

УДК 677.076.75:004.925.8

DOI 10.47367/0021-3497_2025_3_281

**ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛЕТЕННЫХ ПРЕФОРМ
ПУТЕМ ПОСТРОЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПРОЕКЦИЙ
ВИНТОВОЙ ТРАЕКТОРИИ НИТЕЙ**

**GEOMETRICAL MODELING OF BRAIDED PREFORMS BY CONSTRUCTING
HORIZONTAL PROJECTIONS OF THE HELICAL TRAJECTORY OF THREADS**

С.В. ЕРШОВ, Е.Н. КАЛИНИН

S.V. ERSHOV, E.N. KALININ

(Ивановский государственный политехнический университет)

(Ivanovo State Polytechnic University)

E-mail: ershovsv.iv@yandex.ru, enkalini@gmail.com

В работе представлен результат построения пространственных моделей плетеных преформ, полученных на основе горизонтальных проекций винтовой траектории нитей. Горизонтальные проекции винтовой траектории нитей рассчитаны в виде параметрических моделей, учитывающих количество нитей в преформе и порядок их взаимного перекрытия. Угол плетения преформы определялся дополнительной винтовой поверхностью, повторяющей движение нити в процессе плетения. Анализ пространственной геометрии полученных моделей плетеных преформ показал, что приведенный в работе алгоритм расчета горизонтальных проекций винтовой траектории нитей позволил исключить взаимное пересечение контуров нитей и продемонстрировал свою эффективность при построении моделей плетеных преформ с изменяющимся диаметром поперечного сечения оправки для разного типа переплетений.

The paper presents the results of constructing spatial models of braided preforms based on horizontal projections of helical trajectories of threads. Horizontal projections of the trajectories threads are calculated in the form of parametric models taking into account the number of threads in the preform and the order of their mutual overlap. The preform weaving angle was determined by an additional helical surface repeating the movement of the thread during the weaving process. The paper presents the result of constructing spatial models of braided preforms obtained on the basis of horizontal projections of the helical trajectory of threads. The horizontal projections of the helical trajectory of threads are calculated in the form of parametric models taking into account the number of threads in the preform

and the order of their mutual overlap. The preform weaving angle was determined by an additional helical surface repeating the movement of the thread during the weaving process. Analysis of the spatial geometry of the obtained models of braided preforms showed that the algorithm for calculating the horizontal projections of the helical trajectory of threads presented in the paper made it possible to exclude mutual intersection of the contours of the threads and demonstrated its effectiveness in constructing models of braided preforms with a changing diameter of the cross-section of the mandrel for different types of weaves.

Ключевые слова: *плетеные преформы, геометрическое моделирование, траектория нити, пересечение поверхностей.*

Keywords: *braided preforms, geometrical modeling, thread trajectory, surface intersection.*

Введение

Использование плетеных преформ в качестве наполнителя полимерных композиционных материалов (ПКМ) позволяет создавать непрерывно армированные изделия из ПКМ сложной геометрической формы. Бесшовная конструкция таких композитов придает им дополнительную прочность, а высокая подвижность нитей в преформе обеспечивает точное повторение заданной геометрической формы изделий различного уровня сложности. В серийном производстве плетеные преформы, как правило, изготавливают методом радиального плетения с использованием жесткой оправки, которая повторяет форму готового изделия. Для обеспечения требуемых механических свойств композита плетеные преформы изготавливают с заданным углом плетения, величина которого определяется скоростью укладки нитей на оправку и корректируется изменением скорости осевого перемещения оправки по следующей зависимости [1]:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{r\omega}{V}, \quad (1)$$

где θ – угол плетения преформы, определяющий наклон нитей относительно продольной оси оправки, град.; ω – угловая скорость вращения веретен относительно оси преформы, с^{-1} ; V – скорость осевого перемещения оправки, м/с ; r – радиус оправки, м .

