

УДК 004.94

Научная статья

<https://doi.org/10.32603/2071-8985-2022-15-7-14-19>**Автоматизация алгоритма проектирования схемы армирования
для конструкций из композиционных материалов****В. А. Поляков**Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

vapoliakov@etu.ru

Аннотация. Рассматривается разработка и автоматизация алгоритма проектирования схемы армирования на основе деформации изгиба. Алгоритм представлен в виде блок-схемы. При поиске траектории армирования алгоритм учитывает заданные критерии поиска и проектирования. На основе алгоритма разрабатывается программа, способная оперировать данными исследуемой модели, использовать их для построения и синтеза траектории армирования. Код программы основан на простом примере – деформации изгиба. Проводится анализ напряженно-деформированного состояния (НДС), когда деформация протекает линейно и в одном направлении. В результате траектории армирования представляют собой прямые линии. Для нелинейной деформации в данном коде предусмотрена функция сплайн, применяемая для построения кривых траекторий. Автоматизация алгоритма проектирования траекторий армирования в виде программы позволила сократить время поиска, обработки и составления траекторий.

Ключевые слова: автоматизация, алгоритм, Siemens NX, траектории армирования, армирующий детали

Для цитирования: Поляков В. А. Автоматизация алгоритма проектирования схемы армирования для конструкций из композиционных материалов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 7. С. 14–19. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-7-14-19.

Original article

**Automation of the Algorithm for Designing a Reinforcement Scheme
for a Structure Made of Composite Materials****V. A. Polyakov**

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

vapoliakov@etu.ru

Abstract. The paper considers the development and automation of an algorithm for designing a reinforcement scheme based on bending deformation. The algorithm is presented in the form of a block diagram. When searching for a reinforcement trajectory, the algorithm takes into account the specified criteria for searching and designing a scheme. On the basis of the algorithm, a program is developed that can operate with the data of the model under study, use them to construct and synthesize the reinforcement trajectory. The program code is based on a simple example – bending deformation. The stress-strain state (SSS) is analyzed, the deformation proceeds linearly and in one direction. As a result, the reinforcement paths are straight lines. For non-linear deformation, this code provides a spline function that is used to construct curved trajectories. Automation of the algorithm for designing reinforcement trajectories in the form of a program made it possible to reduce the time of searching, processing and compiling trajectories.

Keywords: automation, algorithm, Siemens NX, reinforcement paths, reinforcing parts

For citation: Polyakov V. A. Automation of the Algorithm for Designing a Reinforcement Scheme for a Structure Made of Composite Materials // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 7. P. 14–19. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-7-14-19.

Введение. В настоящее время автоматическое или автоматизированное управление используется во всех областях человеческой деятельности. Внедрение систем управления позволяет выполнять определенные задачи эффективнее [1].

Армирование детали состоит из нескольких этапов: создание геометрической модели, создание конечно-элементной модели, постановка задачи и начальных условий нагрузки, анализ картин напряженно-деформированного состояния, выявление траекторий армирования. Полученные результаты необходимо проанализировать на предмет не только правильного вычисления программой, но и достижения желаемых результатов. Верификацию результатов можно подтвердить математическими расчетами, используя формулы, применяемые при расчете сопротивления материалов. Поставленная задача решается при помощи анализа, изменения и повторения этапов, выполняемых при армировании.

При изготовлении конструкций из композиционных материалов разработчику необходимо учитывать условия эксплуатации. Для проектирования схемы армирования необходимо определить, какую нагрузку испытывает конструкция и в каких местах. Схема армирования определяется исходя из направления смещения материала и траекторий распространения напряжений. Этот подход сейчас активно используется в авиастроении, в частности лопатки двигателя ПД-35 [2] изготавливаются из композиционного материала.

Из вышесказанного видно, что разработка алгоритма поиска траекторий армирования и его автоматизация – это шаг в направлении разработки оптимальных конструкций.

