

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 629.7.021

Проблемы геометрической неустойчивости монолитных изделий из полимерных композитов на углеродной основе*

Е.Н. Некравцев, К.С. Сафонов, В.А. Оганесов,
И.С. Попов, В.В. Самохвалов

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Geometric instability problems in monolithic products made of the carbon-based polymer composites

E.N. Nekravtsev, K.S. Safonov, V.A. Oganegov,
I.S. Popov, V.V. Samokhvalov

FGBOU Voronezh State Technical University

В процессе изготовления изделий из полимерных композиционных материалов методом высокотемпературного формования в автоклаве с армирующим материалом другой химической и физической природы, они могут подвергаться геометрической неустойчивости (короблению), которое часто приводит к отбраковке. Как показали исследования, коробление может возникать не только при высокотемпературном получении монолитных и многослойных панелей для изделий авиационной и наземной техники, но и в процессе формования при температуре внешней среды не более 25...30 °С (по технологии вакуумной инфузии). При такой технологии величина коробления значительно меньше, но для получения изделий заданной геометрической конфигурации необходимо учитывать все факторы, которые могут привести к ее искажению. При переходе на новые отечественные полимерные композиционные материалы в рамках импортозамещения эта задача становится еще более актуальной. Проведены исследования образцов панелей, выполненных из различных препрегов на углеродной основе. Анализ результатов исследований выявил основные факторы, вызывающие геометрическую неустойчивость и влияющие на ее величину, для монолитных панелей из полимерных композиционных материалов. Установлено направление, вдоль которого проявляется геометрическая неустойчивость изделий из полимерных композиционных материалов. Определены конструктивные и технологические мероприятия, которые позволят уменьшить или полностью исключить указанный нежелательный эффект, сократить сроки отработки из-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2023-0011).

делий из полимерных композиционных материалов и в итоге снизить себестоимость их изготовления.

EDN: RCVIXG, <https://elibrary/rcvixg>

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

In the process of manufacturing products from polymer composite materials by high-temperature molding in an autoclave with a reinforcing material of a different chemical and physical nature, they can be subject to geometric instability (warping), which often leads to rejection. As studies have shown, warping can occur not only during high-temperature production of monolithic and multilayer panels for aviation and ground equipment, but also during molding at an ambient temperature of no more than 25 ... 30 ° C (using vacuum infusion technology). With this technology, the amount of warping is significantly less, but to obtain products of a given geometric configuration, it is necessary to take into account all the factors that can lead to its distortion. When switching to new domestic polymer composite materials as part of import substitution, this task becomes even more urgent. Studies of panel samples made of various carbon-based prepregs were conducted. Analysis of the research results showed the main factors causing geometric instability and affecting its value for monolithic panels made of polymer composite materials. The direction along which geometric instability of PCM products manifests itself has been established. Design and technological measures have been defined that will reduce or completely eliminate the said undesirable effect, reduce the time of processing products made of polymer composite materials and, ultimately, reduce the cost of their manufacture.

EDN: RCVIXG, <https://elibrary/rcvixg>

Keywords: polymer composite material, monolithic panel warping, carbon-based prepreg, autoclave technology, equilibrium laying scheme

В процессе получения изделия из полимерных композиционных материалов (ПКМ) методом высокотемпературного автоклавного формования в его слоях возникают внутренние напряжения, обусловленные усадкой связующего при его полимеризации [1, 2]. В случае неуравновешенности этих напряжений изделие будет подвергаться геометрической неустойчивости (короблению).

Коробление приводит к большому количеству отбракованных изделий, резкому снижению технологичности и значительному повышению стоимости его отработки. Оно является крайне нежелательным браковочным признаком, требующим исследования причин возникновения, поиска вариантов устранения, а также прогнозирования его появления на этапах конструирования изделия и технологической подготовки его производства.

Исправление коробления путем высокотемпературной термостабилизации вызывает расслоение конструкции и потерю ее механических свойств. Поэтому задача 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 и выходящих в набегающий поток.

Коробление изделий из ПКМ, получаемых автоклавным способом, на основе стеклотканевых препрегов рассмотрено в статье [4]. Продолжим эту работу для изделий из ПКМ на углеродной основе [5–10], применяемых в авиационной промышленности.

