

УДК 62.437

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-605-612

Для цитирования: Методика выбора материала оснастки для изготовления элементов конструкции летательных аппаратов / К. В. Файзуллин, М. П. Данилаев, А. В. Поляев и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 3. С. 605–612. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-605-612.

For citation: Faizullin K. V., Danilaev M. P., Polyayev A. V. et al. [Tool material selection methodology for aircraft elements design]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 3, P. 605–612. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-605-612.

Методика выбора материала оснастки для изготовления элементов конструкции летательных аппаратов

К. В. Файзуллин, М. П. Данилаев*, А. В. Поляев, С. А. Сёмин, Т. И. Ракипов

Казанский национальный исследовательский технический университет
имени А. Н. Туполева – КАИ (КНИТУ – КАИ)
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10
*E-mail: danilaev@mail.ru

Развитие современных материалов и технологий изготовления элементов конструкций летательных аппаратов из полимерных композиций требует обоснования выбора технологической оснастки. Основными критериями выбора материала технологической оснастки являются физико-технические характеристики материала, обеспечение требуемых точностей изготовления оснастки, а также экономическая целесообразность. Выбор материала оснастки зависит от технологии изготовления элементов конструкции из полимерных композиционных материалов. В работе представлена методика выбора материала оснастки для изготовления деталей методом вакуумной инфузии. Представлены результаты сравнительного анализа типовых материалов оснастки, используемых в производстве. Показано, что основными критериями при проведении сопоставительного анализа являются: температура эксплуатации, стойкость к воздействию растворителей, устойчивость к механическим воздействиям; ремонтпригодность; значение коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР); стабильность геометрии оснастки и ее герметичность. Результаты сопоставительного анализа показали, что для изготовления оснастки, при использовании в технологическом процессе высоких температур, наиболее целесообразными являются металлы и углепластик. В работе представлен алгоритм выбора материала оснастки для изготовления деталей из полимерных композиционных материалов. Отмечено, что при изготовлении элементов конструкции на основе стеклопластика и углепластика материал оснастки следует выбирать такой же, что и у детали. Это позволяет, во-первых, обеспечить одинаковые КЛТР, что важно при горячем формовании детали, а, во-вторых, устранить коробление детали в процессе ее остывания на оснастке. Однако достижение заданных точностей такой оснастки требует учета обработки оснастки гелькоутом после ее изготовления. В работе приведен подход к количественной оценке экономической целесообразности выбора материала оснастки. Показано, что только совокупность технических, технологических и экономических факторов позволяет обосновать целесообразность используемого материала оснастки для конкретного производства элементов конструкции летательного аппарата.

Ключевые слова: инфузия, материал оснастки, элементы конструкции летательного аппарата.

Tool material selection methodology for aircraft elements design

K. V. Faizullin, M. P. Danilaev^{*}, A. V. Polyayev, S. A. Semin, T. I. Rakipov

State Budgetary Educational Institution of Higher Education Kazan National Research Technical University
named after A. N. Tupolev – KAI (KNRTU – KAI)
10, K. Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation
^{*}E-mail: danilaev@mail.ru

The technology and technological equipment selection have to be substantiating for the modern materials for product the aircraft construction elements from polymer composition. The physical and technical characteristics of the material, ensuring the required accuracy of manufacturing equipment, as well as economic feasibility are the main criteria for choosing the material of technological equipment. The material equipment choosing is depends on the polymer composite construction technology manufacturing. The methodic of rigging materials selection for aircraft construction elements production from polymer composition by vacuum infusion is considered in that paper. The results of a comparative analysis of typical materials equipment used in production are presented are considered in that paper. It is shown that the main criteria for a comparative analysis are: temperature, resistance to solvents, resistance to mechanical stress; maintainability; the value of the coefficient of linear thermal expansion; the stability of the geometry of the equipment and its tightness. It was showing that the metals and carbon fiber composite are the most appropriate for equipment manufacture that used in high temperature processes manufacturing composite components. The materials equipment algorithm choosing for polymer composite components manufacturing is considered in that paper. It is noted that the same material have to be choosing for equipment manufacturing as the carbon fiber or fiberglass polymer composite component. This allows to ensure the same CLTE, which is important in hot forming of the composite component, and to eliminate warping of the composite component during its cooling on the equipment. However, the equipment gelcoat processing has to be taking into account for specified accuracy achievement. The quantitative assessment of the economic feasibility of material equipment choosing is considered in that paper. It is shown that only a combination of technical, technological and economic factors makes it possible to substantiate the expediency of the rigging material used for the specific production of aircraft construction elements.

