

Научная статья

УДК 629.7:678.026.7

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185667>

EDN: <https://www.elibrary.ru/BVIMEW>



Определение взаимосвязи структурных и технологических параметров биаксиальных армирующих преформ элементов конструкций ЛА

Марат Ринатович Ибрагимов^{1✉}, Рамазон Собиржонович Усмонов², Валентин Илдарович Халиулин³

^{1, 2, 3} Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

¹sw1ft1704200@mail.ru✉

²ramazonusmanov@gmail.com

³pla.kai@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена определению взаимного влияния структурных параметров в преформах с биаксиальной схемой армирования при изготовлении преформ изделий профильного типа авиационно-космического назначения. В рамках исследования представлены теоретические зависимости по расчету толщины монослоя. В статье представлена система уравнений, описывающая форму ровинга в виде эллипса. Уделено внимание распределению филаментов в ровинге в виде треугольного и квадратного типа, и определено их процентное соотношение в филаменте. Результаты исследования позволяют с высокой точностью определять структурные параметры, имеющие практическую значимость при изготовлении преформы на базе метода радиального плетения.

Ключевые слова: радиальное плетение, зависимость толщины монослоя от угла армирования, расположение филаментов в сечении ровинга, зависимость толщины монослоя от типа расположения филаментов

Для цитирования: Ибрагимов М.Р., Усмонов Р.С., Халиулин В.И. Определение взаимосвязи структурных и технологических параметров биаксиальных армирующих преформ элементов конструкций ЛА // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 3. С. 63–71. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185667>

Original article

Determination of the Relationship between Structural and Technological Parameters of Biaxial Reinforcing Preforms of the Aircraft Structural Elements

Marat R. Ibragimov^{1✉}, Ramazon S. Usmonov², Valentin I. Khaliulin³

^{1, 2, 3} Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

¹sw1ft1704200@mail.ru✉

²ramazonusmanov@gmail.com

³pla.kai@mail.ru

Abstract

To represent the end-use properties of the biaxial type preform manufactured by the radial weaving, knowing only the input data, such as filling-in ratio, both inner and outer diameters of the technological mandrel and reinforcement

angle, is not enough. Special attention should be paid to the preform properties at the micro- and mezolevels, and their interrelation with technological parameters.

The goal of the study consists in studying the roving end-use cross-section shape forming in the structure of the biaxial type preform. The tasks of the said study were as follows:

- determining minimum and maximum roving width at the microlevel to define the filaments location within the framework of the roving cross-section;

- defining thickness of the layer being braided, on the assumption of the filaments location in the roving cross-section. The roving width was being determined by the preforms manufacturing with the radial braiding method with various linear densities and surface mass (Fig. 1), followed by the preform scanning and the roving width determining. Fig. 2 shows the roving width dependence on the preform surface mass.

The monolayer thickness was being determined from the same preforms by the Mitutoyo ID-C112CXB micrometer. Fig. 3 shows the monolayer practical thickness dependence on the reinforcement angle, on the assumption of the data in Table 3. After analysis of the obtained results of the the monolayer thickness dependence on the reinforcement angle by the approximation method, the equation (3) for the monolayer theoretical thickness computing was derived. A slight deviation of the curves from each other is being observed, which indicates the high accuracy and the possibility of the equation (3) application for any brand of the reinforcing material.

There are two basic types of the filament arrangement in the roving cross-section, either triangular and square. The filaments with the triangular arrangement occupy a smaller area in the roving cross-section, hence, an increase in the ratio of filaments with this type of arrangement leads to the monolayer thickness reduction. Thus, it is advisable to determine the filament arrangement effect on the monolayer thickness. A system of equations (5) was obtained as a part of the study, which allowed determining the ratios of filaments forming triangular and square structures. The obtained data will allow determining henceforth the preform maximum degree of compactness while a multi-layer biaxial structure forming.