Цель работы — анализ причин возникновения и характера коробления, а также поиск вариантов его устранения на панелях из ПКМ на углеродной основе [5–10], изготовленных по препреговой автоклавной технологии, в сравнении с ПКМ на основе стеклоткани.

Результатом работы будет выработка рекомендаций по корректированию конструктивных схем ПКМ и (или) технологий их изготовления применительно к проблемным изделиям авиационной техники.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- выявление факторов, влияющих на возникновение и величину коробления монолит-

ных панелей из ПКМ, к которым относятся схема плетения армирующей основы препрега, величина наноса связующего в препреге, направление (схема) укладки монослоев в монолитных панелях и поверхность укладки (лицо — изнанка) по отношению к стороне наноса связующего в препреге;

- анализ результатов формования монолитных плоских однонаправленных утковых и плетеных образцов панелей из препрегов на углеродной основе (КМКУ.2м.120.Э01.45; АСМ 102);
- подбор схем равновесной укладки монолитных панелей.

Материалы и методы. Для проведения экспериментальных исследований изготавливали плоские образцы размером 100×200 мм, длинная сторона которых определяла нулевое направление изделия. Для создания и формования образцов применяли следующее оборудование: лабораторный пресс Langzaunerperfect LZT-UK-25-L с термостатом Logotherm, лабораторный пресс Langzaunerperfect LZT-UK-25-L с электронагревом и прикаточный ролик с электронагревом SK3ROL-2.

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

Процесс формования образцов из препрега КМКУ.2м.120.Э01.45 представляет собой следующую последовательность технологических операций:

- 1) создание давления на поверхность образца $0,85 \pm 0,05$ кгс/см²;
- 2) повышение температуры до 125 ± 5 °C со скоростью не более 2°С/мин;
- 3) выдержка при температуре 125 ± 5 °C в течение 60±5 мин;
- 4) увеличение давление на поверхность образца до $5,5 \pm 0,5$ кгс/см²;
- 5) повышение температуры до 180 ± 5 °C со скоростью не более 2°С/мин;
- 6) выдержка при температуре 180 ± 5 °C и давлении $5,5 \pm 0,5$ кгс/см² в течение 3,0±0,5 ч;
- 7) охлаждение под давлением $5,5 \pm 0,5$ кгс/см² до температуры не более 40 °C со скоростью не более 1°С/мин.

В качестве исходного фактора, влияющего на возникновение и величину коробления (поводку) монолитных панелей из ПКМ, исследовали схему плетения армирующей основы препрега [11]. Плоские двух- и четырехслойные

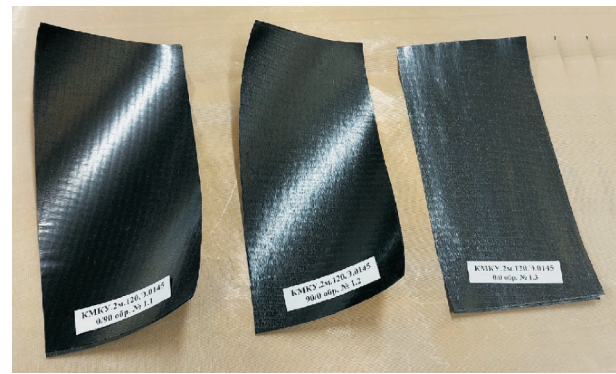


Рис. 1. Внешний вид двухслойных образцов КМКУ.2м.120.Э01.45 с различными схемами укладки:
а — 0/90; б — 90/0; в — 0/0

образцы монолитных панелей формовали из препрега КМКУ.2м.120.Э01.45 на однонаправленной утковой углетканевой основе. Однослойные образцы формовали из препрега АСМ 102 С200Т на плетеной углетканевой основе.

Формование двухслойных образцов КМКУ.2м.120.Э01.45 (рис. 1) проводили комплектно.

