

УДК 629.7.021

doi: 10.18698/0536-1044-2021-10-84-94

Исследование процессов устранения коробления авиационных изделий из полимерных композиционных материалов, полученных методом высокотемпературного формования

В.И. Корольков¹, Е.Н. Некравцев¹, К.С. Сафонов¹, П.С. Огурцов²,
В.А. Оганесов¹, И.С. Попов¹, В.В. Самохвалов¹

¹ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

² ПАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество»

Research of the Processes of Eliminating Warpage of Aviation Products Made of Polymer-Composite Materials Obtained by High-Temperature Molding

V.I. Korolkov¹, E.N. Nekravtsev¹, K.S. Safonov¹, P.S. Ogurtsov²,
V.A. Oganosov¹, I.S. Popov¹, V.V. Samokhvalov¹

¹ FGBOU Voronezh State Technical University

² PAO Voronezh Aircraft Company

Исследованы причины и факторы, оказывающие существенное влияние на возникновение и развитие процесса коробления монолитных изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ), полученных методом послойной разнонаправленной укладки неотвержденного ПКМ — полуфабриката (препрега) — с последующим высокотемпературным формованием в автоклаве. Под короблением понимается дефект изделия из ПКМ в виде искажения его конфигурации (деформации) под влиянием напряжений, возникающих в процессе полимеризации связующего препрега при высокой температуре (180 °С) и охлаждении изделия до комнатной температуры. Рассмотрены плоские образцы, изготовленные из препрегов на стеклянной основе. Выполнен подбор схем равновесной укладки образцов монолитных панелей. Проведена оценка влияния содержания связующего в препреге на деформации при неравновесных схемах укладки образцов панелей. Показано, что наиболее существенными факторами, влияющими на возникновение коробления монолитных панелей из ПКМ, являются схема плетения армирующей основы препрега, нанос связующего в препреге, направление укладки монослоев в панели, краевой эффект и форма поверхности изделия. Выявлено, что коробление образца происходит вдоль направления неуравновешенной усадки связующего. Установлено, что для сбалансированной укладки необходима компенсация в направлении усадки связующего и симметрия относительно центрального слоя; большее количество связующего в препреге уменьшает коробление, но незначительно. Разработка конструктивных и технологических рекомендаций на основе полученных результатов приведет к сокращению сроков обработки изделий из ПКМ.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, коробление монолитных панелей, автоклавная технология, схема равновесной укладки, однонаправленный препрег

The article considers issues of identifying the causes and factors that have a significant impact on the occurring and development of the warping process in monolithic products made of polymer — composite materials (PCM) obtained by the method of multidirectional layering of uncured PCM — semi-finished product (prepreg) and subsequent high-temperature molding in an autoclave. Warping is understood as a defect of a PCM product in the form of distortion of its configuration (deformation) under stresses arising during the polymerization of the binder prepreg at a high temperature (1800C) and cooling the product to room temperature. Flat samples made of glass-based prepregs have been researched. The selecting schemes of equilibrium stacking of samples of monolithic panels has been carried out. The influence of the binder content in the prepreg on the deformations in non-equilibrium layouts of the panel samples has been evaluated. It is shown that the most significant factors influencing the occurrence of warpage of monolithic PCM panels are: the weaving pattern of the prepreg reinforcing base, the amount of binder deposited in the prepreg, the direction of stacking monolayers in the panel, the edge effect and the shape of the product surface. It was found that the warpage of the sample occurs along the direction of unbalanced shrinkage of the binder. For balanced stacking, compensation in the direction of binder shrinkage and symmetry with respect to the central layer are necessary; more binder in the prepreg reduces the amount of warpage, but only slightly. The development of constructive and technological recommendations based on the results obtained will lead to a reduction in the terms of development of PCM products.

Keywords: polymer-composite material, warpage of monolithic panels, autoclave technology, equilibrium stacking scheme, unidirectional prepreg

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) все чаще занимают лидирующие позиции в различных сферах и отраслях промышленности. Авиация, как одна из самых наукоемких отраслей, испытывает потребность в современных перспективных конструкционных материалах, сочетающих в себе высокие механические свойства и сравнительно небольшую массу.

К таким материалам относятся ПКМ. В процессе получения изделия из ПКМ методом высокотемпературного автоклавного формования вследствие усадки связующего при его полимеризации возникают внутренние напряжения в слоях готового продукта [1, 2]. В случае неравномерности этих напряжений изделие будет подвергаться короблению.

Коробление изделий из ПКМ встречается достаточно часто на авиастроительных предприятиях России при изготовлении монолитных и многослойных панелей авиационных конструкций. Оно приводит к большому количеству отбраковок изделия, резкому снижению технологичности и значительному повышению стоимости его обработки. Коробление — крайне нежелательный браковочный признак, требующий исследования причин возникновения, поиска вариантов устранения, а также прогнозирования его появления на этапах конструирования изделия и технологической подготовки его производства.

Известны попытки некоторых предприятий исправить коробление путем высокотемпературной термостабилизации готового изделия. Практика подобных мероприятий приводит к расслоению конструкции и потере ее механических свойств. Поэтому проблема прогнозирования и исключения коробления изделий из ПКМ на этапе первичного формования является весьма актуальной, в частности, для особо ответственных авиационных конструкций [3], формирующих внешний облик летательного аппарата, выходящих в набегающий поток и определяющих его аэродинамические параметры.

В современных условиях перехода на новые отечественные ПКМ в рамках импортозамещения проблема становится еще актуальнее.