Постановка задачи. Поиск траекторий зависит от начальных условий – приложенной нагрузки и места закрепления детали, – а также от условий решаемой задачи: минимальное/максимальное смещение или напряжение должно быть не больше заданного значения. К примеру, необходимо достичь снижения напряжения или смещения в детали посредством внедрения n -го количества арматуры и требуется определить n ; введены критерии оптимальности, например оптимальное использование арматуры, при котором вес конструкции меньше заданного значения.

Процесс поиска траекторий армирования достаточно трудоемок – необходимо повторять одни и те же действия несколько раз. Сократить время подбора оптимального размера арматуры, а также время, требуемое на поиск траекторий, позволит программа, разработанная на языке программирования.

Выбор среды для разработки программы. В среде Siemens NX за взаимодействие модуля Unigraphics и программ пользователя, написанных на языке C, отвечает модуль NX Open. Основное применение этого расширения – программным способом создавать геометрические модели, получать информацию об объектах, формировать сборки, генерировать чертежную документацию и т. д. [3]. Для написания кода программы используется универсальное ПО Microsoft Visual Studio.

Блок-схема алгоритма. На рис. 1 представлен алгоритм поиска траекторий армирования в виде блок-схемы.

Пояснения по каждому блоку:

1. *Данные объекта* – здесь обозначаются данные детали, ее геометрические параметры модели, также здесь указываются критерии решения задачи армирования.

2. *Создание модели* – непосредственно в среде разработки (в данном случае это Siemens NX) создается геометрическая и конечно-элементная модель, задается тип материала.

3. *Моделирование деформации* – создается симуляция, в которой вводятся прикладываемая нагрузка (согласно условиям задачи) и точки фиксации детали.

4. *Анализ результатов НДС (напряженно-деформированного состояния)* – получение картин деформации детали, напряжения и смещения материала. Исходя из картин НДС выбираются участки внедрения арматуры.

5. *Поиск траекторий армирования* – с учетом картин НДС определяются координаты центров элементов детали, в которых будет уложен армирующий материал, определяется направление векторов распространения напряжения, синтезируются траектории армирования, по которой укладывается армирующий материал.

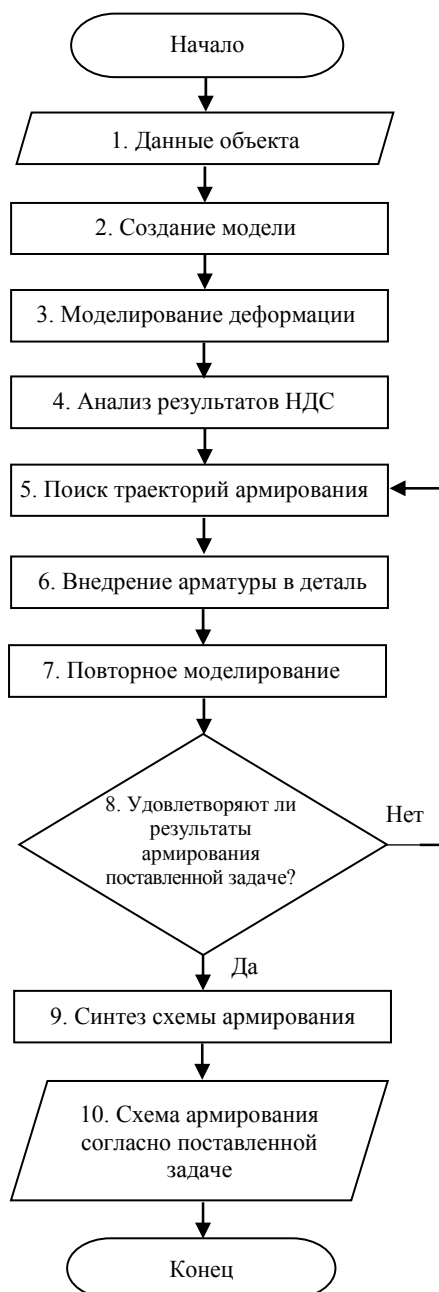


Рис. 1. Блок-схема алгоритма поиска траекторий армирования
Fig. 1. Block diagram of the reinforcement trajectory search algorithm

6. Внедрение арматуры в деталь – по найденным координатам центров элементов в исследуемой детали «вырезается» место для арматуры, арматура вклеивается в деталь.

