

## МАГНИТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЗАЩИТНОГО СЛОЯ БЕТОНА И ДИАМЕТРА ПРУТКОВ АРМАТУРЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А. П. ГУСЕВ, Я. И. ШУКЕВИЧ, А. Л. ЛУКЬЯНОВ

Ин-т прикладной физики НАН Беларуси. 220072, г. Минск-72, ул. Академическая, 16. E-mail: lab1@iaph.bas-net.by

Предложен магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и диаметра прутков арматуры железобетонных строительных конструкций. Компьютерным моделированием получено распределение намагниченности в стальном прутке и экспериментально исследовано распределение напряженности магнитного поля рассеяния прутка при локальном намагничивании полем постоянного магнита в зависимости от диаметра прутка и от его расстояния до магнита. Показано, что преобладающий вклад в поле рассеяния прутка при малых размерах магнита вносит продольная составляющая его намагниченности, характеризующаяся соосными противоположно направленными диполями. Предложенный метод основан на измерении напряженности магнитного поля рассеяния прутка одновременно в двух точках над поверхностью контролируемого объекта в зоне намагничивания прутка и использовании градуировочной сетки, построенной по зависимостям поля рассеяния прутка от двух определяемых параметров. Показана методика построения градуировочной сетки измерительного прибора для контроля железобетонных строительных конструкций. Библиогр. 12, табл. 2, рис. 4.

*Ключевые слова:* магнитный метод контроля, защитный слой бетона, диаметр прутков арматуры

В основу работы существующего магнитного и электромагнитного методов неразрушающего контроля (НК) железобетонных строительных конструкций [1–3] положен принцип воздействия на контролируемый объект (КО) постоянным или переменным магнитным полем и измерения характеристик магнитного поля рассеяния прутков арматуры. Данный принцип использован в ряде известных разработок для контроля толщины защитного слоя бетона и диаметра прутков арматуры, например: Profometer PM-600 [4] и PM-630/650 [5]; Elcometer Protovale 331 [6]; Profoskope [7]; ИПА-МГ4 [8]; Rebar Locator TC100/TC110 [9] и др.

Применение по назначению существующих измерителей сопряжено с выполнением ряда условий, наиболее существенным из которых является необходимость использования проектной документации на КО для получения информации о диаметре прутков арматуры при необходимости контроля толщины защитного слоя бетона или о толщине защитного слоя бетона при необходимости измерения диаметра прутков арматуры [3]. Данные условия применения существующих измерителей являются следствием использования однопараметровых методов измерений характеристик магнитного потока, связанного с КО.

Более полным решением проблемы получения информации об интересующих параметрах строительных конструкций является разработка двухпараметрового метода, принцип действия которого может быть основан на измерении характеристик

распределения напряженности магнитного поля рассеяния прутков арматуры над поверхностью КО. Физическим обоснованием метода может служить различие зависимостей пространственного распределения магнитного поля прутков от их диаметра и от расположения в намагничивающем поле. С целью изучения возможности реализации двухпараметрового метода в настоящей работе выполнено исследование особенностей пространственного распределения напряженности магнитного поля рассеяния стальных прутков в связи с намагничиванием их неоднородным полем магнита в зависимости от диаметра прутков и от расстояния между прутком и магнитом.

**Модель и методика исследования.** Метод исследования – компьютерное моделирование и экспериментальное исследование характеристик магнитного поля. Особенностью исследуемой модели является использование локального однополюсного намагничивания прутка, так как двухполюсное намагничивание – это комбинация двух однополюсных. Исследуемая модель, представленная на рис. 1, содержит намагничивающую систему  $I$  из двух постоянных магнитов и цилиндрический ферромагнитный пруток 2. Магниты расположены симметрично относительно начала координат с небольшим зазором между ними, позволяющим выполнить измерения поля рассеяния вдоль осей  $ox$  и  $oz$ . Вектор намагниченности  $M_0$  магнитов направлен в одну сторону параллельно оси  $oz$ . Пруток диаметром  $d$  расположен в плоскости  $yoz$  параллельно оси  $oy$  на расстоянии от начала координат  $|z| = h$ .