Keywords: Infusion, rigging material, aircraft structural elements.

Введение

Технология инфузии получила широкое распространение при изготовлении элементов конструкции летательных аппаратов (ЛА) из полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1–5]. Причем, эту технологию используют для изготовления как силового набора ЛА (шпангоуты, невелюры) [6], так и для изготовления обшивок и даже интерьеров ЛА [2; 7]. Данный метод изготовления элементов конструкций ЛА позволяет обеспечить наименьшее количество дефектов (пустоты, поры) в слоях ПКМ при относительно невысокой стоимости технологического оснащения [1; 4; 5]. Повышение требований к точности изготовления деталей из ПКМ, применение новых компонентов ПКМ (смолы, тканые и нетканые материалы), а также экономические аспекты, например, в части серийности изделий, требуют пересмотра методики выбора материала оснастки при использовании технологии инфузии. Применяемые в настоящее время материалы оснастки обладают различными показателями физико-технических характеристик. Например, оснастки из древесноволокнистой плиты средней плотности (МДФ) обладают хорошей обрабатываемостью, но плохой стойкостью к воздействию внешних факторов (температура, влажность и пр.). Оснастки из металлов, например, дюралюминия, обладают зеркальными характеристиками: сложнее в обработке, но стойки к внешним воздействиям [8–10].

В настоящее время отсутствуют четкие методические рекомендации по выбору материала оснастки с учетом экономической целесообразности и их физико-технических характеристик.

При изготовлении серийных изделий влияние стоимости оснастки снижается в зависимости от увеличения объёма изготавливаемых на ней изделий [11; 12]. Однако при этом одновременно возрастает износ оснастки, который может привести к существенному снижению точности элементов конструкции ЛА. Целью настоящей работы является разработка методики выбора материала оснастки для изготовления элементов конструкции ЛА методом вакуумной инфузии.

Методика исследований

Выбор материала оснастки предполагает формализацию критериев, по которым такой выбор будет осуществляться. Основными, практически важными, критериями являются: температура эксплуатации, стойкость к воздействию растворителей, устойчивость к механическим воздействиям; ремонтпригодность; значение коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР); стабильность геометрии оснастки и ее герметичность [1, 13, 14]. Выбор этих критериев обусловлен, в том числе, следующими соображениями.

Температура эксплуатации оснастки. Температурные режимы изготовления элементов конструкции ЛА методом вакуумной инфузии определяются типами используемых смол и технологиями их полимеризации [1; 3; 4]. Например, при изготовлении изделий с использованием эпоксидного связующего ТО200 (ТУ 2257-055-59846689-2016, ООО «Итекма», Россия) осуществляют нагрев до 180 °С для полимеризации смолы. При этом материал оснастки должен не только выдержать такую температуру и не подвергнуться деструкции, но и сохранять форму с заданной точностью.

Стойкость к химическому воздействию. Оснастка не должна повреждаться растворителями или специализированными разделительными составами. Оснастка должна легко очищаться от остатков смолы и разделительных антиадгезивных составов с помощью растворителей, рекомендуемых для смол.

Устойчивость к механическим воздействиям и ремонтпригодность. Оснастка должна быть стойкой к внешним механическим воздействиям. Причем материал оснастки должен допускать возможность ремонта рабочей поверхности в случае ее повреждения, например, истирания или появления сколов в процессе ее эксплуатации.

Требование низкого значения КЛТР обусловлено использованием высокотемпературных процессов полимеризации заготовок готовых изделий. Причем КЛТР материала оснастки должен быть близок к КЛТР полимерного композиционного материала изделия. Следует отметить, что учёт расширения оснастки в процессе нагрева не гарантирует отсутствие короблений детали после формования [15].

Герметичность. Вакуумирование подготовленной заготовки изделия при ее изготовлении методом вакуумной инфузии требует высокой герметичности материала оснастки. Наличие пор в материале оснастки может привести к появлению дефектов (пузырьков, пор) в конечном изделии.

Результаты и их обсуждение

Сопоставительный анализ часто используемых материалов оснастки представлен в таблице.

В таблице приняты следующие обозначения: «+» – критерий выполняется; «±» – критерий выполняется частично; «-» – критерий не выполняется; k – максимальное количество деталей, которое может быть изготовлено на данной оснастке с учетом ее износа. Стоимость изготовления оснастки приведена относительно оснастки из МДФ с размерами 2×2×2 м.