Цель работы — анализ причин возникновения и поиск вариантов устранения коробления изделий из ПКМ [4–9], изготовленных по препреговой автоклавной технологии и выполняющих функции аэродинамических поверхностей летательного аппарата, а также выработка рекомендаций по корректированию конструктивных схем ПКМ и технологий их производства применительно к проблемным изделиям авиационной техники.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- выявление факторов, влияющих на возникновение и степень коробления (поводку) монолитных панелей из ПКМ:

- схемы плетения армирующей основы препрега;
- содержания (наноса) связующего в препреге;
- направления (схемы) укладки монослоев в монолитных панелях;
- поверхности укладки (лицевой/изнаночной) по отношению к стороне наноса связующего в препреге;
- анализ результатов формования монолитных плоских однонаправленных утковых и плетеных образцов панелей из препрегов на стеклянной основе (КМКС-2м.120.Т60.37, КМКС-2м.Т10.37 и КМКС-2м.Т10.55);
- подбор схем равновесной укладки монолитных панелей;
- оценка влияния наноса связующего в препрегах КМКС-2м.Т10.37, КМКС-2м.Т10.55 на поведку монолитных плоских образцов при неравновесных схемах укладки;
- сравнительный анализ поведения монолитных панелей, полученных из стеклоармированных препрегов на однонаправленных утковых и плетеных основах после термической полимеризации связующего.

Материалы и методы. Объектом исследования являлись плоские образцы размером 100×200 мм, длинная сторона которых определяла нулевое направление изделия. Для изготовления и формования образцов применяли оборудование, включающее в свой состав прикаточный ролик с электронагревом SK3ROL-2 и два лабораторных прессы Langzauner perfect LZT-UK-25-L с термостатом Logotherm и электронагревом (рис. 1).

Техническая характеристика прикаточного ролика с электронагревом SK3ROL-2

Диаметр, мм	40
Ширина, мм	50
Максимальная температура нагрева, °С	110
Точность термостабилизации, °С	±1,1

Техническая характеристика лабораторных прессов Langzauner perfect LZT-UK-25-L с электронагревом (I) и с термостатом Logotherm (II)

	I	II
Максимальное усилие прессования, кН	250	250
Минимальное усилие прессования, кН	5	5
Максимальная площадь прессования, мм	400×400	500×500
Максимальная температура нагрева, °С	400	200
Максимальная скорость нагрева, °С/мин	6	6

Режимы формования образцов назначали в строгом соответствии с режимами полимеризации связующего в препреге и конструкции панели.

Технологическая операция прессового формования образцов монолитной конструкции включала в себя следующие технологические переходы:

- создание давления на поверхность образца 83,36 кПа;
- повышение температуры до 125 ± 5 °С со скоростью не более 2 °С/мин;
- выдержка при температуре 125 ± 5 °С в течение 60^{+5} мин;



а



б



в



Рис. 1. Внешний вид оборудования для изготовления и формования образцов:
 а — прикаточного ролика с электронагревом SK3ROL-2;
 б и в — лабораторных прессов Langzauner perfect LZT-UK-25-L с термостатом Logotherm и электронагревом

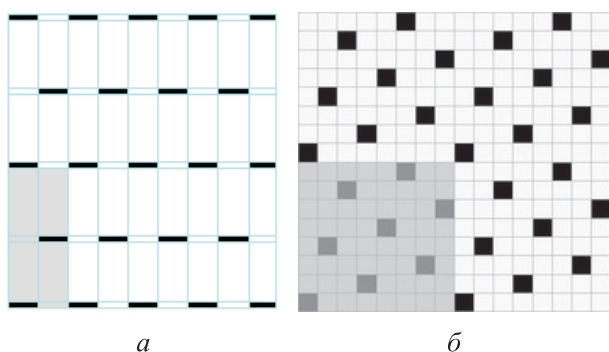


Рис. 2. Схемы однонаправленного уткового (а) и сатинового (б) переплетений: белая зона — нить основы, черная зона — нить утка

- увеличение давления на поверхность образца до 539,37 кПа;
- повышение температуры до 180 ± 5 °С со скоростью не более 2 °С/мин;
- выдержка при температуре 180 ± 5 °С и давлении 539,37 кПа в течение $3,0^{+0,5}$ ч;
- охлаждение под давлением 539,37 кПа до температуры не выше 40 °С со скоростью не более 1 °С/мин.

В качестве исходного фактора, влияющего на возникновение и коробление (деформацию) монолитных панелей из ПКМ, использовали схему плетения армирующей основы препрега [10]. Плоские образцы монолитных панелей с одним-пятью монослоями формовали из трех препрегов на стеклотканевой основе по двух схемам переплетения. В препреге КМКС-2м.120.Т60.37 использовали однонаправленное утковое переплетение (рис. 2, а), в КМКС-2м.120.Т10.37 и КМКС-2м.120.Т10.55 — сатиновое схемы 8/3 (рис. 2, б).

Формование образцов проводили комплектно. Под комплектом понимаются три образца, выполненных из разных материалов. Такой способ выбрали с целью исключения влияния приборной погрешности. Каждый комплект находился в одинаковых условиях формования, поэтому сравнение коробления образцов проводилось с достаточной долей достоверности.

Результаты исследования однослойных образцов. Однослойные образцы изготавливали по схеме укладки основы [0°]. У однослойного образца, сформованного из препрега КМКС-2м.120.Т60.37 (рис. 3, а), наблюдается небольшая диагональная деформация образца с отклонением от плоскостности не более 2 мм на сторону. Образцы, полученные из

препрегов КМКС-2м.120.Т10.37 (рис. 3, б) и КМКС-2м.120.Т10.55 (рис. 3, в), имеют значительно большее коробление (20 и 29 мм), причем с направлением, отличным от предыдущего образца.

Ткань однонаправленного уткового переплетения (см. рис. 2, а) реагирует на усадку связующего малым короблением в силу значительно меньшего количества нитей утка по отношению к количеству нитей основы (1/5), а следовательно, и меньшей жесткости в направлении утка по сравнению с таковой в направлении основы. Направление винта коробления определяется распределением утковой нити по длине образца и не имеет строго закономерного характера. Закономерным в этих комплектах образцов является коробление в сторону большего наноса связующего.

