

УДК 691.328.4:620.179.14

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИК ИДЕНТИФИКАЦИИ СТРУКТУРЫ ФИБРОБЕТОНА

Матус Е.П.

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)», Новосибирск, e-mail: matus_evg@mail.ru

Показано, что для определения распределения дисперсной стальной арматуры в бетоне целесообразно использовать его электромагнитные свойства: компоненты тензора магнитной проницаемости материала и его электрическую проводимость. В первом приближении магнитная проницаемость линейно зависит от коэффициента ориентации армирующих волокон и коэффициента армирования. Эффективным способом диагностики является измерение компонентов матрицы индуктивности связанных электромагнитных контуров, расположенных на поверхности исследуемого образца бетона. Оптимальная частота применяемого тока в контурах зависит от диаметра дисперсной арматуры и электрической схемы установки. Наибольшей помехоустойчивостью отличается электрическая схема, построенная по принципу дифференциального трансформатора, сравнивающего сигналы от измеряющих и эталонных обмоток. Для каждого типа арматуры должна проводиться калибровка на стандартных образцах. Сравняются экспериментальные и расчетные зависимости значений индуктивности контуров, содержащих образцы сталефибробетона от коэффициентов армирования и ориентации фибр. С помощью метода конечных элементов проведен теоретический расчет компонентов индуктивности контуров вблизи образцов магнитного материала. Подобрано геометрическое расположение контуров, позволяющих диагностировать расположение фибры на глубине до 60 мм. Результаты исследования подтверждают эффективность предложенной методики для применения.

Ключевые слова: сталефибробетон, магнитное поле, неразрушающий контроль

MODELING AND SUBSTANTIATION OF IDENTIFICATION METHODS OF FIBER REINFORCED CONCRETE STRUCTURE

Matus E.P.

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, e-mail: matus_evg@mail.ru

It is shown that to determine the distribution of disperse steel reinforcement in concrete it is expedient to use its electromagnetic properties: the components of the tensor of the magnetic permeability of the material and its electrical conductivity. In the first approximation, these characteristics linearly depend on the reinforcement factor and the orientation coefficient of the reinforcing fibers. An effective method of diagnostics is to measure the components of the inductance matrix of coupled electromagnetic circuits located on the surface of the concrete sample being examined. The optimum frequency of the applied current in the circuits depends on the diameter of the armature and the electrical circuit of the installation. The biggest noise immunity is the electrical circuit, built on the principle of a differential transformer, which compares signals from measuring and reference windings. For each type of valve, calibration should be performed on standard samples. Experimental dependences of the inductance of various circuits with steel fiber reinforced concrete samples on the coefficients of reinforcement and orientation of the fibers, as well as on the thickness of the sample, are obtained. With the help of the finite element method, a theoretical calculation of the inductance components of the circuit near the magnetic material was carried out. The shape of the contour is chosen, which allows diagnosing the location of the fiber on the depth up to 60 mm. The results of the study confirm the effectiveness of the proposed method for use.

Keywords: steel fiber reinforced concrete, magnetic field, nondestructive control

Одной из основных задач в производстве дисперсно-армированных бетонов, в том числе и сталефибробетона, является обеспечение равномерности распределения дисперсной арматуры (фибр) в объеме изделия [1, с. 64]. Для неразрушающего контроля равномерности распределения волокон необходима разработка специальных методик и приборов.

Имеются несколько общих способов контроля, основанных на различных физических принципах [2–4]. Во-первых, это просвечивание рентгеновскими лучами, во-вторых, применение ультразвука и, в-третьих, применение электромагнитного поля низкой частоты. Первый способ тре-

бует дорогостоящей аппаратуры, повышенных мер безопасности, наличия возможности расположения излучателя и датчиков с обеих сторон конструкции, не применим в бетоне с высоким значением коэффициента армирования. Использование второго способа затруднительно ввиду большого влияния шероховатости поверхности бетона на распространение ультразвука от излучателя к приемникам и сложностей интерпретации сигналов, прошедших через дисперсную арматуру.