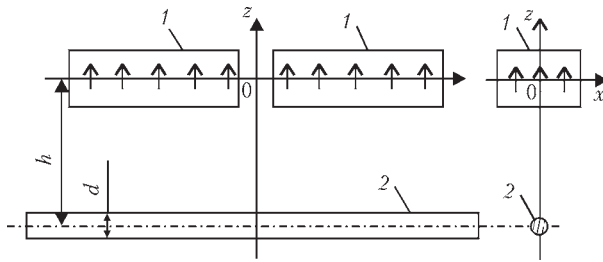


Рис. 1. Исследуемая модель: 1 – магниты; 2 – пруток

В общем случае характеристики магнитного поля рассеяния намагничиваемого тела определяются, как известно, параметрами намагничивающего поля, магнитными свойствами материала тела, его формой и расположением в намагничивающем поле.

Для решения задачи использован метод конечных элементов и программа COMSOL Multiphysics 5.1. Для вычисления распределения магнитного поля в прутке и окружающем пространстве под действием намагничивающего поля постоянных магнитов решалась система уравнений Максвелла:

$$\vec{H} = -\Delta V_m, \nabla(\mu_0 \mu \vec{H}) = 0, \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (1)$$

где  $\vec{H}$  – напряжённость магнитного поля;  $V_m$  – скалярный магнитный потенциал;  $\vec{B}$  – индукция магнитного поля;  $\mu$  – магнитная проницаемость материала прутка.

В качестве расчетной области пространства, внутри которой размещалась моделируемая система, был взят куб с длиной ребра в пять раз большей, чем длина намагничивающей системы, что обеспечивало достаточную точность моделирования полей. Граничным условием на внешних границах области принято условие  $\vec{n}\vec{B} = 0$ , где  $\vec{n}$  – вектор нормали к поверхности.

Принятое в расчетах значение намагниченности  $\vec{M}_0$  постоянных магнитов, входящей в соотношение  $\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}_0)$ , равно 950000 А/м, что является типичным для материала Nd-Fe-B. Задача нахождения  $h$  и  $d$  по распределению напряженности  $\vec{H}$  поля рассеяния прутка относится к классу обратных задач. Для ее решения использован метод градуировки, т. е. через решения ряда прямых задач. Пруток по исследуемой модели намагничивается локально неоднородным полем  $\vec{H}_0$  постоянных магнитов, образуя в окружающем пространстве вторичное магнитное поле, характеристики которого определяются параметрами намагничивающего поля, параметрами прутка и его расположением относительно намагничивающей системы. В общем виде это можно представить выражением:

$$\vec{H}_1 = f(\vec{H}_0, \mu, d, h, x, y, z), \quad (2)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость материала прутка;  $h$  – расстояние от начала координат до оси

прутка;  $d$  – диаметр прутка;  $x, y, z$  – координаты точки наблюдения.

Для упрощения решения задачи полагаем  $\mu = \text{const}$ .

Исследование характеристик магнитного поля рассеяния и особенностей намагничивания прутков неоднородным полем магнитов выполнено в зависимости от параметров  $h$  и  $d$ . Результаты расчетов представлены для близких к реальным значениям:  $h = 0,04; 0,06; 0,08$ , и  $0,1$  м;  $d = 0,005; 0,01; 0,015$  и  $0,02$  м.

**Результаты расчетов и их обсуждение.** На рис. 2 представлено распределение осевой  $H_{вн\ y}$  и радиальной  $H_{вн\ z}$  составляющих напряженности внутреннего магнитного поля на оси прутка для двух значений параметров  $h$  и  $d$  при длине (вдоль оси  $oy$ ) двух магнитов  $L = 0,16$  м.

Из рисунка видно, что величина составляющей  $H_{вн\ y}$  в случаях *a* и *б* существенно больше, чем составляющей  $H_{вн\ z}$ . Для приведенных диаметров прутков отношение максимальных значений осевой и радиальной составляющих находится в диапазоне 10...40, в связи с чем основные характеристики поля рассеяния прутка при указанном соотношении  $L$  и  $h$  определяются его продольным намагничиванием. Характерной особенностью продольного намагничивания, как видно из графиков, является более сильное  $H_{вн\ y}$  тонкого