Анализ существующих на рынке материалов для изготовления оснастки показывает, что при использовании в технологическом процессе высоких температур наиболее целесообразными являются металлы и углепластик. Алгоритм выбора материала оснастки для изготовления элементов конструкции ЛА из ПКМ методом вакуумной инфузии представлен на рис. 1.

Сопоставительный анализ материалов оснастки

| | МДФ | Модельный пластик | Дюралюминий (Д16Т) | Сплав Инвар | Стеклопластик | Углепластик |
|---|-----|-------------------|--------------------|-------------|---------------|-------------|
| Стойкость к температуре | – | ± | + | + | – | + |
| Стойкость к растворителям | ± | ± | + | + | ± | ± |
| Стойкость к механическим воздействиям | – | – | ± | + | ± | ± |
| Ремонтопригодность | ± | + | ± | ± | + | + |
| КЛТР | ± | – | – | + | ± | + |
| Стабильность геометрии | – | ± | + | + | ± | ± |
| Герметичность | – | ± | + | + | ± | ± |
| Приведенная стоимость изготовления оснастки (E) | 1,0 | 2,5±0,3 | 10,0±1,0 | 20,0±2,0 | 7,0±0,7 | 10,0±1,0 |
| k | 1 | 3 | 200 | 300 | 70 | 100 |

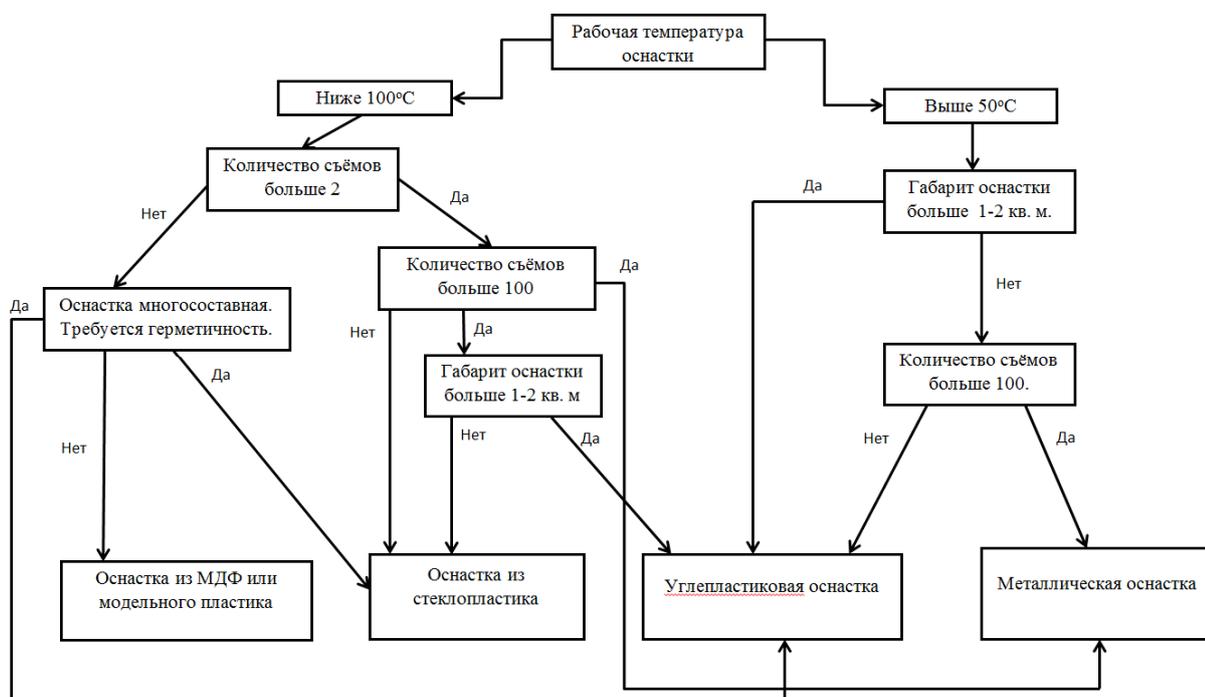


Рис. 1. Алгоритм выбора материала оснастки для изготовления элементов конструкции ЛА из ПКМ

Fig. 1. Algorithm of material equipment's selection for aircraft component manufacturing from composite