Аналитическая зависимость (1) позволяет рассчитать технологические параметры процесса изготовления преформы с

заданным углом плетения, однако сложное пространственное строение плетеной структуры и комплексная форма оправки отдельных изделий значительно усложняют этап проектирования таких преформ. Как следствие, в процессы создания плетеных преформ активно внедряются инструменты систем автоматизированного проектирования (САПР), которые позволяют моделировать поведение плетеных преформ при деформировании и добиваться требуемых физико-механических свойств композита [2, 3]. Использование САПР позволяет точно спрогнозировать физико-механические свойства готовых изделий на основе плетеных преформ, но для этого требуется построение их точных пространственных моделей, учитывающих переплетение нитей в преформе.

В ряде случаев переплетение нитей в преформе может быть представлено в виде пространственной модели периодически повторяющегося фрагмента ее волокнистой структуры. Пространственная модель такого фрагмента, как правило, содержит минимальное количество нитей, необходимое для повторения порядка их взаимного перекрывания, и может быть получена в программных комплексах TexGen [4, 5] и Wisetex [6], реализующих такой подход. Численное моделирование одного отдельно взятого фрагмента плетеной преформы значительно сокращает время расчета таких моделей, однако на практике при моделировании плетеных преформ сложной геометрической формы одного фрагмента для

прогнозирования их механических свойств становится недостаточно и требуется описание пространственной геометрии всей конструкции плетеной преформы в целом.

Переход от моделирования переплетения нитей в отдельно взятом фрагменте плетеной структуры к моделированию пространственной геометрии готовой преформы требует дополнительного описания траектории нитей в преформе. Траектория каждой нити в процессе плетения образует винтовую пространственную кривую, которая складывается из вращательного движения точки вокруг неподвижной оси преформы и переноса точки вдоль этой оси по определенному закону (рис. 1). Расчет винтовой траектории нитей возможен с помощью аналитических уравнений, которые получены в работе [7] и использованы для построения пространственных моделей трубчатых плетеных преформ разного типа переплетений. В дальнейшем метод аналитического описания траектории нитей в плетеных преформах совершенствовался [8...10], однако позволял строить пространственные модели плетеных преформ только с постоянным диаметром оправки.

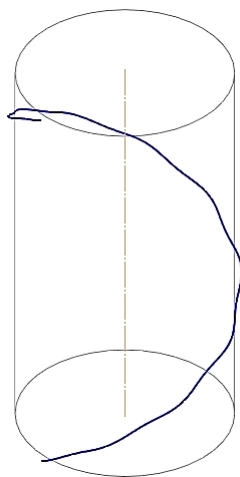


Рис. 1

Для построения более комплексных пространственных моделей плетеных преформ с изменяющимся диаметром оправки разработан метод [11], основанный на совместном использовании аналитических уравнений, описывающих винтовые пространственные кривые, и инструментов

геометрического моделирования поверхностей в САПР. В основу метода положен принцип построения винтовой траектории нитей путем расчета их горизонтальных проекций на плоскость поперечного сечения преформы. Метод стал удобным инструментом для построения в САПР пространственных моделей плетеных преформ с изменяющимся диаметром оправки и позднее был реализован в самостоятельном программном комплексе *TexMind Braider* [12] для моделирования геометрии плетеных преформ с привязкой моделей к технологическим параметрам процесса их производства. Однако при детальном рассмотрении полученных в [11] и [12] пространственных моделей плетеных преформ можно заметить, что метод позволяет точно воспроизводить геометрию плетеных преформ только с переплетением нитей типа «Diamond», имеющим однократное перекрытие встречных нитей в раппорте переплетения (1/1), в то время как преформы с переплетением нитей типа «Regular» и «Hercules», имеющим двойное (2/2) и тройное (3/3) перекрытия встречных нитей соответственно, строятся с искажением. В таких моделях наблюдается взаимное пересечение контуров отдельных нитей, что негативно сказывается на точности их численного моделирования.

Целью настоящей работы являлась разработка алгоритма, позволяющего с использованием инструментов САПР выполнять построение точных пространственных моделей плетеных преформ с изменяющимся диаметром оправки для разного типа переплетений.

Методы

В настоящей работе для построения пространственных моделей плетеных преформ использован метод, описанный в [11], но для того, чтобы исключить взаимное пересечение контуров нитей в преформе, алгоритм расчета горизонтальных проекций винтовой траектории нитей был доработан.

