

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-61-72

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ГОРЯЧИХ ПОДФОРМОВОК ПРЕПРЕГОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТОЛСТОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СЛОИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ВАКУУМНО-АВТОКЛАВНОГО ФОРМОВАНИЯ

Т.В. Колокольцева<sup>1</sup>, Ю.О. Попов<sup>1</sup>, Ю.А. Гусев<sup>1</sup>, М.Н. Усачева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы, связанные с технологией изготовления толстостенных изделий из слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) методом послойной выкладки препрегов с последующим вакуумно-автоклавным формованием. Исследовано влияние режимов горячих подформовок на изменение толщины ПКМ по показателям степени усадки и уформованности с использованием метода статистического планирования эксперимента. Установлены зависимости между выбранными факторами процесса горячей подформовки пакета и параметрами, характеризующими изменение толщины ПКМ.

**Ключевые слова:** углепластик, препреги, полимерные композиционные материалы, горячие подформовки, толстостенные изделия, вакуумно-автоклавное формование, планирование эксперимента

**Для цитирования:** Колокольцева Т.В., Попов Ю.О., Гусев Ю.А., Усачева М.Н. Исследование режимов горячих подформовок препрегов при изготовлении толстостенных изделий из слоистых полимерных композиционных материалов методом вакуумно-автоклавного формования // Труды ВИАМ. 2025. № 11 (153). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-61-72.

Scientific article

## STUDY OF PREPREG DEBULKING MODES IN THE MANUFACTURING OF THICK-WALLED PRODUCTS FROM LAYERED POLYMER COMPOSITE MATERIALS BY VACUUM-AUTOCCLAVE MOLDING METHOD

T.V. Kolokoltseva<sup>1</sup>, Yu.O. Popov<sup>1</sup>, Yu.A. Gusev<sup>1</sup>, M.N. Usacheva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The article considers issues related to the technology of manufacturing thick-walled products from layered polymer composite materials (PCM) by layer-by-layer laying of prepregs followed by vacuum-autoclave molding. The influence of debulking modes on changes in PCM thickness, based on shrinkage and moldability, using the method of statistical experimental planning is studied. Based on the results, dependencies were established between the selected factors of the debulking process and the parameters characterizing changes in the thickness of PCM.

**Keywords:** carbon fiber, prepregs, polymer composite materials, debulking, thick-walled products, vacuum-autoclave molding, experimental planning

**For citation:** Kolokoltseva T.V., Popov Yu.O., Gusev Yu.A., Usacheva M.N. Study of prepreg debulking modes in the manufacturing of thick-walled products from layered polymer composite materials by vacuum-autoclave molding method. *Trudy VIAM*, 2025, no. 11 (153), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-61-72.

### Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) нашли широкое применение в конструкциях изделий авиационной техники [1–7]. Особое место занимают слоистые ПКМ на основе препрегов – композиты, структура которых образуется путем послойной выкладки заготовок с ориентацией основы наполнителя в соответствии с заданной конструктором схемой армирования, отвечающей схеме нагружения изделия.

Процесс изготовления изделий из слоистых ПКМ включает следующие последовательные операции: раскрой препрега, выкладка слоистой заготовки на оснастку, сборка технологического пакета и вакуумно-автоклавное формование.

Вакуумно-автоклавное формование деталей из ПКМ применяют для изготовления высоконагруженных изделий авиационной техники. Этот способ позволяет создать оптимальные условия для формирования монолитной беспористой структуры композита. Под воздействием равномерно распределенного по всему объему давления при оптимальном температурно-временном режиме происходят монолитизация заготовки и окончательное отверждение материала. В результате при использовании вакуумно-автоклавного формования удается получить детали высокого качества с превосходными, прогнозируемыми физико-механическими свойствами и исключительной монолитностью [8].

Для изготовления качественных изделий из ПКМ со стабильными свойствами важны все технологические операции, которые предшествуют стадии формования. В процессе выкладки заготовки, т. е. набора на соответствующей оснастке необходимого количества слоев препрега, между слоями неизбежно остается воздух, вследствие чего толщина заготовки значительно превышает толщину отвержденного изделия [9]. Для деталей толщиной более 10–15 мм это приводит к тому, что при сборке не удается поместить собранную заготовку в формовочную оснастку по высоте (рис. 1).