Последний способ наиболее удобен для зондирования сталефибробетона, так как стальные фибры обладают большими значениями магнитной проницаемости и про-

водимости по сравнению с неармированной бетонной матрицей. В работе [5] приведены данные тестирования указанной методики с использованием специальной схемы, моделирующей образец сталефибробетона, установлены зависимости ее электромагнитных характеристик от коэффициента армирования и коэффициента ориентации фибр. Рамки применимости этих результатов ограничены требованием чрезмерной компактности исследуемых экспериментальных образцов.

В работе [6] предложен метод контроля распределения фибр в фибробетоне с применением идеи дифференциального трансформатора, опробованный в условиях опытного производства тонкостенной сталефибробетонной опалубки для ограждающих конструкций помещений электростанций. Разработанный прибор обеспечил уверенную идентификацию параметров фиброзаполнения на глубине до 20 мм в изделии.

Теоретический анализ распределения магнитного поля в материале для данного прибора проведен в [7]. Расчеты подтвердили, что такая схема расположения контуров не позволяет диагностировать распределение фибры на глубине более 20 мм. В настоящей статье автор приводит результаты исследования повышения возможностей диагностики распределения стальных волокон на глубине до 60 мм путем решения задачи управления геометрией расположения электромагнитных контуров измерительной установки.

Изложение и реализация методики

Сталефибробетон считаем средой с однородными магнитными свойствами, усредненными по объему, с характерными линейными размерами, равными (не менее) удвоенному значению длины фибр. В случае расположения фибробетона внутри бесконечно длинного соленоида известно аналитическое выражение для индуктивности элемента этого соленоида [8, с. 24]:

$$L = \mu_{fb} \cdot \mu_0 \cdot n^2 \cdot V, \quad (1)$$

где μ_{fb} – усредненная величина магнитной проницаемости фибробетона вдоль оси соленоида, μ_0 – магнитная постоянная, n – количество витков на единице длины, V – объем элемента соленоида. В первом приближении можно считать, что магнитная проницаемость фибробетона имеет вид

$$\mu_{fb} = 1 + k \cdot \mu_f \cdot f \cdot c, \quad (2)$$

где k – коэффициент ориентации волокон вдоль оси соленоида, μ_f – магнитная проницаемость материала фибр, f – коэффициент

армирования (доля объема фибр в бетоне), c – численный коэффициент, учитывающий проводимость фибр, их форму и размер.

При диагностике распределения стальных фибр частота тока должна подбираться таким образом, чтобы уменьшить влияние проводимости фибр на измеряемые параметры контуров. Действительно, эксперименты показали [6], что вплоть до частоты 100 кГц на индуктивность контуров влияет в основном магнитная проницаемость волокон. Поэтому для моделирования трехмерного распределения магнитного поля в сталефибробетоне был применен расчетный блок магнитостатических задач в программном комплексе ANSYS.

Катушка длиной 100 мм квадратного сечения со стороной (внутренняя часть) 50 мм с $N = 100$ витков немагнитной проволоки диаметром 1 мм с постоянным током силой $I = 10$ А, заполнялась различными комбинациями элементов кубической формы с фибрами (16 элементов с ребром 25 мм). Магнитная проницаемость воздуха 1. Границы области расчета в 500 мм от центра катушки (сфера), граничные условия: тангенциальность магнитного поля. Элементы кубической формы были двух типов. В первом симметрично параллельно расположены 4 стержня квадратного сечения 1 мм^2 длиной 20 мм с постоянным изотропным значением магнитной проницаемости $\mu_{fx} = \mu_{fy} = \mu_{fz} = 100$ (материал элементов немагнитный, $\mu = 1$). Во втором – 9 таких же стержней.