Ткань сатинового (8/3) переплетения (см. рис. 2, б) имеет более равномерное соотношение количества нитей утка и основы (1/1,8). При усадке связующего в процессе его полимеризации коробление образцов выражено четко (см. рис. 3, б, в) вследствие большого количества нитей уткового направления и происходит в направлении меньшей жесткости полотна, т. е. в направлении утка.

Нанос связующего в препреге существенно влияет на степень коробления. На рис. 3, б и в приведены образцы, сформованные на препрегах КМКС-2м.120.Т10.37 и КМКС-2м.120.Т10.55, в которых содержится 37 и 55 % связующего соответственно. Видно значительно большее коробление последних образцов.

Большее количество связующего приводит к росту внутренних напряжений и, как следствие, к увеличению степени коробления образцов.

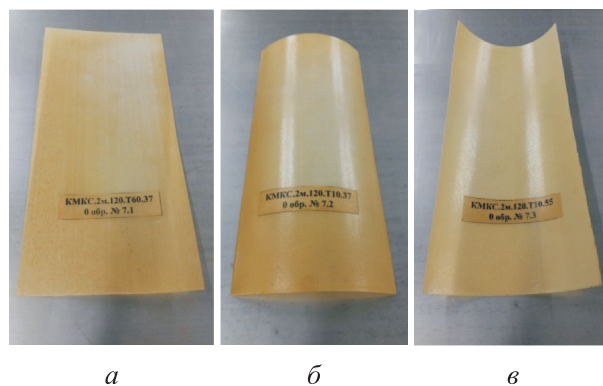


Рис. 3. Внешний вид однослойных образцов, сформованных из препрегов КМКС-2м.120.Т60.37 (а), КМКС-2м.120.Т10.37 (б) и КМКС-2м.120.Т10.55 (в) по схеме укладки монослоев [0°]

Направление коробления определяется стороной с большим наносом. При изготовлении препрегов на расплавном связующем ею является сторона, с которой осуществлялся процесс наноса.

Как показали результаты исследования, наиболее существенным фактором коробления стала схема взаимной укладки монослоев в монолитных панелях.

Результаты исследования двухслойных образцов. Двухслойные образцы изготавливали по схемам укладки, приведенным на рис. 4. Схема укладки читается от оснастки, маркировка нанесена на последний (верхний) слой, т. е. если схема укладки $[0^\circ/90^\circ]$, то маркировка на слое 90° и т. д. по всем образцам.

Как видно из рис. 4, *а* и *г*, образцы, сформованные из препрега КМКС-2м.120.Т60.37 по схемам укладки монослоев $[0^\circ/90^\circ]$ и $[+45^\circ/-45^\circ]$, имеют значительное отклонение от плоскостности (14 и 45 мм соответственно) в направлении меньшей жесткости, т. е. перпендикулярно основе. Во многих технологиях укладки однонаправленных монослоев ПКМ можно встретить рекомендации по компенсации укладки слоя -45° слоем $+45^\circ$ и наоборот. Образец, по-

казанный на рис. 4, *з* полностью отвергает подобные рекомендации.

Образцы, сформованные из препрегов КМКС-2м.120.Т10.37 и КМКС-2м.120.Т10.55, имели коробление, но существенно меньшее, чем образцы из КМКС-2м.120.Т60.37. Отклонение от плоскостности образцов из препрегов КМКС-2м.120.Т10.37 и КМКС-2м.120.Т10.55 со схемой укладки $[0^\circ/90^\circ]$ (рис. 4, *б*, *в*) составило 7 и 5 мм соответственно, а со схемой укладки монослоев $[+45^\circ/-45^\circ]$ (рис. 4, *д*, *е*) — 11 и 9 мм. Направление коробления не зависит от типа полотна и определяется схемой укладки монослоев. Степень коробления определяется типом полотна и наносом связующего.

Двухслойные образцы, за исключением имеющих однонаправленную схему укладки монослоев $[0^\circ/0^\circ]$, $[90^\circ/90^\circ]$, $[-45^\circ/-45^\circ]$, $[+45^\circ/+45^\circ]$, являются неуравновешенными. При неуравновешенной укладке увеличение наноса связующего влияет упрочняюще на образец и уменьшает коробление, в отличие от однослойных образцов.

Двухслойные образцы, сформованные из препрега КМКС-2м.120.Т60.37 по схемам укладки монослоев $[0^\circ/0^\circ]$, $[90^\circ/90^\circ]$, $[-45^\circ/-45^\circ]$, $[+45^\circ/+45^\circ]$, приведены на рис. 5. В этих образцах обращено внимание на взаимориентацию сторон препрега при укладке. Различались лицевая (Л) и изнаночная (И) стороны. Лицевая сторона — сторона препрега, с которой наносилось связующее на ткань при пропитке, изнаночная — обратная сторона препрега.

На всех образцах наблюдается несущественное коробление (не более 2 мм на сторону). Кроме того, не выявлено закономерного влияния на коробление стороны (лицевой или изнаночной) укладки препрега. Однонаправленную межслойную укладку однонаправленного препрега можно считать сбалансированной.

Образцы, полученные однонаправленной межслойной укладкой $[0^\circ/0^\circ]$ препрегов КМКС-2м.120.Т10.37 и КМКС-2м.120.Т10.55 на плетеном полотне, приведены на рис. 6, *а* и *б*. Видно наличие коробления (отклонение от плоскостности 6,5 и 3,5 мм соответственно), что превышает деформацию образцов на утковом препреге КМКС-2м.120.Т60.55 и объясняется большей жесткостью полотна в утковом направлении. Меньшее коробление образцов из КМКС-2м.120.Т10.55 вызвано большим содержанием связующего (55 %) в препреге.