7. Повторное моделирование – полученная конструкция проверяется на деформацию, повторяются условия моделирования из п. 3.

8. Условие – если результаты армирования удовлетворяют заданным критериям задачи, то траектории армирования найдены, если нет, то цикл повторяется начиная с п. 5, пока не будет достигнут критерий решения задачи.

9. Синтез схемы армирования – полученные траектории армирования собираются в одну общую схему армирования.

10. Схема армирования – на выходе из алгоритма разработчик получает схему армирования конструкции с заданными параметрами.

Разработка программы. Для разработки программы необходимо выбрать один из простых случаев деформации, например деформацию изгиба (модель представлена на рис. 2).

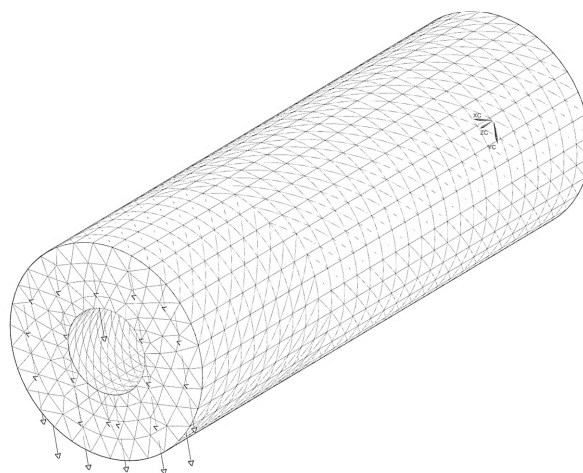


Рис. 2. Модель симуляции
Fig. 2. Simulation model

Процесс написания кода можно условно разделить на несколько этапов:

1. Определение координат траекторий армирования.

2. Определение направления распространения траекторий.

3. Синтезирование траекторий армирования.

Код программы можно разделить на 3 части, для удобства можно каждый шаг описать как отдельную программу, а потом их соединить.

Определение координат траекторий армирования. Для работы с данными из модели в Siemens NX в Microsoft Visual Studio создается приложение на языке программирования C# и подключается соответствующий модуль NX Open. Подключив данный модуль, можно определить количество элементов конечно-элементной модели, а также их координаты и значения напряжения. На начальном этапе интерес представляют значения напряжения в элементе.

Основным критерием для выбора элементов служит условие «напряжение в элементе должно быть больше или равно 80 % от максимального значения». После запуска цикла поиска и получения некоего количества элементов создается таблица Excel со всеми данными по этим элементам.

Выбранные элементы модели
Selected elements of the model

Номер элемента	Координата X	Координата Y	Координата Z	Напряжение, МПа
951	12.45	-19.36	1.97	0.72
952	12.45	-19.36	5.92	0.73
989	6.49	-22.09	1.97	0.82
990	6.49	-22.09	5.92	0.83
991	6.49	-22.09	9.87	0.78
992	6.49	-22.09	13.82	0.75
993	6.49	-22.09	17.76	0.73
1027	0.01	-23.02	1.97	0.86
1028	0.01	-23.02	5.92	0.87
1029	0.01	-23.02	9.87	0.82
1030	0.01	-23.02	13.82	0.79
1031	0.01	-23.02	17.76	0.76
1032	0.01	-23.02	21.71	0.74
1065	-6.48	-22.09	1.97	0.82
1066	-6.48	-22.09	5.92	0.84
1067	-6.48	-22.09	9.87	0.78
1068	-6.48	-22.09	13.82	0.75
1069	-6.48	-22.09	17.76	0.73
1103	-12.44	-19.37	1.97	0.72
1104	-12.44	-19.37	5.92	0.73

В таблице представлены порядковые номера элементов, их координаты относительно глобальной системы координат и значения напряжения. Видно, что некоторые элементы имеют одинаковые координаты X , Y или Z . Если пара или несколько элементов имеют две одинаковые координаты, значит, они лежат на одной прямой. Так, на одной прямой лежат элементы с номерами 989–993 (одинаковые координаты x , y), в то же время, элементы с номерами 992, 1068 (одинаковые координаты y , z) находятся на другой прямой. Выходит, что недостаточно определить только координаты элементов, потому что это просто набор точек, и, соединив их между собой, получим множество прямых (в данном случае) линий, что не решит задачу армирования. Для того чтобы понять, какие точки можно связать между собой, необходимо определить, в каком направлении распространяются напряжения.