Тем не менее следует отметить перспективность использования модельного пластика в качестве материала оснастки. По сути, модельный пластик представляет собой полимерный композиционный материал с дисперсным наполнением. В качестве связующего в этом материале обычно используются полиуретаны различных марок. За счет выбора наполнителя, его концентрации, а также марки полиуретана возможно обеспечить характеристики, удовлетворяющие заданным требованиям технологического процесса. В настоящее время на рынке представлены, в основном, зарубежные марки модельного пластика, которые далеко не всегда удовлетворяют требованиям производства. Например, значительный КЛТР по сравнению с углепластиком и

наличие открытых ячеек (пор) (см. таблицу) требуют дополнительных затрат на изготовление технологической оснастки. Пример изготовления оснастки из модельного пластика представлен на рис. 2.

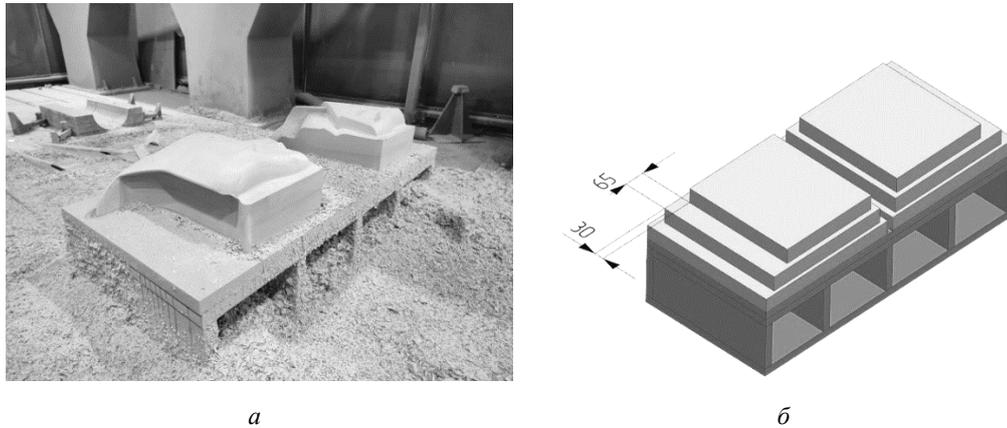


Рис. 2. Изготовление оснастки из модельного пластика:

a – заготовка мастер-модели на станке с ЧПУ; *б* – заготовка для изготовления мастер-модели из модельного пластика на каркасе из МДФ

Fig. 2. Equipment manufacturing from model plastic:

a – blank master model; *b* – blank for the master model manufacturing from MDF

Отдельно следует отметить, что при изготовлении элементов конструкции из стеклопластика и углепластика материал оснастки следует выбирать такой же, что и у детали. Это позволяет, во-первых, обеспечить одинаковые КЛТР, что важно при горячем формовании детали, а во-вторых, устранить коробление детали в процессе ее остывания на оснастке. Однако даже в этом случае не всегда удастся обеспечить высокую точность заданных размеров деталей. Например, это может быть связано с использованием «гелькоута» в структуре такой оснастки в отличие от мастер-модели, на которой она располагается (рис. 3).



Рис. 3. Оснастка из углепластика

Fig. 3. Carbon fiber composite equipment

Это, в свою очередь, повышает требования к точности изготовления оснастки, а, следовательно, следует ожидать повышения ее стоимости.

При оценке экономической целесообразности при выборе материала оснастки следует учитывать не только ее приведенную стоимость E (см. таблицу), но и себестоимость (Σ) партии деталей, изготовленных с ее использованием:

$$\Sigma = X \cdot n + \frac{k - n + 1}{k} \cdot Y, \quad (1)$$

где X – себестоимость одной детали, Y – себестоимость одной оснастки для изготовления таких деталей, n – количество изготовленных деталей. Например, при себестоимости элемента конструкции ЛА $X = 200\,000$ руб, стоимости оснастки из модельного пластика $Y_{МП} = 50\,000$ руб, из углепластика $Y_{УП} = 150\,000$ руб себестоимость партии деталей в 50 шт. составит: $\Sigma_{УП} = 10\,076\,500$ руб, $\Sigma_{МП} = 10\,533\,333$ руб.

Заключение

Проведенный сопоставительный анализ материалов оснастки для изготовления деталей методом вакуумной инфузии позволил формализовать методику выбора материала, наилучшим образом удовлетворяющего требуемым критериям. Следует отметить, что только совокупность технических, технологических и экономических факторов позволяет обосновать целесообразность используемого материала оснастки для конкретного производства элементов конструкции ЛА.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по Соглашению номер 1022041100774-3 / 1022041100496-8 от 03.06.2022.