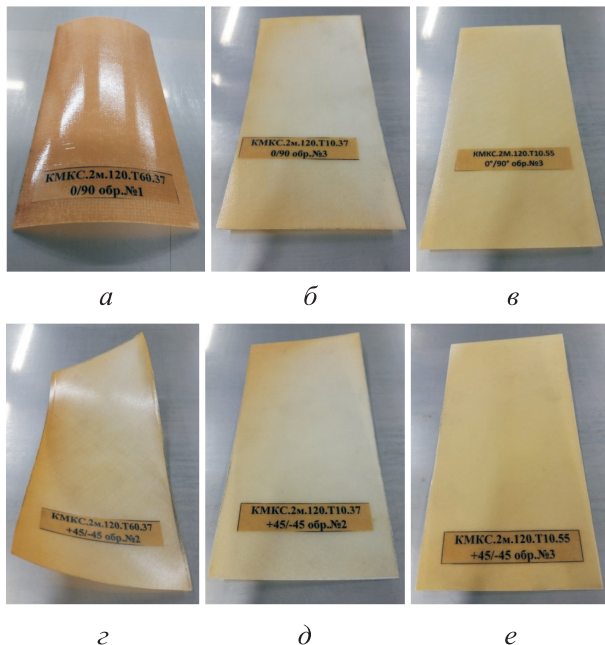


Рис. 4. Внешний вид двухслойных образцов, сформованных по схеме укладки монослоев $[0^\circ/90^\circ]$ (*а-в*) и $[+45^\circ/-45^\circ]$ (*з-е*) из разных препрегов:

- а, з* — КМКС-2м.120.Т60.37;
- б, д* — КМКС-2м.120.Т10.37;
- в, е* — КМКС-2м.120.Т10.55

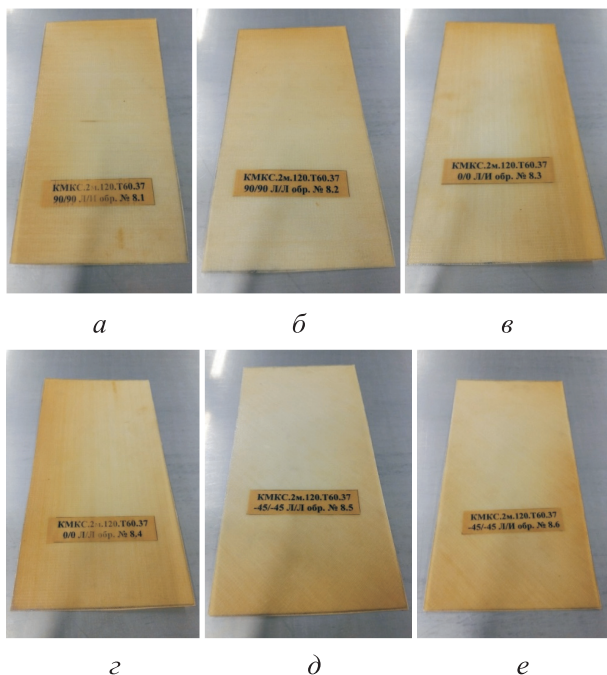


Рис. 5. Внешний вид двухслойных образцов, сформованных из препрега КМКС-2м.120.Т60.37 однонаправленной укладкой при разной взаимориентации сторон препрега:

а — [90°/90°], Л/Л; б — [90°/90°], Л/Л; в — [0°/0°], Л/Л; г — [0°/0°], Л/Л; д — [-45°/+45°], Л/Л; е — [-45°/+45°], Л/Л

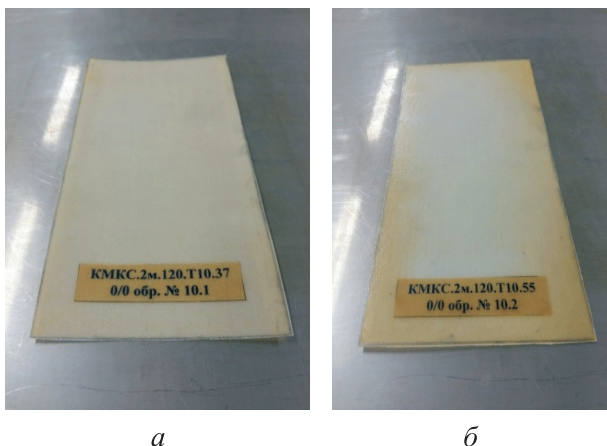


Рис. 6. Внешний вид двухслойных образцов, полученных однонаправленной межслойной укладкой [0°/0°] препрегов КМКС-2м.120.Т10.37 (а) и КМКС-2м.120.Т10.55 (б) на плетеном полотне

Результаты исследования трехслойных образцов. Трехслойные образцы, изготовленные из трех материалов по схемам укладки монослоев [0°/90°/0°] и [90°/0°/90°], приведены на рис. 7. Ни один из образцов, сформованных из препрега КМКС-2м.120.Т60.37, не имел коробления. У образцов, полученных из препрегов КМКС-2м.120.Т10.37 и КМКС-2м.120.Т10.55,

наблюдалось незначительное коробление (не более 0,5 мм на сторону). Симметричная укладка относительно нейтрального слоя является сбалансированной. Это утверждение справедливо для однонаправленных и плетеных армирующих полотен.

Результаты исследования четырехслойных образцов. Четырехслойные образцы (рис. 8) изготавливали из трех препрегов по схемам укладки монослоев [+45°/90°/90°/-45°] и [+45°/0°/90°/-45°]. Результаты исследования приведены в табл. 1. Анализ схем укладки проводили, начиная со средних слоев.