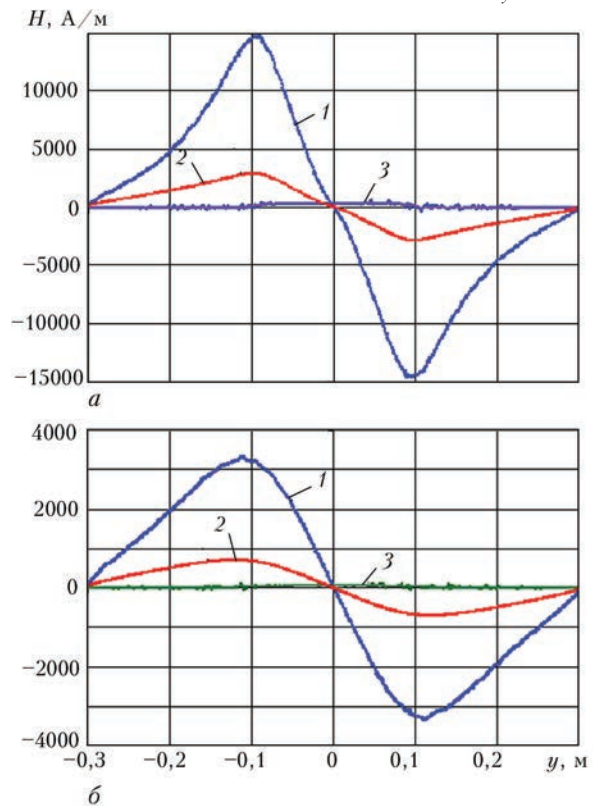


Рис. 2. Распределение продольной  $H_{вн\ y}$  и поперечной  $H_{вн\ z}$  составляющих напряженности внутреннего магнитного поля на оси прутка: *a* –  $h = 0,04$  м ( $1 - H_{вн\ y}$  ( $d = 0,005$  м);  $2 - H_{вн\ y}$  ( $d = 0,02$  м);  $3 - H_{вн\ z}$  ( $d = 0,005$  м;  $0,02$  м); *б* –  $h = 0,1$  м ( $1 - H_{вн\ y}$  ( $d = 0,005$  м);  $2 - H_{вн\ y}$  ( $d = 0,02$  м);  $3 - H_{вн\ z}$  ( $d = 0,005$  м;  $0,02$  м)

прутка в сравнении с толстым при одинаковом их расположении относительно магнитов. Это противоречит тому, что при одинаковом расположении прутков они находятся в одинаковом намагничивающем поле и должны иметь одинаковое внутреннее из-за непрерывности тангенциальной составляющей напряженности. Данное кажущееся противоречие снимается, если учесть наличие размагничивающего фактора, определяемого в данном случае соотношением диаметра прутка и длины его намагничиваемого участка. Для тонкого прутка отношение данных величин существенно меньше, чем для толстого, в связи с чем напряженность намагничивающего поля в толстом прутке снижается размагничивающим полем сильнее, чем в тонком. В пользу приведенного объяснения кажущегося противоречия свидетельствуют также расчетные данные по составляющей  $H_{вн z}$ . Так как размагничивающий фактор круглого прутка в поперечном направлении не зависит от его диаметра, то значение размагничивающего поля в толстом и тонком прутках должно быть одинаковым. Данное заключение подтверждено рис. 2, где распределение поперечной составляющей  $H_{вн z}$  напряженности внутреннего поля (кривые 3) для тонкого и толстого прутков практически совпадают.

Необходимо отметить, что использование понятия о размагничивающем факторе в приведенном варианте является весьма условным, так как строгая формулировка этого понятия относится к намагничиванию тела ограниченных размеров в однородном поле [10]. При намагничивании в неоднородном поле условия для возникновения намагниченности материала несколько иные в связи с тем, что замкнутые внутри тела магнитные потоки могут существенно влиять на распределение намагниченности в его объеме [11].

Составляющая  $H_{вн y}$  по обе стороны от точки  $y = 0$  (см. рис. 2) имеет различный знак, т. е. намагниченность прутка в этих областях характеризуется двумя соосными, направленными в противоположные стороны, магнитными диполями. Следовательно, магнитное поле рассеяния  $H_x$ , формируемое преимущественно этими диполями, будет иметь зеркальную (при используемом в исследуемой модели способе намагничивания) относительно плоскости  $xoz$  симметрию пространственного распределения напряженности.

Кроме изложенного, следует отметить различие зависимостей распределения  $H_{вн y}$  от параметров  $h$  и  $d$ . Расстояние  $\Delta y_3$  по оси абсцисс между экстремумами кривых на рис. 2, *a* больше, чем на рис. 2, *б*, т. е. с увеличением расстояния  $h$  между магнитом и прутком соосные диполи смещаются от центра в противоположные стороны. При этом величина изменения расстояния  $\Delta y_3$  не зависит от

диаметра прутка, в то время как значение  $|H_{вн y}|$  зависит от двух параметров  $h$  и  $d$ .