Keywords: radial weaving, monolayer thickness dependence on the reinforcement angle, the filaments location in the roving section, monolayer thickness dependence on the filaments arrangement type

For citation: Ibragimov M.R., Usmonov R.S., Khaliulin V.I. Determination of the Relationship between Structural and Technological Parameters of Biaxial Reinforcing Preforms of the Aircraft Structural Elements. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(3):63-71. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185667>

List of Figures

Fig. 1. Preform split into the zones with different surface mass, on the example of the HTA40 E13 6K 400tex carbon fiber:

1 – 20°; 2 – 30°; 3 – 45°; 4 – 50°

Fig. 2. Roving width dependence on its surface mass

Fig. 3. Practical monolayer thickness dependence on the reinforcement angle

Fig. 4. Practical and approximated monolayer thickness dependence on the reinforcement angle:

a – UMT430-12K-EP; b – HTA40 E13 6K 400tex

List of tables

Table 1. Initial data of fibers

Table 2. Input data for the preform manufacturing

Table 3. Roving width values

Table 4. Practical values of the monolayer thickness

Table 5. Filament content computing in the triangular arrangement

Table 6. Determining the monolayer thickness by various methods

Введение

Современные технологии и промышленность все чаще обращаются к композитным материалам как к решению, сочетающему в себе высокие механические, термические и эксплуатационные свойства [1–3]. Композиты, представляющие собой комбинацию полимерной матрицы и армирующих элементов, обладают уникальными характеристиками, которые превосходят свойства традиционных материалов, таких как металлы и керамика. Благодаря своей легкости, прочности,

устойчивости к коррозии [4] и возможности создания сложных конструкций [5], композитные материалы находят широкое применение в различных отраслях, включая авиастроительную промышленность [6–8].

Преформы изготавливаются следующими методами:

- автоматизированная выкладка [9, 10];
- намотка [11, 12];
- радиальное плетение [13–15];
- 3D-ткачество [16, 17].

В данной работе исследуются структурные параметры преформы, изготовленной методом радиального плетения.

Преформы состоят из волокон, сечение которых нерегулярно меняется в зависимости от структурных и технологических параметров преформы. Известно, что конфигурация сечения напрямую зависит от физико-механических свойств будущей детали летательного аппарата (ЛА).

К структурным параметрам плетеных преформ относятся такие параметры, как угол армирования α , форма поперечного сечения ровинга, коэффициент наполнения V_f , структурный тип переплетения (Diamond, Regular, Hercules) [18].

В работе [19] предложена аналитическая модель, прогнозирующая структуру волокон в преформе и разработанная методом конечных элементов (МКЭ). Данная модель может достаточно точно предсказать структурные параметры преформы, но она не учитывает типы расположения филаментов в волокне.

В работе [20] приводится аналитическая модель прогнозирования структурных параметров преформы, учитывающая типы расположения филаментов и разработанная на основе математического анализа. Данная модель не учитывает случайного расположения филаментов в волокне ввиду вероятности получения неточного результата и не учитывает взаимосвязь с технологическими параметрами преформы.

В работе [21] предлагается метод конечных элементов (МКЭ) для моделирования механического поведения тканых материалов на микроскопическом уровне, то есть на уровне отдельных волокон. Были разработаны модели и алгоритмы, позволяющие моделировать тканые структуры на уровне отдельных волокон, но сильная неоднородность деформаций на уровне волокон указывает на необходимость дальнейшего изучения применимости непрерывных моделей для описания поведения волокон. Но в данной работе учитывается деформация в рамках только одного слоя; не учитываются такие параметры, как ширина ровинга, угол армирования, поверхностная масса, а также метод создания преформы.

В работе [22] представлен расчет толщины ровинга в зависимости от выбранного типа поперечного сечения: прямоугольного, эллиптического, двояковыпуклого (чечевицеобразного). Выбор поперечного сечения влияет на значение коэффициента сечения нити. Также в работе уделяется внимание степени упаковки, в зависимости от которой изменяется объемное содержание филаментов в ровинге. Данное значение варьируется от 0,7 до 0,91.

Для представления формирования конечных структурных свойств преформы биаксиального типа, изготовленной методом радиального плетения, нужно знать не только входные данные, такие как коэффициент наполнения, внутренний и внешний диаметры конечного изделия и угол армирования. Особое внимание стоит уделить структурным свойствам преформы на микро- и мезоуровнях и их взаимосвязь с технологическими параметрами.

Цель данного исследования заключается в определении взаимосвязи структурных параметров преформы с биаксиальной схемой армирования. Актуальность работы обусловлена открытым состоянием вопроса определения значения ширины ровинга и влияния данного параметра на толщину монослоя в преформе, а также форму и плотность упаковки филаментов в ровинге.