В работе [11] горизонтальная проекция винтовой траектории нити на плоскость поперечного сечения преформы рассчитывалась в параметрическом виде по следующему уравнению:

$$\begin{cases} x = (r_0 + r(t))\cos(t), \\ y = (r_0 + r(t))\sin(t). \end{cases} \quad (2)$$

Величины r_0 и $r(t)$ в уравнении (2) определялись по следующим формулам:

$$r(t) = \frac{a}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\beta}t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (3)$$

$$r_0 = R + a, \quad (4)$$

$$\beta = \frac{360}{n}, \quad (5)$$

где R – радиус оправки, м; a – толщина нити, м; n – количество нитей в преформе; t – параметр, $t \in [0; 360]$; β – угол, который определяет расстояние между нитями, оплетающими оправку в одном направлении.

Результатом расчета для заданных параметров преформы являлась замкнутая кривая, число вершин которой определялось количеством нитей, образующих преформу (рис. 2).

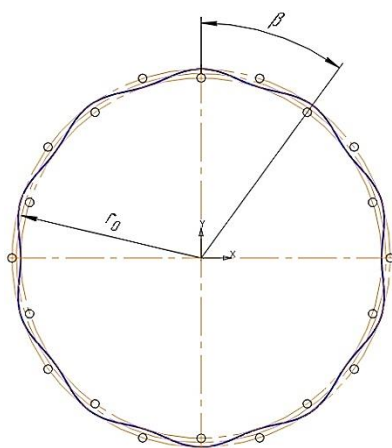


Рис. 2

Переплетение нитей типа «Diamond» в преформе строилось путем равномерного распределения нитей между вершинами полученной кривой. Для построения преформ с тем же диаметром оправки и углом плетения, но с переплетением нитей типа «Regular» и «Hercules» в модель добавлялись дополнительные нити со смещением относительно уже построенных. Таким образом, в работе [11] для построения всех трех типов переплетений использовалась одна и та же форма винтовой траектории

нитей с горизонтальной проекцией, рассчитанной по уравнению (2). В полученной форме нитей не учитывался порядок их взаимного перекрытия в преформе при переходе от одного типа переплетения нитей к другому. Как следствие, пространственная геометрия плетеных преформ с переплетением нитей типа «Regular» и «Hercules» строилась с искажением. Для того чтобы исключить ошибки при построении пространственных моделей плетеных преформ, в настоящей работе разработан алгоритм расчета горизонтальных проекций винтовой траектории нитей, учитывающий особенности взаимного перекрытия нитей в преформе для каждого типа переплетений.

Горизонтальная проекция винтовой траектории нити для переплетения нитей типа «Diamond» в настоящей работе, как и в [11], рассчитывалась по уравнению (2), а для переплетения нитей типа «Regular» и «Hercules» горизонтальные проекции винтовой траектории нитей строились в виде параметрических моделей на основе уже полученной по уравнению (2) кривой. Порядок взаимного перекрытия нитей учитывался в моделях через параметр β , который рассчитывался по формуле (5). Параметр β позволял определить число перекрытий по направлению каждой нити, после которых чередование перекрытий повторялось. Так, для преформы с переплетением нитей типа «Diamond» и количеством нитей в преформе $2n$ параметр β определял угол между соседними нитями, оплетающими оправку в одном направлении (рис. 2), а следовательно, количество перекрытий на этом участке преформы было равно двум.

В переплетении нитей типа «Regular» каждая отдельная нить в преформе перекрывает две встречные нити, располагаясь сначала над встречными нитями, а затем проходя под ними. Таким образом, рассчитанный по формуле (5), но уже для количества нитей в преформе $4n$ параметр β будет определять тот же участок преформы, но количество перекрытий на этом участке будет равно четырем. С учетом количества перекрытий нитей на участке преформы, ограниченном углом β , параметрическая модель горизонтальной проекции винтовой

траектории нитей для переплетения нитей типа «Regular» примет вид, представленный на рис. 3.

