

Научная статья

УДК 621.792.6

EDN RUWXGM

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-3-69-51-58>

**Ксения Юрьевна Стрункина**<sup>1</sup>

**Павел Николаевич Рудовский**<sup>2</sup>

**Сергей Владимирович Палочкин**<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С. К. Тимошенко, г. Кострома, Россия

<sup>2</sup> Костромской государственный университет, г. Кострома, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>1</sup> [strunkina.ksyu@mail.ru](mailto:strunkina.ksyu@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0000-7366-7891>

<sup>2</sup> [pavel\\_rudovsky@mail.ru](mailto:pavel_rudovsky@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-8675-2910>

<sup>3</sup> [palnigs@mail.ru](mailto:palnigs@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0005-6192-0243>

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ УКЛАДКИ НИТЕЙ АРМИРУЮЩЕГО НАПОЛНИТЕЛЯ

**Аннотация.** Статья посвящена совершенствованию алгоритма построения траекторий укладки нитей армирующего наполнителя в композиционных материалах. Рассмотрены ключевые проблемы, возникающие при программной реализации алгоритма, включая определение граничных точек модели, обеспечение симметричного разбиения на конечные элементы, предотвращение пересечений кривых укладки и зависимость расположения нитей от выбора стартовых точек. Авторы предлагают практические решения для каждой из этих проблем, такие как алгоритм идентификации граничных точек с использованием секторного анализа окрестностей, методы оптимизации сетки в Ansys Workbench, а также подходы к устранению пересечений кривых за счет регулировки параметра точности  $\Delta$ , а также создание более равномерной структуры укладки. Результаты демонстрируются на примере конкретной модели, подтверждая эффективность предложенных методов. Разработанный алгоритм позволяет автоматизировать процесс построения траекторий укладки, что способствует повышению прочности и устойчивости композиционных материалов.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, армирующий наполнитель, алгоритм укладки, равномерность укладки нитей, конечно-элементный анализ, главные напряжения, граничные точки

**Благодарности:** исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 25-29-00164).

**Для цитирования.** Стрункина К. Ю., Рудовский П. Н., Палочкин С. В. Совершенствование алгоритма построения траекторий укладки нитей армирующего наполнителя // Технологии и качество. 2025. № 3(69). С. 51–58. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-3-69-51-58>

Original article

**Ksenia Yu. Strunkina**<sup>1</sup>

**Pavel N. Rudovsky**<sup>2</sup>

**Sergey V. Palochkin**<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Military Academy of Radiation, Medical and Biological Defense named after Marshal of the Soviet Union S. K. Timoshenko, Kostroma, Russia

<sup>2</sup> Kostroma State University, Kostroma, Russia

<sup>3</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

## IMPROVEMENT OF THE ALGORITHM FOR CONSTRUCTING TRAJECTORIES FOR LAYING REINFORCING FILLER THREADS

**Abstract.** The article is devoted to improving the algorithm for constructing the trajectories of laying reinforcing filler threads in composite materials. The key problems arising in the software implementation of the algorithm considered, include determining the boundary points of the model, ensuring symmetrical partitioning into finite elements, preventing intersections of laying curves, and dependence of the thread location on

*the choice of starting points. The authors propose practical solutions for each of these problems, such as an algorithm for identifying boundary points using sector analysis of neighbourhoods, mesh optimisation methods in Ansys Workbench, as well as approaches to eliminating curve intersections by adjusting the accuracy parameter  $\Delta$ , and creating a more uniform laying structure. The results demonstrated, use a specific model as an example, confirming the effectiveness of the proposed methods. The developed algorithm allows automating the process of constructing laying trajectories, which helps to increase the strength and stability of composite materials.*

**Keywords:** composite materials, reinforcing filler, laying algorithm, thread laying uniformity, finite element analysis, principal stresses, boundary points

**Acknowledgements:** the research was carried out with the financial support of the grant from the Russian Science Foundation (project No. 25-29-00164).

**For citation:** Strunkina K. Yu., Rudovsky P. N., Palochkin S. V. Improvement of the algorithm for constructing trajectories for laying reinforcing filler threads. *Technologies & Quality*. 2025. No 3(69). P. 51–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-3-69-51-58>.