Так как характер поля рассеяния прутка определяется его намагниченностью, то полученные особенности зависимости  $H_{вн}$  от параметров  $h$  и  $d$  должны быть справедливы и для поля рассеяния.

С целью проверки результатов расчета выполнены экспериментальные исследования распределения напряженности магнитного поля рассеяния прутков арматуры в области пространства при  $z \geq 0$ . При этом расположение магнитов и прутков соответствует рис. 1. Измерения выполнены на автоматизированной установке с программным управлением. Значения диаметра прутков  $d$  в эксперименте изменялись в пределах 4...22 мм, расстояние  $h$  от оси прутка до центра магнитов – в диапазоне 20...60 мм. Значения напряженности поля рассеяния прутков определялись по разности результатов двух измерений: измерение поля магнитов в отсутствие прутка и измерение суммарного поля при наличии прутка.

**Результаты эксперимента и их обсуждение.** На рис. 3 представлено распределение по оси  $ox$  составляющей  $H_x(x, d, h)$  напряженности магнитного поля рассеяния прутков различного диаметра, располагавшихся на двух расстояниях  $h$  от намагничивающей системы: *a* – 29 мм, *б* и *в* – 40 мм. При этом в случаях *a* и *б* прутки находятся в поле двух магнитов, в случае *в* – в поле шести таких же магнитов, расположенных вдоль оси  $OY$ . Длина намагничивающей системы в этом случае больше в три раза по сравнению с вариантами *a* и *б*.

Как видно из рис. 3, графики функции  $H_x(x, d, h)$  по форме подобны: при  $x = 0$  во всех случаях  $H_x = 0$ , с удалением от точки  $x = 0$  значения  $|H_x|$  возрастают и проходят через экстремумы, далее уменьшаются. Подобие графиков определяется одинаковой формой намагничиваемого тела в представленных вариантах и одинаковой его ориентацией относительно намагничивающей системы. Кроме подобия графиков на рис. 3, видны и различия между ними, связанные с зависимостью  $H_x$  от параметров  $h$  и  $d$ . Расположение экстремальных точек  $x_3$  на оси абсцисс, в которых  $H_x$  имеет экстремум, в каждом варианте не зависит от значения  $d$  (в пределах погрешности эксперимента), но зависит от  $h$ , что видно при сравнении вариантов *a* и *б*, в которых расстояния  $h$  равны 29 и 40 мм соответственно. Это значит, что распределение напряженности поля рассеяния прутка определяется лишь его положением в поле магнитов, чем подтверждаются выводы на основе расчетных данных по внутреннему полю в прутке.

Аналогичное смещение экстремумов  $H_x$  от центра намагниченной области имеется не только при увеличении  $h$ , но и при увеличении длины  $L$  намагничивающей системы.

