

Взаимодействие электромагнитного поля и вихревых токов в электропроводящих материалах с дефектами

САНДОВСКИЙ В.А.

Рассматривается возможность использования распределения плотности вихревых токов в бездефектном проводящем полупространстве для расчета влияния дефектов типа несплошности на значение потока. Предлагаемый метод расчета позволяет единообразно и наиболее полно отразить сложное взаимодействие электромагнитного поля и плотности вихревых токов в металле с находящимися в нем дефектами. Путем сравнения экспериментальных данных с теоретическими расчетами установлено, что степень изменения потока вследствие наличия дефектов пропорциональна интегральному потоку, проходящему через контур, ограничивающий этот дефект. Приводятся результаты расчетов и экспериментов.

Ключевые слова: вихревые токи, дефект в металле, интегральный поток, частота, глубина проникновения

При расчетах, связанных с математическим описанием различного рода неоднородностей в электропроводящих материалах, приходится прибегать к использованию аппарата математической физики [1–4]. В [1] представлены методы решения разностных уравнений, описаны прямые методы решения этих уравнений, а также итерационные методы решения сеточных уравнений общего вида и их применение. Решение сеточных уравнений и, в частности разностных, является довольно сложной задачей, включающей решение задач линейной алгебры, для чего существуют различные численные методы и разрабатываются новые, более совершенные.

В практике лабораторных исследований, а также в условиях производства встречающиеся неоднородности обычно называют дефектами. При необходимости математического описания дефектов в первую очередь принято рассматривать дефекты в виде прямоугольников или параллелепипедов. Однако, когда мы имеем дело с электропроводящими материалами, то наиболее простыми в этих случаях являются дефекты несплошности. Такие дефекты математически могут быть представлены как бесконечно тонкие изолирующие включения. Расчеты, связанные с исследованием электрических полей в проводящих средах, содержащих подобные дефекты, могут быть существенно упрощены. Этим целям и посвящена настоящая статья.

В магнитных материалах дефекты проявляются при намагничивании постоянным полем. В области дефекта при этом образуется так называемое поле дефекта, которое обнаруживается с помощью чувствительных элементов [5] (феррозондов, преобразователей Холла и др.). В немагнитных материалах дефекты несплошности проявляются благодаря сопротивлению, оказываемому этими де-

фектами вихрево-токовому потоку. Таким образом, нам предстоит выполнить математические расчеты в области электродинамики при возбуждении переменного поля в немагнитной проводящей среде.

Наиболее известные задачи электродинамики включают источник электромагнитного поля, расположенный над проводящим бездефектным полупространством. Простым источником переменного поля является катушка с переменным током, которую в принципе возможно смоделировать витком с переменным током. В [6–8] в качестве источника рассматривается виток с током, лежащий в плоскости параллельной поверхности полупространства. Решение этой задачи в случае бездефектного материала описывает поле вектор-потенциала как внутри проводящего полупространства, так и над его поверхностью.

Как уже говорилось, задача сильно усложняется, если в проводящем полупространстве имеются различного рода дефекты или неоднородности. Наличие дефектов в проводящей среде исключает возможность использования одинаковых граничных условий для всей поверхности образца и делает неприемлемой методику [6–8]. Однако, если имеется в виду задача с дефектами в виде тонкой изолирующей пластины, перпендикулярной поверхности полупространства, то методику [6–8] можно использовать для оценки влияния дефекта на изменение электромагнитного поля над поверхностью. При этом предполагается, что дефект не оказывает сильного влияния на общую картину распределения электромагнитного поля, что вполне соответствует действительности. Это позволяет рассчитывать распределение поля вихревых токов в бездефектном полупространстве, а влияние дефекта оценивать как сопротивление, оказываемое этим дефектом потоку вихревых токов. Такая мето-

дика оказывается вполне приемлемой, поскольку решение [6–8] позволяет рассчитать поток вихревых токов в бездефектном материале в месте предполагаемого расположения дефекта.