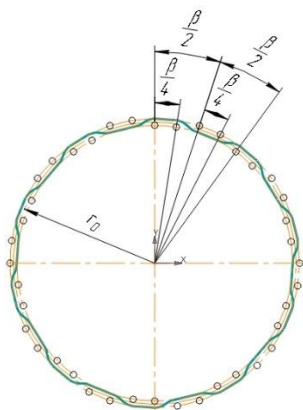


Рис. 3

Для переплетения нитей типа «Hercules» параметр β рассчитывался для количества нитей в преформе $6n$, поскольку каждая нить в таком переплетении перекрывала три встречные нити, также располагаясь сначала над встречными нитями, а затем проходя под ними. Количество перекрытий нитей на участке преформы, ограниченном углом β , в данном случае было равно шести. С учетом количества перекрытий нитей на том же участке β параметрическая модель горизонтальной проекции винтовой траектории нитей для переплетения нитей типа «Hercules» принимала вид, представленный на рис. 4.

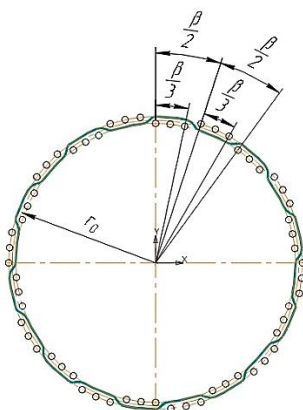


Рис. 4

На основе полученных горизонтальных проекций винтовой траектории нитей с использованием инструментов геометриче-

ского моделирования для каждого типа переплетения нитей строилась пространственная поверхность, которая повторяла форму оплетенной оправки (рис. 5, а). Для того чтобы рассчитать траекторию нити, строилась дополнительная винтовая поверхность, повторяющая движение нити в процессе плетения. Винтовая поверхность пересекала пространственную поверхность оправки и строилась по уравнению винтовой пространственной кривой в параметрическом виде:

$$\begin{cases} x = r_0 \cos(t), \\ y = r_0 \sin(t), \\ z = r_0 \operatorname{ctg}(\theta) \frac{\pi}{180} t. \end{cases} \quad (6)$$

Винтовая поверхность, полученная по уравнению (6), имела положительное направление, т. е. закручивалась против часовой стрелки.

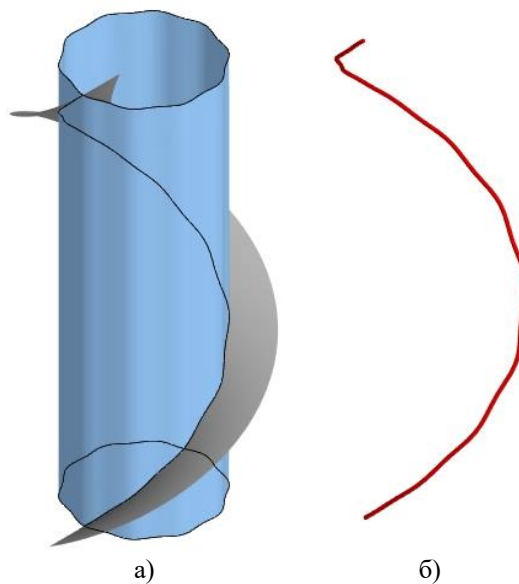


Рис. 5

Кривая пересечения винтовой поверхности и поверхности оправки образовывала траекторию нити в преформе. Пространственная геометрическая модель оплетающей оправку нити строилась путем выдавливания эскиза поперечного сечения нити вдоль полученной траектории (рис. 5, б). Копии построенной нити равномерно распределялись вдоль линии горизонтальной

проекции их винтовой траектории, образуя массив нитей, оплетающих оправку в одном направлении.

Для построения массива нитей, оплетающих оправку в противоположном направлении, горизонтальная проекция винтовой траектории нитей при построении поверхности оправки поворачивалась на угол $\beta/2$, а закручивание винтовой поверхности выполнялось по часовой стрелке.

Пространственная модель готовой преформы строилась в виде сборки из полученных массивов оплетающих оправку нитей.

Реализация описанного алгоритма построения пространственных моделей плетеных преформ выполнена в САПР КОМПАС-3D [13], являющейся одной из наиболее распространенных и востребованных в

России систем трехмерного моделирования и инженерного анализа.