У образцов, выполненных из препрега КМКС-2м.120.Т60.37, наблюдается максимальное коробление. Анализ такого образца со схемой укладки монослоев [+45°/90°/90°/-45°] (рис. 8, а) показывает, что несмотря на ее сбалансированную середину (90°/90°), неравномерные внешние слои (+45°/-45°) приводят к диагональной деформации образца (перпендикулярно основе в этих слоях), равной 25 мм.

Вследствие увеличения толщины образца и повышения жесткости его деформация меньше, чем у образца, показанного на рис. 4, г. Схема

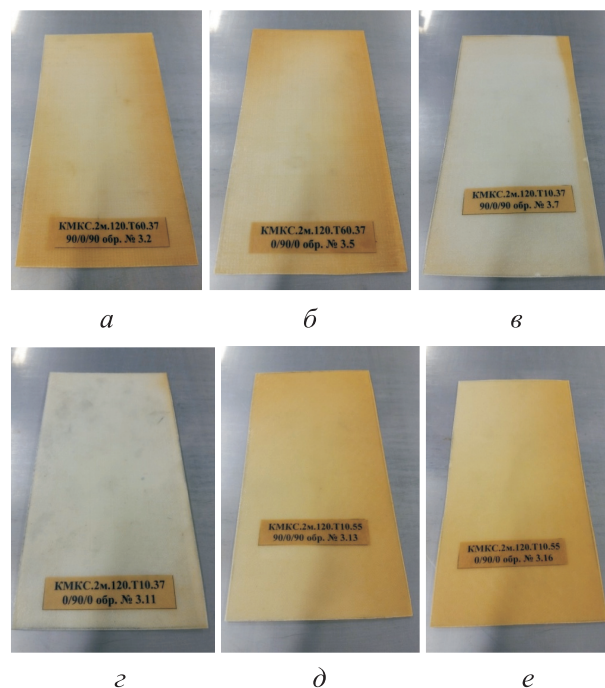


Рис. 7. Внешний вид трехслойных образцов, сформованных из препрегов КМКС-2м.120.Т60.37 (а, б), КМКС-2м.120.Т10.37 (в, г) и КМКС-2м.120.Т10.55 (д, е) по разным схемам укладки монослоев: а, в, д — [90°/0°/90°]; б, г, е — [0°/90°/0°]

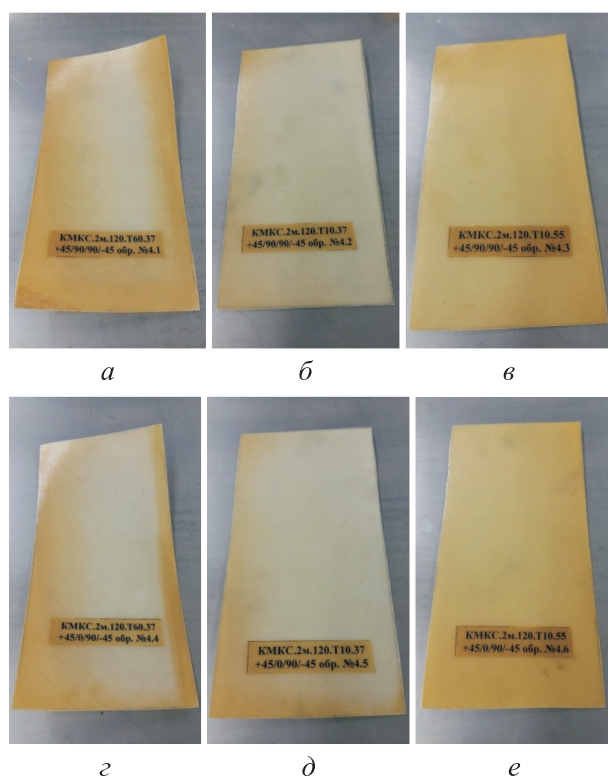


Рис. 8. Внешний вид четырехмонослойных образцов, сформованных по схеме укладки монослоев $[+45^\circ/90^\circ/90^\circ/-45^\circ]$ (а–в) и $[+45^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ]$ (г–е) из разных препрегов:
 а, г — КМКС-2м.120.Т60.37;
 б, д — КМКС-2м.120.Т10.37;
 в, е — КМКС-2м.120.Т10.55

Таблица 1
 Значения отклонений от плоскостности
 четырехмонослойных образцов

Марка препрега	Отклонение от плоскостности, мм, при схеме укладки монослоев	
	$[+45^\circ/90^\circ/90^\circ/-45^\circ]$	$[+45^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ]$
КМКС-2м.120.Т60.37	25	25
КМКС-2м.120.Т10.37	10	9
КМКС-2м.120.Т60.55	8	9

укладки $[+45^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ]$, имеющая несбалансированные средние и крайние слои, но разный характер коробления двухмонослойных образцов (см. рис. 4, а, г), приводит к некоторой компенсации деформации и снижает ее до 25 мм (см. рис. 4, г.)

Образцы на препрегах КМКС-2м.120.Т10.37 и КМКС-2м.120.Т10.55 имеют существенно меньшее коробление (рис. 8, б, в, д, е) по вполне понятным причинам, но сохраняют его диагональную направленность, которая вызвана укладкой внешних слоев $[+45^\circ/-45^\circ]$.

Таблица 2
 Результаты исследования четырехмонослойных образцов, сформованных из препрега КМКС-2м.120.Т60.37

Схема укладки монослоев	Отклонение от плоскостности, мм	Вид коробления
$0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ$	0	–
$+45^\circ/0^\circ/0^\circ/+45^\circ$	До 1	Диагональная деформация
$-45^\circ/+45^\circ/+45^\circ/-45^\circ$	До 1	То же
$+45^\circ/90^\circ/90^\circ/+45^\circ$	22	Прогиб
$0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ$	18	»
$-45^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ$	25	»

Результаты исследования четырехмонослойных образцов, сформованных из препрега КМКС-2м.120.Т60.37 по разным схемам укладки монослоев, приведены в табл. 2. Видно, что однонаправленный препрег дает стабильный результат по отсутствию коробления при симметричных схемах укладки.