Задачи исследования:

- определить зависимость толщины монослоя от линейной плотности и ширины ровинга;
- исследовать зависимость ширины ровинга от угла армирования и поверхностной массы;
- определить соотношение филаментов треугольного и квадратного типа в ровинге.

Экспериментальная часть

Экспериментальная часть работы была выполнена с использованием углеволокон марок UMT49S-12K-EP, HTA40 E13 6K 400tex и UMT430-12K-EP. В рамках данного исследования преформы изготавливались на машине радиального плетения HERZOG RF 1/144-100. Измерения геометрических параметров ровинга проводились посредством микрометра Mitutoyo ID-C112CXB и методом анализа сканогамм готовых преформ. Ширина ровинга определялась в результате оплетки цилиндрической технологической оправки с последовательным изменением угла армирования в диапазоне от 20 до 60°.

Известно, что ширина ровинга при плетении зависит от таких технологических параметров, как количество катушек, угол армирования и тип армирующего материала. Ширина ровинга принимает участие в определении такого структурного параметра, как степень площади ровинга (отношение текущей ширины ровинга к максимальной), играющая важнейшую роль в формировании преформы и в определении физико-механических свойств будущего изделия.

Для определения минимальной и максимальной ширины ровинга был проведен ряд экспериментов с углеволокнами с различной линейной плотностью. В табл. 1 представлены исходные данные волокон, которые использовались в рамках данного исследования.

Входные технологические параметры плетения представлены в табл. 2.

Таблица 1. Исходные данные волокон

	UMT49S-12K-EP	HTA40 E13 6K 400tex	UMT430-12K-EP
Количество филаментов n , шт.	12000	6000	12000
Линейная плотность волокна ρ_l , г/км	759	400	700
Диаметр филамента D_{fil} , мкм	7		

Минимальное и максимальное значения ширины ровинга определялись путем оплетки длинномерной технологической оправки с изменением угла армирования по длине (рис. 1). Входные данные по изготовлению преформы представлены в табл. 2. Толщина монослоя определялась исходя из сканограммы преформы. На рис. 2 представлена зависимость ширины ровинга от поверхностной массы преформы.

В табл. 3 представлены значения ширины ровинга t , которой удалось достичь в рамках исследова-

ния. Ширина ровинга определялась исходя из сканограммы преформы.

Исходя из табл. 3, можно заметить, что увеличение угла армирования приводит к уменьшению ширины ровинга. Максимальной шириной ровинга следует считать значение при $\alpha = 20^\circ$, поскольку преформы с данным углом армирования были изготовлены при $0,93 < CF < 1$ (CF – степень покрытия, представляющая собой долю площади технологической оправки, занятой волокном). Под минимальной шириной ровинга подразумевается

Таблица 2. Входные данные для изготовления преформы

Технологический параметр	UMT430-12K-EP	UMT49S-12K-EP	HTA40 E13 6K 400tex
Диаметр технологической оправки, мм	50		30
Количество катушек, шт.	72		
Натяжение нити, Н	4,5		
Диаметр кольца схода армирующего материала, мм	100		
Частота вибрации кольца схода, Гц	25		

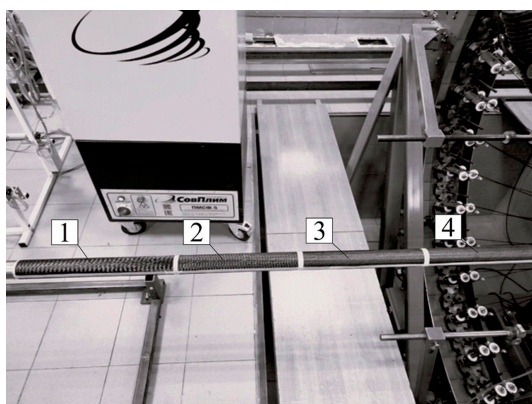


Рис. 1. Преформа, разделенная зонами с различной поверхностной массой на примере углеволокна марки HTA40 E13 6K 400tex: 1 – 20°; 2 – 30°; 3 – 45°; 4 – 50°