Механические свойства композиционных материалов в значительной степени зависят от направления армирования по отношению к направлению приложения нагрузок. Поскольку прочность армирующего наполнителя существенно выше прочности материала матрицы, то увеличить прочность композита можно за счет повышения доли наполнителя в его составе [1–4] или за счет более эффективного его использования [5]. В научной статье [6] показано, что в случае совпадения направления нагружения и направления армирования наблюдается наиболее эффективное использование прочности армирующего наполнителя при прочих равных условиях.

При использовании в качестве наполнителя тканых структур направления армирования имеют постоянные по всему объему материала направления: по основе или по утку. При этом обеспечить совпадение направления армирования и направления главных напряжений во всех точках детали возможно только для простых напряженных состояний, таких как растяжение, сжатие, кручение и изгиб [7, 8]. При сложном напряженном состоянии, характерном для большинства деталей машин, главные напряжения имеют разные направления в разных точках.

Для формирования армирующего наполнителя определенной толщины из тканей их укладывают слоями друг на друга с последующей пропиткой материалом матрицы. Это ведет к низкой устойчивости таких материалов к нагрузкам, сдвигающим слои. Для повышения устойчивости композиционных материалов к таким нагрузкам используют 3D-ткани [9, 10]. Однако при этом учесть особенности нагружения детали в каждом отдельном случае не удастся.

Создать армирующий наполнитель с изменяющейся ориентацией нитей при переходе от точки к точке можно, используя технологию программируемой раскладки с помощью специ-

ального 3D-принтера [11, 12]. Задача построения траекторий укладки нитей армирующего наполнителя таким образом, чтобы их направление в каждой точке совпадало с направлением главных напряжений, поставлена в наших исследованиях [13, 14] и решалась в работе [15]. Здесь предложен алгоритм и программное обеспечение, позволяющее рассчитать траектории укладки нитей текстильного наполнителя вдоль кривых, соответствующих направлениям главных напряжений. В нечетных слоях предполагается укладка нитей по кривым вдоль наибольшего главного напряжения  $\alpha_1$ , а в четных – вдоль наименьшего главного напряжения  $\alpha_3$ . Данный метод позволяет сформировать армирующий наполнитель таким образом, чтобы добиться максимальной прочности детали.

В процессе разработки методики расчета и алгоритма ее реализации был выявлен ряд вспомогательных задач, решение которых позволяет поднять уровень автоматизации алгоритма и повысить его качество.

К таким задачам относятся:

- 1) выявление узловых точек, находящихся на границе модели;
- 2) обеспечение равномерного и симметричного разбиения геометрической модели на совокупность конечных элементов;
- 3) обеспечение равномерного без пересечений расположения кривых укладки армирующего наполнителя;
- 4) равномерное распределение нитей армирующего наполнителя по поверхности детали.

Согласно предложенному алгоритму [15] построение кривых укладки нитей армирующего наполнителя начинается с узловой точки, расположенной на контуре детали, т. е. граничной точки. Поэтому алгоритм построения кривых укладки армирующего наполнителя нужно дополнить алгоритмом определения граничных точек.

Поскольку модель детали может иметь сложную геометрическую форму, а также содержать отверстия, нахождение граничных точек модели существенно затрудняется. Нет возможности определить, расположена ли точка на границе, простым отбором максимальных и минимальных значений координат по каждой оси. Для решения этой задачи предлагается следующий алгоритм.

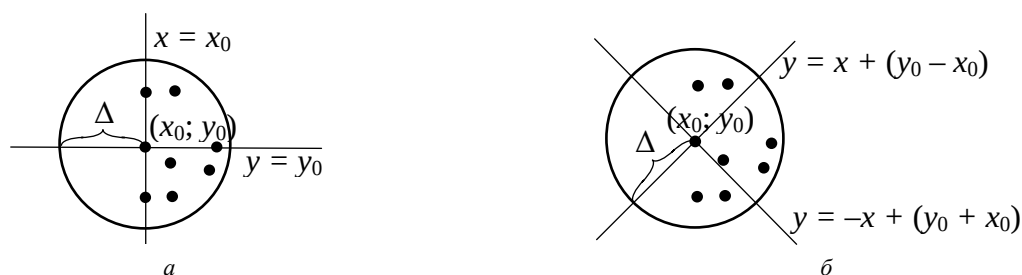
Для рассматриваемой точки с координатами  $(x_0; y_0)$  проведем окружность радиусом  $\Delta$  (рис. 1). Отметим, что  $\Delta$  выбирается в соответствии с максимальным размером конечных элементов

(параметр *Element Size*), который указывается на этапе построения конечно-элементной сетки.