Результаты и обсуждение

На рис. 6 представлены результаты построения пространственных моделей плетеных преформ с переплетением нитей типа «Diamond» (рис. 6, а), «Regular» (рис. 6, б) и «Hercules» (рис. 6, в), полученные с использованием рассчитанных горизонтальных проекций винтовой траектории нитей. Как видно из рис. 6, модели встречных нитей, образующих структуру преформы, точно повторяют заданный тип переплетения, при этом порядок взаимного перекрытия нитей в преформах для каждого типа переплетения сохраняется по всей длине преформы без нарушения пространственной геометрии моделей.

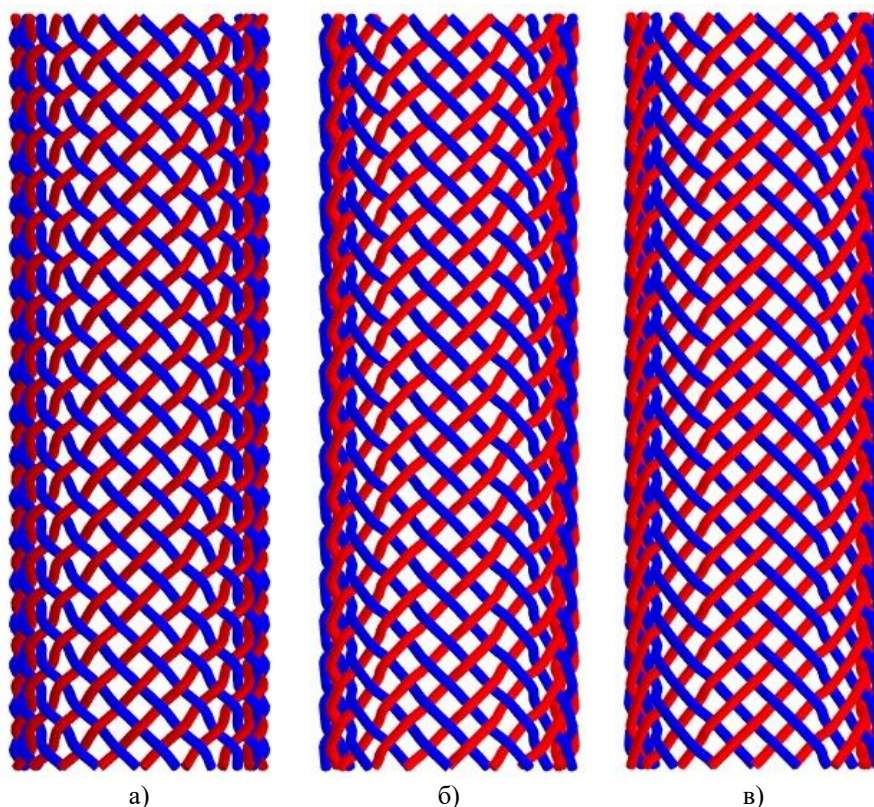


Рис. 6

На рис. 7 представлены поперечные сечения нитей на участке преформы с переплетением нитей типа «Diamond» (рис. 7, а), «Regular» (рис. 7, б) и «Hercules» (рис. 7, в). Из рис. 7 видно, что взаимное перекрытие нитей в полученных моделях строится без

искажений. В представленных сечениях не наблюдается пересечения контуров встречных нитей, а следовательно, должно исключаться и наложение моделей нитей друг на друга.

Более точный анализ полученных моделей на наличие пересечений контуров встречных нитей выполнен с использова-

нием инструментов диагностики моделей в САПР КОМПАС-3D.

