

УДК 624.04

ОПТИМИЗАЦИЯ МАССЫ ФИБРЫ ФИБРОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Шеин Александр Иванович,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г.
Пенза,*

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика».

Азимова Яна Александровна,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г.
Пенза,*

аспирант, ассистент кафедры «Механика».

Аннотация

Использование быстротвердеющей бетонной смеси, армированной микрофиброй резко повышают возможности 3-D печати зданий и сооружений. В этом случае очень важное значение приобретает математически правильное, оптимальное распределение составляющих композита по несущим и ограждающим конструкциям. Фибру целесообразно укладывать в определенных расчетных участках стен и перекрытий с учетом определенной унификации. При этом общий расход фибры необходимо оптимизировать. Задача оптимизации количества арматурной фибры композита записана в виде задачи поиска минимальных совокупных долей фибры в армированных объемах композита. Решение задачи разбито на два этапа: 1) на основе предварительного расчета однородной конструкции (здания, сооружения) по изополям напряжений устанавливаются конечные элементы композита, требующие армирования; 2) при помощи математического пакета Maple выполняется решение задачи оптимизации количества фибры. Задача оптимизации может, также, решаться приближенно путем сравнения вариантов.

Ключевые слова: оптимизация, арматура, фибробетонные конструкции, метод конечных элементов, математический пакет, 3-D печать, вариантная оптимизация.

OPTIMIZATION OF THE MASS OF FIBERS FIBER-REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Shein Alexander Ivanovich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Doctor of Sciences, Professor, Head of the department "Mechanics".

Asimova Yana Aleksandrovna,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Post-graduate student, Assistant of the department "Mechanics".

Abstract

The use of a fast-hardening concrete mix reinforced with microfiber dramatically increases the possibility of 3-D printing of buildings and structures. In this case, the mathematically correct and optimal distribution of the composite components over the supporting and enclosing structures becomes very important. It is advisable to lay the fiber in the sections of walls and floors determined by the calculation, taking into account a certain unification. In this case, the total fiber consumption must be optimized. The problem of optimizing the amount of reinforcement fiber of the composite is written as a problem of finding the minimum aggregate shares of fiber in the reinforced volumes of the composite. The solution of the problem is divided into two stages: 1) based on the preliminary calculation of a homogeneous structure (building, structure), the final elements of the composite that require reinforcement are set using the stress isofields; 2) the mathematical package Maple is used to solve the problem of optimizing the amount of fiber. The optimization problem can also be solved approximately by comparing the options.

Keywords: optimization, reinforcement, fiber concrete structures, finite element method, mathematical package, 3-D printing, variant optimization.

Введение. Технология печати зданий и сооружений на 3D-принтерах постепенно проникает в строительную отрасль. Ее распространение зависит от нескольких факторов: математически правильное, оптимальное распределение составляющих композита по несущим и ограждающим конструкциям; наличие робота-манипулятора, оснащенного несколькими типами форсунок для подачи материала матриц и фибры; наличие быстротвердеющих смесей материалов матриц.

Направления развития строительной 3D-печати, одного из самых быстроразвивающихся направлений в области аддитивных технологий, приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Направления развития строительной 3D-печати

Технология	Contour Crafting	D-Shape	StroyBot	Спецавиа	Apis Cor	ProTo R 3Dp и RC 3Dp, CyBe	WinSun
Вид работа	Экструдер установлен на подвижной портальной конструкции	Массив из 300 сопел, закрепленный на подвижной платформе	3D-принтер под названием «СтройБот»	3D-принтера S-6044 Long3D портальной схемы	Телескопический манипулятор на поворотной платформе	3D-принтер-манипулятор	3D-принтер WinSun – в виде портальной конструкции с габаритами 36x12x6 м
Типы смесей	Бетонная смесь	Нанесение связующего агента на слои песка, метод селективного спекания	геополимерный бетон из вулканического пепла	После сборки силовые элементы стен заливают бетоном производства Екатеринбургского цементного завода	фибробетон или геополимер	Быстротвердеющий бетонный раствор CyBe MORTAR	строительные смеси с наполнителями из переработанных отходов, вероятнее всего стеклопластика
Арматура	стержневая	-	-	Несъемная опалубка армируется во время печати			стеклопластик

Опыт строительства традиционным способом свидетельствует, что наиболее востребованным материалом несущих и ограждающих конструкций является композит, железобетон. В последнее время быстрое распространение получил фибробетон [1-5].

