

## Влияние вибрации на процесс создания преформ с плетеной структурой армирования элементов конструкций летательных аппаратов

**М.Р. ИБРАГИМОВ,**  
**Р.С. УСМОНОВ,**  
**В.В. БАТРАКОВ,**  
канд. техн. наук  
(КНИТУ-КАИ, Казань)  
sw1ft1704200@mail.ru

*Экспериментально определяется влияние вибрации на степень покрытия преформы с биаксиальной схемой армирования. По результатам эксперимента установлен рабочий диапазон частот вибрации со значениями степени покрытия преформы в рабочем поле 0,93...1.*

**Радиальное плетение, степень покрытия, ширина ровинга, вибрация**

Композиционные материалы широко применяются в авиационной и космической промышленности. Перспективным методом создания преформы является радиальное плетение, позволяющее получать преформы сложной формы с высокой точностью и максимальной повторяемостью структурных свойств за счет автоматизации процесса создания преформы.

В существующих исследованиях рассматриваются различные аспекты технологии плетения: непосредственно процесс плетения, моделирование траектории нитей, управление оборудованием и влияние технологических параметров на структуру преформы [1–7], качество и дефекты плетения [8–11], свойства и структура плетеных материалов [12], прогнозирование физико-механических свойств трубчатых изделий [13], применение композиционных материалов с плетеной структурой армирования [14–17].

В настоящей работе исследуется влияние вибрации на качество преформ, изготовленных методом радиального плетения.

Основной задачей радиального плетения является достижение равномерного покрытия поверхности оправки армирующим материалом, при этом степень покрытия напрямую влияет на конечные несущие свойства изделия. В статье [18] рассматривают степень покрытия, зависящую от геометрических и структурных параметров преформы. Основное внимание уделено исследованию влияния вибрационного механизма ALDAK D-53842, установленного на кольце схода. Экспериментально установлено, что в диапазоне частот 4...20 Гц амплитуда вибрационного воздействия оказывает нелинейное влияние на структуру укладки ровинга. Максимальное значение степени покрытия (0,837) зафиксировано при частоте вибрации 12,75 Гц. Вместе с тем в исследовании не представлен диапазон изменения ширины ровинга, а также не рассмотрена возможность достижения значения степени покрытия, равного единице.

В работе [19] исследовалось влияние степени покрытия на плоские механические свойства углеродных композитов с би- и триаксиальной структурой переплетения. Основная цель работы – определение количественной зависимости между степенью покрытия преформы и прочностными характеристиками плоского пластика. В рамках исследования изготовлена серия образцов преформы би- и триаксиального типа на технологических оправках с диаметром 120, 160, 190 мм с фиксированным углом армирования. Представлены данные о значениях степени покрытия для биаксиальных преформ, при которых наблюдается незначительное ухудшение физико-механических свойств. Приводится минимально допустимое значение степени покрытия для биаксиальных преформ – 92,9 %. Вместе с тем не исследуется влияние вибрационного воздействия при создании преформ с плетеной структурой армирования, которое определяет конечную ширину ровинга в преформе и потенциально позволяет регулировать степень покрытия в заданном диапазоне за счет изменения частоты вибрации кольца.

Кроме вибрации кольца на степень покрытия и стабильность процесса плетения преформы также влияют и другие параметры: травмирование армирующего материала в процессе плетения, обрыв ровинга при образовании петель на катушке с армирующим материалом, возникновение избыточного натяжения в процессе формирования петли на катушке с армирующим материалом.

В научной работе [20] предложены два типа сенсорных колец с пьезорезистивными датчиками, которые достаточно точно фиксируют увеличение натяжения осевых и аксиальных нитей и фильтруют необходимые данные от фоновых колебаний, вызванных вибрацией машины радиального плетения и колебаниями нитей в продольном и аксиальном направлении. Применение указанных сенсорных колец позволило на ранней стадии выявить увеличение натяжения нити, вызванное повреждением ровинга на катушке. Вместе с тем в исследовании не установлена взаимосвязь степени покрытия и стабильности процесса плетения. Тем не менее очевидно, что неравномерность укладки, связанная с изменением натяжения нити, обрывом и механическим повреждением армирующего материала, влияет на величину степени покрытия и физико-механические свойства конечного изделия.

Таким образом, необходим комплексный подход к управлению степенью покрытия, учитывающий влияние вибрационных факторов на формирование структуры преформы. Представленный обзор литературы подтверждает актуальность темы настоящего исследования, а его результаты могут обеспечить получение преформы с требуемыми качественными характеристиками.

Целью исследования являлось определение количественной зависимости между частотой вибрации кольца и степенью покрытия при радиальном плетении. Исследования проводились на базе комплекса радиального плетения Herzog RF 1/144-100.

Для определения влияния частоты вибрации кольца на степень покрытия были использованы следующие исходные данные: диаметр оправки – 50 мм; количество веретен – 72 шт.; тип армирующего материала – UMT49S-12K-EP; угол армирования – 45°; диаметр кольца – 100 мм; натяжение ровинга – 5 Н.