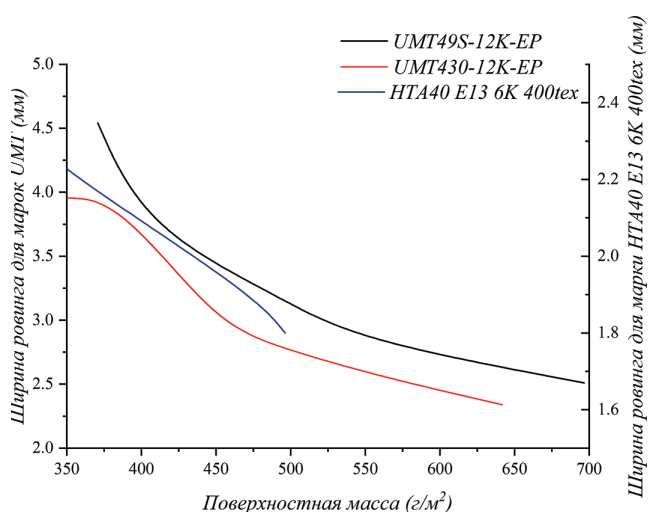


Рис. 2. Зависимость ширины ровинга от его поверхностной массы

Таблица 3. Значения ширины ровинга

Марка армирующего материала	$\alpha, ^\circ$	$t, \text{мм}$
UMT430-12K-EP	20	3,64
	30	3,13
	45	3,04
	50	2,81
	60	2,17
UMT49S-12K-EP	20	3,96
	30	3,34
	45	3,09
	50	2,71
	60	2,20
HTA40 E13 6K 400tex	20	1,91
	30	1,81
	45	1,75
	50	1,59

такая ширина ровинга, при которой тот в дальнейшем не способен сжиматься. Максимальная и минимальная ширина ровинга связана с разряжением и переуплотнением преформы соответственно.

Таким образом, была выявлена зависимость толщины монослоя от линейной плотности и ширины ровинга:

$$b = \frac{8a\rho_l}{\rho t}, \quad (1)$$

где b — толщина монослоя, мм; ρ_l — линейная плотность волокна, г/км; ρ — объемная плотность волокна, г/см³; t — ширина ровинга, мм; a — поправочный коэффициент.

В табл. 4 представлены значения практической толщины монослоя b в зависимости от угла армирования α . Толщина монослоя определялась микрометром Mitutoyo ID-C112CXВ.

На рис. 3 представлена зависимость практической толщины монослоя от угла армирования, исходя из данных табл. 3.

Исходя из графиков, представленных на рис. 3, можно сделать вывод о том, что зависимость нелинейная, в связи с чем появляется необходимость введения вариативного поправочного коэффициента a , зависящая от угла армирования α . Определение зависимости $a = a(\alpha)$ состоит в следующем.

Зная практические значения толщины монослоя в зависимости от угла армирования α (табл. 3), можно вычислить поправочные коэффициенты из формулы (1). Исходя из полученных значений выводится зависимость поправочного коэффициента a путем аппроксимации кривой зависимости прак-

Таблица 4. Значения практической толщины монослоя

Марка армирующего материала	$\alpha, ^\circ$	$b, \text{мм}$
UMT430-12K-EP	20	0,422
	30	0,453
	45	0,487
	50	0,515
	60	0,637
UMT49S-12K-EP	20	0,414
	30	0,442
	45	0,517
	50	0,569
	60	0,715
HTA40 E13 6K 400tex	20	0,421
	30	0,442
	45	0,505
	50	0,546

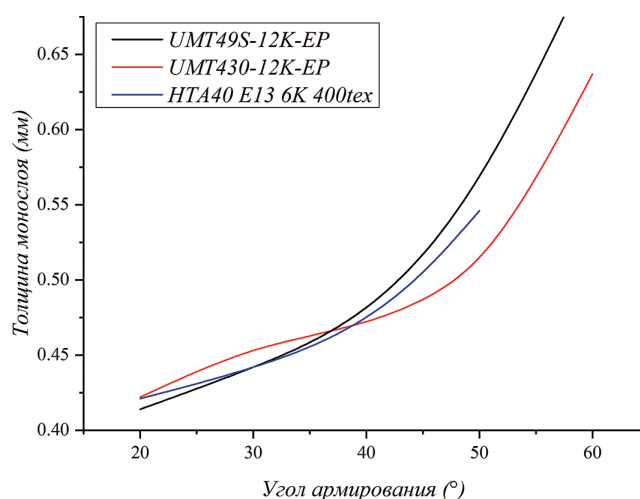


Рис. 3. Зависимость практической толщины монослоя от угла армирования

тического значения поправочного коэффициента от угла армирования. В результате выполнения данных операций была получена формула:

$$a = 0,003917 \cdot \alpha^{-0,018305}, \quad (2)$$

где a — поправочный коэффициент; α — угол армирования, $^\circ$.

После подстановки выражения (2) в (1) получаем формулу

$$b = 0,003917 \cdot \alpha^{-0,018305} \cdot \frac{\rho_l}{\rho \cdot t}. \quad (3)$$

На рис. 4 представлены зависимости практической толщины монослоя и толщины монослоя,

полученной по формуле (3), от угла армирования для UMT430-12K-EP (рис. 4,а) и НТА40 Е13 6К 400tex (рис. 4,б). Кривые приведены только для двух марок армирующего материала, поскольку формула (3) выводилась исходя из практической толщины монослоя для UMT49S-12K-EP.

На графиках наблюдается слабое отклонение кривых друг от друга, что говорит о высокой точности и возможности использования формулы (3) для любой марки армирующего материала.

Зная толщину монослоя и ширину ровинга при заданных значениях оплетаемого диаметра и угла армирования преформы, можно определить характер распределения филаментов в поперечном сечении ровинга.

На сегодняшний день известно множество структур филаментов в рамках ровинга. Некоторые не рассматривают сечение ровинга, состоящее из филаментов и структур, которые они образуют, а просто рассматривают объем филаментов в ровинге. Но никто из авторов не рассматривает соотношение распределения той или иной структуры в рамках ровинга, что может повлиять на прочностные характеристики детали ЛА. В рамках исследования была получена система уравнений, которая позволяет определить соотношения филаментов, образующих структуры треугольного и квадратного типа:

$$\begin{cases} b = \frac{2D_{fil}^2}{\pi t} \left[\pi \cdot fil_t + \frac{3\pi}{4} fil_s + \frac{1}{3} \left(\sqrt{3} - \frac{\pi}{2} \right) fil_{tr} \right]; \\ b = 3,917 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha^{-0,018305} \frac{\rho_l}{\rho \cdot t}; \\ fil_t = fil_s + fil_{tr}, \end{cases} \quad (4)$$

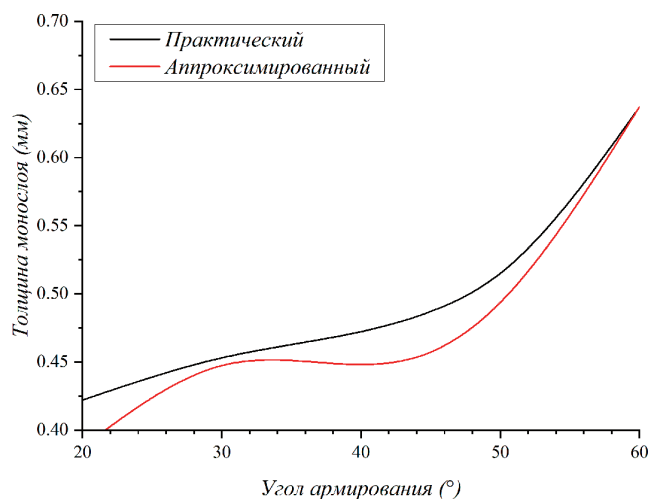
где D_{fil} — диаметр филамента, мм; fil_t — общее количество филаментов, fil_s — количество филаментов в квадратном расположении, fil_{tr} — количество филаментов в треугольном расположении.

В табл. 5 приведены процентные содержания филаментов в треугольном соотношении, полученные из системы уравнений (4).