Комплект состоял из трех образцов КМКУ.2м.120.Э01.45, выполненных с различными направлениями укладки материала: 0/90, 90/0 и 0/0. Такой способ выбран с целью исключения влияния приборной погрешности. Сравнение характера и величины коробления проведено с достаточной долей достоверности, так как каждый комплект образцов изготавливали в одинаковых условиях.

У образца, выполненного из препрега КМКУ.2м.120.Э01.45, со схемой укладки 0/90 (рис. 1, а), наблюдается сильно выраженное диагональное коробление с отклонением его углов от плоскости более чем на 18 мм на сторону. У образца КМКУ.2м.120.Э01.45 со схемой укладки 90/0 (рис. 1, б) также имеется сильно выраженное диагональное коробление с отклонением углов от плоскости более чем на 20 мм на сторону. У образца КМКУ.2м.120.Э01.45 со схемой укладки 0/0 (рис. 1, в) коробление выражено слабо. Отклонение верхнего и нижнего края образца от плоскости составляет приблизительно 2,5 мм на сторону.

У образцов КМКУ.2м.120.Э01.45 коробление больше, чем у образцов аналогичной укладки, выполненных из препрега КМКС-2м.120.Т60.37 (14 мм для образцов с укладкой 0/90) [4]. Это обусловлено меньшей длиной связи между



Рис. 2. Внешний вид четырехслойных образцов КМКУ.2м.120.Э01.45 с разными схемами укладки:
а — 0/0/0/0; *б* — 0/90/0/90; *в* — 0/90/90/0

атомами в кристаллической решетке углеволокна по сравнению таковой у стекловолокна.

Четырехслойные образцы, изготовленные из препрега КМКУ.2м.120.Э01.45, приведены на рис. 2.

Образец КМКУ.2м.120.Э01.45 со схемой укладки 0/90/0/90 имеет заметное коробление, отклонение верхнего и нижнего края образца от плоскости составляет около 5 мм (рис. 2, б). У образцов КМКУ.2м.120.Э01.45 со схемами укладки 0/0/0/0 (рис. 2, а) и 0/90/90/0 (рис. 2, в) также наблюдается коробление, но его величина существенно меньше, чем у образца со схемой укладки 0/90/0/90: отклонение от плоскостности не превышает 1 мм.

Как показали экспериментальные исследования, направление коробления не зависит от природы материала, используемого при изготовлении препрега, а определяется схемой укладки слоев препрега. Величина неплоскостности зависит от химической природы армирующего материала композита.

В подтверждение этого проведено сравнение величины коробления образца из стеклянного препрега КМКС-2м.120.Т60.37 со схемой укладки 0/90/0/90, равной 18 мм [4], с величиной неплоскостности образца из препрега КМКУ.2м.120.Э01.45 с такой же схемой укладки (см. рис. 2, б), которая не превысила 5 мм. Проведенные исследования подтвердили, что основным фактором, приводящим к короблению изделий из стекло- и угленаполненных препрегов на основе однонаправленных (утковых) полотен, является направление (схема) взаимной укладки монослоев в монолитных панелях.

Для сравнения поведения одно- и двунаправленных угленаполненных препрегов при

высокотемпературной полимеризации выполнены эксперименты с образцами, изготовленными из препрегов на основе плетеных армирующих полотен. Исследования проводили на отечественном препреге АСМ 102 С200Т вследствие его частого применения в авиационных конструкциях.

Тип плетения полотна — саржа 2/2, ткань — равнонаправленная, а следовательно, равнопрочная, т. е. количество нитей на единицу площади и их плотность в направлении 0° (основное направление) и 90° (утковое) одинаково. Очевидно, что получаемые результаты во многом будут зависеть от такой структуры ткани препрега.

Технология формования образцов из препрега АСМ 102 С200Т, назначенная согласно технической документации, включала в себя следующие операции:

- 1) создание давления на поверхность образца 0,85±0,05 кгс/см²;
- 2) повышение температуры до 100±5 °С со скоростью не более 2°С/мин;
- 3) выдержка при температуре 100±5 °С в течение 60±5 мин;
- 4) увеличение давления на поверхность образца до 5,5±0,5 кгс/см²;
- 5) повышение температуры до 145±5 °С со скоростью не более 2°С/мин;
- 6) выдержка при температуре 145±5 °С и давлении 5,5±0,5 кгс/см² в течение 3,0±0,5 ч;
- 7) охлаждение под давлением 5,5±0,5 кгс/см² до температуры не более 40 °С со скоростью не более 1°С/мин.