Acknowledgements

This work was carried out by Russian Ministry of Science and Higher Education Grant No 1022041100774-3 / 1022041100496-8 of 03.06.2022.

Библиографические ссылки

1. Особенности изготовления полимерных композиционных материалов методом вакуумной инфузии / М. И. Душин, Л. В. Чурсова, А. В. Хрульков, Д. И. Коган // Вопросы материаловедения. 2013. № 3. С. 33–40.
2. Изготовление стеклопластиковых обшивок методом вакуумной инфузии с использованием эпоксиангидридного связующего и полупроницаемой мембраны / М. М. Григорьев, А. В. Хрульков, Я. М. Гуревич, Н. Н. Панина // Тр. ВИАМ. 2014. № 2. С. 4–8.
3. Донецкий К. И., Усачева М. Н., Хрульков А. В. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Ч. 1 // Труды ВИАМ. 2022. № 6. С. 58–67.
4. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Ч. 2 / А. В. Хрульков, К. И. Донецкий, М. Н. Усачева, А. Н. Горянский // Тр. ВИАМ. 2022. № 7. С. 50–62.
5. Мостовые конструкции из композитов / А. Е. Ушаков, Ю. Г. Кленин, Т. Г. Сорина и др. // Композиты и наноструктуры. 2009. № 3. С. 25–37.
6. Проектирование и оптимизация технологического процесса вакуумной инфузии для изготовления кузова вагона-хоппера из полимерных композиционных материалов / А. Е. Ушаков, А. А. Сафонов, И. В. Сергеичев и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 3. С. 102–109.
7. Руденко М. С., Михеев А. Е., Гирн А. В. Технология изготовления сотовых заполнителей из полимерных композиционных материалов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 2. С. 391–397.

8. Комаров В. А., Куркин Е. И., Кузнецов А. С. Исследование и модификация оснастки и формообразующей поверхности с целью повышения точности изготовления деталей методом вакуумной инфузии // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2013. Т. 15, № 6-3. С. 710–717.
9. Янович А. Современные композитные материалы для производства оснастки // Композитный мир. 2016. № 6. С. 36–40.
10. Исследования и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ / А. В. Хрульков, М. И. Душин, Ю. О. Попов, Д. И. Коган // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 292–301.
11. Исследование свойств полимерного композиционного материала для изготовления пресс-форм ЛГМ / Шаршин В. Н., Кечин В. А., Сухоруков Д. В., Сухорукова Е. В., Серeda Е. В. // Литейщик России. 2011. № 12. С. 40–42.
12. Дектярев А. В., Морозов В. Н. Техничко-экономическое обоснование внедрения аддитивных технологий в отечественную судостроительную промышленность // Гипотеза. 2018. № 3. С. 15–24.
13. Андреев А. В., Петропольский В. С. Оптимизация выбора материала мастер-моделей для изделий из полимерных композиционных материалов в условиях единичного и опытного производства в изделиях авиационной техники // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. 2015. № 2. С. 20–28.
14. Моделирование влияния оснастки на конечную форму изделий из полимерного композита / М. В. Козлов, С. В. Шешенин, И. В. Макаренко, Д. А. Белов // Вычислительная механика сплошных сред. 2016. Т. 9, № 2. С. 145–161.
15. Карташова Е. Д., Муйземнек А. Ю. Технологические дефекты полимерных слоистых композиционных материалов // Изв. вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2017. Т. 42, № 2. С. 79–89.