Моделирование источника переменного поля. В качестве источника переменного поля в эксперименте используется цилиндрическая катушка с переменным током, ось которой перпендикулярна проводящей поверхности. Сечение катушки должно быть значительно меньше ее диаметра, что позволит смоделировать ее витком с током. Плотность вихревых токов для такой модели рассчитывается по формуле

$$J_B = j\omega\sigma A, \tag{1}$$

где $j = \sqrt{-1}$; $\omega = 2\pi f$; f – частота тока в витке; σ – удельная электрическая проводимость материала образца; A – вектор-потенциал в проводящем полупространстве;

$$A = I\mu\mu_0 R \int_0^\infty J_1(\lambda R) J_1(\lambda \rho) \times \frac{\exp(-\lambda d + z\sqrt{\lambda^2 + j\omega\mu\mu_0\sigma})}{\mu\lambda + \sqrt{\lambda^2 + j\omega\mu\mu_0\sigma}} \lambda d\lambda, \tag{2}$$

где I – ток в витке; μ – магнитная проницаемость материала образца; μ_0 – магнитная постоянная; J_1 – функция Бесселя первого рода первого порядка; R – радиус витка с током; ρ – полярная координата; d – расстояние от витка до поверхности образца; z – глубина.

Переходя к нормированным к радиусу витка величинам, выражение (2) можно записать в более общем виде:

$$A = I\mu\mu_0 R \int_0^\infty J_1(x) J_1(\delta x) \times \frac{e^{-\alpha x - \zeta\sqrt{x^2 + j\beta^2}}}{\mu x + \sqrt{x^2 + j\beta^2}} x dx, \tag{3}$$

где

$$\beta = R\sqrt{2\pi f\mu_0\sigma}; \tag{4}$$

f – частота тока; $\alpha = d/R$; $\delta = \rho/R$; $\zeta = z/R$; $\mu = 1$.

Выражение (3) предполагает операции над комплексными числами, поэтому в соответствующей компьютерной программе рассчитываются отдельно вещественная и мнимая части, а затем определяется модуль. За предел интегрирования принято значение 100, число итераций $n = 501$.

На рис. 1,а показаны рассчитанные по (1)–(4) графики распределения модуля плотности вихревых токов в алюминиевом образце с удельной

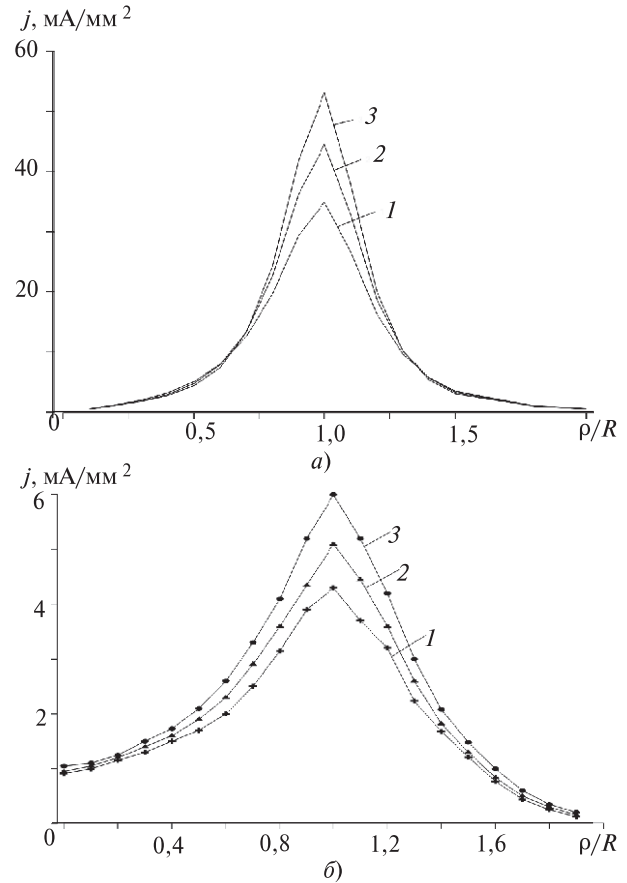


Рис. 1. Распределение плотности вихревых токов в зависимости от относительной полярной координаты (а) и экспериментальные измерения с дефектом длиной 7 мм в образце с удельной электрической проводимостью 36 МСм/м (б) на частотах: 1 – 500; 2 – 800; 3 – 1200 Гц

электрической проводимостью $\sigma = 36$ МСм/м. Расчеты выполнены для случая, когда виток с током $I = 10$ мА представлен в эксперименте катушкой с радиусом R , состоящей из 200 витков. Кривые на рисунке рассчитаны для относительной глубины $\zeta = 0,066$ при различных значениях частоты тока: 500, 800 и 1200 Гц.