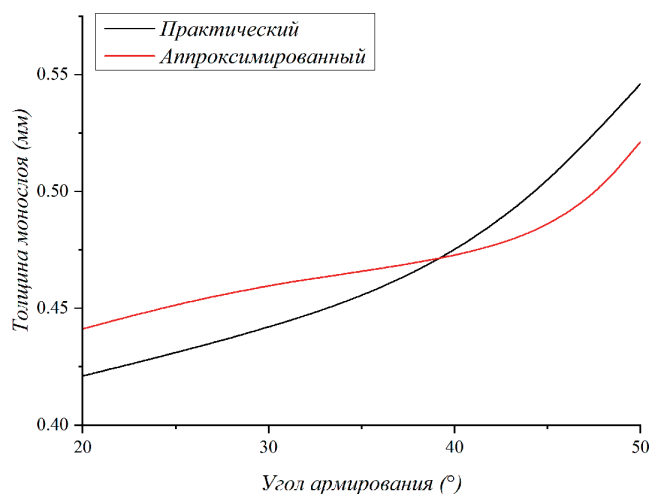
Результаты

В результате проведенных исследований были установлены следующие закономерности:

- выведена аналитическая зависимость толщины монослоя от линейной плотности волокна и ширины ровинга, включающая вариативный поправочный коэффициент;
- установлена связь между шириной ровинга и углом армирования, а также поверхностной массой преформы;



а



б

Рис. 4. Зависимость практической и аппроксимированной толщины монослоя от угла армирования:
а — UMT430-12K-EP; б — НТА40 Е13 6К 400tex

— определено количественное соотношение филаментов с треугольным расположением, изменяющееся в пределах от 72,28% до 95,33% в зависимости от марки волокна и угла армирования.

Обсуждение

Результаты исследования согласуются с ранее опубликованными работами, однако предлагаемый подход позволяет более точно рассчитывать толщину монослоя за счет введения вариативного поправочного коэффициента и учета структуры расположения филаментов в ровинге.

В отличие от моделей, представленных в исследованиях [17–20], данная методика учитывает влияние структуры филаментов на формирование преформы, что повышает достоверность расчетов.

Расчет по методике [21] производится в зависимости от степени упаковки, что затрудняет

Таблица 5. Расчет содержания филаментов в треугольном соотношении

Марка армирующего материала	$\alpha, ^\circ$	$(fil_w/fil_t) \cdot 100\%^*$
UMT430-12K-EP	20	95,18
	30	93,51
	45	94,16
	50	95,33
	60	92,75
UMT49S-12K-EP	20	82,56
	30	79,89
	45	81,03
	50	81,56
	60	83,07
HTA40 E136K 400tex	20	74,78
	30	74,97
	45	72,28
	50	72,73

* процентное содержание филаментов в треугольном расположении

определение толщины ровинга. Предлагаемая методика позволяет облегчить расчет толщины монослоя без определения степени упаковки с высокой точностью. Результаты сравнения расчетов по методике [21] представлены в табл. 6. Толщина монослоя рассчитывалась при степени упаковки, равной 0,75.

Выводы

По результатам работы были сделаны следующие выводы:

- выявлены закономерности, описывающие влияние линейной плотности волокна и угла армирования на толщину и ширину ровинга в монослое с биаксиальной структурой армирования;
- определено процентное содержание филаментов с треугольным расположением в зависимости от формы поперечного сечения ровинга и количества филаментов в нем.

Полученные результаты демонстрируют высокую практическую ценность, способствуя повышению точности расчета структуры преформ. Предложенный метод, включающий вариативный поправочный коэффициент и структурный анализ расположения филаментов, превосходит по точ-

ности и универсальности существующие подходы и может быть эффективно использован при создании биаксиальных преформ авиационно-космического назначения. Полученные данные позволят в дальнейшем определить максимальную степень компактируемости преформы в процессе формирования многослойной структуры биаксиального типа.