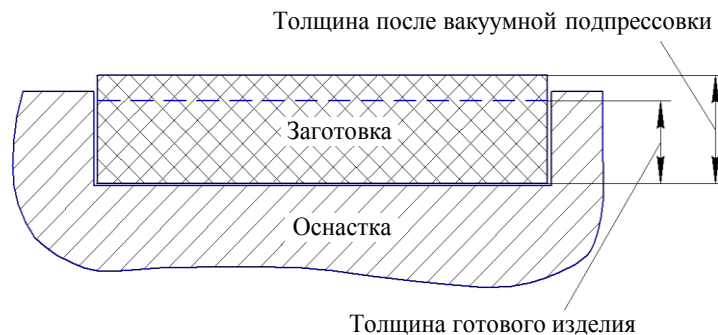


Рис. 1. Толстостенная заготовка из полимерного композиционного материала на оснастке

Формование в автоклаве без предварительного удаления воздуха из многослойной заготовки не позволяет получить бездефектные детали с минимально допустимой пористостью [10]. Кроме того, при выкладке толстостенных изделий сложной геометрической формы особенно важно, чтобы слои препрега не «зависали» в области закрытых углов, образуя мостики – перемычки, препятствующие воздействию давления при формовании. Это приводит к получению рыхлой (несплошной) пористой структуры композита, способствующей снижению уровня упруго-прочностных свойств изделия, и образованию внутренних напряжений, вызывающих коробление детали (рис. 2).

На практике в процессе выкладки слоев при изготовлении изделий для удаления воздуха используют стандартную процедуру вакуумной подформовки через каждые 3–5 слоев при комнатной температуре.

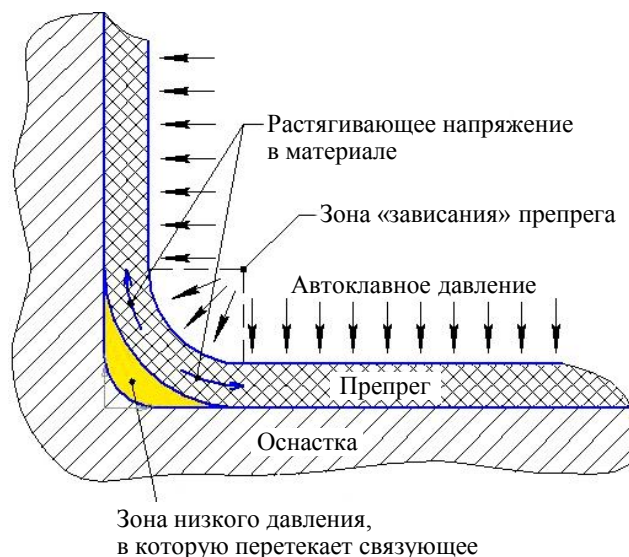


Рис. 2. «Зависание» слоев препрега в углах

Мировые производители препрегов (например, компания Hexcel Composites) рекомендуют в процессе выкладки изделий из слоистых ПКМ для эффективной консолидации слоев до формования удалять воздух с помощью вакуума (проводить вакуумные подформовки) при комнатной температуре в течение длительного времени [11]. При этом отмечено, что горячая подформовка, т. е. подогрев пакета-заготовки, и применение повышенного давления при удалении захваченного воздуха позволяют сократить продолжительность цикла подформовки и, соответственно, весь цикл изготовления изделия, что особенно эффективно при получении толстостенных деталей из ПКМ [12].

Кроме того, на практике для получения высококачественных толстостенных деталей (толщиной от 50 до 100 мм и более) производителю приходится разделять их на несколько оптимально допустимых групп слоев для проведения последовательных подформовок при повышенной температуре, вакууме и давлении. При этом уровень и продолжительность температурного воздействия, увеличивая податливость слоев препрега, не должны критически снижать жизнеспособность связующего (податливость, текучесть) для обеспечения финального процесса отверждения в автоклаве [13].

Таким образом, в каждом конкретном случае при разработке технологического процесса изготовления деталей из ПКМ необходимо предварительно проводить исследования с целью выбора оптимального режима подформовки, обеспечивающего качественную консолидацию (совмещение) слоев препрега на стадии выкладки (сборки) перед последующим формованием в автоклаве.

При решении задач прикладного материаловедения, связанных с разработкой материалов и технологий их изготовления, необходимо учитывать влияние множества различных факторов. Как правило, оптимальное сочетание факторов для достижения желаемого уровня свойств материала выбирают, используя методы поиска. Такой подход сводится к последовательному варьированию этих независимых факторов при некотором выбранном шаге и сопоставлению получаемых результатов. В случае полного перебора возможных вариантов количество опытов оказывается большим. В связи с этим при исследовании и оптимизации сложных систем наиболее эффективны методы выбора оптимальных параметров, связанные с использованием основ математической теории эксперимента, т. е. методы статистического планирования [14, 15].