Однослойные образцы из препрега АСМ 102 С200Т со схемами укладки 0, 90 и 45 приведены на рис. 3. На всех образцах наблюдает-

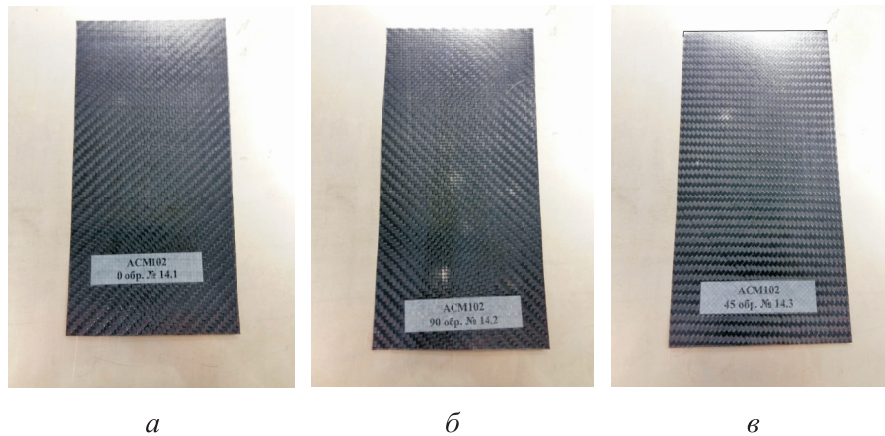


Рис. 3. Внешний вид однослойных образцов из препрега АСМ 102 С200Т со схемами укладки 0 (а), 90 (б) и 45 (в)

ся незначительное отклонение от плоскостности, не превышающее 2 мм на сторону, что существенно меньше, чем у аналогичных образцов, выполненных из КМКС-2м.120.Т10.55 и КМКС-2м.120.Т10.55 (20 и 29 мм соответственно), и сравнимо по величине с образцами, изготовленными из КМКС-2м.120.Т60.37 (2 мм) [4].

Двухслойные образцы из препрега АСМ 102 С200Т с укладкой 0/90, +45/-45, 0/+45 и 90/+45 приведены на рис. 4. Образцы с укладкой 0/90 (рис. 4, а) и +45/-45 (рис. 4, б) имеют незначительное отклонение от плоскостности (менее 1 мм). На образце с укладкой 0/+45 (рис. 4, в) это отклонение достигает 2 мм, а на образце с укладкой 90/+45 (рис. 4, г) — 4 мм.

Такое отличие от образцов аналогичной укладки, выполненных из однонаправленного углового препрега КМКУ.2м.120.Э01.45, обусловлено более равномерным распределением жесткости нитей основы в ее направлении и направлении угтка, характерном для препрегов

на плетеной основе, причем эта основа равнопрочная, о чем было указано ранее.

Трехслойные образцы из препрега АСМ 102 С200Т с укладкой 0/90/0, 90/0/90, -45/0/+45 и +45/0/+45 приведены на рис. 5. Все образцы имеют незначительное отклонение от плоскостности, не превышающее 1 мм. Столь малые величины коробления также обусловлены более равномерным распределением жесткости нитей основы в направлении 0° (направлении основы) и угтка (90°).

Четырехслойные образцы из препрега АСМ 102 С200Т с укладкой +45/90/90/-45, +45/0/90/-45, +45/0/90/+45, +45/90/90/+45, -45/90/90/-45, +45/0/0/+45 и -45/0/0/-45 приведены на рис. 6. Они также обладают незначительным короблением. Отклонение всех образцов от плоскостности не превышает 0,5 мм.