Разделим полученную окружность двумя способами на 4 сектора и подсчитаем количество точек, попавших в каждый сектор (рис. 1, б).

*Граничными* будем называть такие точки, в окрестности которых имеется хотя бы один пустой (не содержащий других точек) сектор.

Математически алгоритм сводится к проверке выполнения восьми систем неравенств для каждой узловой точки. Каждая система неравенств позволяет определить, имеются ли в заданном секторе рядом с проверяемой точкой другие точки в пределах расстояния  $\Delta$  (табл.).



**Рис. 1. Деление окрестности точки:**

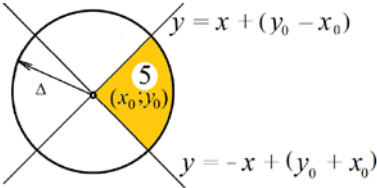
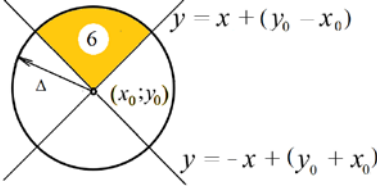
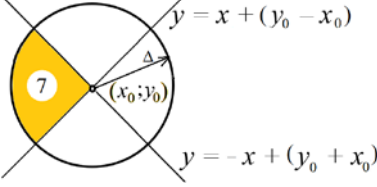
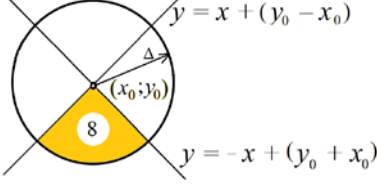
*а* – прямыми, параллельными осям координат;

*б* – прямыми, являющимися биссектрисами I и II координатных четвертей

Т а б л и ц а

| Расположение сектора | Система неравенств                                                                                                                                                          |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                      | $\begin{cases} \begin{cases} x_1 \neq x_0 \\ y_1 \neq y_0 \end{cases} \\ (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 \leq \Delta^2 \\ x_1 \geq x_0 \\ y_1 \geq y_0 \end{cases} \quad (1)$ |
|                      | $\begin{cases} \begin{cases} x_1 \neq x_0 \\ y_1 \neq y_0 \end{cases} \\ (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 \leq \Delta^2 \\ x_1 \leq x_0 \\ y_1 \geq y_0 \end{cases} \quad (2)$ |
|                      | $\begin{cases} \begin{cases} x_1 \neq x_0 \\ y_1 \neq y_0 \end{cases} \\ (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 \leq \Delta^2 \\ x_1 \leq x_0 \\ y_1 \leq y_0 \end{cases} \quad (3)$ |
|                      | $\begin{cases} \begin{cases} x_1 \neq x_0 \\ y_1 \neq y_0 \end{cases} \\ (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 \leq \Delta^2 \\ x_1 \geq x_0 \\ y_1 \leq y_0 \end{cases} \quad (4)$ |

О к о н ч а н и е   т а б л .