Планирование эксперимента сводится к моделированию исследуемой системы, математическому описанию общих закономерностей на уровне статистических моделей и последующему их анализу.

В данной работе в качестве исследуемой системы рассматривали технологический процесс горячей подформовки многослойного пакета-заготовки, набранного из листов препрега. Задача оптимизации такого процесса сведена к поиску наилучших (оптимальных) условий проведения подформовок для обеспечения максимально возможной консолидации слоев препрега, сопровождающейся снижением толщины пакета (усадкой) за счет удаления воздуха еще до формования в автоклаве.

Цель исследования – установление достоверной зависимости между выбранными технологическими факторами процесса горячей подформовки пакета и параметрами, характеризующими изменение толщины препрега.

### Материалы и методы

Для исследования влияния режимов горячих подформовок на изменение толщины многослойного пакета-заготовки выбран препрег на основе равнопрочной углеродной ткани и эпоксидного связующего с жизнеспособностью при комнатной температуре не менее 30 сут, предназначенный для изготовления изделий из ПКМ методом выкладки и последующего вакуумно-автоклавного формования.

Исследования проводили с использованием метода статистического планирования эксперимента (в соответствии с полным факторным планом ПФЭ  $2^3$ ) [14].

Объектами исследований были восемь пакетов-заготовок, выложенных из 50 слоев препрега размером  $120 \times 120$  мм каждый. В процессе сборки проводили промежуточное вакуумирование при комнатной температуре в течение 15 мин, после чего определяли среднее значение толщины пакета по результатам замеров в восьми точках.

Далее в автоклаве выполняли процедуру горячей подформовки в соответствии с каждым из восьми выбранных режимов. Схема сборки пакета для подформовок и последующего формования приведена на рис. 3.

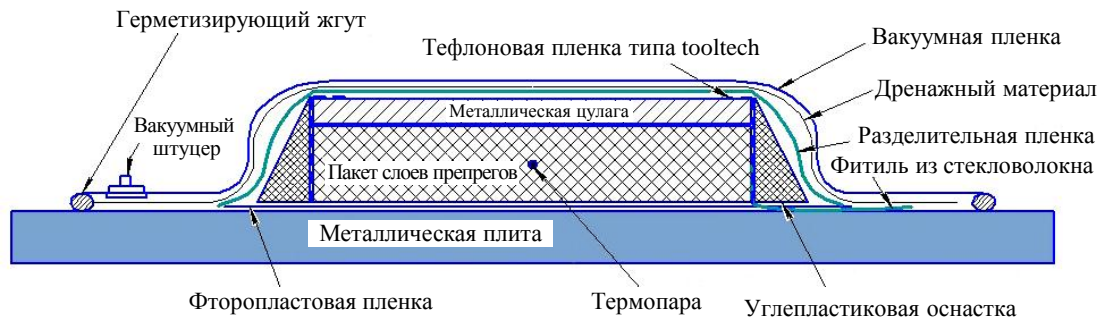


Рис. 3. Схема сборки пакета для подформовок и формования

Дополнительно собран еще один пакет (контрольный), который не подвергался подформовке.

После выполнения подформовок по различным режимам пакеты принудительно охлаждали до температуры  $30\text{--}35$  °С, затем измеряли их толщину в восьми точках и вычисляли среднее значение.

По результатам замеров определяли степень усадки препрега после горячей подформовки ( $U_c$ ). После подформовки все пакеты, включая контрольный, помещали в автоклав, где отверждали при температуре  $180$  °С в течение 4 ч под давлением  $0,7$  МПа.

Вычисляли среднее значение толщины изготовленных плит из углепластика (по результатам замеров в восьми точках). По ГОСТ Р 56682–2015 определяли пористость (объемное содержание пор). Далее вычисляли степень уформованности до толщины отвержденной детали ( $U_{\phi}$ ) для каждого из восьми режимов.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Результаты и обсуждение

При переходе к экспериментальному исследованию процесса горячей подформовки с позиций математических методов, в частности планирования эксперимента, первоначальными действиями являются математическая формализация задачи конкретного исследования и сведение ее к изучению и интерпретации функций, которым соответствуют поверхности отклика. Эти поверхности отклика характеризуют в данном случае закономерности изменения параметров толщины подформованных пакетов в зависимости от технологических факторов, определяющих режим подформовки. Для математической формализации задачи необходимо выбрать независимые переменные – технологические параметры режимов подформовки, определить границы областей их изменения и выявить, какие функции отклика на эти изменения целесообразно использовать для поиска оптимального режима подформовки.