Обсуждение результатов. Анализ выявленных факторов, влияющих на причины возникновения и величину коробления образцов монолит-

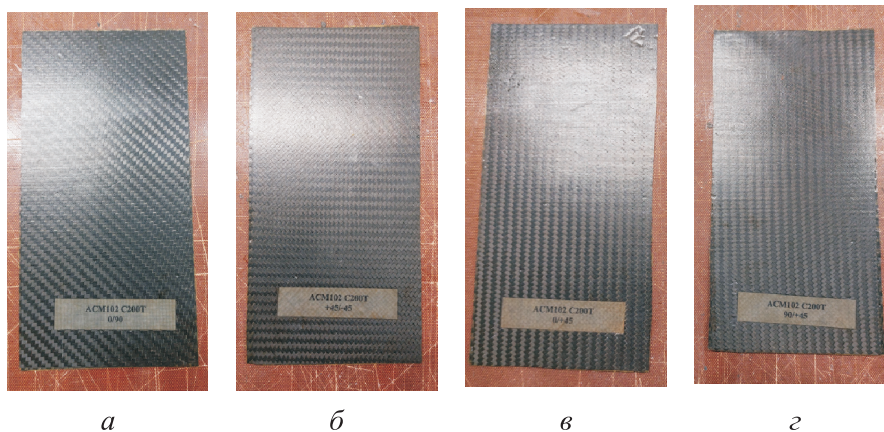


Рис. 4. Внешний вид двухслойных образцов из препрега АСМ 102 С200Т с различными схемами укладки: а — 0/90; б — +45/-45; в — 0/+45; г — 90/+45

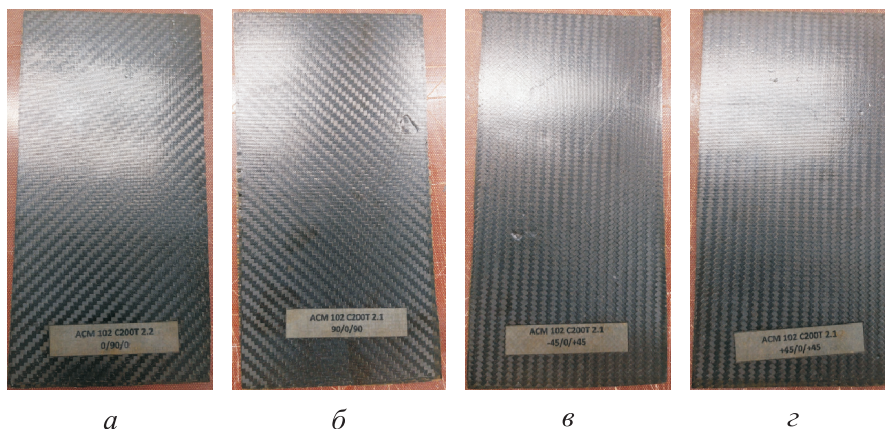


Рис. 5. Внешний вид трехслойных образцов из препрега АСМ 102 С200Т с различными схемами укладки:
 а — 0/90/0; б — 90/0/90; в — -45/0/+45; г — +45/0/+45

ных панелей на основе углетканевых армирующих полотен, показал, что они тесно взаимосвязаны и существенно влияют друг на друга.

Экспериментальные исследования показали, что однослойные панели, выполненные из препрегов на плетеной углетканевой основе, имеют незначительное коробление, как и однослойные образцы, изготовленные из препрегов на плетеной

стеклотканевой основе. Это свидетельствует о сходной природе возникновения коробления в таких препрегах.

Двухслойные панели с неравновесной (несимметричной) укладкой монослоев, выполненные из препрегов на однонаправленной утковой основе, коробятся в гораздо большей степени (отклонение от плоскости в 3 раза вы-