Из приведенной таблицы 3-D строительства видно, что вопрос с армированием основного материала (т.н. матрицы) чаще всего решается достаточно просто: по мере печати слоев укладывается горизонтальная арматура.

Возможности 3-D печати резко повышаются при использовании в качестве строительного материала быстротвердеющей бетонной смеси, армированной микрофиброй. В этом случае композит представляет собой гетерогенную систему, в которой равномерно распределены частицы стеклянной, полипропиленовой, углеволоконной, базальтовой или стальной фибры.

Фибру целесообразно укладывать в определенных расчетом участках стен и перекрытий. При этом в различных участках процент армирования композита может быть разным, определяемым расчетом. С учетом унификации целесообразно иметь не более 3-4 различных типов армирования на данном уровне здания. При этом общий расход фибры необходимо оптимизировать. Задачи оптимизации стержневой арматуры и конструкций в целом рассматривались в работах [6-17]. В данной работе предлагается математическая модель оптимизации фибры фибробетона.

Постановка задачи. Если рассматривать балку или балку стенку в условиях плоского напряженного состояния, то элементы матриц жесткости конечных элементов композита можно представить в виде:

$$k_{ij} = \frac{G\delta}{4F} \left\{ \left[\frac{1+\nu}{1-\nu} + (-1)^{i+k} \right] c_i c_k + s_i s_k \right\}, \quad (1)$$

где G_{np} – приведенный модуль сдвига композита, ($G_{np} = E_{np}/[2(1+\nu)]$), ν - коэффициент Пуассона, δ - толщина балки.

Модуль упругости плоского конечного элемента композита можно определить по модели Рейсса для моноармированных фибробетонов по формуле

$$E^{np} = (E_1 E_2) / (\mu_1 E_2 + \mu_2 E_1), \quad (2)$$

где: E_1, E_2 – модули упругости бетона и фибры соответственно; μ_1, μ_2 – объемная доля бетона и фибры в данном типе конечного элемента композита, соответственно.

Для полиармированных (двумя видами волокон) фибробетонов модуль упругости КЭ можно вычислить по формуле:

$$E^{np} = (E_1 E_2 E_3) / (\mu_1 E_2 E_3 + \mu_2 E_1 E_3 + \mu_3 E_1 E_2). \quad (3)$$

Здесь μ_1, μ_2, μ_3 – объемная доля бетона, первой и второй фибры в композите, соответственно.

По модели Фойхта для фибробетонов, армированных одним видом волокна (моноармированных) КЭ:

$$E^{np} = \mu_1 E_1 + \mu_2 E_2, \quad (4)$$

а для полиармированных фибробетонов модуль упругости КЭ определяется с помощью соотношения

$$E^{np} = \mu_1 E_1 + \mu_2 E_2 + \mu_3 E_3. \quad (5)$$

Задачу оптимизации количества арматурной фибры композита можно записать в виде задачи поиска минимальных объемных совокупных долей фибры в армированных объемах композита:

Основная группа уравнений-ограничений задачи оптимизации – уравнения равновесия МКЭ

$$K(\mu_{si})U = P, \quad (1)$$

где μ_{si} и U свободные переменные.

Введем ограничения на трещинообразование в композите. Определение точек зарождения трещин и траектории их развития можно установить путем решения задачи по определению деформированного состояния композита в условиях плоского напряженного состояния. Зарождение трещины будет

происходить в той точке припорной зоны балки (стены), где деформации достигнут одного из предельных значений

$$\varepsilon_{\max}^+ = [\varepsilon^+], \quad (2)$$

$$\varepsilon_{\min}^- = [\varepsilon^-]. \quad (3)$$

где ε_{\max}^+ , ε_{\min}^- – главные деформации растяжения и сжатия в точке, $[\varepsilon^+]$, $[\varepsilon^-]$ – деформация, соответствующая разрыву и дроблению волокон бетона.