При выборе конкретных технологических факторов процесса горячей подформовки препрега, которые наиболее существенно [16] влияют на параметры степени уплотнения пакетов-заготовок, необходимо выполнить одно из важнейших требований процедуры планирования эксперимента: каждый фактор должен быть управляем, т. е. должна существовать возможность устанавливать нужное значение фактора и поддерживать его постоянным в течение опыта. При этом факторы, не являющиеся наиболее существенными для исследования, но влияющие на параметры отклика, необходимо поддерживать на постоянном уровне, чтобы снизить ошибку эксперимента. С учетом изложенного в качестве независимых факторов, которые влияют на уменьшение толщины пакета, выбраны следующие параметры режима горячей подформовки, проводимой в автоклаве:  $X_1$  – температура  $T$ , °С;  $X_2$  – время  $\tau$ , мин;  $X_3$  – давление  $P$ , ат.

Границы областей изменения (уровни варьирования) технологических параметров исследуемых режимов горячих подформовок представлены в табл. 1. Критерием оценки пригодности выбираемых границ являлась возможность реализовать на практике данный режим подформовки. Уровни варьирования параметра  $X_1$  выбирали, исходя из информации о жизнеспособности исследуемого препрега при воздействии повышенных температур (в процессе переработки связующего при его синтезе и в результате разогрева при изготовлении препрега). Дополнительно исследована жизнеспособность препрега после термического старения (термообработки) в термошкафу при температуре 70 °С в течение 15 ч. Степень конверсии связующего в препреге после термического старения не превышала 10 %, что является допустимым значением для получения при последующем формовании монолитной структуры (в момент гелеобразования степень конверсии связующего достигает критического значения 30–40 %).

При выборе временных границ учитывали тот факт, что общее время проведения одной подформовки (включая процедуры нагрева и охлаждения) не должно быть чрезмерным (не более 60 мин), так как после проведения определенного количества (от 3 до 6) подформовок, необходимых для изготовления толстостенных деталей, препрег должен оставаться жизнеспособным.

Границы области изменения давления являются типовыми для проведения вакуумно-автоклавного формования.

Технологические параметры исследуемых режимов горячих подформовок

Уровень варьирования	Условное обозначение уровней для $X_1, X_2, X_3$	Значения переменных факторов		
		Температура $T, ^\circ\text{C}$	Время $\tau$ , мин	Давление $P$ , МПа
Верхний	+1	70	60	0,7
Нижний	-1	50	0*	0,3
Средний	0	60	30	0,5
Интервал	-	10	30	0,2

\* Температурное воздействие ограничили нагревом до заданной в опыте температуры и последующим охлаждением.

В табл. 1 уровни варьирования технологических факторов выражены в натуральных ( $T, \tau, P$ ) и нормированных ( $X_1, X_2, X_3$ ) значениях. Это обусловлено тем, что при планировании эксперимента модели зависимостей принято записывать таким образом, что в качестве переменных используются не натуральные, а нормированные значения. Нормированные значения факторов вычисляли по формулам, принятым в теории планирования эксперимента [14]. Для данного случая нормированные значения вычисляли по формулам

$$X_1 = \frac{T - 60}{10}, \quad (1)$$

$$X_2 = \frac{\tau - 30}{30}, \quad (2)$$

$$X_3 = \frac{P - 5}{2}. \quad (3)$$

При планировании эксперимента исследуемые свойства принято называть функциями отклика системы и обозначать как  $Y_i$ , где  $i$  – любой показатель свойств системы.

В данной работе в качестве таких функций отклика на воздействие условий проведения подформовки рассматривали степени усадки  $Y_c$  и уформованности  $Y_\phi$ .

Функция отклика  $Y_c$  характеризует степень усадки препрега – относительное изменение толщины пакета-заготовки после проведения горячей подформовки  $t_{гп}$  в сравнении с исходной толщиной  $t_{вак}$  (после вакуумирования при комнатной температуре). Эта характеристика позволила оценить эффективность горячей подформовки. Степень усадки определяли путем замера соответствующих толщин с последующим вычислением по формуле

$$Y_c = \frac{t_{вак} - t_{гп}}{t_{гп}} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Функция отклика  $Y_\phi$  описывает степень уформованности – соотношение толщин отвержденного препрега  $t_{отв}$  (после формования) и пакета-заготовки после горячей подформовки  $t_{гп}$  (до формования). Уформованность толщины пакета-заготовки практически до толщины готового изделия оказывает значительное влияние на качество изделий из ПКМ на основе препрегов, особенно при изготовлении изделий сложной геометрической формы.