References

1. Dushin M. I., Chursova L. V., Khrul'kov A. V., Kogan D. I. [Peculiarities of production of polymer composites by vacuum infusion method]. *Voprosy materialovedeniya*. 2013, No. 3, P. 33–40 (In Russ.).
2. Grigor'ev M. M., Khrul'kov A. V., Gurevich Ya. M., Panina N. N [Production of fiberglass liners by vacuum infusion using an epoxy-hydride binder and a semi-permeable membrane]. *Trudy VIAM*. 2014, No. 2, P. 4–8 (In Russ.).
3. Donetskiy K. I., Usacheva M. N., Khrul'kov A. V. [Infusion methods for the production of polymer composites (review). Part 1]. *Trudy VIAM*. 2022, No. 6, P. 58–67 (In Russ.).
4. Khrul'kov A. V., Donetskiy K. I., Usacheva M. N., Goryanskiy A. N. [Infusion methods for the manufacture of polymer composites (Review). Part 2]. *Trudy VIAM*. 2022, No. 7, P. 50–62 (In Russ.).
5. Ushakov A. E., Klenin Yu. G., Sorina T. G. et al. [Composite bridge structures]. *Kompozity i nanostruktury*. 2009, No. 3, P. 25–37 (In Russ.).
6. Ushakov A. E., Safonov A. A., Sergeichev I. V. et al. [Design and optimization of vacuum infusion process for manufacturing of hopper body made of polymer composites]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2015, No. 3, P. 102–109 (In Russ.).
7. Rudenko M. S., Mikheev A. E., Girn A. V. [Technology of honeycomb core production from polymer composites]. *Sibirskiy aerokosmicheskiy zhurnal*. 2021, Vol. 22, No. 2, P. 391–397 (In Russ.).
8. Komarov V. A., Kurkin E. I., Kuznetsov A. S. [Research and modification of tooling and forming surface in order to improve the accuracy of parts manufacturing by vacuum infusion]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2013, Vol. 15, No. 6-3, P. 710–717 (In Russ.).
9. Yanovich A. [Modern composite materials for tooling production]. *Kompozitnyy mir*. 2016, No. 6, P. 36–40 (In Russ.).

10. Khrul'kov A. V., Dushin M. I., Popov Yu. O., Kogan D. I. [Research and development of autoclave and non-autoclave technologies for PCM molding]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2012, No. 5, P. 292–301 (In Russ.).

11. Sharshin V. N., Kechin V. A., Sukhorukov D. V. et al. [Study of the properties of polymer composite material for the production of LGM molds]. *Liteyshchik Rossii*. 2011, No. 12, P. 40–42 (In Russ.).

12. Dektyarev A. V., Morozov V. N. [Feasibility study on the implementation of additive technologies in the domestic shipbuilding industry]. *Gipoteza*. 2018, No. 3, P. 15–24 (In Russ.).

13. Andreev A. V., Petropol'skiy V. S. [Optimization of material selection of master models for polymer composite products in the conditions of single and pilot production in the products of aeronautical engineering]. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruktsiy letatel'nykh apparatov*. 2015, No. 2, P. 20–28 (In Russ.).

14. Kozlov M. V., Sheshenin S. V., Makarenko I. V., Belov D. A. [Modeling the influence of tooling on the final shape of polymer composite products]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*. 2016, Vol. 9, No. 2, P. 145–161 (In Russ.).

15. Kartashova E. D., Muzyemnek A. Yu. [Technological defects in polymer layered composites]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki*. 2017, Vol. 42, No. 2, P. 79–89 (In Russ.).

© Файзуллин К. В., Данилаев М. П., Поляев А. В., Сёмин С. А., Ракипов Т. И., 2023

Файзуллин Константин Владимирович – кандидат технических наук, заместитель начальника управления научно-исследовательской работы (УНИР); Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ. E-mail: KV Fayzullin@kai.ru.

Данилаев Максим Петрович – доктор технических наук, профессор, заведующий межвузовской междисциплинарной лабораторией; Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ. E-mail: danilaev@mail.ru.

Поляев Арсений Валерьевич – начальник НИЛ «СЦК «Технологии композитов»; Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ. E-mail: AVPolyaev@kai.ru.

Сёмин Никита Александрович – инженер НИЛ «СЦК «Технологии композитов»; Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ. E-mail: NASyemin@kai.ru.

Ракипов Тимур Ильшатovich – инженер НИЛ «СЦК «Технологии композитов»; Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ. E-mail: TIRakipov@dckai.ru.

Fayzullin Konstantin Vladimirovich – Cand. Sc., Deputy Head of UNIR; Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI. E-mail: KV Fayzullin@kai.ru.

Danilaev Maksim Petrovich – Dr. Sc., Professor, Head of the Interuniversity Interdisciplinary Laboratory; Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI. E-mail: danilaev@mail.ru.

Polyaev Arseniy Valer'evich – header RL “SCC “Composite technologies”; Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI. E-mail: AVPolyaev@kai.ru.

Semin Nikita Aleksandrovich – engineer RL “SCC “Composite technologies”; Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI. E-mail: NASyemin@kai.ru.

Rakipov Timur Il'shatovich – engineer RL “SCC “Composite technologies”; Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI. E-mail: TIRakipov@dckai.ru.