| Расположение сектора                                                               | Система неравенств                                                                                                                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | $\begin{cases} \begin{cases} x_1 \neq x_0 \\ y_1 \neq y_0 \end{cases} \\ (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 \leq \Delta^2 \\ y_1 \leq x_1 + (y_0 - x_0) \\ y_1 \geq x_1 + (y_0 + x_0) \end{cases} \quad (5)$ |
|   | $\begin{cases} \begin{cases} x_1 \neq x_0 \\ y_1 \neq y_0 \end{cases} \\ (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 \leq \Delta^2 \\ y_1 \geq x_1 + (y_0 - x_0) \\ y_1 \geq x_1 + (y_0 + x_0) \end{cases} \quad (6)$ |
|   | $\begin{cases} \begin{cases} x_1 \neq x_0 \\ y_1 \neq y_0 \end{cases} \\ (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 \leq \Delta^2 \\ y_1 \geq x_1 + (y_0 - x_0) \\ y_1 \leq x_1 + (y_0 + x_0) \end{cases} \quad (7)$ |
|  | $\begin{cases} \begin{cases} x_1 \neq x_0 \\ y_1 \neq y_0 \end{cases} \\ (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 \leq \Delta^2 \\ y_1 \leq x_1 + (y_0 - x_0) \\ y_1 \leq x_1 + (y_0 + x_0) \end{cases} \quad (8)$ |

Таким образом можно определить граничные точки в том случае, если контур детали содержит внутренние углы больше  $45^\circ$ . В противном случае необходимо разбиение окрестности на большее число секторов.

Решение следующих задач рассмотрим на примере модели, изображенной на рисунке 2.

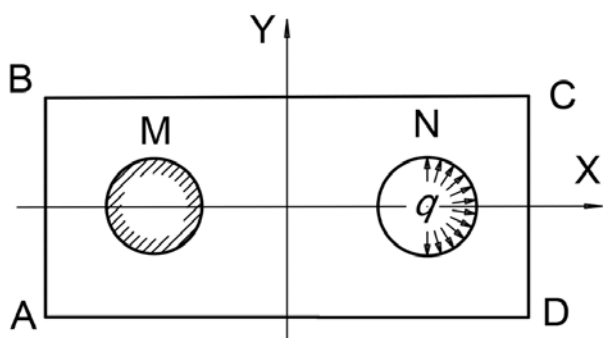


Рис. 2. Исследуемая модель

В рассматриваемой модели жестко зафиксировано левое отверстие М, на правую часть правого отверстия N приложено давление. Модель симметрична относительно оси X.

Второй задачей является обеспечение равномерного и симметричного разбиения геометрической модели на совокупность конечных элементов.

В среде *Ansys Workbench* по умолчанию для создания конечно-элементной сетки используется объект *Mesh*. Однако он далеко не всегда обеспечивает равномерное распределение конечных элементов. Для моделей, имеющих сложное геометрическое строение, конечные элементы часто принимают различные формы и сильно отличаются по размеру (рис. 3).

Для решения проблемы отличающихся по размеру конечных элементов достаточно добавить в объект *Mesh* закладку *Sizing* и указать необходимый размер элементов в параметре *Element Size*.

Для приведения конечных элементов к одной форме необходимо добавить в *Mesh* инструмент *Face Meshing*. Этот инструмент отвечает за создание структурированной сетки конечных элементов.

Однако в случае сложной геометрической формы модели указанный объект применяется

некорректно: либо выдает ошибку, либо не срабатывает вовсе. В этом случае необходимо преобразовать виртуальную топологию модели. Для этого необходимо выполнить следующую последовательность действий:

- 1) на этапе создания геометрической модели в режиме *Geometry* создать на границах модели точки, через которые будут проходить отрезки, разбивающие топологию модели на части. Отметим, что количество и место расположения точек зависят от геометрических свойств исследуемой модели;
- 2) в режиме *Model* перейти в раздел *Virtual Topology* (в дереве проекта выбрать *Model*, затем найти на ленте инструментов раздел *Virtual Topology*);
- 3) выбрать две точки, через которые должен пройти отрезок, разделяющий топологию модели. Затем на ленте инструментов вкладки *Virtual Topology* нажать на *Split Face at Vertices*. Данный пункт необходимо повторить для всех пар точек, которые были созданы на первом этапе.