Как известно, главные деформации в плоской задаче находят из уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{\max}^+ &= \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}, \\ \varepsilon_{\min}^- &= \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) - \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Определение ε_x , ε_y и γ_{xy} можно выполнить методом конечных элементов.

Группу ограничений по трещинообразованию запишем в виде:

$$\varepsilon_t^+(U) \leq [\varepsilon^+], \quad (5)$$

$$\varepsilon_t^-(U) \geq [\varepsilon^-]. \quad (6)$$

Таким образом, задача оптимизации фиброармирования композита примет вид:

$$\begin{aligned} \min \sum \mu_{si} V_i \\ \text{при} \quad K(\mu_{si})U = P, \\ [\varepsilon^-] \leq \varepsilon_t(U) \leq [\varepsilon^+], \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь, μ_{si} – искомые доли армирования групп конечных элементов i , V_i – объемы этих групп конечных элементов; $K(\mu_{si})$ – матрица жесткости фибробетона, зависящая от искомым параметров армирования; U – неизвестный вектор узловых перемещений композита.

Армированные конечные элементы композита можно наметить, выполнив предварительный расчет однородной конструкции (здания,

сооружения) и построив траектории главных напряжений (деформаций) (см. рис.1) или их изополя.

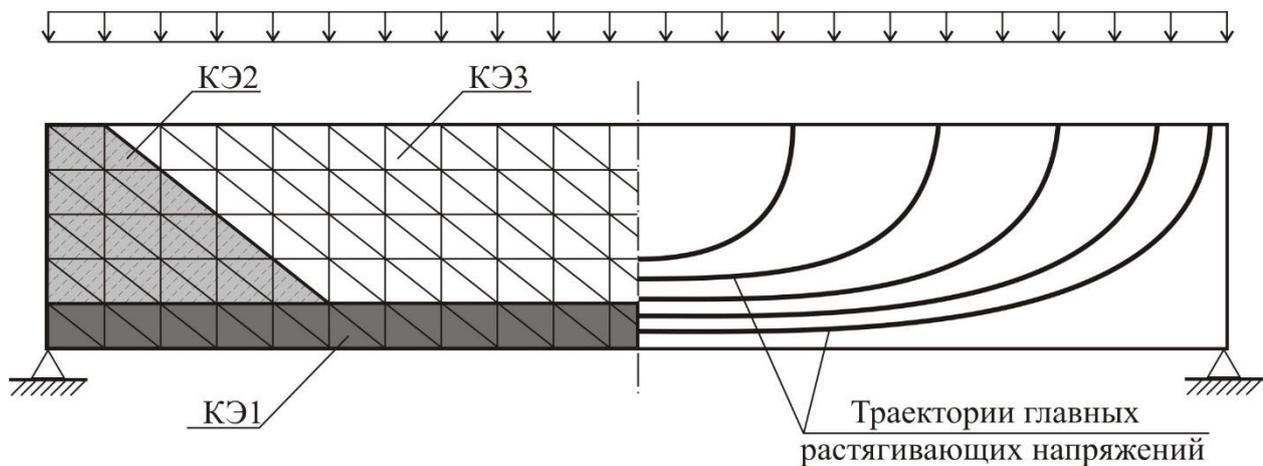


Рисунок 1 - Траектории главных напряжений (справа от оси симметрии); армированные конечные элементы композита (КЭ1 и КЭ2) и конечные элементы бетона КЭ3 (слева от оси симметрии)

Решение задачи оптимизации удобно выполнить при помощи математического пакета Maple. Пакет оптимизации в Maple представляет собой набор команд для численного решения оптимизационных задач, которые включают в себя поиск минимума или максимума целевой функции, подверженной ограничениям. Пакет использует встроенные библиотечные подпрограммы, предоставленных группой численных алгоритмов (NAG) и, в частности, решает задачи нелинейного программирования (NLP). В общем случае предполагается, что переменные непрерывны, а локальные решения вычисляются и для задач, которые не являются выпуклыми. Команда `NLPSolve` предоставляет глобальный алгоритм поиска для задач с ограничениями. Уравнения равновесия задачи оптимизации МКЭ нелинейны, т.к. содержат две группы взаимно перемножаемых переменных - объемные доли фибры в КЭ композита μ_{si} и перемещения узлов конечно элементной сетки U_j .