Степень уформованности рассчитывали по формуле

$$Y_{\phi} = \frac{t_{\text{отв}}}{t_{\text{гп}}} \cdot 100 \% \quad (5)$$

При таких обозначениях задача поиска наилучших (оптимальных) условий проведения подформовок препрега в пакетах-заготовках с целью максимально возможного снижения толщины пакета и увеличения степени уформованности слоев сведена к исследованию и решению линейных уравнений

$$Y_c = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3, \quad (6)$$

$$Y_{\phi} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3, \quad (7)$$

где  $b_0, b_1, b_2, b_3$  – коэффициенты регрессии, рассчитываемые для каждой функции отклика отдельно.

По имеющимся предварительным данным можно было предположить, что в указанной области изменения  $T, \tau$  и  $P$  обе функции отклика носят линейный характер.

Выбран полный факторный план (ПФЭ  $2^3$ ) [14], предполагающий реализацию экспериментов со всеми возможными комбинациями трех параметров процесса подформовки препрега – температуры  $T$ , времени  $\tau$  и давления  $P$ .

Матрица плана исследования процесса горячих подформовок и результаты опытов (средние значения откликов), полученные после проведения всех технологических процедур (промежуточное вакуумирование пакетов-заготовок при комнатной температуре, горячие подформовки и последующее формование в автоклаве), приведены в табл. 2. Каждая строка матрицы плана (опыт плана) соответствует определенному режиму подформовки. Представлены как нормированные, так и натуральные значения независимых переменных.

Таблица 2

Полный факторный эксперимент ПФЭ  $2^3$ 

Условный номер опыта	Матрица плана ПФЭ $2^3$			Значения параметров режимов подформовок			Отклики	
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	Температура $T$ , °C	Время $\tau$ , мин	Давление $P$ , МПа	Степень усадки $Y_c$ , %	Степень уформованности $Y_{\phi}$ , %
1	–	–	–	50	0	0,3	14,61	90,34
2	+	–	–	70	0	0,3	18,25	96,91
3	–	+	–	50	60	0,3	15,73	94,14
4	+	+	–	70	60	0,3	20,18	98,55
5	–	–	+	50	0	0,7	14,37	92,00
6	+	–	+	70	0	0,7	21,04	98,84
7	–	+	+	50	60	0,7	19,84	98,06
8	+	+	+	70	60	0,7	19,74	98,36

Предварительный анализ данных табл. 2 показал, что область изменения параметров режима подформовки ( $T, \tau$  и  $P$ ) для решения поставленных задач выбрана верно, так как отклики  $Y_c$  и  $Y_{\phi}$  существенно зависят от режима. В зависимости от величин независимых параметров значения  $Y_c$  менялись в пределах от 14 до 21 %,  $Y_{\phi}$  – от 90 до 98 %.

Следует отметить, что пористость исследуемых восьми образцов после отверждения в автоклаве была незначительна (от 0,4 до 0,6 %), что позволяет сделать вывод об эффективности процесса горячей подформовки с целью удаления воздуха между

слоями при выкладке препрега. При этом пористость в контрольном образце, не подвергнутом подформовке, составила 1,56 %.

Проведенные по плану исследования позволили перейти к расчету моделей. Коэффициенты регрессии определены с использованием математического аппарата регрессионного анализа [14] по формулам

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{Y}_{mi}}{N}, \quad (8)$$

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{Y}_{mi} X_{ji}}{N}, \quad (9)$$

где  $N$  – число точек плана;  $\bar{Y}_{mi}$  – среднее по  $m$  повторным опытам значение исследуемой функции в  $i$ -той точке плана;  $j = 1, 2, 3$  – индексы переменных.

По формулам (8) и (9) получены следующие адекватные линейные модели искомым зависимостям

$$Y_c = 17,97 + 1,83X_1 + 0,90X_2 + 0,79X_3, \quad (10)$$

$$Y_\phi = 95,90 + 2,26X_1 + 1,38X_2 + 0,91X_3. \quad (11)$$

Анализ моделей по величине коэффициентов регрессии при соответствующих параметрах  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$  показал, что наиболее значимое влияние в пределах исследуемой области на степени усадки и уформованности оказывает температура, меньшее влияние – время и давление. Определить вклад каждого фактора, несмотря на их физическое различие и различие в размерности, можно благодаря тому, что в уравнения (10) и (11) они включены в нормированном виде, как множители  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ . Свободный член в уравнениях (соответственно 17,97 и 95,9) определяет среднее значение показателей  $Y_c$  и  $Y_\phi$  в границах исследуемой области. При варьировании значений  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$  в рамках опытов от  $-1$  до  $+1$  значения  $Y_c$  и  $Y_\phi$  будут меняться соответствующим образом от минимальных до максимальных.