Список источников

1. Hsissou R., Seghiri R., Benzekri Z., et al. Polymer composite materials: A comprehensive review // Composite structures. 2021. Vol. 262: 113640. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113640
2. Gibson R.F. A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures // Composite structures. 2010. Vol. 92. No. 12, pp. 2793–2810. DOI: 10.1016/j.compstruct.2010.05.003
3. Rajak D.K., Pagar D., Kumar R., et al. Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials // Journal of Materials Research and Technology. 2019. Vol. 8. No. 6, pp. 6354–6374. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.09.068
4. Bairagi H., Vashishth P., Ji G., et al. Polymers and their composites for corrosion inhibition application: Development, advancement, and future scope – A critical review // Corrosion Communications. 2024. Vol. 15, pp. 79–94. DOI: 10.1016/j.corcom.2023.10.006
5. Nagavally R.R. Composite materials - history, types, fabrication techniques, advantages, and applications // International Journal of Mechanical and Production Engineering. 2017. Vol. 5. No. 9, pp. 82–87.
6. Parveez B., Kittur M.I., Badruddin I.A., et al. Scientific advancements in composite materials for aircraft applications: a review // Polymers. 2022. Vol. 14. No. 22: 5007. DOI: 10.3390/polym14225007
7. Setlak L., Kowalik R., Lusiak T. Practical use of composite materials used in military aircraft // Materials. 2021. Vol. 14. No. 17: 4812. DOI: 10.3390/ma14174812
8. Zolkin A.L., Galanskiy S.A., Kuzmin A.M. Perspectives for use of composite and polymer materials in aircraft construction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1047. No. 1: 012023. DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012023
9. Zhang L., Wang X., Pei J., et al. Review of automated fibre placement and its prospects for advanced composites // Journal of Materials Science. 2020. Vol. 55. No. 2, pp. 7121–7155. DOI: 10.1007/s10853-019-04090-7
10. Frketic J., Dickens T., Ramakrishnan S. Automated Manufacturing and Processing of Fiber-Reinforced

Таблица 6. Определение толщины монослоя по различным методикам

Марка армирующего материала	$\alpha, ^\circ$	Практическое значение толщины монослоя, мм	Теоретическое значение толщины монослоя, мм	Теоретическое значение толщины монослоя по методике [21], мм.
UMT49S-12K-EP	45	0,517	0,504	0,502

- Polymer (FRP) Composites: An Additive Review of Contemporary and Modern Techniques for Advanced Materials Manufacturing // *Additive Manufacturing*. 2017. Vol. 14. No. 4, pp. 69–86. DOI: 10.1016/j.addma.2017.01.003
11. Munro M. Review of manufacturing of fiber composite components by filament winding // *Polymer Composites*. 1988. Vol. 9. No. 5, pp. 352–359.
 12. Azeem M., Ya H.H., Kumar M., et al. Application of filament winding technology in composite pressure vessels and challenges: a review // *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 49: 103468. DOI: 10.1016/j.est.2021.103468
 13. Patti A., Acierio D. Materials, weaving parameters, and tensile responses of woven textiles // *Macromol - A Journal of Macromolecular Research*. 2023. Vol. 3. No. 3, pp. 665–680. DOI: 10.3390/macromol3030037
 14. Федяев В. Л., Халиулин В. И., Сидоров И. Н. и др. Капиллярная пропитка пакета семипрегов при изготовлении композитных элементов летательных аппаратов // *Вестник Московского авиационного института*. 2023. Т. 30. № 4. С. 68–78. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177608>
 15. Чесноков А.В. Исследование влияния технологических параметров плетения на структуру поверхностного слоя // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2008. № 3(50). С. 37–40.
 16. Perera Y.S., Muwanwella R.M.H.W., Fernando P.R., et al. Evolution of 3D weaving and 3D woven fabric structures // *Fashion and Textiles*. 2021. Vol. 8. No. 1: 11. DOI: 10.1186/s40691-020-00240-7
 17. Walther J., Decrette M., Tournlonias M., et al. 3D weaving process for composite reinforcements: Critical yarn crossings // *Applied Composite Materials*. 2025. DOI: 10.1007/s10443-025-10321-9
 18. Rawal A., Saraswat H., Sibal A. Tensile response of braided structures: a review // *Textile Research Journal*. 2015. Vol. 85. No. 19, pp. 2083–2096. DOI: 10.1177/0040517515576331
 19. Czichos R., Bareiro O., Pickett A.K., et al. Experimental and numerical studies of process variabilities in biaxial carbon fiber braids // *International Journal of Material Forming*. 2021. Vol. 14. No. 9/10, pp. 39–54. DOI: 10.1007/s12289-020-01541-4
 20. Самунур С.А. Проектирование и технология изготовления сетчатых конструкций летательных аппаратов с плетеной системой армирования: Дисс. ... канд. техн. наук. Казань, 2018. 134 с.
 21. Durville D. A finite element approach of the behaviour of woven materials at microscopic scale // In: Ganghoffer JF., Pastrone F. (eds) *Mechanics of Microstructured Solids. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics*. Springer, Berlin, Heidelberg; 2008. Vol. 46, pp. 39–46. DOI: 10.1007/978-3-642-00911-2_5
 22. van Ravenhorst J.H. Design tools for circular overbraiding of complex mandrels. PhD thesis. Enschede, University of Twente; 2018. DOI: 10.3990/1.9789036545860
 7. Setlak L, Kowalik R, Lusiak T. Practical use of composite materials used in military aircraft. *Materials*. 2021;14(17):4812. DOI: 10.3390/ma14174812
 8. Zolkin AL, Galanskiy SA, Kuzmin AM. Perspectives for use of composite and polymer materials in aircraft construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1047(1):012023. DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012023
 9. Zhang L, Wang X, Pei J, et al. Review of automated fibre placement and its prospects for advanced composites. *Journal of Materials Science*. 2020;55(2):7121–7155. DOI: 10.1007/s10853-019-04090-7
 10. Frketic J, Dickens T, Ramakrishnan S. Automated Manufacturing and Processing of Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites: An Additive Review of Contemporary and Modern Techniques for Advanced Materials Manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2017;14(4):69–86. DOI: 10.1016/j.addma.2017.01.003
 11. Munro M. Review of manufacturing of fiber composite components by filament winding. *Polymer Composites*. 1988;9(5):352–359.
 12. Azeem M, Ya HH, Kumar M, et al. Application of filament winding technology in composite pressure vessels and challenges: a review. *Journal of Energy Storage*. 2022;49:103468. DOI: 10.1016/j.est.2021.103468
 13. Patti A, Acierio D. Materials, weaving parameters, and tensile responses of woven textiles. *Macromol - A Journal*