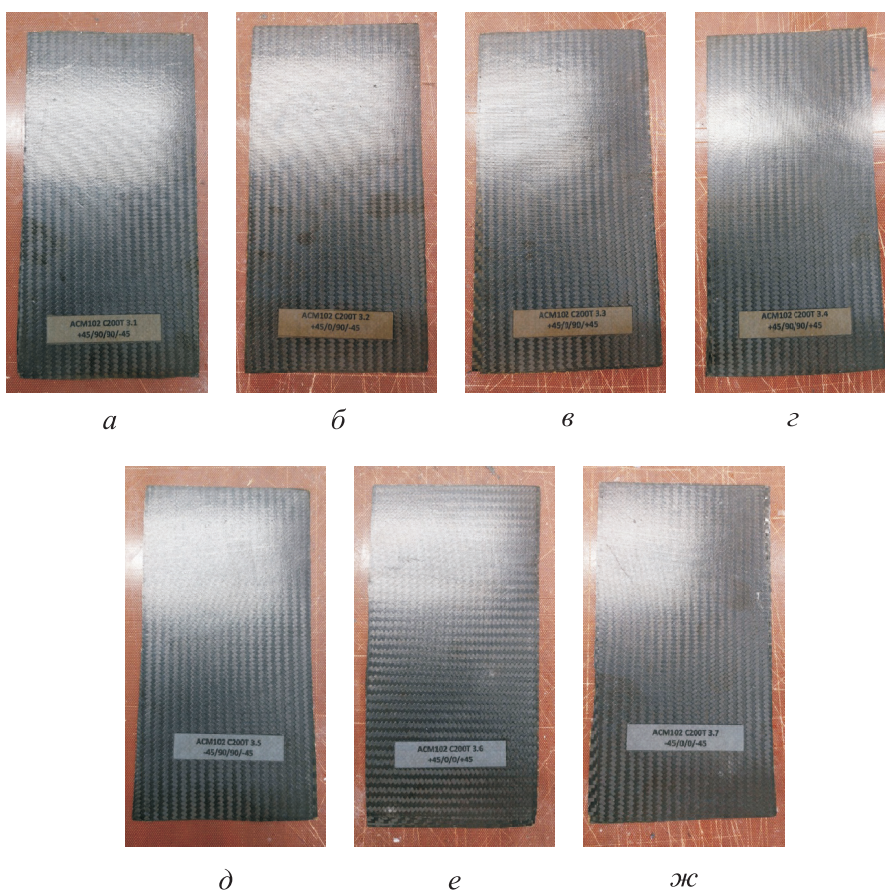


Рис. 6. Внешний вид четырехслойных образцов из препрега АСМ 102 С200Т с различными схемами укладки:
 а — +45/90/90/-45; б — +45/0/90/-45; в — +45/0/90/+45; г — +45/90/90/+45;
 д — -45/90/90/-45; е — +45/0/0/+45; ж — -45/0/0/-45

ше), чем четырехслойные образцы с неравномерной укладкой из того же препрега. Следовательно, величина коробления снижается по мере увеличения количества слоев материала в образце, т. е. его жесткости.

Двухслойные панели с неравновесной укладкой монослоев, выполненные из препрегов на плетеной основе, коробятся значительно меньше (отклонение от плоскости в 5 раз ниже), чем двухслойные образцы с неравновесной укладкой, изготовленные из однонаправленного уткового препрега. Это остается справедливым и при увеличении количества слоев.

В равновесных (симметричных) схемах укладки образцов однонаправленные препреги на углетканевой основе дают коробление, сходное по величине с равновесными образцами, выполненными из однонаправленных препрегов на стеклотканевой основе [4]. Большая разница в величине коробления возникает при неравновесной укладке. Двухслойные образцы из препрега на однонаправленной утковой углетканевой основе с неравновесной укладкой монослоев коробятся сильнее, чем таковые из препрега на однонаправленной утковой стеклотканевой основе (величина отклонения в 1,3 раза больше).

Для четырехслойных образцов из препрега на однонаправленной утковой углетканевой основе с несимметричной укладкой картина меняется на противоположную (отклонение в 10 раз меньше). Общее в картине коробления однонаправленных и плетеных препрегов заключается в его направлении — оно перпендикулярно основе.

В образцах с произвольной, но симметричной схемой укладки однонаправленных препре-

гов, коробление было незначительным. Формы коробления препрегов на углетканевой основе совпадают с таковыми для препрегов на стеклотканевой основе.

Выводы

1. Выявлены и проанализированы факторы, влияющие на причины возникновения и величину коробления образцов монолитных панелей на основе углетканевых армирующих полотен.