Результаты исследования пятимонослойных образцов. Пятимонослойные образцы изготавливали по симметричной и несимметричной схемам укладки монослоев. Анализ результатов исследования показал, что образцы, сформованные из препрега КМКС-2м.120.Т60.37 по симметричной схеме укладки $[+45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ]$ не имеют коробления (рис. 9, а).

Это подтверждено укладкой до четырнадцати монослоев в образце как из препрега КМКС-2м.120.Т60.37, так и из КМКС-2м.120.Т10.55. Незначительное коробление (0,5 мм) трехмонослойных образцов, сформованных из КМКС-2м.120.Т10.55 (см. рис. 7, д, е), при их симметричной укладке скомпенсировано жесткостью уже на пятимонослойных образцах.

Несимметричная укладка рассматриваемых образцов приводила к регулируемому короблению. Образцы, выполненные из препрега КМКС-2м.120.Т60.37, имели различную степень коробления в зависимости от размещения «возмущающих» слоев в монолите.

Для схемы укладки монослоев по схеме $[0^\circ/-45^\circ/90^\circ/+45^\circ/0^\circ]$ отклонение от плоскостности при диагональной деформации составило 17 мм (рис. 9, б), для схемы укладки $[-45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ]$ (рис. 9, в) — 26 мм, что на 35 % больше. То есть неравновесная укладка $[45^\circ/+45^\circ]$, вынесенная дальше от оси симмет-

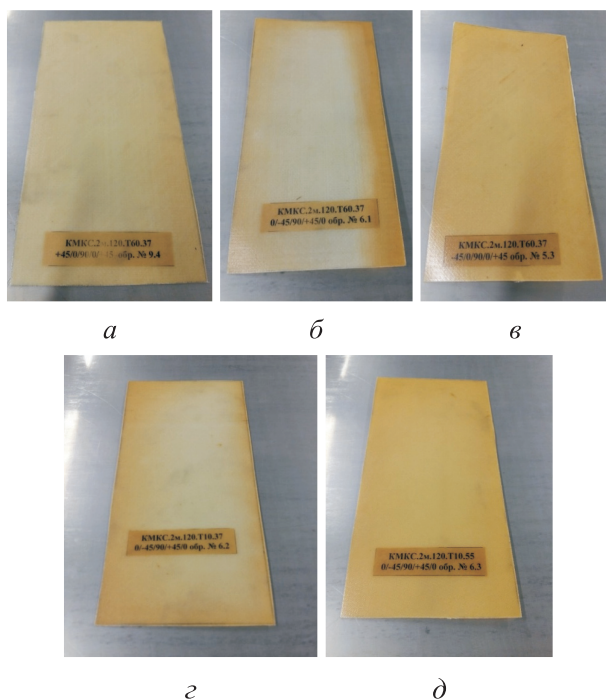


Рис. 9. Внешний вид пятимonoслойных образцов, сформованных из препрегов КМКС-2м.120.Т60.37 (а-в) и КМКС-2м.120.Т10.55 (д) по разным схемам укладки монослоев: а — $[+45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ]$; б, д — $[0^\circ/-45^\circ/90^\circ/+45^\circ/0^\circ]$; в — $[-45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ]$; з — $[0^\circ/-45^\circ/90^\circ/+45^\circ/0^\circ]$

рии, обладая большим плечом, вызывает большее коробление.

Сравнение степени деформации пятимonoслойных образцов неравновесной схемы укладки $[0^\circ/-45^\circ/90^\circ/+45^\circ/0^\circ]$ из препрегов КМКС-2м.120.Т60.37, КМКС-2м.120.Т10.37 (рис. 9, з) и КМКС-2м.120.Т10.55 (рис. 9, д) подтвердило, что отклонение от плоскостности на однонаправленном препреге больше, чем на плетеных КМКС-2м.120.Т10.37 (5 мм) и КМКС-2м.120.Т10.55 (3 мм), подвергшихся диагональной деформации.

Выводы

1. Исследованы плоские образцы монолитных панелей на основе стеклотканевых армирующих полотен. Выявлены и проанализированы факторы, влияющие на причины возникновения коробления и отклонения от плоскостности образцов. Установлено, что все факторы тесно взаимосвязаны и существенно влияют на проявление друг друга.

2. Нанос связующего в препреге оказывает незначительное влияние на степень коробления образцов, причем в панелях толщиной до

1,5 мм (с ориентировочным количеством монослоев до 7). Ориентация поверхностей (лицевой и изнаночной) при укладке препрега в панель также влияет на степень коробления только в тонких изделиях (одно- и двухmonoслойных). При проектировании панели толщиной более 1,5 мм влиянием наноса можно пренебречь. Если панель имеет толщину менее 1,5 мм, то следует принимать во внимание содержание связующего в препреге. Чем больше нанос связующего, тем значительнее коробление панели. Если толщина панели меньше 0,5 мм, то повышается вероятность ее коробления в сторону большего наноса связующего, в сторону лицевой поверхности. Проявление этих двух факторов существенно зависит от двух других, более значимых: схемы плетения армирующей основы препрега и схемы укладки монослоев препрега в монолитных панелях.

3. Рассмотрены две схемы плетения — однонаправленная утковая и сатиновая (8/3). Одноmonoслойные образцы наиболее зависят от схемы плетения. Панели на однонаправленных препрегах имеют незначительное коробление, на плетеных (вследствие неравномерной жесткости по основе и утку) — гораздо большее (в 10–12 раз). Начиная с двухслойных образцов, картина коробления меняется на противоположную. В неравновесных (несимметричных) схемах укладки образцов однонаправленные препреги дают значительно большее (в 2–5 раз) отклонение от плоскостности, чем плетеные.