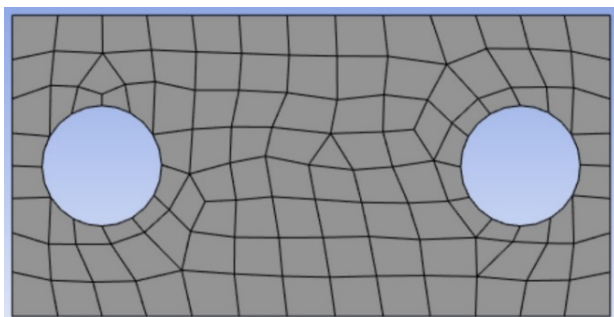


Рис. 3. Конечно-элементная сетка исследуемой модели с автоматическими параметрами объекта *Mesh*

Поскольку касательные к кривым укладки армирующего наполнителя в каждой точке совпадают с направлением главных напряжений, то они не могут совпадать и тем более пересекаться. Однако из приведенного на рисунке 5 распределения кривых укладки армирующего наполнителя видно, что кривые располагаются неравномерно и в местах сгущения, отмеченных красными окружностями, совпадают. Причиной этого является приближенный характер конечно-элементного расчета. Совпадение линий возможно в том случае, когда расстояние между линиями становится меньше величины  $\Delta$ , используемой для определения усредненного значения направления главных напряжений в алгоритме, приведенном в работе [15].

Устранение указанного недостатка алгоритма можно обеспечить за счет уменьшения величины  $\Delta$  в  $n$  раз, что позволит соответственно повысить точность расчета кривой укладки. Для

И только после преобразования виртуальной топологии применим объект *Face Meshing*. В результате будем иметь следующее разбиение модели на совокупность конечных элементов (рис. 4).

Объект *Mesh* среды *Ansys Workbench* даже для симметричных моделей создает асимметричную сетку конечных элементов. В дальнейшем это ведет к неточностям, а также к отсутствию симметрии в конечных решениях.

Для устранения этой проблемы исходная модель детали разрезается по оси симметрии (ось  $X$ ). Расчет проводится только для одной части, например, расположенной ниже оси  $X$ . При этом с помощью инструмента *Displacement* по линии разреза запрещается перемещение в направлении оси  $Y$ . Решение для рассматриваемой задачи показано на рисунке 5. Для получения полной картины расположения нитей армирующего наполнителя решение, полученное для нижней части, симметрично отображается на верхнюю.

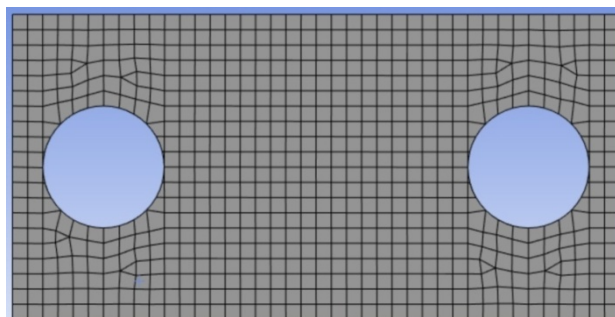


Рис. 4. Конечно-элементная сетка исследуемой модели с примененными объектами *Element Size* и *Face Meshing*

получения требуемой плотности линий необходимо строить их через  $(n - 1)$  граничную точку.

На рисунке 5 приведено построение всех кривых укладки при определенном значении  $\Delta$ , а на рисунке 6 через 5 линий. На последнем рисунке видно, что наложение линий практически устранено.

При построении кривых укладки из граничных точек возможно образование достаточно больших зон, по которым не проходят линии укладки нитей армирующего наполнителя. Это хорошо видно на рисунке 6. Устранить их можно, если начать построение не от граничной точки, а из точки внутри зоны, свободной от линий, построенных по алгоритму [15]. Выбор соответствующих точек производится вручную. В последующем планируется разработка критерия для их выбора и автоматизация процесса.

Траектории укладки нитей армирующего наполнителя показаны на рисунке 7.

Красным на рисунке 7 показаны нити, заполняющие пустые зоны. Они могут не иметь общих точек с границами детали.

### ВЫВОДЫ

1. По результатам анализа алгоритма укладки нитей армирующего наполнителя по направлениям, совпадающим с направлением главных напряжений выявлен ряд недостатков, снижающих его эффективность.

2. Предложены алгоритмические решения, позволяющие определять положение граничных точек на контуре модели.

3. Обоснованы инструменты для построения рациональной конечно-элементной сетки методами *Ansys Workbench*.

4. Предложена методика построения траекторий укладки нитей армирующего наполнителя с требуемой плотностью укладки.