Полученным функциям отклика  $Y_c$  и  $Y_\phi$  соответствуют поверхности отклика. Они описывают закономерности влияния параметров режима подформовки ( $T$ ,  $\tau$  и  $P$ ) на отклики «усадка» и «уформованность». Если задать одной из независимых переменных некоторое постоянное значение (например, проводить подформовки при давлении 0,7 МПа, т. е. при  $X_3 = 1$ ), то в трехмерной системе координат ( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $Y_c$  и  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $Y_\phi$ ) получится поверхность отклика, которую можно рассечь системой плоскостей  $Y_c = \text{const}$  и  $Y_\phi = \text{const}$  соответственно. Линии пересечения затем можно спроецировать на плоскости  $X_1X_2$ . Таким образом, получится совокупность линий, которые называют линиями уровня.

На рис. 4 представлена графическая интерпретация зависимостей, позволяющая определить оптимальные режимы подформовок для поставленных задач.

Эти модели однозначно связывают отклики с параметрами режима подформовки и позволяют относительно просто решать так называемые прямые и обратные задачи, связанные с поиском оптимальных условий проведения подформовки.

Для прямой задачи для назначенных (приемлемых, допустимых, желательных) в конкретном технологическом процессе величин параметров  $T$ ,  $\rho$  и  $\tau$  рассчитывают ожидаемые  $Y_c$  и  $Y_\phi$ .

Для проверки адекватности моделей выбран следующий режим горячей подформовки: температура  $T = 60$  °С, время  $\tau = 30$  мин, давление  $P = 0,5$  МПа.

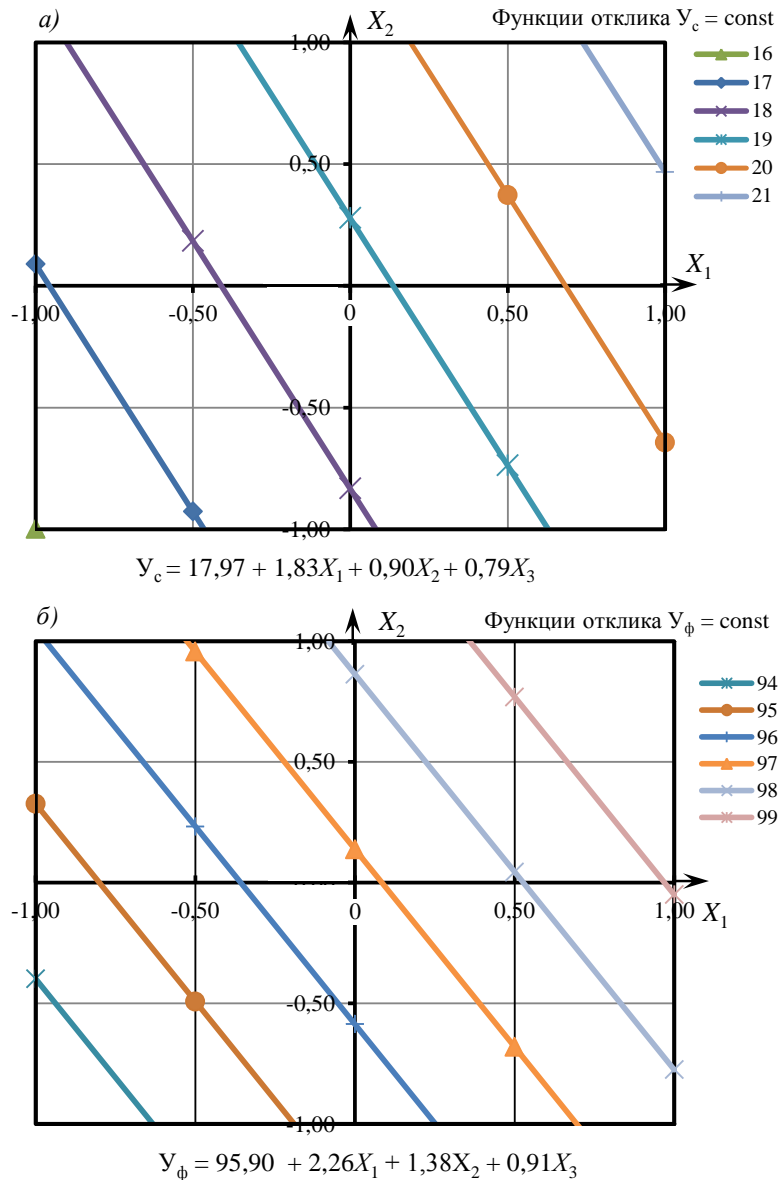


Рис. 4. Графическая интерпретация откликов «усадка» ( $Y_c$ ) (а) и «уформованность» ( $Y_\phi$ ) (б)