Упрощенный вариантный оптимизационный расчет можно провести путем сопоставления максимальных деформаций конструкции при нескольких

вариантах армирования с заданным объемом фибры. Конструкция, имеющая меньшие деформации в этом случае будет предпочтительнее.

Библиографический список:

1. Matteo Bruggi, Gabriele Milani, Alberto Taliercio/ Design of the optimal fiber-reinforcement for masonry structures via topology optimization // International Journal of Solids and Structures, Volume 50, Issue 3, 15 June 2013, Pages 2087-2106
2. Gieljan Vantighem, Wouter De Corte, Emad Shakour, Oded Amir. 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization // Automation in Construction, Volume 112, April 2020, Article 103084
3. Zaher Mundher Yaseen, Minh Tung Tran, Sungwon Kim, Taha Bakhshpoori, Ravinesh C. Deo. Shear strength prediction of steel fiber reinforced concrete beam using hybrid intelligence models: A new approach // Engineering Structures, Volume 177, 15 December 2018, Pages 244-255
4. Gieljan Vantighem, Wouter De Corte, Emad Shakour, Oded Amir 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization // Automation in Construction, Volume 112, Article 103084
5. Пантелеев Д. А. Полиармированные фибробетоны с использованием аморфнометаллической фибры. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук., Санкт-Петербург, 2016, 155 стр.
6. Шеин А.И., Азимова Я.А. Оптимизация арматуры железобетонных конструкций в условиях плоского напряженного состояния // Моделирование и механика конструкций. 2019. № 9. С. 5.
7. Шеин А.И., Земцова О.Г., Бучин Ю.Д. Метод ограниченных деформаций при расчете приопорных участков железобетонных балок и диафрагм жесткости [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2017. №5. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no5/stroitel'naya-mehanika/5.2/at_download/file

8. Шеин А.И. Оптимизация несущих конструкций каркасных зданий. // Промышленное и гражданское строительство. 2002. №12.

9. Шеин А.И., Шмелев Д.А. Оптимизация размеров двутавровой балки из условия жесткости и ограничения касательных напряжений // Сб. докладов. Часть II., Студенческая наука- интеллектуальный потенциал XXI века. Пенза: ПГУАС, 2008.

10 Шеин А.И., Земцова О.Г. Оптимизация многомассовых гасителей колебаний при гармоническом воздействии // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2010. №1(13).

11. Шеин А.И. Замкнутое решение задачи оптимизации многоэтажных рамных систем из условия устойчивости // Транспортные сооружения. 2018. №2. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://t-s.today/PDF/06SATS218.pdf> (доступ свободный).

12. Шеин А.И. Исследование пограничной гиперповерхности области устойчивости в осях жесткостей // Транспортные сооружения. 2018. №2. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://t-s.today/PDF/09SATS218.pdf> (доступ свободный).

13. Шеин А.И. Оптимальные размеры прямоугольного сечения бруса при косом изгибе // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2016. Том 8. №2. С. 134.

14. Шеин А.И., Земцова О.Г. Оптимизация строительных конструкций. Основы теории и примеры расчета. Учебное пособие. Пенза: ПГУАС, 2014. 123 с.

15. Шеин А.И., Земцова О.Г., Азимова Я.А. Расчёт и оптимизация арматуры композитных систем методом конечных элементов [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2017. №6. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/nob/stroitelnaia-mehanika/6.2/at_download/file

16. Шеин А.И. Метод ограниченных деформаций при решении проектной задачи для железобетонных конструкций // Наукоеведение. 2017. №2. Том 9.

Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL:
<http://naukovedenie.ru/PDF/08TVN217.pdf> (доступ свободный).

17. Shein A., Zemtsova O. Method of limited deformations for the calculation of parameters of reinforced concrete structures sections // Ponte. Apr. 2017. Volume 73.Issue 4.