Производился расчет значений магнитной индукции внутри и снаружи катушки, а также значение индуктивности катушки при различных ориентациях фибр. С целью сопоставления были проведены измерения индуктивности катушки с фибробетонными образцами из мелкозернистого бетона размером $40 \times 40 \times 160$ мм. Использовались фибры из гладкой низкоуглеродистой стальной проволоки общего назначения длиной 20 мм диаметром 0,35 мм при коэффициенте армирования 0,7, 1,3 и 2,0%. Фибры подвергались ориентации на стадии формования с помощью магнитного поля, создаваемого этой же катушкой. Коэффициент ориентации подсчитывался после разреза образцов, как отношение среднего количества фибр в сечениях к расчетному значению фибр, находящихся на расстоянии не более половины длины фибры от сечения.

Далее было произведено изменение геометрии расположения тонких катушек, применяемых для диагностики распределения фибр в реальных изделиях, так, чтобы их магнитное поле охватывало более глубокие слои. С этой целью они были разнесены в пространстве, как показано на рис. 1.

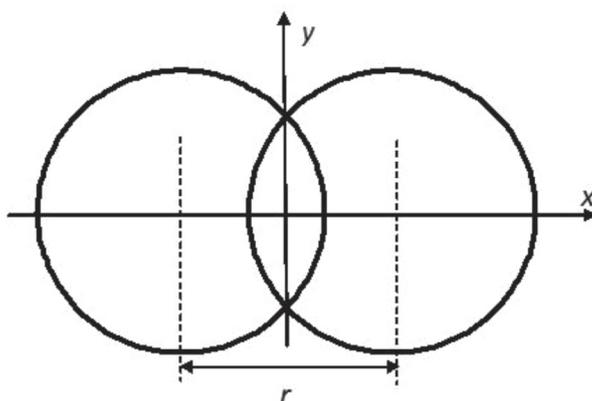


Рис. 1. Расположение катушек для диагностики фибробетона

Катушки располагались горизонтально вплотную друг на друге на поверхности образца толщиной h от 20 до 60 мм (простирающегося до границ расчетной области) с постоянным изотропным значением магнитной проницаемости μ_b от 1 до 10. В каждой катушке $N = 100$ витков немагнитной проволоки диаметром 0,3 мм, радиус катушек $R = 50$ мм. Сила тока $I = 0,1$ А. Токи идут по часовой стрелке. Границы области расчета в 1000 мм от начала координат (сфера), граничные условия: вектор индукции касателен к границе. Сходимость решения проверялась сравнением с теоретическими значениями индукции на оси одной тонкой катушки в отсутствии магнетика.

Был произведен расчет значений магнитной индукции во всей области, значений собственных индуктивностей катушек, их взаимной индуктивности и величины магнитного потока через область пересечения катушек.

Результаты исследования и их обсуждение

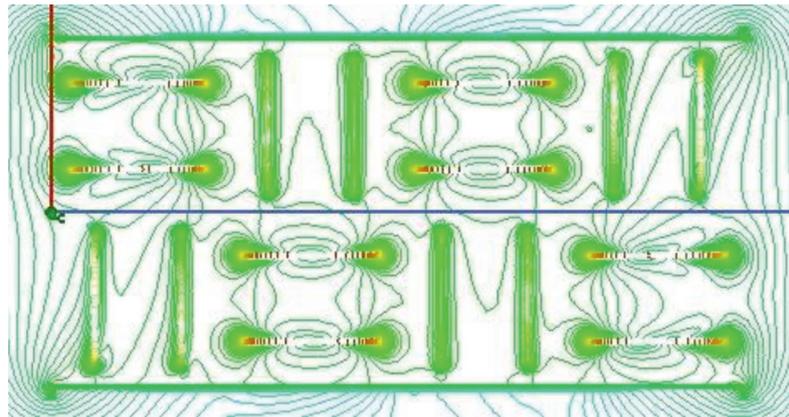
На рис. 2, а, показан пример результата расчета индукции магнитного поля в катушке квадратного сечения со стальными волокнами, расположенными вдоль и поперек продольной оси катушки (показано продольное сечение катушки, проходящее непосредственно через волокна). Данная конфигурация расположения волокон соответствует коэффициенту армирования 0,006 (0,6% по объему) и коэффициенту ориентации 0,5. Расчет показывает, что индукция магнитного поля значительно увеличивается вблизи поверхности и внутри волокон, имеющих ориентацию в направлении оси катушки. Графики, изображенные на рис. 2, б, подтверждают, что индуктивность катушки с высокой точностью прямо пропорциональна коэффициенту ориентации. Зависимость же индуктивности

