

Проектирование схемы армирования конструкции из композиционных материалов при деформации изгиба

В. А. Поляков

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия
vapoliakov@etu.ru

Аннотация. Рассматривается проектирование схемы армирования детали при деформации изгиба. В среде Siemens NX создается модель и проводится анализ напряженно-деформированного состояния. Используя концепцию синтеза схем армирования, определяют траектории, по которым в дальнейшем укладывают армирующий материал. Работоспособность данной концепции проверяется на простом примере, чтобы потом перейти к более сложным деталям. Выявление траекторий армирования и внедрение арматуры показало, что деформация уменьшилась. Результатом становится схема армирования при деформации изгиба детали. Оптимизация схемы армирования заключается в подборе оптимального количества арматуры и ее размеров.

Ключевые слова: деформация изгиба, Siemens NX, тензор напряжений, траектории армирования, армирующий материал

Для цитирования: Поляков В. А. Проектирование схемы армирования конструкции из композиционных материалов при деформации изгиба // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 5/6. С. 51–56. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-5/6-51-56.

Original article

Designing a reinforcement scheme for a structure made of composite materials during bending deformation

V. A. Polyakov

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia
vapoliakov@etu.ru

Abstract. The paper considers the reinforcement of a pipe during bending deformation. In the Siemens NX environment, a model is created and an analysis of the stress-strain state is carried out. Using the concept of synthesis of reinforcement schemes, trajectories are determined along which the reinforcing material is subsequently laid. The efficiency of this concept is tested on a simple example, then to move on to more complex details. The identification of reinforcement trajectories and the introduction of reinforcement showed that the deformation has decreased. The result is a reinforcement scheme for pipe bend deformation in the general case. Optimization of the reinforcement scheme consists in selecting the optimal amount of reinforcement and its dimensions.

Keywords: bending deformation, Siemens NX, stress tensor, reinforcement paths, reinforcing material

For citation: Polyakov V. A. Designing a reinforcement scheme for a structure made of composite materials during bending deformation // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no 5/6. P. 51–56. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-5/6-51-56.

Введение. Часть жизненного цикла изделия составляет его разработка. Если изделие будет подвержено различным нагрузкам, то при проектиро-

вании это следует учесть и разработать соответствующую схему армирования. При проектировании схемы армирования необходимо учитывать, что

в зависимости от прикладываемой нагрузки и геометрической формы детали деформация может протекать не одинаково и в разных направлениях [1].

Для разработки схемы армирования используется концепция синтеза схем армирования конструкции. В ее основе лежит идея расположения арматуры по траекториям распространения напряжений в конструкции, т. е. в рассматриваемой детали выбираются деформированные участки конструкции и определяются направления векторов напряжений. В конечном итоге создается схема армирования, которая состоит из множества траекторий.

Согласно концепции, необходимо определить траектории распространения напряжения и построить по ним линии, вдоль которых будет уложен армирующий материал. Для применения концепции к деталям, имеющим сложную геометрическую форму, необходимо рассмотреть ее на простых примерах. Одним из таких примеров служит деформация растяжения (сжатия) трубы, рассмотренная в [2]. Другим примером простой деформации служит изгиб детали.

Постановка задачи. К основным параметрам, определяющим прочность армированной конструкции, относятся ее геометрическая форма, компонентный состав и схема армирования. В данном случае ставится задача спроектировать схему армирования для детали, подверженной деформации изгиба.

В качестве рассматриваемой модели выбирается труба из эпоксидной смолы диаметром 50 мм, толщиной 30 мм, длиной 150 мм. Один торец жестко закрепляется, а к другому прикладывается сила, вектор которой направлен в сторону $+Y$. В качестве среды моделирования выступает Siemens NX, модель трубы представлена на рис. 1.