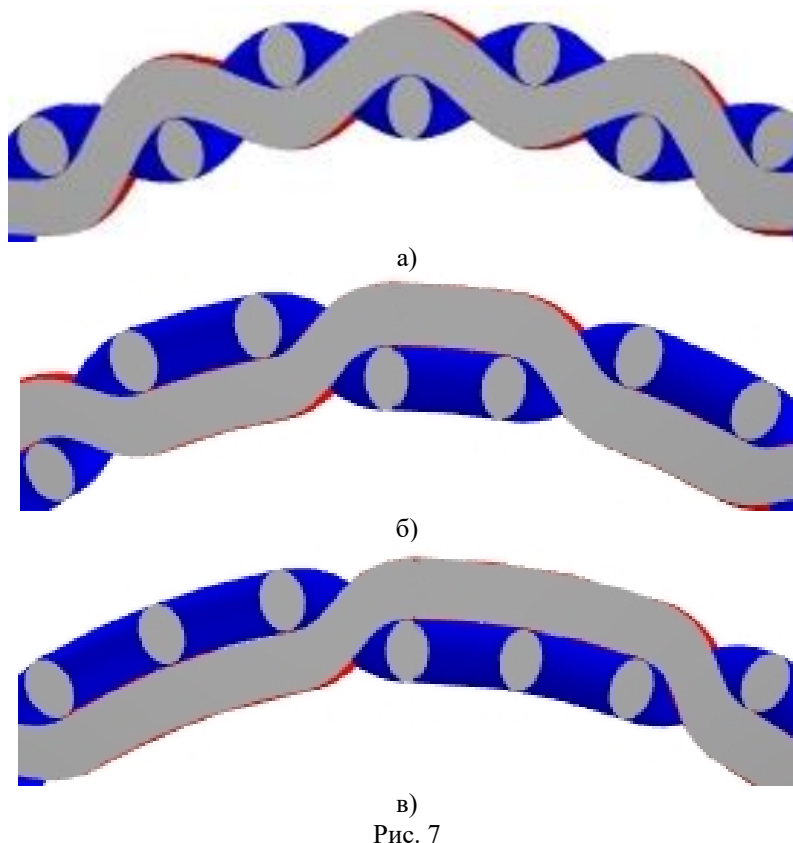


Рис. 7

Для определения пересечений между встречными нитями применена операция проверки коллизий и рассчитан объем образующихся пересечений для каждой модели. Результаты проверки моделей на наличие пересечений представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Тип переплетения	Diamond (1/1)	Regular (2/2)	Hercules (3/3)
Объем преформы, мм ³	190232,16	184738,48	182131,23
Объем коллизий, мм ³	0,002	0,035	0,024
Количество коллизий	648	648	432

Как показывают полученные результаты, с увеличением количества перекры-

тий в раппорте переплетения уработка нитей в преформе уменьшается, а следовательно, уменьшается и общий объем нитей, образующих преформу. Наименьший объем образующихся при этом пересечений наблюдается в модели преформы с переплетением нитей типа «Diamond». Для переплетения нитей типа «Regular» и «Hercules» объем рассчитанных пересечений по сравнению с переплетением типа «Diamond» увеличивается, но при этом в сравнении друг с другом объем пересечений имеет сопоставимые значения. Количество пересечений для моделей преформ с переплетением нитей типа «Diamond» и «Regular» равно количеству перекрытий встречных нитей в преформе. Однако для модели преформы с переплетением нитей типа «Hercules» количество пересечений меньше на треть. Разница в количестве пересечений позволяет заметить, что пересечения возникали в зонах контакта встречных нитей, когда нити огибали друг друга,

и не возникали, когда нити проходили друг над другом без переплетения.

Разница в полученных объемах коллизий может быть обусловлена усложнением формы горизонтальных проекций винтовой траектории нитей при переходе от преформы с переплетением нитей типа «Diamond» к преформам с переплетением нитей типа «Regular» и «Hercules». При этом, несмотря на разницу в объеме пересечений и их количество, объем пересечений для каждого типа переплетения остается несущественным и во всех трех случаях характеризует исключительно точечное касание встречных нитей при построении их взаимного перекрытия.

Рассчитанные в работе горизонтальные проекции винтовой траектории нитей использованы и для построения простран-

ственных моделей плетеных преформ с изменяющимся диаметром поперечного сечения оправки. Для этого в модель преформы добавлялись дополнительные плоскости, которые выделяли участки преформы постоянного диаметра. На каждой плоскости строилась горизонтальная проекция винтовой траектории нитей для заданного в преформе типа переплетения. Параметр β в горизонтальных проекциях сохранялся постоянным, а радиус проекций r_0 изменялся вместе с изменением диаметра оправки для каждого сечения. Из полученных горизонтальных проекций винтовой траектории нитей строилась пространственная поверхность, повторяющая форму оправки, а затем по уже описанному выше алгоритму строилась и сама модель готовой преформы.