Степень покрытия как структурный параметр преформы изучался ранее, однако не упоминалась связь данного параметра с частотой вибрации кольца.

Исходная теоретическая ширина ровинга UMT49S-12K-EP составляет 3 мм. При известных значениях ширины ровинга, угла армирования и диаметра технологической оправки возможно рассчитать количество катушек в одном направлении, необходимое для получения степени покрытия, равной единице, при условии, что исходная ширина ровинга является реализуемой в условиях технологического процесса.

Расчет количества катушек проводится по формуле

$$n = \frac{\pi D \cos \alpha}{W_f}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество катушек в одном направлении, шт;  $W_f$  – ширина ровинга, мм;  $D$  – оплетаемый диаметр, мм;  $\alpha$  – угол армирования, град.

С учетом приведенных параметров можно определить степень покрытия [1] по формуле

$$CF = 1 - \left( 1 - \frac{W_f N_C}{4\pi R \cos \alpha} \right), \quad (2)$$

где  $CF$  – степень покрытия;  $N_C$  – количество катушек, шт;  $R$  – оплетаемый радиус, мм.

Как видно из формулы (2), степень покрытия зависит от ширины ровинга. В свою очередь, ширина ровинга зависит от множества технологических и структурных параметров – количества катушек, частоты вибрации кольца, диаметра филаментов в ровинге и их общего количества, расположения филаментов по площади поперечного сечения ровинга. В данном исследовании не рассматриваются все взаимосвязи, определяющие ширину ровинга. Тем не менее на основе известного исходного значения ширины ровинга продемонстрирован диапазон ее изменения в зависимости от частоты вибрации кольца. Диапазон показывает степень влияния частоты вибрации кольца на изменения структурных свойств преформы.

Такие технологические параметры, как диаметр технологической оправки, угол армирования, диаметр кольца и количество катушек были неизменны. Частота вибрации была единственным параметром, изменяющимся на протяжении эксперимента по оплетению длинномерной трубы преформой биаксиального типа.

В свою очередь, длинномерная технологическая оправка была разделена на зоны, в которых меняется значение частоты вибрации в диапазоне 0...20 Гц с шагом 5 Гц.

До начала плетения определялась скорость подачи технологической оправки в зону создания преформы по формуле

$$V_m = \frac{\omega R_m}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (3)$$

где  $V_m$  – линейная скорость подачи технологической оправки, м/с;  $\omega$  – угловая скорость вращения веретен, рад/с.




В ходе исследования рассматривается механизм влияния частоты вибрации на изменение ширины ровинга с последующим определением поля изменения ширины ровинга в зависимости от частоты вибрации кольца. В свою очередь, ширина ровинга влияет на степень покрытия.



Результаты экспериментов представлены на рис. 1.



Рис. 1

Преформы, полученные при различной частоте вибрации, приведены в таблице.

Частота вибрации кольца, Гц	Общий вид преформы	Степень покрытия
0		0,93
5		0,95
10		0,97

Частота вибрации кольца, Гц	Общий вид преформы	Степень покрытия
15		1
20		1

Кривая зависимости степени покрытия  $CF$  от частоты вибрации  $\nu$  кольца для схода представлена на рис. 2.

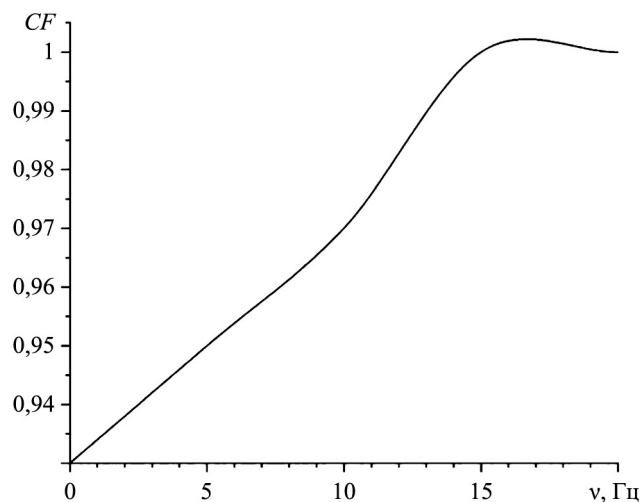


Рис. 2

Как видим, степень покрытия определяется не только количеством веретен, углом армирования и типом армирующего материала, но и существенно зависит от частоты вибрации. С увеличением частоты вибрации значение степени покрытия стремится к единице при условии, что ширина ровинга не достигла своего максимального значения. По результатам проведенного исследования определена рекомендуемая частота вибрации, обеспечивающая оптимальное формирование преформы, – 20 Гц. Вместе с тем при проектировании и назначении технологических параметров процесса изготовления преформы допустимым считается диапазон степени покрытия 0,93...1.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Xinfu Chi et al.* Robot Trajectory Optimization Control of Braiding for Three-Dimensional Complex Preforms // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2021. Vol. 16. Article № 15589250211043226.
2. *Meng Zhuo et al.* Prediction Method for Offset Compensation on Three-Dimensional Mandrel with Spatial Irregular Shape // *Journal of Industrial Textiles [Electronical Journal]*. 2021. Vol. 50. Iss. 8. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1528083719858766> (дата обращения: 4.08.2025).