4. Общее в картине коробления однонаправленных и плетеных препрегов заключается в его направлении, перпендикулярном основе. В образцах с произвольными, но симметричными схемами укладки коробление либо не выявлено (однонаправленные препреги), либо оказалось незначительным (плетеные препреги), и им можно пренебречь. Причем эти незначительные коробления практически вырождались с ростом толщины образца.

5. Для исключения явления коробления плоских монолитных панелей, изготовленных из препрегов на основе стеклотканевых армирующих полотен, необходимо соблюдать симметричную схему укладки монослоев относительно срединной линии (для пакетов с четным количеством монослоев) или среднего монослоя (для пакетов с нечетным количеством монослоев).

6. Результаты исследования могут быть рекомендованы для применения в монолитных

стеклотканевых конструкциях с высокой долей вероятности повторения.

7. Исследования продолжаются в направлении испытаний монолитных образцов на препрегах с углеродной основой (КМКУ.2М.120.Э.0145, АСМ-102, Т107), многослойных (с сотовым наполнителем) [11], а также образцов криво-

линейной формы поверхности. Результат работы — разработка математической модели прогнозирования коробления монолитных и многослойных панелей из ПКМ различной кривизны при их формовании автоклавным методом [12–15].

Литература

- [1] Бондарчук Д.А., Федулов Б.Н., Федоренко А.Н. и др. Анализ остаточных напряжений в слоистых композитах на примере симметричной схемы армирования $[0^\circ/90^\circ]$. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета*. Механика, 2019, № 3, с. 17–26, doi: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.3.02>
- [2] Молодцов Г.А., Биткин В.Е., Симонов В.Ф. и др. *Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов*, Москва, Машиностроение, 2000. 352 с.
- [3] Гусева Р.И., Ша Мингун. Особенности изготовления тонкостенных обшивок из углепластика в самолетостроении. Изменение технологических параметров в процессе формования. *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*, 2014, № 2, с. 4–12.
- [4] Васильев В.В. *Механика конструкций из композиционных материалов*. Москва, Машиностроение, 1988. 268 с.
- [5] Stress and warpage in polymer composite structures reduced. *newswise.com: веб-сайт*. URL: <https://www.newswise.com/articles/stress-and-warpage-in-polymer-composite-structures-reduced> (дата обращения: 15.04.2021).
- [6] Михайлин Ю.А. *Специальные полимерные композиционные материалы*. Санкт-Петербург, НОТ, 2009. 658 с.
- [7] Еренков О.Ю., Ковальчук С.А. *Инновационные технологии полимерных композиционных материалов*. Хабаровск, Из-во ТОГУ, 2016. 187 с.
- [8] Sonmez F.O., Eyol E. Optimal post-manufacturing cooling paths for thermoplastic composites. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2002, vol. 33, no. 3, pp. 301–314, doi: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00133-6](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00133-6)
- [9] Карташова Е.Д., Муйземнек А.Ю. Технологические дефекты полимерных слоистых композиционных материалов. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*, 2017, № 2, с. 79–89, doi: <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2017-2-7>
- [10] Биткина О.В. Экспериментальное исследование влияния технологических факторов на формоизменение многослойных панелей из композиционных материалов. *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*, 2013, № 1, с. 99–110.
- [11] Burnley L., Correia G. *Manipulating fiber orientation for the reduction of warpage in carbon fiber composite sandwich panels*. California Polytechnic State University, 2019. 56 p.
- [12] Козлов М.В., Шешенин С.В., Бабкин А.В. и др. Моделирование формования композитов на основе терморезистивных матриц. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2016, т. 12, № 6, с. 11–17.
- [13] Мотавкин А.В., Покровский Е.М. Упругие ориентационные напряжения и деформации в полимерных композитах. *Высокомолекулярные соединения. Серия А*, 2001, т. 43, № 12, с. 2156–2162.
- [14] Федулов Б.Н., Сафонов А.А., Кантор М.М. и др. Моделирование отверждения термопластических композитов и оценка величин остаточных напряжений. *Композиты и наноструктуры*, 2017, т. 9, № 2, с. 102–122.
- [15] Карпов Я.С., Павленко В.Н., Ставиченко В.Г. Структура и содержание расчёта на прочность панелей из композиционных материалов с учетом температурного воздействия. *Авиационно-космическая техника и технология*, 2010, № 3, с. 57–64.