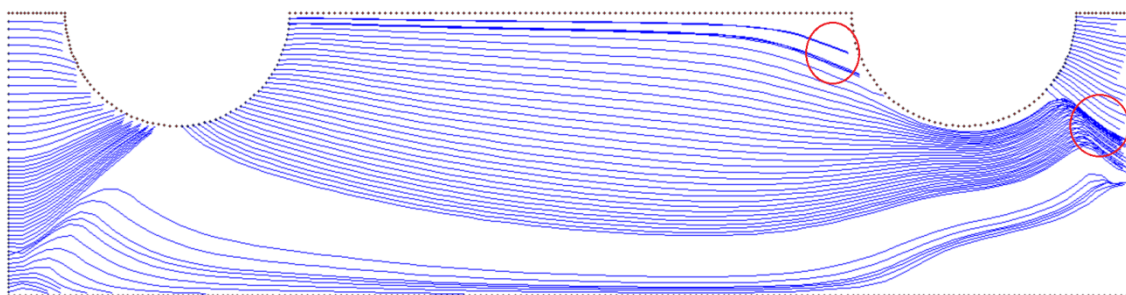


Рис. 5. Распределение кривых укладки армирующего наполнителя в исследуемой модели\*

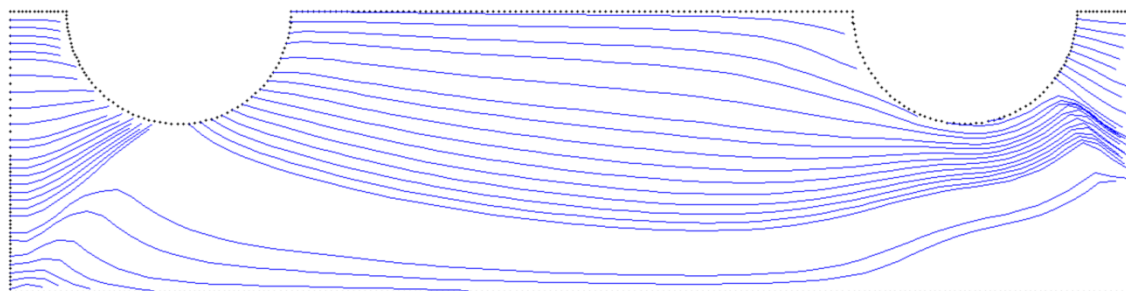


Рис. 6. Расположение кривых укладки армирующего наполнителя в случае их построения из каждой пятой граничной точки

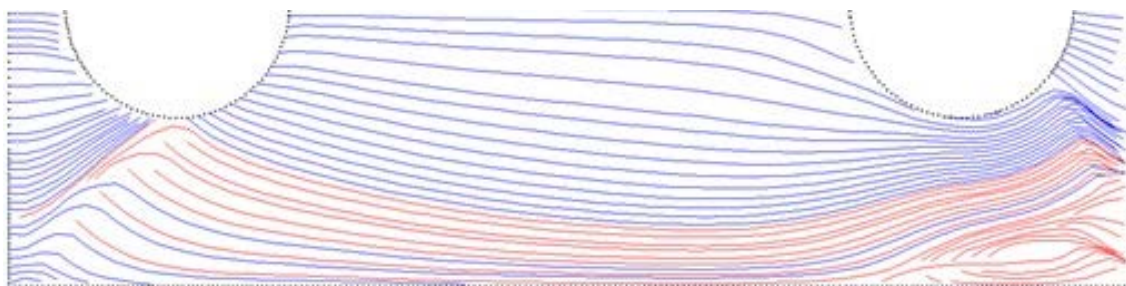


Рис. 7. Скорректированные траектории укладки нитей армирующего наполнителя\*

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Об использовании комплексных нитей для армирования волокнистых композиционных материалов, применяемых в нефтегазовой отрасли / М. И. Панин, В. М. Капустин, А. Е. Цимбалюк, Р. В. Хакимов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2021. № 6(396). С. 103–106.
2. Исследование влияния натяжения нити при перематывании на удельную плотность бобин сомкнутой намотки / С. Д. Николаев, М. И. Панин, М. М. Кашеева, Н. А. Николаева // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2009. № 4(318). С. 55–58.