(а соответственно, и усредненной по объему магнитной проницаемости фибробетона) от коэффициента армирования отклоняется от линейной зависимости на 15% (следует из сравнения отношений коэффициентов армирования и коэффициентов пропорциональности в аппроксимирующих зависимостях), т.е. наблюдается подобие эффекта насыщения.

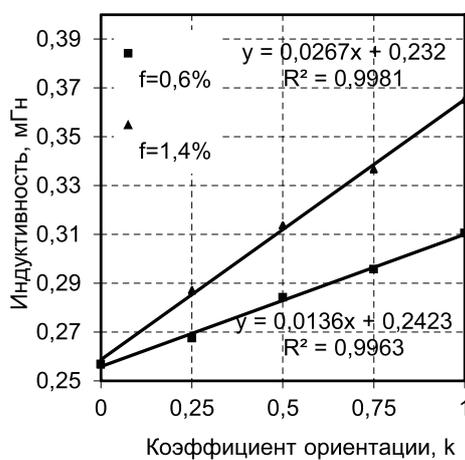
На рис. 2, в, показаны экспериментальные зависимости индуктивности катушки (круглого сечения диаметром 800 мм с 2000 витков проволоки) с образцами фибробетона. Данные зависимости с высокой точностью подтверждают расчетные и теоретические результаты.

На рис. 3, а показан пример расчета индукции магнитного поля, созданного двумя разнесенными контурами, расположенными на поверхности магнитного материала (показан разрез с материалом слева от контуров). Наблюдается изменение изолиний индукции в материале особенно вблизи токов. В области пересечения контуров магнитное поле проникает в материал на глубину с большими значениями индукции до половины толщины образца, далее происходит постепенное выравнивание изолиний. Расчет собственной индуктивности контуров и магнитного потока через область пересечения контуров показал их незначительную зависимость (изменение не более 3%) от толщины материала в диапазоне от 20 до 60 мм. Взаимная индуктивность, наоборот, показала значительное изменение с увеличением толщины материала (рис. 3, б).

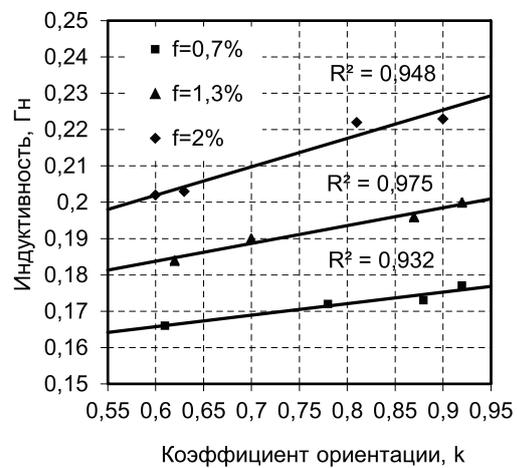
Кроме того, этот параметр сильно зависит от расстояния между катушками (в таблице приведены соответствующие расчетные значения при толщине образца 40 мм). Видно, что наибольшее изменение взаимной индуктивности достигается при расстоянии между центрами катушек (рис. 1) около 70 мм (70% диаметра катушки).