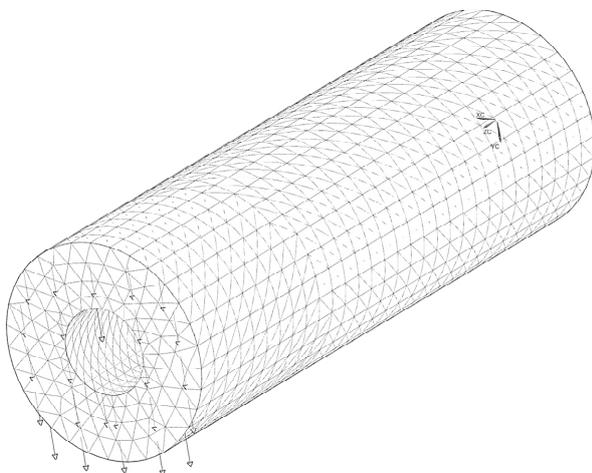


Рис. 1. Модель симуляции
Fig. 1. Simulation model

После моделирования получаем следующие результаты: напряжение (рис. 2), смещение (рис. 3) и деформация (рис. 4) трубы.

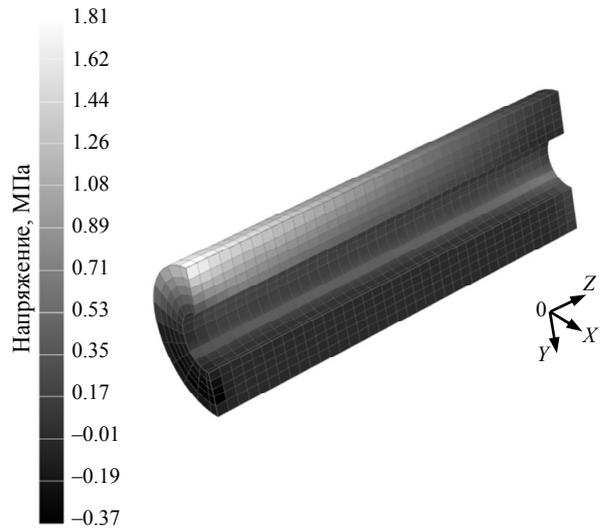


Рис. 2. Напряжение детали (в разрезе) по элементам
Fig. 2. Strain of the part (in section) by elements

Из результатов моделирования видно, что наибольшее напряжение испытывают элементы со стороны закрепленного торца на гранях, параллельных оси Z . При армировании будем опираться именно на эти сегменты.

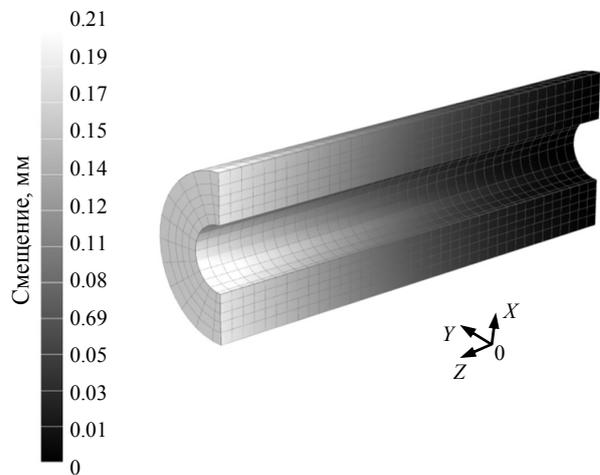


Рис. 3. Смещение материала детали
Fig. 3. Displacement material of the part

Как видно из рис. 3, наибольшее смещение возникает на торце, к которому была приложена сила. Если посмотреть на картину деформации (рис. 4), то будет видно, что труба наклонилась в направлении оси $+Y$, также есть небольшое удлинение в сторону $+Z$ и отсутствует смещение вдоль оси X .