Определение направления распространения траекторий. Расположение арматуры в детали будет зависеть от того, какое направление имеют векторы напряжения. Для определения направления вектора в элементе необходимо разложить вектор тензора напряжения на отдельные компоненты. В среде моделирования NX есть возможность представить максимальный главный момент через тензор главных напряжений, а зна-

чит, можно определить, в какую сторону направлено максимальное напряжение. Также можно понять, как направлены главные напряжения по отношению к соответствующим осям. Для определения направления в данном случае необходимо человеческое вмешательство, поскольку в программе сложно описать определение направления векторов. Необходимо посмотреть на картину векторов максимального напряжения и определить, в какую сторону они направлены. Далее следует посмотреть на картины напряжения, представленные по осям X , Y , Z – в данном случае перебирать все элементы не нужно, достаточно рассмотреть те, которые попали под фильтр написанной программы (рис. 3).

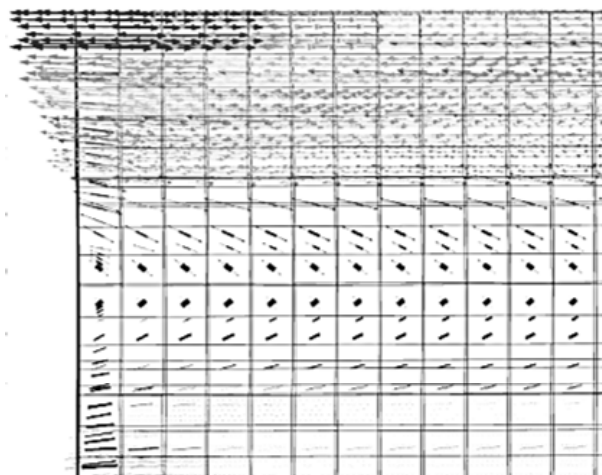


Рис. 3. Тензоры в направлении оси Z
Fig. 3. Tensors in the Z direction

В случае изгиба трубы основным направлением векторов напряжения становится направление по оси Z , направления векторов напряжений по осям X и Y крайне малы и ими можно пренебречь.

Синтезирование траекторий армирования. Теперь, зная координаты и направления векторов напряжения, можно строить траектории армирования. По координатам из таблицы строятся соответствующие траектории. Вводить вручную каждую точку для построения прямой достаточно долго, написание небольшой программы ускорит данный процесс – чтение будет осуществляться из текстового файла, в котором записаны координаты (таблица). В зависимости от рода траектории (прямая или кривая) выбирается соответствующая функция построения. Фрагмент программы для построения прямой линии в NX на языке C имеет вид

```
#include <uf.h>
#include <uf_curve.h>
```

```
void ufusr(char *param, int *retcode, int param-  
Len)  
{ tag_t entid = 0; // идентификатор объекта  
«линия»  
UF_CURVE_line_t line_coords; // структура  
концевых точек линии //  
if (UF_initialize()) return;  
line_coords.start_point[0]=12.45.; // X1, запол-  
нение координат точек  
line_coords.start_point[1]=-19.36.; // Y1  
line_coords.start_point[2]=1.97.; // Z1  
line_coords.end_point[0]=12.45.; // X2  
line_coords.end_point[1]=-19.36.; // Y2  
line_coords.end_point[2]=5.92.; // Z2  
UF_CURVE_create_line (&line_coords,  
&entid); // построение линии  
UF_terminate(); }
```

Как видно из таблицы, траектории имеют вид прямых линий, и их построение задается двумя точками, в данном случае программа проста и работает, однако если траектории имеют вид кривых, тогда для построения используется функция-сплайн UF_CURVE_create_spline_thru_pts [4]. С ее помощью были построены пять прямых линий, в рамках рассматриваемого случая эти линии служат траекториями армирования (рис. 4).