References

- of *Macromolecular Research*. 2023;3(3):665–680. DOI: 10.3390/macromol3030037
14. Fedyaev VL, Khaliulin VI, Sidorov IN, et al. Capillary impregnation of a semipreg stack in composite aircraft parts production. *Aerospace MAI Journal*. 2023;30(4):68–78. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=177608>
15. Chesnokov AV. Investigation of the influence of technological parameters of weaving on the structure of the surface layer. *Aerospace technic and technology*. 2008(3):37–40.
16. Perera YS, Muwanwella RMHW, Fernando PR, et al. Evolution of 3D weaving and 3D woven fabric structures. *Fashion and Textiles*. 2021;8(1):11. DOI: 10.1186/s40691-020-00240-7
17. Walther J, Decrette M, Tourlonias M, et al. 3D weaving process for composite reinforcements: Critical yarn crossings. *Applied Composite Materials*. 2025. DOI: 10.1007/s10443-025-10321-9
18. Rawal A, Saraswat H, Sibal A. Tensile response of braided structures: a review. *Textile Research Journal*. 2015;85(19):2083–2096. DOI: 10.1177/0040517515576331
19. Durville D. A finite element approach of the behaviour of woven materials at microscopic scale. In: Ganghoffer JF, Pastrone F (eds) *Mechanics of Microstructured Solids. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics*. Springer, Berlin, Heidelberg; 2008. Vol. 46. p. 39–46. DOI: 10.1007/978-3-642-00911-2_5
20. Czichos R, Bareiro O, Pickett AK, et al. Experimental and numerical studies of process variabilities in biaxial carbon fiber braids. *International Journal of Material Forming*. 2021;14(9/10):39–54. DOI: 10.1007/s12289-020-01541-4
21. Samipur SA. *Design and manufacturing technology of mesh structures of aircraft with a braided reinforcement system*. PhD thesis. Kazan: Kazan National Research Technical University named after AN. Tupolev – KAI; 2018. 134 p. (In Russ.).
22. van Ravenhorst JH. *Design tools for circular overbraiding of complex mandrels*. PhD thesis. Enschede, University of Twente; 2018. DOI: 10.3990/1.9789036545860

Статья поступила в редакцию / Received 30.06.2025
Одобрена после рецензирования / Revised 19.07.2025
Принята к публикации / Accepted 29.07.2025