a)



б)



в)

Рис. 2. Катушка индуктивности со сталефибробетоном: а) пример картины изолиний индукции в образце сталефибробетона; б) расчетная индуктивность катушки с образцом сталефибробетона; в) экспериментальные значения индуктивности соленоида

Взаимная индуктивность при различном расположении контуров

Изменяемый параметр	Взаимная индуктивность, мГн					
Расстояние r , мм	40	50	60	70	80	90
Магнитная проницаемость $\mu_{fb} = 5$	0,793	0,535	0,309	0,106	-0,076	-0,231
Магнитная проницаемость $\mu_{fb} = 10$	0,871	0,59	0,343	0,121	-0,078	-0,248
Изменение индуктивности, %	9,8	10,2	11,0	14,2	2,6	7,4

Так как взаимная индуктивность при таком расстоянии между катушками принимает минимальные значения, то измерять ее приращение целесообразно по схеме дифференциального трансформатора (рис. 4). При этом идет сравнение сигналов от одинаковых пар катушек – одна пара удалена от магнитных материалов, а вторая находится на поверхности бетона.

Для определения коэффициента армирования фибробетона необходимо вначале откалибровать измерительную схему на специально подготовленных образцах. Следует отметить, что достоверные значения коэффициента армирования будут измерены только при равномерном распределении волокон по толщине изделия, в других случаях можно лишь диагностировать степень равномерности их распределения.

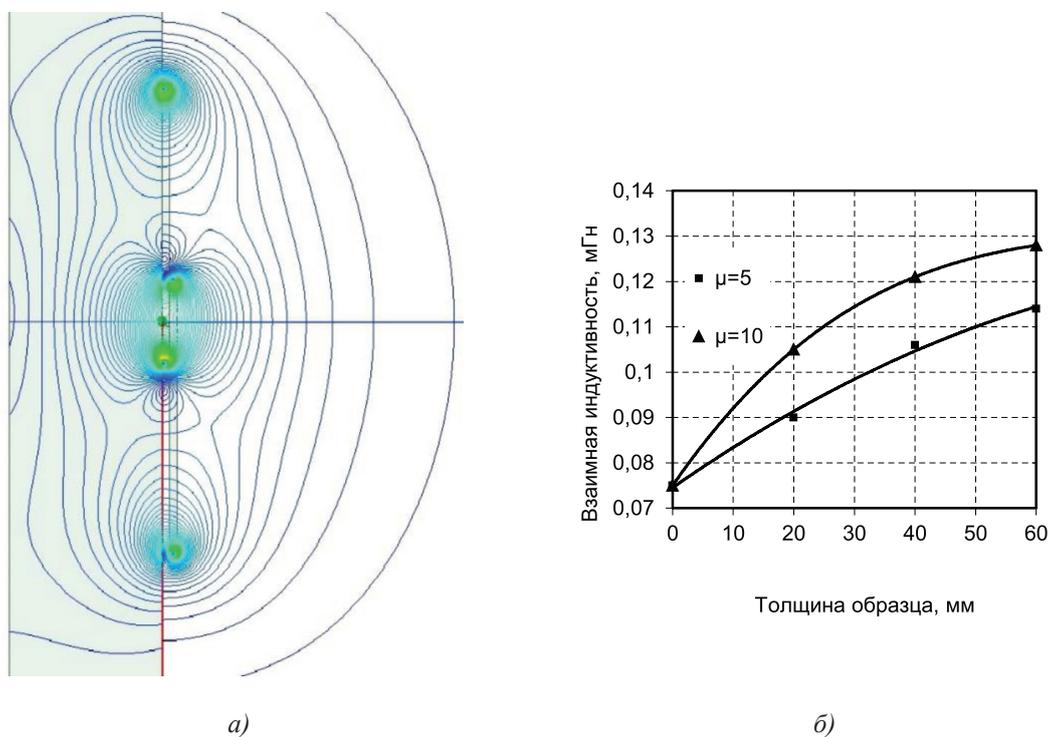


Рис. 3. Магнитное поле двух разнесенных контуров: а) картина изолиний индукции двух контуров ($h = 60$ мм, $r = 70$ мм, $\mu_r = 10$); б) взаимная индуктивность контуров