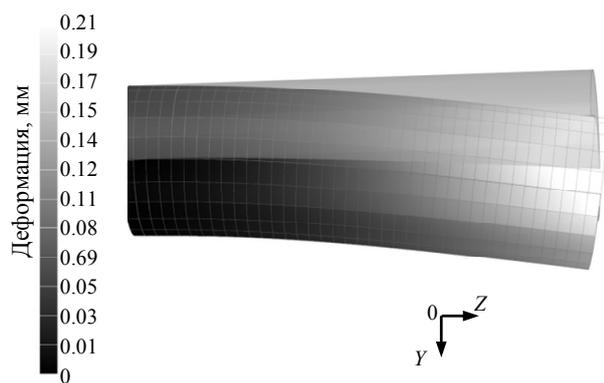


Рис. 4. Деформация детали
 Fig. 4. Part deformation

Траектории укладки арматуры определяются, исходя из полученных результатов, представленных на рис. 2–4.

Определение траекторий армирования. Поиск траектории армирования можно разделить на два этапа: поиск мест укладки и поиск направления укладки. Первый этап состоит в определении мест укладки, т. е. нахождении элементов, напряжение которых больше 75 % от максимального значения. Конкретного представления напряжений в виде векторов в Siemens NX нет, но есть возможность представить механическое напряжение в виде тензоров напряжений [3]. Тензор напряжений полностью описывает напряженное состояние в точке и представляет собой матрицу, компоненты которой представлены в виде векторов. На главной диагонали расположены нормальные напряжения, а в остальных позициях – касательные [4]. Тензор выглядит следующим образом:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}.$$

В разных точках детали напряжения имеют разные значения и направления. Интерес представляет направление вектора максимального напряжения в точке. В свою очередь, максимальное главное напряжение означает, что напряжение действует на главную площадку, т. е. на площадку, на которой отсутствуют касательные напряжения. На главных площадках нормальные напряжения (главные напряжения) принимают свои экстремальные значения – максимум σ_1 , ми-

нимум σ_3 и минимакс σ_2 [4]. Тензор напряжений, записанный через главные напряжения, имеет следующий вид:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix}.$$

С учетом этого выбирается отображение результатов моделирования в виде максимального главного момента, что в Siemens NX соответствует максимальному главному напряжению σ_1 [5].

Определение мест укладки арматуры. Место укладки определяется исходя из того, где значения напряжений имеют максимальное значение. Выбранный фильтр (значение больше 75 % максимального) показывает, какие элементы «нуждаются» в армировании. Идея простая, но возникает вопрос: как определить координаты этих элементов? Определять координаты в пространстве необходимо в ненагруженном состоянии, поскольку по найденным координатам будут строиться кривые, по которым далее необходимо «вырезать» в детали место под арматуру.

Для начала необходимо определить координаты одного из отфильтрованных элементов, а потом аналогично – остальные. Для примера выбирается элемент № 1029, ближе к закрепленному торцу, как показано на рис. 5. В окне «Определить значение» появились графы максимального и минимального значений напряжения. Полная информация по выбранному элементу доступна в виде файла Excel при генерации отчета.

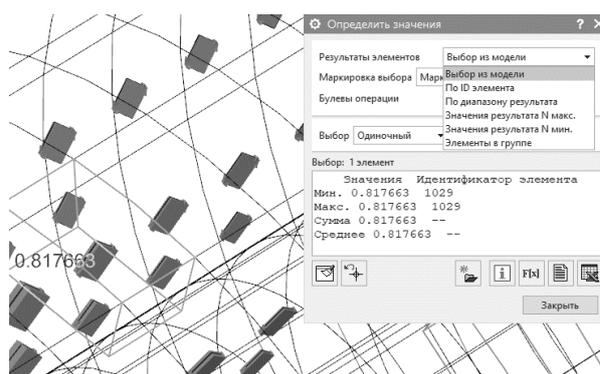


Рис. 5. Выбор элемента из модели
 Fig. 5. Selecting an element from the model

В таблице, генерируемой NX, выводятся координаты центра элемента, а также разложение тензора на нормальные напряжения по граням – xx , yy , zz и напряжения сдвига по граням x , y , z в направлении y , z , x соответственно [5].