2. Установлено, что для исключения явления коробления плоских монолитных панелей, изготовленных из препрегов на основе углетканевых 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). Этот результат подтвержден данными описанных исследований и может быть рекомендован для применения в монолитных углетканевых конструкциях. Следует отметить качественную аналогию полученного результата с плоскими монолитными панелями, изготовленными из препрегов на основе стеклотканевых армирующих полотен.

3. Дальнейшие исследования будут направлены на выявление и описание факторов, влияющих на появление и величину коробления изделий, изготовленных из разных ПКМ (стекло- и углеткани), с сотовым наполнителем [12], а также изделий криволинейной формы. Итогом исследований станет разработка математической модели прогнозирования коробления изделий из ПКМ разной кривизны при их формовании автоклавным методом [13–16].

Литература

- [1] Афанасьев А.В., Рабинский Л.Н. Учет влияния упруго-наследственных свойств полимерного композиционного материала на остаточное напряженное состояние после процесса формования. *Мат. II всерос. науч.-практ. студ. школы-семинара Компьютерный инжиниринг в промышленности и ВУЗах*. Москва, МАИ-принт, 2010, с. 52.
- [2] Молодцов Г.А., Елпатьевский А.Н., Лурье С.А. и др. Методы решения задач устойчивости слоистых ортотропных панелей из композиционных материалов несимметричной структуры по толщине с учетом технологических факторов. *II Всесоюз. конф. Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов*. Куйбышев, КуАИ им. С.П. Королева, 1986, с. 71–72.
- [3] Гусева Р.И., Ша М. 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] Корольков В.И., Некравцев Е.Н., Сафонов К.С. и др. 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: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-10-84-94>
- [5] Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Ч. 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов. *Контроль. Диагностика*, 2007, № 4, с. 23–32.
- [6] 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: 15.11.2023).
- [7] Михайлин Ю.А. *Специальные полимерные композиционные материалы*. Санкт-Петербург, НОТ, 2009. 658 с.
- [8] Бунаков В.А., Головкин Г.С., Машинская Г.П. и др. *Армированные пластики*. Москва, Изд-во МАИ, 1997. 402 с.
- [9] Fazil O. Sonmez, Erhan Eyol. 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)
- [10] Мэттьюз Ф., Ролингс Р. *Композитные материалы. Механика и технология*. Москва, Техносфера, 2004. 408 с.
- [11] Вашуков Ю.А. *Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композитных материалов. Мультимедийный образовательный модуль*. Самара, Изд-во СГАУ, 2012. 185 с.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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] Afanasyev A.V., Rabinskiy L.N. [Consideration of the influence of elastic and hereditary properties of polymer composite material on the Residual stress state after the moulding process]. *Mat. II vseros. nauch.-prakt. stud. shkoly-seminara Kompyuternyy inzhiniring v promyshlennosti i VUZakh* [Proc. II Russ. Sci.-Pract. Student School-Seminar “Computer Engineering in Industry and Universities”]. Moscow, MAI-print Publ., 2010, p. 52. (In Russ.).
- [2] Molodtsov G.A., Elpatyevskiy A.N., Lurye S.A. et al. [Methods for solving stability problems of layered orthotropic panels of asymmetric composite materials. composite materials of asymmetric structure on thickness with account of technological factors]. *II Vsesoyuz. konf. Sovremennyye problemy stroitelnoy mekhaniki i prochnosti letatelnykh apparatov* [II All-Union Conf. Modern Problems of Structural Mechanics and Aircraft Strength]. Kuybyshev, KuAI im. S.P. Koroleva, 1986, pp. 71–72. (In Russ.).
- [3] Guseva R.I., Sha M. 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 Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific Notes of Komsomolsk-on-Amour State Technical University], 2014, no. 2, pp. 4–12. (In Russ.).
- [4] Korolkov V.I., Nekravtsev E.N., Safonov K.S. et al. Research of the processes of eliminating warpage of aviation products made of polymer-composite materials obtained by high-temperature molding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2021, no. 10, pp. 84–94, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-10-84-94> (in Russ.).
- [5] Murashov V.V., Rumyantsev A.F. Defects of monolithic details and laminated structures made of polymer composite materials and methods of detecting them. Part. 1. Defects of monolithic details and laminated structures made of polymer composite materials. *Kontrol. Diagnostika*, 2007, no. 4, pp. 23–32. (In Russ.).
- [6] 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: 15.11.2023).
- [7] Mikhaylin Yu.A. *Spetsialnye polimernye kompozitsionnye materialy* [Special polymer composite materials]. Sankt-Petersburg, NOT Publ., 2009. 658 p. (In Russ.).
- [8] Bunakov V.A., Golovkin G.S., Mashinskaya G.P. et al. *Armirovannyye plastiki* [Reinforced plastics]. Moscow, Izd-vo MAI Publ., 1997. 402 p. (In Russ.).
- [9] Fazil O. Sonmez, Erhan Eyol. 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)
- [10] Matthews F.L., Rawlings R.D. *Composite materials. Engineering and science*. Woodhead, 1999. 470 p. (Russ. ed.: *Kompozitnyye materialy. Mekhanika i tekhnologiya*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2004. 408 p.)
- [11] Vashukov Yu.A. *Tekhnologiya raketnykh i aerokosmicheskikh konstruktsiy iz kompozitnykh materialov. Multimediyyny obrazovatelnyy modul* [Technology of rocket and aerospace structures from composite materials. Multimedia educational module]. Samara, Izd-vo SGAU Publ., 2012. 185 p. (In Russ.).
- [12] 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.
- [13] 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.).
- [14] 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.)
- [15] 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.).
- [16] 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.).