References

- [1] Bondarchuk D.A., Fedulov B.N., Fedorenko A.N., et al. The analysis of residual stresses in layered composites with $[0^\circ/90^\circ]$ layup. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanik* [PNRPU Mechanics Bulletin], 2019, no. 3, pp. 17–26, doi: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.3.02> (in Russ.).
- [2] Molodtsov G.A., Bitkin V.E., Simonov V.F., et al. *Formostabil'nye i intellektual'nye konstruksii iz kompozitsionnykh materialov* [Shape-stable and intelligent composite design], Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000. 352 p.
- [3] Guseva R.I., Sha Mingun. Producing thin-walled lining plates of carbon fiber in aircraft engineering: a change of process parameters during molding of items made of polymer composite materials. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific Notes of Komsomolsk-On-Amour State Technical University], 2014, no. 2, pp. 4–12 (in Russ.).
- [4] Vasil'yev V.V. *Mekhanika konstruksiy iz kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of composite constructions]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 268 p.
- [5] Stress and warpage in polymer composite structures reduced. *newswise.com: website*. URL: <https://www.newswise.com/articles/stress-and-warpage-in-polymer-composite-structures-reduced> (accessed: 15.04.2021).
- [6] Mikhaylin Yu.A. *Spetsal'nye polimernye kompozitsionnye materialy* [Special polymer composites]. Sankt-Petersburg, NOT Publ., 2009. 658 p.
- [7] Erenkov O.Yu., Koval'chuk S.A. *Innovatsionnye tekhnologii polimernykh kompozitsionnykh materialov* [Innovative technologies of polymer compotes]. Khabarovsk, Iz-vo TOGU Publ., 2016. 187 p.
- [8] Sonmez F.O., Eyol E. Optimal post-manufacturing cooling paths for thermoplastic composites. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2002, vol. 33, no. 3, pp. 301–314, doi: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00133-6](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00133-6)
- [9] Kartashova E.D., Muzyemnek A.Yu. Technological defects of polymeric layered composite materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences], 2017, no. 2, pp. 79–89, doi: <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2017-2-7> (in Russ.).
- [10] Bitkina O.V. Experimental investigation of the influence of technological factors on the forming of multilayered panels done of composite materials. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series], 2013, no. 1, pp. 99–110 (in Russ.).
- [11] Burnley L., Correia G. *Manipulating fiber orientation for the reduction of warpage in carbon fiber composite sandwich panels*. California Polytechnic State University, 2019. 56 p.
- [12] Kozlov M.V., Sheshenin S.V., Babkin A.V., et al. Modeling of forming of composites based on thermosetting matrices. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh State Technical University], 2016, vol. 12, no. 6, pp. 11–17 (in Russ.).
- [13] Motavkin A.V., Pokrovskiy E.M. Elastic orientational stresses and strains in polymer composites. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A*, 2001, vol. 43, no. 12, pp. 2156–2162. (In Russ.). (Eng. version: *Polym. Sci. Ser. A.*, 2001, vol. 43, no. 12, pp. 1280–1285.)
- [14] Fedulov B.N., Safonov A.A., Kantor M.M., et al. Modeling of thermoplastic composites solidification and estimation of residual stresses. *Kompozity i nanostruktury* [Composites and Nanostructures], 2017, vol. 9, no. 2, pp. 102–122 (in Russ.).
- [15] Karpov Ya.S., Pavlenko V.N., Stavichenko V.G. Structure and content strength prediction of composite panels with account of temperature impact. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2010, no. 3, pp. 57–64 (in Russ.).

Информация об авторах

КОРОЛЬКОВ Владимир Иванович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Самолетостроение». ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: kafedra_ss@bk.ru).

НЕКРАВЦЕВ Евгений Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Самолетостроение». ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: joh-n@yandex.ru).

САФОНОВ Кирилл Сергеевич — заместитель директора Базового образовательного научно-производственного комплекса «Авиaperspektiva». ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: vstysafonov@gmail.com).

ОГУРЦОВ Павел Сергеевич — главный специалист по НМ и ПКМ. ПАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество» (394029, Воронеж, Российская Федерация, ул. Циолковского, д. 27, e-mail: ogurzowps@mail.ru).

ОГАНЕСОВ Владислав Артурович — инженер Базового образовательного научно-производственного комплекса «Авиaperspektiva». ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: voganesov@gmail.com).

ПОПОВ Игорь Сергеевич — инженер Базового образовательного научно-производственного комплекса «Авиaperspektiva». ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: igsp76@mail.ru).

САМОХВАЛОВ Виктор Валерьевич — инженер Базового образовательного научно-производственного комплекса «Авиaperspektiva». ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: belet666@yandex.ru).

Information about the authors

KOROLKOV Vladimir Ivanovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Department of Aircraft Engineering. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, 20-letiya Oktyabrya st., 84, e-mail: kafedra_ss@bk.ru).

NEKRAVTSEV Evgeniy Nikolaevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Aircraft Engineering. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, 20-letiya Oktyabrya st., 84, e-mail: joh-n@yandex.ru).

SAFONOV Kirill Sergeevich — Deputy Director of the Basic Educational Research and Production Complex “Aviaperspektiva”. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, 20-letiya Oktyabrya st., 84, e-mail: vstysafonov@gmail.com).

OGURTSOV Pavel Sergeevich — Chief Specialist in NM and PCM. PAO Voronezh Aircraft Company (394029, Voronezh, Russian Federation, Tsiolkovsky str., 27, e-mail: ogur-zowps@mail.ru).

OGANESOV Vladislav Arturovich — Engineer, Basic Educational Research and Production Complex “Aviaperspektiva”. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, 20-letiya Oktyabrya st., 84, e-mail: voganesov@gmail.com).

POPOV Igor Sergeevich — Engineer, Basic Educational Research and Production Complex “Aviaperspektiva”. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, 20-letiya Oktyabrya st., 84, e-mail: igsp76@mail.ru).

SAMOKHVALOV Viktor Valerievich — Engineer, Basic Educational Research and Production Complex “Aviaperspektiva”. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, 20-letiya Oktyabrya st., 84, e-mail: belet666@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Корольков В.И., Некравцев Е.Н., Сафонов К.С., Огурцов П.С., Оганесов В.А., Попов И.С., Самохвалов В.В. Исследование процессов устранения коробления авиационных изделий из полимерных композиционных материалов, полученных методом высокотемпературного формования. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 10, с. 84–94, doi: 10.18698/0536-1044-2021-10-84-94

Please cite this article in English as:

Korolkov V.I., Nekravtsev E.N., Safonov K.S., Ogurtsov P.S., Oganegov V.A., Popov I.S., Samokhvalov V.V. Research of the Processes of Eliminating Warp of Aviation Products Made of Polymer-Composite Materials Obtained by High-Temperature Molding. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 10, pp. 84–94, doi: 10.18698/0536-1044-2021-10-84-94