Определив координаты центроидов, можно переходить к следующему этапу – определение направления укладки армирования.

Определение направления укладки арматуры. Укладка арматуры зависит от того, как направлены векторы напряжения. Чтобы узнать направление, необходимо представить тензор в виде отдельных компонентов. В среде моделирования NX есть возможность представить максимальный главный момент через тензор главных напряжений. Значит, можно определить, в какую сторону направлено максимальное напряжение. Рассмотрим каждое направление по отдельности (рис. 6–8).

Из рис. 6–8 видно, что наибольшие значения имеют нормальные напряжения, направления которых ориентированы по оси Z . Значит, первоначальная схема армирования будет состоять из укладки арматуры в этом направлении. Определив место и направление укладки арматуры, составляют схему армирования.

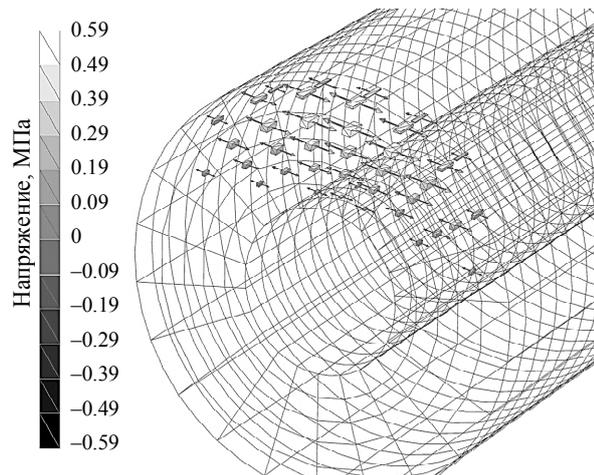


Рис. 6. Тензоры в направлении оси X
Fig. 6. Tensors in the X direction

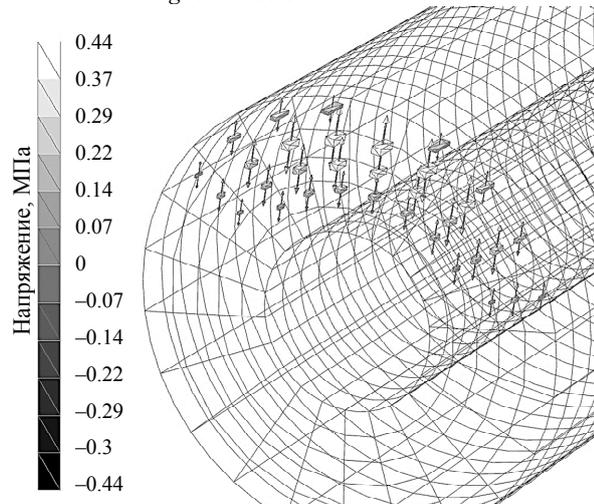


Рис. 7. Тензоры в направлении оси Y
Fig. 7. Tensors in the Y direction

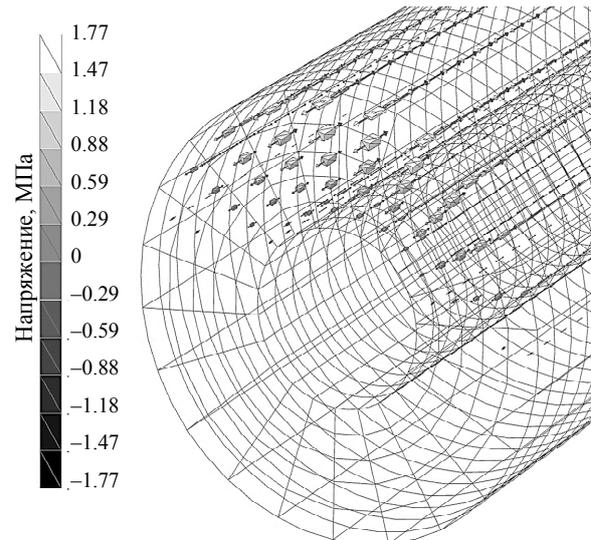


Рис. 8. Тензоры в направлении оси Z
Fig. 8. Tensors in the Z direction