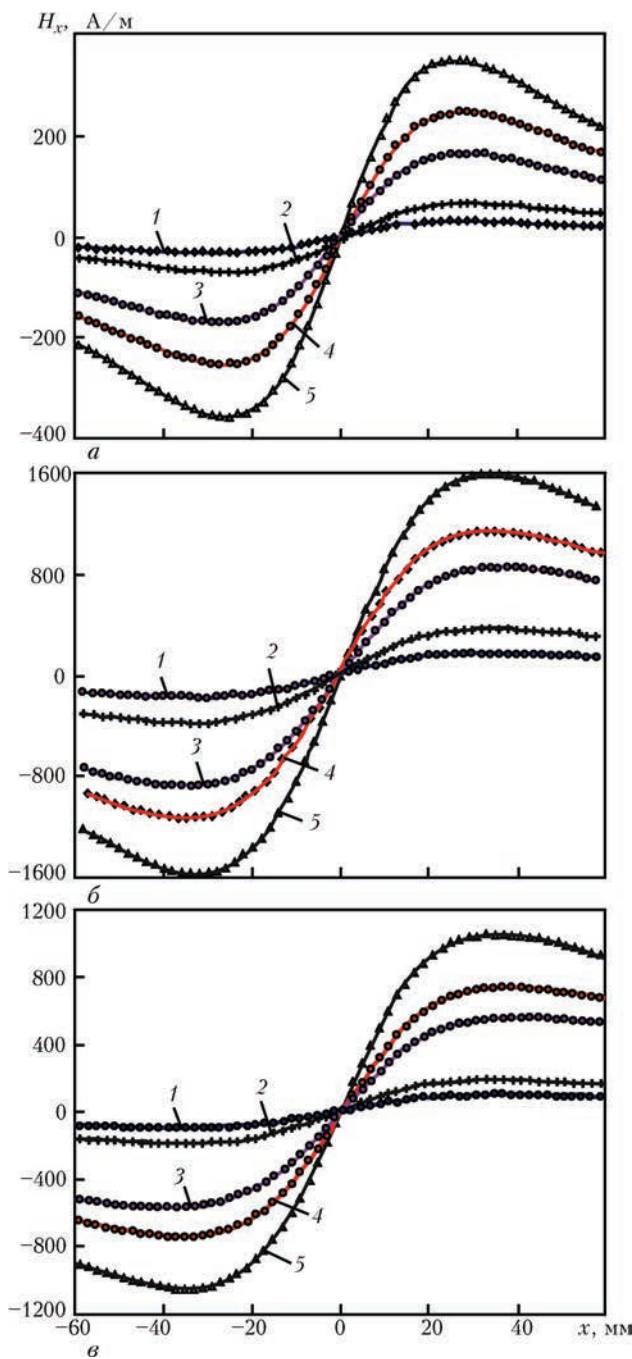


Рис. 3. Распределение составляющей  $H_x$  напряженности магнитного поля прутков по оси  $ox$  при различных значениях  $h$  ( $a - 29$ ;  $б - 40$ ;  $в - 40$  мм) и следующих диаметрах прутков: 1 - 4; 2 - 6,5; 3 - 11,4; 4 - 16; 5 - 22 мм

Сравнивая графики на рис. 3, б и в, полученные для различной длины  $L$  намагничивающей системы, видим, что максимальное значение  $|H_x|$  в варианте в меньше, чем в варианте б. Уменьшение напряженности  $\vec{H}$  магнитного поля рассеяния прутка при увеличении количества магнитов не соответствует увеличению напряженности  $\vec{H}_0$  намагничивающего поля. Данное несоответствие связано с тем, что изменение составляющих  $H_{Oz}$  и  $H_{Oy}$  при увеличении  $L$  различным образом влияет на намагниченность прутка. С увеличением составляющей  $H_{Oz}$  растет и составляющая  $|H_{вн z}|$

внутреннего поля, а также происходит увеличение намагничиваемого этой составляющей объема металла в области между соосными диполями. Увеличение вследствие этого напряженности поля рассеяния прутка не является столь существенным в сравнении с изменениями  $\vec{H}$  под влиянием  $H_{вн y}$  из-за большого размагничивающего фактора прутка в поперечном направлении. Изменения составляющей  $H_{вн y}$  при увеличении  $L$  характеризуются некоторым ростом напряженности и пропорциональным росту  $L$  увеличением расстояния между соосными диполями. Последнее приводит к существенному снижению напряженности поля рассеяния в области между диполями, что и наблюдается на графиках рис. 3, б, в.

Из выполненного анализа расчетных и экспериментальных данных следует возможность определения толщины защитного слоя бетона железобетонных конструкций по распределению напряженности магнитного поля рассеяния прутков арматуры без использования информации об их диаметре из проектной документации. Однако необходимость выполнения измерений пространственного распределения магнитного поля при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений является непростой задачей.

С целью упрощения данной задачи и рассмотрения возможности реализации двухпараметрового метода (одновременного определения  $h$  и  $d$ ) для градуировки измерительного прибора можно использовать метод сеток, основанный на различии зависимостей поля рассеяния  $\vec{H}$  от параметров  $h$  и  $d$ . В этом случае, при заданном источнике намагничивающего поля и выбранной точке определения напряженности магнитного поля прутка, неизвестными в формуле (2) остаются два параметра –  $h$  и  $d$ . Очевидно, что для определения этих параметров необходимо, по меньшей мере, два взаимосвязанных уравнения, в которых неизвестными выступают указанные параметры. Систему из двух уравнений обеспечивают результаты расчетов (или измерений) значений  $\vec{H}$  в двух точках пространства в области намагниченного участка прутка. В общем виде система уравнений будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \vec{H}_1 &= f(\vec{H}_0, \mu, d, h, x_1, y_1, z_1), \\ \vec{H}_2 &= f(\vec{H}_0, \mu, d, h, x_2, y_2, z_2). \end{aligned} \quad (3)$$

Условие выбора координат точек: значения напряженности магнитного поля в этих точках должны различаться ( $\vec{H}_1 \neq \vec{H}_2$ ), а напряженность поля – достаточна для измерений.