Согласно алгоритму, следующий этап – это внедрение арматуры в деталь и новый поиск траекторий армирования. Для данной операции в дальнейшем будет создаваться отдельная программа по внедрению стержней, преимуществом автоматизации которой будет программное изменение диаметра арматуры и ее количество в сборке. При измене-

нии геометрических параметров модели конструкцию необходимо пересобрать с обновлением элементов склеивания, а делать это в ручном режиме достаточно трудоемко и занимает много времени.

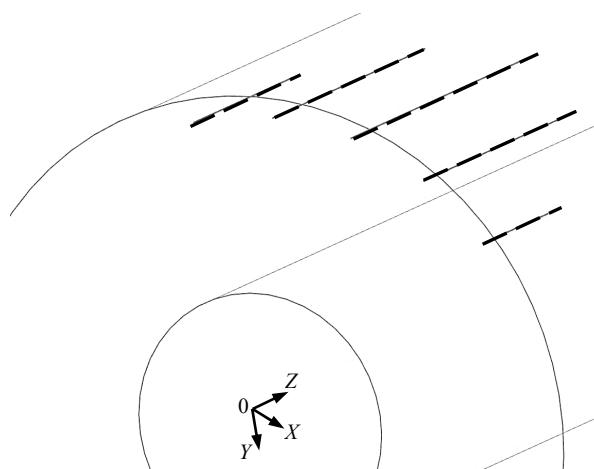


Рис. 4. Траектории армирования, построенные с помощью программы
Fig. 4. Constructed trajectories of pipe reinforcement using the program

Выводы. Автоматизация алгоритма проектирования траекторий армирования в виде программы позволила сократить время поиска, обработки и составления траекторий. Данный код необходимо совершенствовать с целью его применения не только к простым видам деформации. Следующий этап разработки программы заключается в ее применении к другим задачам – например, к армированию трубы, на которую действует несимметричная нагрузка. Необходимо посмотреть, как в данном случае будет работать программа.

Список литературы

1. Информационные технологии и снижение влияния человеческого фактора на результаты бизнеса. URL: <http://www.topsbi.ru/default.asp?artID=1699> (дата обращения 14.04.2021).
2. Наука и техника. Композитная лопатка авиадвигателя сверхбольшой тяги ПД-35. URL: <https://>

- naukatehnika.com/kompozitnaya-lopatka-pd-35.html (дата обращения 14.04.2021).
3. Краснов М., Чигишев Ю. Unigraphics для профессионалов. М.: Изд-во «ЛОРИ», 2004. 141 с.
4. Тихомиров В. А. Разработка приложений для Unigraphics на языке С. Изд-во: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2012. 462 с.

Информация об авторе

Поляков Владимир Александрович – аспирант, ассистент кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: vapoliakov@etu.ru

References

1. Informacionnye tekhnologii i snizhenie vliyaniya chelovecheskogo faktora na rezul'taty biznesa. URL: <http://www.topsbi.ru/default.asp?artID=1699> (data obrashcheniya 14.04.2021). (In Russ.).

2. Nauka i tekhnika. Kompozitnaya lopatka aviadvigatelya sverhbol'shoj tyagi PD-35. URL: <https://naukatehnika.com/kompozitnaya-lopatka-pd-35.html> (data obrashcheniya 14.04.2021). (In Russ.).

3. Krasnov M., CHigishev YU. Unigraphics dlya professionalov. M.: Izd-vo «LORI», 2004. 141 s. (In Russ.).

4. Tihomirov V. A. Razrabotka prilozhenij dlya Unigraphics na yazyke S. Izd-vo: FGBOU VPO «KnAGTU», 2012. 462 s. (In Russ.).

Information about the author

Vladimir A. Polyakov – postgraduate student, assistant of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: vapoliakov@etu.ru

Статья поступила в редакцию 11.04.2022; принята к публикации после рецензирования 07.05.2022; опубликована онлайн 13.09.2022.

Submitted 11.04.2022; accepted 07.05.2022; published online 13.09.2022.