Составление схемы армирования. Схема армирования состоит из нескольких траекторий армирования, которые представляют собой кривые линии, по которым в дальнейшем укладывается армирующий материал. Объединив выбранные ранее элементы (рис. 5) и направления векторов напряжения (рис. 5–8), получаем несколько пар связанных элементов, тогда картина армирования выглядит, как на рис. 9.

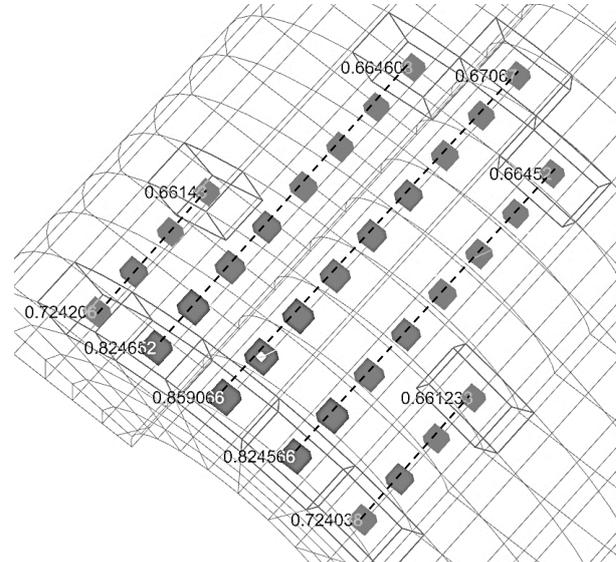


Рис. 9. Элементы армирования
Fig. 9. Selected items

На рис. 9 показаны начальные и конечные элементы армирования. Объединение элементов в группу происходит по условию: координаты Z должны быть разными, а X и Y – одинаковыми. Это вытекает из п. «Определение направления» (рис. 6–8). Рассматривая любую из пар элементов, можно заметить, что между начальным и конеч-

ным элементами есть еще элементы, координаты X и Y которых совпадают, а меняется только координата Z . Таким образом, можно построить прямые через эти пары точек, которые и станут траекториями (линиями) армирования. Следующий шаг – нанесение траекторий на модель симуляции.

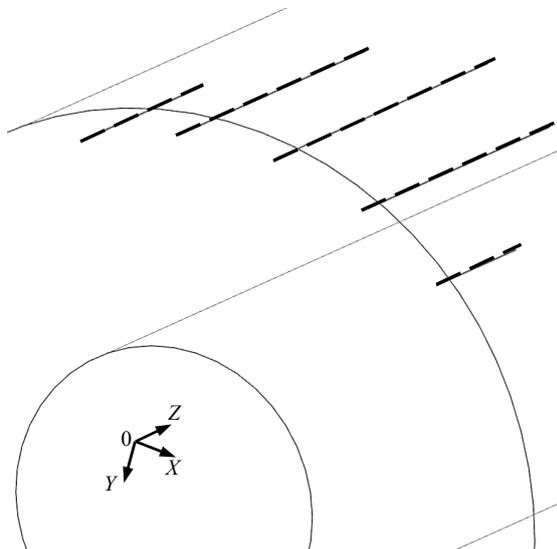


Рис. 10. Траектории армирования трубы
Fig. 10. Pipe reinforcement paths

В рассматриваемом случае траектории имеют линейный характер. На рис. 10 показаны траектории армирования, созданные в модели трубы; следующий шаг – укладка арматуры.