**Метод построения градуировочной сетки для определения диаметра прутка и расстояния до магнита.** Магнитное поле рассеяния  $\vec{H}$  намагниченного прутка является суммарным полем рассе-

**Таблица 1.** Расчетная зависимость от параметров  $d$  и  $h$  составляющей  $H_z$  напряженности поля рассеяния (А/м) в точках 1 и 2

Расстояние от начала координат $h, \text{ м}$	Диаметр прутка $d, \text{ мм}$							
	5		10		15		20	
	$H_{z1}$	$H_{z2}$	$H_{z1}$	$H_{z2}$	$H_{z1}$	$H_{z2}$	$H_{z1}$	$H_{z2}$
0,04	5466	1719	11578	3405	16443	4507	21948	5436
0,06	1930	956	4037	1973	5747	2694	7347	3307
0,08	775	486	1636	1017	2254	1422	2932	1775
0,10	350	250	747	537	1057	748	1332	940

нения всех его частей, соотношение составляющих  $\vec{M}_x, \vec{M}_y$  и  $\vec{M}_z$  намагниченности в которых изменяется в зависимости от параметров  $h$  и  $d$  различным образом, следствием чего является различие зависимостей  $H_1$  и  $H_2$  от  $h$  и  $d$ . Иллюстрацией данного положения могут служить численные данные значений  $H_z$  (табл. 1), полученные расчетами в точках 1 ( $x = y = z = 0$ ) и 2 ( $x = 0,05 \text{ м}, y = z = 0$ ), представленные в табл. 1.

Из таблицы видно, что значение  $H_z$  при изменении  $h$  от 0,04 до 0,1 м изменяется в точке 1 примерно в 15,5 раза, а в точке 2 – в среднем в 6,3 раза; при изменении  $d$  от 5 до 20 мм значение  $H_z$  в точке 1 изменяется в среднем в 3,85 раза, в точке 2 – в среднем в 3,4 раза. При этом с увеличением  $h$  величина  $H_z$  уменьшается, с увеличением  $d$  возрастает. На основе результатов, приведенных в табл. 1, можно построить зависимость  $\vec{H}_1 = f(\vec{H}_2)$ .

В графическом представлении каждая строка таблицы образует линию, вдоль которой изменяется  $d$ , но сохраняется неизменным значение  $h$ . Таких линий четыре, каждая будет соответствовать своему значению  $h$ . Линии, образованные парой соседних столбцов, соответствуют постоянному значению  $d$  при переменном  $h$ . Таких линий также будет четыре и каждая будет соответствовать определенному значению  $d$ . Очевидно, что линии первой серии (имеющие известные значения  $h$ ) будут пересекаться с линиями второй серии (имеющими известные значения  $d$ ), образуя сетку с четырехугольными ячейками. Таким образом, точки пересечения линий являются узлами сетки, в которых известны значения  $H_1, H_2, d$  и  $h$ . Следовательно, полученная сетка является аналогом градуировочной кривой при решении однопараметровых задач. Такую градуировочную сетку [12] можно построить как теоретически по расчетной модели, так и экспериментально, используя набор эталонных образцов. С помощью проградуированного подобным образом прибора, измеряющего величины  $H_1$  и  $H_2$  в двух выбранных точках, не составляет труда определить искомые параметры  $d$  и  $h$  исследуемого объекта.

В качестве примера практического построения градуировочной сетки по образцам прутков в табл. 2 приведены экспериментальные значения

**Таблица 2.** Зависимость от параметров  $d$  и  $h$  составляющей  $H_z$  напряженности поля рассеяния (А/м) в двух точках: 1 –  $x = 0,02 \text{ м}, y = z = 0$ ; 2 –  $x = 0,06 \text{ м}, y = z = 0$

$h, \text{ м}$	$d_1 = 12 \text{ мм}$		$d_2 = 16 \text{ мм}$	
	$H_1$	$H_2$	$H_1$	$H_2$
0,05	3434	1309	3735	1740
0,12	176	134	197	151