\* Полноцветная версия представлена на сайте. URL: <https://tik.kosgoss.ru>.



3. Панин М. И. Исследование прочностных характеристик мотальных паковок специального назначения с помощью разверток // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2010. № 8(329). С. 40–44.
4. Анализ текстильных структур армирующих компонентов композиционных материалов и выбор областей их применения / М. И. Панин, А. Р. Гареев, А. П. Карпов, Д. С. Максимова, Н. А. Корчинский // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2023. № 2(145). С. 15–28.
5. Рудовский П. Н., Гречухин А. П., Палочкин С. В. Рациональное армирование деталей из композиционных материалов тканями с переменной плотностью по утку // Вестник Костромского государственного технологического университета. 2015. № 2(35). С. 21–23.
6. Влияние укладки и угла несоосности на механические свойства волокнисто-армированных стеклопластиков / Л. М. Кун, В. Чжэн, С. Б. Ван, Г. Д. У, Я. Я. Ци, Я. Цз. Сюэ, Б. Ч. Ван, Х. М. Сюй // Механика композитных материалов. 2021. Т. 57, № 4. С. 783–796.
7. Grechukhin A. P., Seliverstov V. Y., Rudovskiy P. N. The method of determination of yarn bending rigidity and friction factor during interaction of fibers // The Journal of the Textile Institute. 2017. Vol. 108, No 12. P. 2067–2072.
8. Гречухин А. П., Рудовский П. Н. Развитие теории строения и формирования однослойных тканей. Кострома : Костром. гос. ун-т, 2017. 171 с.
9. Определение рациональных параметров системы заправки нитей при формировании трехмерного ортогонального тканого волокнистого материала / А. П. Гречухин, С. Н. Ушаков, П. Н. Рудовский, С. В. Палочкин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2018. № 5(377). С. 111–115.
10. Влияние величины смещения слоя горизонтального утка на плотность расположения вертикальных слоев нитей при формировании трехмерных ортогональных тканей / С. Н. Ушаков, А. П. Гречухин, П. Н. Рудовский, С. В. Палочкин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2018. № 6(378). С. 96–100.
11. Azarov A. V., Latysheva T. A., Khaziev A. R. Optimal design of advanced 3D printed composite parts of rocket and space structures // Advances in Composite Science and Technology (ACST 2019). IOP Conf. Series : materials Science and Engineering. M., 2020. T. 934. C. 012062.
12. Косых П. А., Азаров А. В. Алгоритм топологической оптимизации композитных конструкций, основанный на анализе главных напряжений // Инженерный журнал: наука и инновации. 2023. № 12(144). С. 1–18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-topologicheskoy-optimizatsii-kompozitnyh-konstruktsiy-osnovannyi-na-analize-glavnyh-napryazheniy/viewer> (дата обращения: 26.04.2025).
13. Стрункина К. Ю., Рудовский П. Н. Выбор рационального направления армирования композитов на текстильной основе // Повышение энергоресурсоэффективности, экологической и технологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности (ISTS “EESTE-2024”) : сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. симпозиума, посвященного 120-летию со дня рождения П. Г. Романкова. М., 2024. С. 312–316.
14. Стрункина К. Ю., Рудовский П. Н. Повышение прочности композиционных материалов на текстильной основе путем выбора рационального направления армирования // Цифровые технологии в производстве : материалы Всерос. науч.-техн. конф. Кострома : Костром. гос. ун-т, 2024. С. 56–60.
15. Стрункина К. Ю., Рудовский П. Н. Алгоритм расчета направлений укладки текстильного армирующего наполнителя с учетом напряженного состояния детали // Технологии и качество. 2025. № 2(68). С. 29–35.

## REFERENCES

1. Panin M. I., Kapustin V. M., Tsymbalyuk A. E., Khakimov R. V. On the use of complex yarns for reinforcing fibrous composite materials used in the oil and gas industry. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 2021;6(396):103–106. (In Russ.)
2. Nikolaev S. D., Panin M. I., Kashcheyeva M. M., Nikolaeva N. A. Study of the effect of thread tension during rewinding on the specific density of close-wound bobbins. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 2009;4(318):55–58. (In Russ.)