Укладка арматуры. Перед тем как вставить стержни в связующее, необходимо подготовить для них место. По найденным траекториям создаются цилиндрические отверстия внутри детали. Длина каждого соответствует длине траектории. В центре будет находиться самый длинный стержень – 31.5789 мм, по сторонам от него разместятся 2 стержня длиной 27.6316 мм и затем аналогично – еще 2 стержня длиной 11.8421 мм.

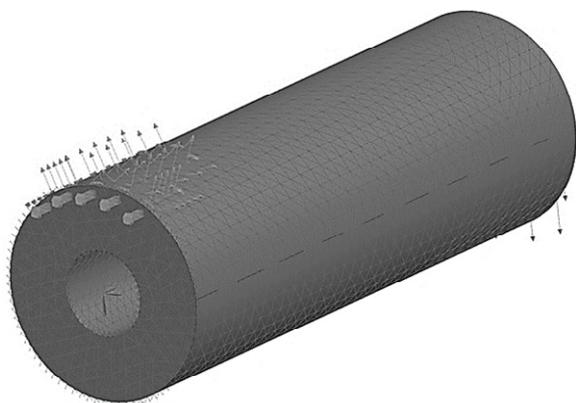


Рис. 11. Модель симуляции
Fig. 11. Simulation model

На рис. 11 показана новая модель симуляции – связующее с вклеенными стержнями арматуры. Далее необходимо оценить работу внедренных стержней, для этого повторяются условия моделирования (нагрузка силы на один торец, а другой – жестко закреплен).

Выполнив сборку и повторив процедуру симуляции нагрузки, необходимо сравнить полученные результаты с начальными.

Сравнение результатов после армирования. Выполнив симуляцию, получаем результаты деформации для связующего (рис. 12).

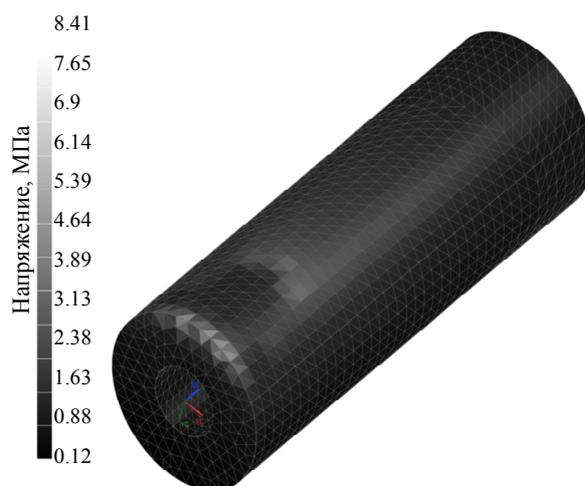


Рис. 12. Напряжение связующего
Fig. 12. Binder tension

Как видно из результата моделирования, напряжение связующего в местах установки стержней снизилось (было 1.62...1.81 – стало 0.48...0.88 МПа). Внедрение стержней снизило напряжение, однако там, где стержни заканчиваются, напряжение возрастает. Что касается элементов, которыми заканчиваются стержни, то относительно них можно сделать следующее: пересмотреть критерий отбора элементов (установить фильтр не 75, а 70 или 60 %). Если посмотреть на рис. 2, можно увидеть элементы, у которых значение напряжения от 0.589 до 0.66 МПа, что составляет 67 % от максимального, т. е. эти элементы не попадают в фильтр. В таком случае возникает вопрос оптимальности выбора фильтра.

Как видно из рис. 12, арматура взяла на себя часть нагрузки. За счет этого снизилась нагрузка на связующее и уменьшилось не только напряжение, но и смещение материала. Для сравнения на рис. 13 представлены результаты смещения связующего.