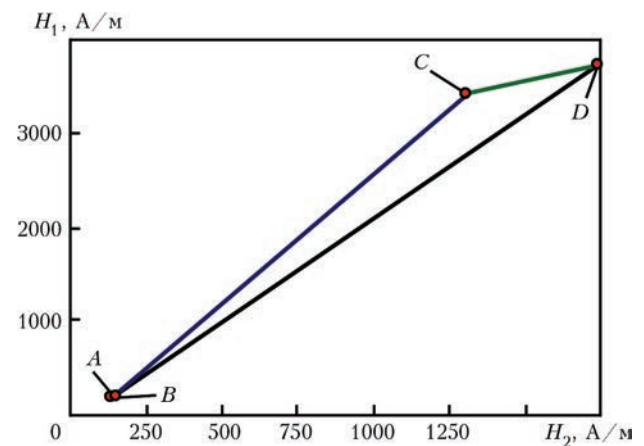


Рис. 4. Ячейка градуировочной сетки

$H_z$  для построения ячейки. Ячейка, представленная на рис. 4, построена в координатной системе  $\vec{H}_1 = f(\vec{H}_2)$ .

На рисунке линия А–В соответствует значению  $h = 0,12 \text{ м}$ , линия С–Д – значению  $h = 0,05 \text{ м}$ . Линия А–С соответствует значению  $d_1$ , линия В–Д – значению  $d_2$ . Если в процессе контроля по измеренным значениям  $H_1$  и  $H_2$  точка на графике попадает в данную ячейку, то для определения значения  $d$  исследуемого образца можно использовать линию А–В или С–Д, и для определения  $h$  – линии А–С или В–Д.

### Выводы

Показано, что зависимости как распределения напряженности внутреннего магнитного поля по длине прутка при намагничивании его постоянным магнитом, так и распределения напряженности поля рассеяния от величин  $d$  и  $h$  имеют различный характер: распределение напряженности поля определяется положением прутка и не зависит от его диаметра. Для одновременного определения значений величин  $h$  и  $d$  показана возможность применения двухпараметрового метода, основанного на измерении напряженности магнит-

ного поля рассеяния в двух точках пространства в зоне намагничивания прутка. Полученные особенности распределения поля в зависимости от величин  $d$  и  $h$ , а также от размеров магнита могут быть использованы для оптимизации намагничивающей системы и измерительной схемы применительно к конкретным условиям контроля параметров армирования железобетонных конструкций.

**Список литературы**

1. ГОСТ 22904–93. Конструкции железобетонные. Магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и расположения арматуры.
2. EN 1520:2011. Prefabricated reinforced components of lightweight aggregate concrete with open structure with structural or non-structural reinforcement.
3. Ульбин А. В. Методы контроля параметров армирования железобетонных конструкций // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – №1(27). – С. 4–13.
4. <http://www.proceq.com/ru/produkcija/kontrol-betona/lokator-sterzhnei-armatury-v-betone/profometer-pm-600.html>
5. <http://www.proceq.com/ru/produkcija/kontrol-betona/lokator-sterzhnei-armatury-v-betone/profometer-pm-630-650.html>
6. [http://www.elcometer.com/images/stories/PDFs/InstructionBooks/331\\_b.pdf](http://www.elcometer.com/images/stories/PDFs/InstructionBooks/331_b.pdf)
7. <http://www.proceq.com/ru/produkcija/kontrol-betona/lokator-sterzhnei-armatury-v-betone/profoscope.html?pqf=5>
8. <http://www.stroypribor.com/produkt/catalog/naprarm/>
9. <http://www.tgindt.com/products/concrete-testing-gauge/time-tc100-tc110-rebar-locator.html>
10. Аркадьев В. К. Магнитные коэффициенты формы, вещества и тела // Избранные труды. – М.: Изд. АН СССР, 1961. – 332 с.
11. Гусев А. П. Модели магнитных зарядов и потоков в задаче дефектоскопии с локальным намагничиванием // Дефектоскопия. – 2014. – № 6. – С. 46–53.
12. Магнитный метод контроля толщины слабомагнитных двухсторонних покрытий по немагнитному основанию / А. А. Лухвич и др. // Дефектоскопия. – 2009. – № 7. – С. 75–82.