Статья поступила в редакцию 22.12.2023

Информация об авторах

НЕКРАВЦЕВ Евгений Николаевич — кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «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 — младший научный сотрудник научно-образовательной лаборатории «Учебно-научный центр радиотехники и электроники». ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: vstysafonov@gmail.com).

ОГАНЕСОВ Владислав Артурович — младший научный сотрудник научно-образовательной лаборатории «Учебно-научный центр радиотехники и электроники». ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: voganesov@gmail.com).

ПОПОВ Игорь Сергеевич — младший научный сотрудник научно-образовательной лаборатории «Учебно-научный центр радиотехники и электроники». ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: igsp76@mail.ru).

САМОХВАЛОВ Виктор Валерьевич — младший научный сотрудник научно-образовательной лаборатории «Учебно-научный центр радиотехники и электроники». ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394006, Воронеж, Российская Федерация, ул. 20-летия Октября, д. 84, e-mail: samohvalov@cchgeu.ru).

Information about the authors

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

SAFONOV Kirill Sergeevich — Junior Researcher, Technician, Scientific and Educational Laboratory “Training and Research Center of Radio Engineering and Electronics”. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, 20-letiya Oktyabrya St., Bldg. 84, e-mail: vstysafonov@gmail.com).

OGANESOV Vladislav Arturovich — Junior Researcher, Technician, Scientific and Educational Laboratory “Training and Research Center of Radio Engineering and Electronics”. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, 20-letiya Oktyabrya St., Bldg. 84, e-mail: voganesov@gmail.com).

POPOV Igor Sergeevich — Junior Researcher, Technician, Scientific and Educational Laboratory “Training and Research Center of Radio Engineering and Electronics”. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, 20-letiya Oktyabrya St., Bldg. 84, e-mail: igsp76@mail.ru).

SAMOKHVALOV Viktor Valerievich — Junior Researcher, Technician, Scientific and Educational Laboratory “Training and Research Center of Radio Engineering and Electronics”. Voronezh State Technical University (394006, Voronezh, Russian Federation, St. 20-letiya Oktyabrya, Bldg. 84, e-mail: samohvalov@cchgeu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Некравцев Е.Н., Сафонов К.С., Оганесов В.А., Попов И.С., Самохвалов В.В. Проблемы геометрической неустойчивости монолитных изделий из полимерных композитов на углеродной основе. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 8, с. 104–113.

Please cite this article in English as:

Nekravtsev E.N., Safonov K.S., Oganegov V.A., Popov I.S., Samokhvalov V.V. Geometric instability problems in monolithic products made of the carbon-based polymer composites. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 8, pp. 104–113.