3. Qiyang Li et al. Off-Center Braiding Process for Complex Composite Preforms Based on Analysis of the Geometric Contour Model of the Mandrel // *Textile Research Journal*. 2022. Vol. 92. Iss. 23-24. P. 4845–4859.
4. Ali Fouladi, Reza Jafari Nedoushan. Prediction and Optimization of Yarn Path in Braiding of Mandrels with Flat Faces // *Journal of Composite Materials*. 2018. Vol. 52. № 5. С. 581–592.
5. Чесноков А.В. Исследование влияния технологических параметров плетения на структуру поверхностного слоя // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2008. № 3. С. 37–40.
6. Дягилев А.С. Изготовление плетеных преформ для формирования композиционных материалов на радиальной плетельной машине // *Материалы докл. 50-й Междунар. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов, посвященной году науки: в 2 т. Витебск: ВГТУ, 2017. Т. 2. С. 308–310.*
7. Самитур Садржад Алиасгар. Проектирование и технология изготовления сетчатых конструкций летательных аппаратов с плетеной системой армирования: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2018. 16 с.
8. Maidl S. et al. Development of Sensor Integrated Braiding Rings for the Automated Detection of Braiding Defects // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 34. Pt 1. P. 74–81.
9. Mekonnen A.A., Woo K. Effects of Defects on Effective Material Properties of Triaxial Braided Textile Composite // *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. 2020. Vol. 21. Iss. 3. P. 657–669.
10. Czichos R. et al. Experimental and Numerical Studies of Process Variabilities in Biaxial Carbon Fiber Braids // *International Journal of Material Forming*. 2021. Vol. 14. P. 39–54.
11. Самитур С.А., Батраков В.В., Константинов Д.Ю. Разработка методики удаления пористости конструкций из композиционных материалов при ограниченном автоклавном давлении // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 2018. № 3. С. 152–156.
12. Sun X. et al. Experimental and Numerical Studies on the Braiding of Carbon Fibres over Structured End-Fittings for the Design and Manufacture of High Performance Hybrid Shafts // *Production Engineering*. 2018. Vol. 12. С. 215–228.
13. Шабалин Л.П. и др. Расчет напряженно-деформированного состояния и конструктивных параметров композитных трубчатых элементов с криволинейной осью // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 2021. № 4. С. 49–54.
14. Galos J. et al. Energy Storage Structural Composites with Integrated Lithiumion Batteries: A Review // *Advanced Materials Technologies*. 2021. Vol. 6. Iss. 8. Article № 2001059.
15. Muhammad Umar Aslam Khan et al. Recent Advances in Biopolymeric Composite Materials for Tissue Engineering and Regenerative Medicines: A Review // *Molecules*. 2021. Vol. 26. № 3. Article № 619.
16. Guo Z., Poot A.A., Grijpma D.W. Advanced Polymer-Based Composites and Structures for Biomedical Applications // *European Polymer Journal*. 2021. Vol. 149. Article № 110388.
17. Sreejith M., Rajeev R.S. 25-Fiber Reinforced Composites for Aerospace and Sports Applications // *Fiber Reinforced Composites*. Woodhead Publishing, 2021. С. 821–859.
18. Reimer V., Dyagilev A. S., Gries T. Effect of Vibration Mechanism Operating Conditions on the Structure of a Braided Preform // *Fibre Chemistry*. 2018. Vol. 49. С. 330–333.
19. Heieck F. et al. Influence of the Cover Factor of 2D Biaxial and Triaxial Braided Carbon Composites on Their in-Plane Mechanical Properties // *Composite Structures*. 2017. Vol. 163. С. 114–122.
20. Potluri P. et al. Geometrical Modelling and Control of a Triaxial Braiding Machine for Producing 3D Preforms // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2003. Vol. 34. Iss. 6. P. 481–492.

Поступила в редакцию 4.09.25  
 После доработки 9.09.25  
 Принята к публикации 15.09.25

## The Effect of Vibration on the Process of Creating Preforms with a Braided Reinforcement Structure for Aircraft Structural Elements

M.R. IBRAGIMOV, R.S. USMONOV, AND V.V. BATRAKOV

Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan

*The effect of vibration on the preform cover factor with a biaxial reinforcement scheme is determined experimentally. According to the results of the experiment, the operating frequency range of vibration was established with values of the preform cover factor in the working field of 0.93...1.*

**Radial weaving, cover factor, roving width, vibration**