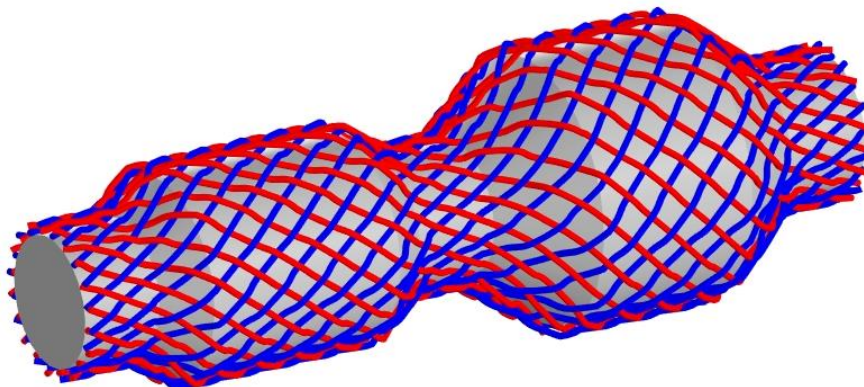


Рис. 8

На рис. 8 представлен результат построения пространственной модели плетеной преформы с переплетением нитей типа «Regular» и изменяющимся диаметром поперечного сечения оправки. Как видно из полученной модели, траектория нитей точно повторяет сложную геометрическую форму оправки. Порядок взаимного перекрытия нитей в преформе сохраняется на всех участках преформы для каждого сечения, а переплетение нитей строится без нарушения пространственной геометрии по всей длине преформы, включая зоны перехода формообразующей поверхности оправки. Проверка представленной на рис. 8 модели на наличие пересечений показала, что при объеме преформы (без учета оправки), равном $56184,97 \text{ мм}^3$, рассчитанный объем

коллизий модели равен $0,001 \text{ мм}^3$, а их количество соответствует количеству перекрытий нитей в преформе и равно 648. Малый объем коллизий и их равномерное распределение в модели определяет наличие касаний встречных нитей в преформе и отсутствие пересечений, нарушающих ее пространственную геометрию. Важно отметить, что наличие даже локальных, отдельно взятых пересечений в модели может привести к нарушениям ее геометрии на этапе создания конечно-элементной сетки, осложняя или делая невозможным дальнейший переход к расчету конечно-элементной модели преформы.

На практике описанный в настоящей работе алгоритм построения пространственной геометрии плетеных преформ с исполь-

зованием разработанных параметрических моделей горизонтальных проекций винтовой траектории нитей может быть реализован с помощью инструментов различных систем твердотельного моделирования, подобных использованной в настоящей работе САПР КОМПАС-3D.

ВЫВОДЫ

Представленный в работе алгоритм расчета горизонтальных проекций винтовой траектории нитей в преформах позволил исключить взаимное пересечение контуров нитей при построении пространственных моделей плетеных преформ. Для преформ с переплетением нитей типа «Diamond», «Regular» и «Hercules» разработаны параметрические модели горизонтальных проекций винтовой траектории нитей, учитывающие порядок взаимного перекрытия нитей для каждого типа переплетения. С использованием инструментов САПР выполнено построение пространственных моделей плетеных преформ как с постоянным, так и с изменяющимся диаметром поперечного сечения оправки. Анализ пространственной геометрии полученных моделей плетеных преформ показал, что при использовании рассчитанных горизонтальных проекций винтовой траектории нитей порядок взаимного перекрытия нитей в преформах для каждого типа переплетения сохранялся по всей длине преформы и исключалось наложение моделей нитей друг на друга. На основании полученных результатов сделан вывод об эффективности использования разработанного алгоритма для построения пространственных моделей плетеных преформ с изменяющимся диаметром поперечного сечения оправки для разного типа переплетений. Дальнейшее совершенствование разработанного алгоритма позволит выполнять построение пространственных моделей плетеных преформ с более сложной геометрией.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kyosev Y.* Braiding Technology for Textiles: Principles, Design and Processes: Woodhead Publishing

Series in Textiles No. 158. – Woodhead Publishing Limited, 2015, 392 p.