По выбранному режиму проведены соответствующие процедуры подформовки и последующего формования пакета-заготовки, определены фактические значения величин  $Y_c$  и  $Y_\phi$ , которые сравнили со значениями, вычисленными по формулам (10) и (11). По результатам эксперимента фактические значения ( $Y_c = 17,56 \%$ ,  $Y_\phi = 96,3 \%$ ) незначительно отличаются от расчетных ( $Y_c = 17,97 \%$ ,  $Y_\phi = 95,9 \%$ ).

При обратной задаче для назначенных (заданных) в конкретном технологическом процессе величин  $Y_c$  и  $Y_\phi$  определяются оптимальные значения параметров  $T$ ,  $P$  и  $\tau$ . Например, для формования детали сложной пространственной формы переменного сечения толщиной от 50 до 100 мм и более требуется обеспечить эффективное удаление воздуха из пакета-заготовки и плотную упаковку (почти до толщины отформованного изделия) слоев препрега для получения монолитного, беспористого материала. Для решения этой задачи степень усадки  $Y_c$  должна быть максимальной, а степень уформованности  $Y_\phi$  стремиться к 97–98 %. Параметры оптимального режима процесса ( $T$ ,  $P$  и  $\tau$ ) можно получить путем расчета с использованием зависимостей (10) и (11) или графиков. Например, задавая приемлемые для конкретного производства значения

давления ( $P = 0,6$  МПа) и времени ( $\tau = 45$  мин) можно определить значение температуры ( $T = 60\text{--}65$  °С) для получения заданной степени уформованности. При этом степень усадки составит 19–20 %.

### Заключения

Исследовано влияние режимов горячих подформовок многослойного пакета-заготовки из препрега на основе эпоксидного связующего и равнопрочной углеродной ткани на изменение толщины по показателям  $U_c$  и  $U_\phi$ .

Исследования проводили с использованием метода статистического планирования эксперимента. В качестве независимых факторов  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ , влияющих на снижение толщины пакета, выбраны следующие параметры режима горячей подформовки, проводимой в автоклаве: температура  $T$ , продолжительность  $\tau$  и давление  $P$ . В качестве функций отклика исследуемой системы рассматривали  $U_c$  и  $U_\phi$ . Выбран полный факторный план (ПФЭ  $2^3$ ), предполагающий реализацию экспериментов со всеми возможными комбинациями уровней исследуемых факторов процесса подформовки препрега ( $T$ ,  $\tau$  и  $P$ ).

По результатам исследований, проведенных по плану, расчетным путем с использованием математического аппарата регрессионного анализа определены адекватные линейные модели искомых зависимостей.

Анализ моделей по величине коэффициентов регрессии при соответствующих параметрах ( $T$ ,  $\tau$  и  $P$ ) показал, что наиболее значимое влияние в пределах исследуемой области на степени усадки и уформованности оказывает температура, меньшее влияние – время и давление.

Представлена графическая интерпретация зависимостей в трехмерной системе координат ( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $U_c$  и  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $U_\phi$ ), позволяющая определить оптимальные для поставленных задач режимы подформовок.

Приведены примеры возможного использования полученных моделей при решении прямых и обратных задач.

Данный метод статистического планирования эксперимента при изготовлении толстостенных деталей получил положительный отклик при применении в технологических условиях.

### Список источников

1. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
2. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
3. Каблов Е.Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // Металлы Евразии. 2017. № 1. С. 2–6.
4. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение терморективных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-23.
5. Постнов В.И., Вешкин Е.А., Макрушин К.В., Судьин Ю.И. Технологические особенности изготовления из полимерных композиционных материалов лопастей несущего винта для легкого вертолета // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 21.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.

6. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
7. Ткачук А.И., Терехов И.В., Гуревич Я.М., Кудрявцева А.Н. Применение бисмалеимидного связующего марки ВСТ-57 для получения теплостойких размеростабильных оснасток из полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 32–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-32-40.
8. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Усачева М.Н., Пурвин К.Э. Технологические особенности изготовления толстостенных деталей из ПКМ (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 3 (75). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-61-67.
9. Kardos J., Dudukovic M.P., Dave R. Void growth and resin transport during processing of thermosetting-matrix composites // *Advances in Polymer Science*. 1980. Vol. 80. P. 101–123.
10. Дмитриенко Ю.И., Захарова Ю.В., Сборщиков С.В. Моделирование процесса отверждения толстостенных конструкций из полимерных композиционных материалов // *Инновационная наука*. 2016. № 12–4. С. 31–36.
11. Hexcel. HexPly Prepreg Technology. URL: [https://www.hexcel.com/user\\_area/content\\_media/raw/Prepreg\\_Technology.pdf](https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Prepreg_Technology.pdf) (дата обращения: 30.01.2025).
12. Zweben C.H., Beaumont P.W.R. *Comprehensive composite materials II*: in 8 vol. Amsterdam: Elsevier, 2018. Vol. 2. 4288 p.
13. Seon G., Nikishkov Yu., Makeev A. A numerical method based on pore-pressure cohesive zone modeling for simulation of debulking in resin-saturated composite prepregs // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2022. Is. 12. Vol. 123. P. 2791–2813.
14. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
15. Khoun L., Centea T., Hubert P. Characterization methodology of thermoset resins for the processing of composite materials – case study: CYCOM 890RTM epoxy resin // *Journal of Composite Material*. 2010. Vol. 44. P. 1397–1415.
16. Liu D.S.-C., Hubert P. Bulk factor characterization of heated debulked autoclave and out-of-autoclave carbon fibre prepregs // *Composites. Part B*. 2019. Vol. 219. P. 1–16.

#### References

1. Kablov E.N., Antipov V.V. The Role of New-Generation Materials in Ensuring the Technological Sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
2. Kablov E.N. The Role of Fundamental Research in the Creation of Next-Generation Materials. *Reports XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
3. Kablov E.N. The Present and Future of Additive Technologies. *Metally Evrazii*, 2017, no. 1, pp. 2–6.
4. Tkachuk A.I., Donetsky K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <https://www.journal.viam.ru> (accessed: January 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-23.
5. Postnov V.I., Veshkin E.A., Makrushin K.V., Sudin Yu.I. Technological features of manufacturing polymer composite materials of main rotor blades for a light helicopter. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 21, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
6. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.

7. Tkachuk A.I., Terekhov I.V., Gurevich Ya.M., Kudryavtseva A.N. Application of bismaleimide VST-57 binder for obtaining heat-resistant dimensionally stable molds from polymer composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 32–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-32-40.
8. Timoshkov P.N., Khrulkov A.V., Usacheva M.N., Purvin K.E. Technological features of the manufacture of thick-walled parts of the PCM (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 16, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-61-67.
9. Kardos J., Dudukovic M.P., Dave R. Void growth and resin transport during processing of thermosetting-matrix composites. *Advances in Polymer Science*, 1980, vol. 80, pp. 101–123.
10. Dmitrienko Yu.I., Zakharova Yu.V., Sborshchikov S.V. Modeling the curing process of thick-walled structures made of polymer composite materials. *Innovatsionnaya nauka*, 2016, no. 12–4, pp. 31–36.
11. *Hexcel. HexPly Prepreg Technology*. Available at: [https://www.hexcel.com/user\\_area/content\\_media/raw/Prepreg\\_Technology.pdf](https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Prepreg_Technology.pdf) (accessed: January 30, 2025).
12. Zweben C.H., Beaumont P.W.R. *Comprehensive composite materials II*: in 8 vol. Amsterdam: Elsevier, 2018, vol. 2, 4288 p.
13. Seon G., Nikishkov Yu., Makeev A. A numerical method based on pore-pressure cohesive zone modeling for simulation of debulking in resin-saturated composite prepregs. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2022, is. 12, vol. 123, pp. 2791–2813.
14. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovsky Yu.V. *Experimental planning in the search for optimal conditions*. Moscow: Nauka, 1976, 279 p.
15. Khoun L., Centea T., Hubert P. Characterization methodology of thermoset resins for the processing of composite materials – case study: CYCOM 890RTM epoxy resin. *Journal of Composite Material*, 2010, vol. 44, pp. 1397–1415.
16. Liu D.S.-C., Hubert P. Bulk factor characterization of heated debulked autoclave and out-of-autoclave carbon fibre prepregs. *Composites. Part B*, 2019, vol. 219, pp. 1–16.

**Информация об авторах**

**Колокольцева Татьяна Вениаминовна**, ведущий инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Попов Юрий Олегович**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Гусев Юрий Андреевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Усачева Мария Николаевна**, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Tatiana V. Kolokoltseva**, Leading Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Yuri O. Popov**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Yuri A. Gusev**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Maria N. Usacheva**, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 16.04.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 23.04.2025.  
The article was submitted 16.04.2025; approved and accepted for publication after reviewing 23.04.2025.