3. Panin M. I. Study of the strength characteristics of special-purpose winding packages using reamers. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 2010;8(329):40–44. (In Russ.)
4. Panin M. I., Gareev A. R., Karpov A. P., Maksimova D. S., Korchinsky N. A. Analysis of textile structures of reinforcing components of composite materials and selection of their application areas. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya Mashinostroenie* [Bulletin of the Moscow State Technical University named after N. E. Bauman. Series Mechanical Engineering]. 2023;2(145):15–28. (In Russ.)
5. Rudovsky P. N., Grechukhin A. P., Palochkin S. V. Rational reinforcement of parts made of composite materials with fabrics with variable density by weft. *Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kostroma State Technological University]. 2015;2(35):21–23. (In Russ.)
6. Kong L. M., Zheng W., Wang X. B., Wu G. D., Qi Ya. Ya., Xue Y. J., Wang B. Ch., Xu H. M. Effects of layering types and fiber off-axis angle on the mechanical properties of s-glass-fiber-reinforced composites. *Mekhanika kompozitnyh materialov* [Mechanics of composite materials]. 2021;57,4:783–796. (In Russ.)
7. Grechukhin A. P., Seliverstov V. Y., Rudovskiy P. N. The method of determination of yarn bending rigidity and friction factor during interaction of fibers. *The Journal of the Textile Institute*. 2017;108,12:2067–2072.
8. Grechukhin A. P., Rudovsky P. N. Development of the theory of structure and formation of single-layer tissues. Kostroma, Kostroma St. Univ. Publ., 2017. 171 p. (In Russ.)
9. Grechukhin A. P., Ushakov S. N., Rudovsky P. N., Palochkin S. V. Determination of rational parameters of the thread threading system during the formation of three-dimensional orthogonal woven fibrous material. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 2018;5(377):111–115. (In Russ.)
10. Ushakov S. N., Grechukhin A. P., Rudovsky P. N., Palochkin S. V. The influence of the displacement value of the horizontal weft layer on the density of the arrangement of vertical layers of threads during the formation of three-dimensional orthogonal fabrics. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 2018;6(378):96–100. (In Russ.)
11. Azarov A. V., Latysheva T. A., Khaziev A. R. Optimal design of advanced 3D printed composite parts of rocket and space structures // *Advances in Composite Science and Technology (ACST 2019)*. IOP Conf. Series : materials Science and Engineering. Moscow, 2020. Vol. 934. P. 012062.
12. Kosykh P. A., Azarov A. V. Algorithm for topological optimization of composite structures based on the analysis of principal stresses. *Inzhenerny jzhurnal: nauka i innovacii* [Engineering Journal: Science and Innovations] 2023. No. 12(144). P. 1–18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algorithm-topologicheskoy-optimizatsii-kompozitnyh-konstruktsiy-osnovanny-na-analize-glavnyh-napryazheniy/viewer> (accessed 26.04.2025). (In Russ.)
13. Strunkina K. Yu., Rudovsky P. N. Selection of a Rational Direction of Reinforcement of Textile-Based Composites. In the collection: *Improving Energy and Resource Efficiency, Environmental and Technological Safety of Processes and Apparatus in the Chemical and Related Industries (ISTS “EESTE-2024”)*. Collection of scientific papers of the international scientific and technical symposium dedicated to the 120th anniversary of the birth of P. G. Romankov. Moscow, 2024. P. 312–316. (In Russ.)
14. Strunkina K. Yu., Rudovsky P. N. Increasing the strength of textile-based composite materials by choosing a rational reinforcement direction. In the collection: *Digital technologies in production*. Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference. Kostroma, Kostroma St. Univ. Publ., 2024. P. 56–60. (In Russ.)
15. Strunkina K. Yu., Rudovsky P. N. Algorithm for calculating the directions of laying textile reinforcing filler taking into account the stress state of the part. *Tekhnologii i kachestvo* [Technologies & Quality]. 2025. No 2(68). P. 29–35. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 29.07.2025  
Принята к публикации 09.09.2025