2. *Xu L., Kim S.J., Ong C.-H., Ha S.K.* Prediction of material properties of biaxial and triaxial braided textile composites // *Journal of Composite Materials*. 2012. Vol. 46. P. 2255...2270.

3. *Киселев А.М., Киселев М.В.* Проектирование и прогнозирование физико-механических свойств композиционных материалов на основе 3D-текстильных преформ // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2017. № 1. С. 325...329.

4. https://texgen.sourceforge.io/index.php/Main_Page (дата обращения: 05.03.2025).

5. *Modeling the geometry of textile reinforcements for composites: TexGen // Composite Reinforcements for Optimum Performance (Second Edition) / L.P. Brown, A.C. Long; edited by P. Boisse.* Woodhead Publishing, 2021. P. 237...265.

6. *Lomov S.V.* Modelling the geometry of textile reinforcements for composites: *WiseTex // Composite Reinforcements for Optimum Performance.* Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2011. P. 200...238.

7. *Alpyildiz T.* 3D geometrical modelling of tubular braids // *Textile Research Journal*. 2012. Vol. 82. P. 443...453.

8. *Kyosev Y.* Generalized geometric modeling of tubular and flat braided structures with arbitrary floating length and multiple filaments // *Textile Research Journal*. 2016. Vol. 86. P. 1270...1279.

9. *Gholami A., Melenka G.W.* Generating geometrical models for tubular braided composites // *Proceedings of the Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress*. 2021.

10. *He G., Sheng C., He H. et al.* Mathematical and geometrical modeling of braided ropes bent over a sheave // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2020. Vol. 15. P. 1...13.

11. *Ning F., Potluri P., Yu W., Hearle J.* Geometrical modeling of tubular braided structures using generalized rose curve // *Textile Research Journal*. 2017. Vol. 87. P. 474...486.

12. <http://www.texmind.com/wp/doku.php?id=braider> (дата обращения: 05.03.2025).

13. <https://kompas.ru/> (дата обращения: 05.03.2025).

REFERENCES

1. *Kyosev Y.* Braiding Technology for Textiles: Principles, Design and Processes: Woodhead Publishing Series in Textiles No. 158. – Woodhead Publishing Limited, 2015, 392 p.

2. *Xu L., Kim S.J., Ong C.-H., Ha S.K.* Prediction of material properties of biaxial and triaxial braided textile composites // *Journal of Composite Materials*. 2012. Vol. 46(18). P. 2255...2270.

3. *Kiselev A.M., Kiselev M.V.* Design and prediction physical and mechanical properties of composite

materials based 3D-textile preforms // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2017. № 1. P. 325...329.

4. https://texgen.sourceforge.io/index.php/Main_Page (date of access: 05.03.2025).

5. Modeling the geometry of textile reinforcements for composites: *TexGen // Composite Reinforcements for Optimum Performance (Second Edition)* / L.P. Brown, A.C. Long; edited by P. Boisse. Woodhead Publishing, 2021. P. 237...265.

6. *Lomov S.V. Modelling the geometry of textile reinforcements for composites: WiseTex // Composite Reinforcements for Optimum Performance*. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2011. P. 200...238.

7. *Alpyildiz T. 3D geometrical modelling of tubular braids* // *Textile Research Journal*. 2012, Vol. 82. P. 443...453.

8. *Kyosev Y. Generalized geometric modeling of tubular and flat braided structures with arbitrary floating length and multiple filaments* // *Textile Research Journal*. 2016. Vol. 86. P. 1270...1279.

9. *Gholami A., Melenka G.W. Generating geometrical models for tubular braided composites* // *Proceedings of the Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress*. 2021.

10. *He G., Sheng C., He H. et al. Mathematical and geometrical modeling of braided ropes bent over a sheave* // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2020. Vol. 15. P. 1...13.

11. *Ning F., Potluri P., Yu W., Hearle J. Geometrical modeling of tubular braided structures using generalized rose curve* // *Textile Research Journal*. 2017, Vol. 87. P. 474...486.

12. <http://www.texmind.com/wp/doku.php?id=braider:braider> (date of access: 05.03.2025).

13. <https://kompas.ru/> (date of access: 05.03.2025).

Рекомендована кафедрой мехатроники и радиоэлектроники ИВГПУ. Поступила 22.04.25.