однонаправленных углепрепегов, предназначенных для изготовления высоконагруженных изделий авиационной техники, работающих при знакопеременных нагрузках.

Разработанная технология изготовления однонаправленных препрегов на основе стеклоровинга РВМПН-10-1200-14 и эпоксидного связующего ВСП-3М позволяет, за счет исключения применения растворителей, в 1,5–2 раза снизить энергоемкость процесса в пересчете на единицу продукции, значительно повысить пожаробезопасность процессов получения препрегов и экологическую безопасность производства, улучшить условия труда работающих.

Применение жгутового наполнителя (стеклоровинга РВМПН-10-1200-14) позволяет, по меньшей мере, на 10–15% повысить упруго-прочностные и усталостные характеристики КМ и одновременно существенно снизить цену на препреги, поскольку наполнители такого типа – наиболее дешевый полуфабрикат в сравнении с тканями и ткаными лентами. Разработанный высокотехнологичный однонаправленный стеклопрепрег ВПС-31 с повышенной жизнеспособностью при 20°C (не менее 3 мес) позволяет стабилизировать процесс производства крупногабаритных изделий авиационной техники вне зависимости от продолжительности цикла намотки–выкладки, а также организовать централизованные поставки препрега предприятиям отрасли.

Разработанная в рамках данной работы опытная технология позволяет получать однонаправленные препреги на основе различных расплавных связующих и наполнителей в виде углеродных, арамидных жгутов и стеклоровингов, а также их сочетаний в диапазоне поверхностных плотностей наполнителей от 100 до 400 г/м² с требуемым содержанием связующего – от 22 до 50% – в зависимости от конкретных требований к препрегу. Комплекс свойств, которым обладают ПКМ на основе таких препрегов, позволит применять их в составе силовых конструкций планера самолетов (центроплан,

крыло, оперение). Однонаправленные стеклопрепреги могут успешно применяться в составе металлокомпозитов – СИАЛов, предназначенных для изготовления обшивок фюзеляжа.

Особо следует отметить, что в рамках работы была разработана опытная технология резки однонаправленных препрегов на ленты шириной от 10 до 60 мм с требуемой точностью и проработана концепция товарного продукта – препрега, пригодного для транспортировки, хранения и использования на месте потребления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по композиционным материалам /Под ред. Дж. Любина.– М.: Машиностроение, 1988, т. 1, с. 238–312, т. 2, с. 212–226.
2. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология.– М.: Техносфера, 2004, с. 185–187.
3. Prepreg technology. Hexcel Composites. Publication, 1997, No. FGU 017. January.
4. Должанский Ю.М., Строганов Г.Б., Шалин Р.Е. Оптимизация свойств машиностроительных материалов с использованием ЭВМ.– М.: Воениздат, 1980, с. 5–20, 58–91.