**References**

1. GOST 22904–93. Konstruktsii zhelezobetonnye. Magnitnyy metod opredeleniya tolshchiny zashchitnogo sloya betona i raspolozheniya armatury. [in Russian].
2. EN 1520:2011. Prefabricated reinforced components of lightweight aggregate concrete with open structure with structural or non-structural reinforcement.
3. Ulybin A.V. Inspection methods of reinforcement parameters of concrete structures // Magazine of Civil Engineering. – 2012. – №1 (27). P. 4–13. [http://engstroy.spbstu.ru/eng/index\\_2012\\_01/ulybin.html](http://engstroy.spbstu.ru/eng/index_2012_01/ulybin.html)
4. <http://www.proceq.com/ru/produkcija/kontrol-betona/lokator-sterzhnei-armatury-v-betone/profometer-pm-600.html>
5. <http://www.proceq.com/ru/produkcija/kontrol-betona/lokator-sterzhnei-armatury-v-betone/profometer-pm-630-650.html>
6. [http://www.elcometer.com/images/stories/PDFs/InstructionBooks/331\\_b.pdf](http://www.elcometer.com/images/stories/PDFs/InstructionBooks/331_b.pdf)
7. <http://www.proceq.com/ru/produkcija/kontrol-betona/lokator-sterzhnei-armatury-v-betone/profoscope.html?pqf=5>
8. <http://www.stroypribor.com/produkt/catalog/naprarm/>
9. <http://www.tgindt.com/products/concrete-testing-gauge/time-tc100-tc110-rebar-locator.html>
10. Arkadyev V. K. Magnitnye koeffitsiyenty formy, veshchestva i tela // Izbrannyye trudy. – M.: Izd. AN SSSR, 1961. – 332 s. [in Russian].
11. Gusev A. P. Models of Magnetic Charges and Fluxes in the Problem of Flaw Detection with Local Magnetization // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – №6. – P. 343–349.
12. A Magnetic Method for Testing the Thickness of Two-Sided Weakly Magnetic Coatings by a Nonmagnetic Base / A. A. Lukhovich et al. // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2009. – №7. – P. 502–508

О. П. ГУСЕВ, Я. І. ШУКЕВИЧ, А. Л. ЛУК'ЯНОВ

Институт прикладной физики НАН Беларуси.  
220072, м. Минск-72, вул. Академічна, 16.  
E-mail: lab1@iaph.bas-net.by

**МАГНІТНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ЗАХИСНОГО ШАРУ БЕТОНУ І ДІАМЕТРА ПРУТКІВ АРМАТУРИ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

Запропоновано магнітний метод визначення товщини захисного шару бетону і діаметра прутків арматури залізобетонних будівельних конструкцій. Комп'ютерним моделюванням отримано розподіл намагніченості в сталевому прутку і експериментально досліджено розподіл напруженості магнітного поля розсіювання прутка при локальному намагнічуванні полем постійного магніту в залежності від діаметра прутка і від його відстані до магніту. Показано, що переважний внесок у поле розсіювання прутка при малих розмірах магніту вносить складові складова його намагніченості, що характеризується співвісними протилежно спрямованими диполями. Запропонований метод ґрунтується на вимірюванні напруженості магнітного поля розсіювання прутка одночасно в двох точках над поверхнею контрольованого об'єкта в зоні намагнічування прутка і використанні градувальної сітки, побудованої по залежностям поля розсіювання прутка від двох визначених параметрів. Показана методика побудови градувальної сітки вимірювального приладу для контролю залізобетонних будівельних конструкцій. Бібліогр. 12, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: магнітний метод контролю, захисний шар бетону, діаметр прутків арматури

A. P. GUSEV, Ya. I. SHUKEVICH, A. L. LUKYANOV

Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. 220072, Minsk, str. Academic, 16.  
E-mail: lab1@iaph.bas-net.by

**MAGNETIC METHOD FOR DETERMINATION OF THE THICKNESS OF PROTECTIVE CONCRETE LAYER AND DIAMETER OF REBARS OF BUILDING STRUCTURES**

A magnetic method of determination of the thickness of protective concrete layer and diameter of rebars of concrete building structures is proposed. Computer modeling was used to obtain the distribution of magnetization in a steel rod, and distribution of intensity of magnetic scattering field of the rod at local magnetization by a constant magnet field, depending on rod diameter and its distance to the magnet, was experimentally studied. It is shown that the longitudinal component of rod magnetization, which is characterized by coaxial oppositely directed dipoles, makes a prevailing contribution into the rod scattering field at small dimensions of the magnet. The proposed method is based on measurement of intensity of the rod scattering magnetic field simultaneously in two points above the controlled object surface in the zone of rod magnetization and application of a calibration grid, plotted by the dependencies of the rod scattering field on two determined parameters. A procedure of plotting a calibration grid of measuring instrument for monitoring concrete building structures is shown. 12 References, 2 Tables, 4 Figures.

Keywords: magnetic control method, protective layer of concrete, rebar diameter

Поступила в редакцію  
12.12.2016