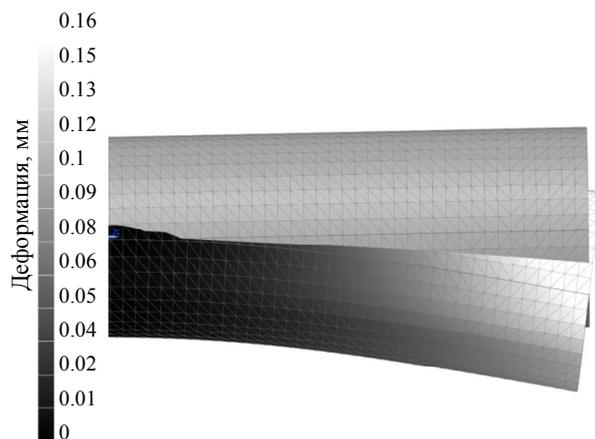


Рис. 13. Деформация детали
Fig. 13. Part deformation

Сравнивая рис. 4 и 13, можно заметить, что в первом случае максимальное смещение составляет 0.2 мм, а при внедрении арматуры – 0.16 мм.

Выводы. Внедрение пяти стальных стержней уменьшило напряжение и смещение материала

связующего. Также можно заметить, что уменьшилась стрела прогиба связующего. В рамках поставленной задачи схема армирования показана на рис. 10, однако есть ряд пунктов, которые можно оптимизировать:

– уменьшить толщину стержней и увеличить их количество;

– автоматизировать поиск траекторий армирования путем разработки алгоритма поиска и составления соответствующей программы в виде машинного кода.

Схема армирования может быть доработана, если в условии задачи стоят критерии минимальной или максимальной массы конструкции. В дальнейшем планируется создание приложения для эффективного поиска схемы армирования, что позволит применять концепцию к сложным конструкциям с заданными свойствами.

Список литературы

1. Феодосьев В. И. Сопrotивление материалов / МГТУ им. Н. Э. Баумана. М., 1999. 592 с.
2. Поляков В. А. Армирование простого симметричного тела при заданной нагрузке // Сб. тр. Молодеж. шк.-семинара по проблемам управления в технических системах. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. URL: https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2020/sbornik_2020.pdf (дата обращения 06.04.2022).
3. Шимкович Д. Г. Расчет конструкций в NX // Nastran for windows. М.: ДМК, 2003. 448 с.
4. Основы теории напряженного состояния. Лекция № 5. URL: http://sopromat.vstu.ru/metod/lek/lek_05.pdf (дата обращения 06.04.2022).
5. Центр документации. Справка по Siemens NX 1899. URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/support/docs.html> (дата обращения 06.04.2022).

Информация об авторе

Поляков Владимир Александрович – аспирант гр. 9943, ассистент каф. робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: vapoliakov@etu.ru

References

1. Feodos'ev V. I. Soprotivlenie materialov / MG TU im. N. E. Bauman a. M., 1999. 592 s.
2. Polyakov V. A. Armirovanie prostogo simmetrichnogo tela pri zadanno j nagruzke // Sb. tr. Molodezh. shk.-seminara po problemam upravleniya v tekhnicheskikh sistemah. SPb.: SPbGETU «LETI», 2020. URL: https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2020/sbornik_2020.pdf (accessed: 06.04.2022). (In Russ.).
3. SHimkovich D. G. Raschet konstrukcij v NX // Nastran for windows. M.: DMK, 2003. 448 s. (In Russ.).
4. Osnovy teorii napryazhennogo sostoyaniya. Lekciya № 5. URL: http://sopromat.vstu.ru/metod/lek/lek_05.pdf (accessed: 06.04.2022). (In Russ.).
5. Centr dokumentacii. Spravka po Siemens NX 1899. URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/support/docs.html> (accessed: 06.04.2022). (In Russ.).

Information about the author

Vladimir Al. Polyakov – the post-graduate student, Assistant of the Department of Robotics and Automation of Production Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: vapoliakov@etu.ru

Статья поступила в редакцию 01.05.2022; принята к публикации после рецензирования 13.05.2022; опубликована онлайн 30.06.2022.

Submitted 01.05.2022; accepted 13.05.2022; published online 30.06.2022.