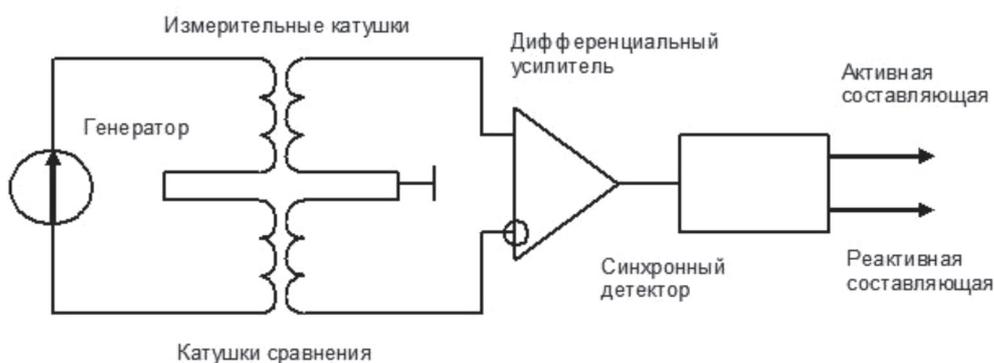


Рис. 4. Приближенная схема детектирования дисперсной арматуры

Заключение

Значение компонентов усредненной по объему магнитной проницаемости сталефибробетона с равномерным распределением фибры прямо пропорционально коэффициенту ориентации и приближенно пропорционально коэффициенту ар-

мирования материала. Это позволяет контролировать содержание фибр путем измерения взаимной индуктивности тонких катушек, расположенных на поверхности изделия.

Для диагностики распределения фибр на глубине до 60 мм рекомендовано разносить центры катушек на расстояние 70% от

их диаметра. Перед измерениями необходимо проведение калибровки на образцах с известным распределением фибр.

Список литературы

1. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технологии и конструкции / Ф.Н. Рабинович. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 560 с.
2. Schnell J., Ackermann F.P., Rösch R., Sych T. Statistical analysis of the fibre distribution in ultra high performance concrete using computer tomography // Proceedings of the second international symposium on UHPC, Kassel. – 2008. – P. 145–152.
3. Пухаренко Ю.В. Об оценке трещиностойкости сталефибробетона ультразвуковым методом / Ю.В. Пухаренко, В.Ю. Голубев, А.О. Хегай // Промышленное и гражданское строительство. – 2009. – № 9. – С. 50–51.
4. Roussel N., Laetitia M., Franc J. Fiber orientation during casting of UHPFRC: electrical resistivity measurements, image analysis and numerical simulations // Materials and Structures, 2015, No. 48, P. 947–957.
5. Cavalaro S.H.P., Lopez R., Torrents J.M., Aguado A. Improved assessment of fibre content and orientation with inductive method in SFRC // Materials and Structures, 2015, No. 48, P. 1859–1873.
6. Неразрушающий контроль распределения волокон фибры в тонкостенных сталефибробетонных конструкциях / Е.П. Матус [и др.] // Известия вузов. Строительство. – 2016. – № 1. – С. 98–104.
7. Матус Е.П. Магнитный контроль распределения фибр в сталефибробетонных конструкциях / Е.П. Матус, А.В. Морозов, А.А. Шевченко // Вестник СевКавГТИ. – 2017. – № 1. – С. 110–115.
8. Котенёв С.В. Расчет и оптимизация тороидальных трансформаторов / С.В. Котенёв, А.Н. Евсеев. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011. – 287 с.