Предполагается, что электромагнитное поле над образцом должно изменяться пропорционально сопротивлению, оказываемому дефектом потоку вихревых токов. Если предположение справедливо, а дефект достаточно мал (значительно меньше радиуса R), то при его перемещении от оси витка к периферии поле над поверхностью образца должно изменяться в соответствии с изменением плотности вихревых токов (см. рис. 1,а). Такой дефект условно будем называть точечным.

Точечный дефект. Не имея возможности непосредственно измерять плотность потока вихревых токов, в эксперименте используется связь изменений этого потока с изменениями поля над поверхностью образца. Для достижения необходимой точности при проведении соответствующего эксперимента выбран большой размер витка с током.

Поскольку результаты эксперимента должны сравниваться с теоретическими расчетами, необходимо опытные экземпляры катушек выполнить максимально приближенными по форме к одному витку в соответствии с выбранной математической моделью. В качестве витка с током используется катушка диаметром 54 мм, содержащая 200 витков провода ПЭЛ-0,1 мм. Соосная с токовой измерительная катушка содержит тоже 200 витков и наматывается поверх катушки с током. Обе катушки размещены в пазу цилиндрического каркаса. В данном случае сечение двух катушек составляет примерно $2,5 \times 3 \text{ мм}^2$. В качестве точечного дефекта использовали углубление длиной 7 мм, глубиной 3,6 мм в пластине толщиной 12,5 мм из алюминия ($\sigma = 36 \text{ МСм/м}$). Расчеты были выполнены для средней глубины 1,8 мм.

Вначале дефект размещается на оси (в центре катушек), выполняется измерение U_d и записывается результат, затем измерения повторяются по мере перемещения дефекта от оси к периферии с шагом 2 мм. Для построения графиков на рис. 1, б используется разность между измеренным сигналом U_d и соответствующим измерением U_0 на бездефектной поверхности, отнесенная к последнему измерению:

$$\Delta U = (U_d - U_0) / U_0 \cdot 100\%. \quad (5)$$

Опыты выполняются на частотах 500, 800, 1200 Гц. Из сравнения графиков на рис. 1, а и б видно, что они подобны. Это означает, что предположение может оказаться справедливым и в отношении крупных дефектов.

На рис. 1, а и б рассмотрено распределение плотности вихревых токов вдоль полярной координаты. Рассмотрим также зависимость плотности вихревых токов от глубины проникновения в металл. Например, радиус витка возбуждающего поля $R = 30 \text{ мм}$, ток, протекающий по витку, $I = 2000 \text{ мА}$, удельная электрическая проводимость образца 18 МСм/м . Результаты расчетов по (1)–(4) показали, что с увеличением частоты плотность вихревых токов растет, но гораздо быстрее убывает с глубиной.

Зависимость от глубины дефекта. Дефект значительных размеров должен сильно влиять на изменение потока вихревых токов. Естественно предположить, что его воздействие также должно быть пропорционально сопротивлению, оказываемому этим дефектом потоку вихревых токов. В этом случае необходимо вычислить поток вихревых токов в бездефектном полупространстве, проходящий через прямоугольную рамку, длина которой равна длине дефекта, а высота его глубине. В дальнейшем такую рамку будем называть условным дефек-

том. Вначале рассмотрим случай, когда условный дефект симметричен относительно оси. Тогда достаточно проинтегрировать только половину размера рамки с последующим удвоением результата. Полагая

$$F(\delta, \zeta) = \int_0^{\infty} J_1(x) J_1(\delta x) \frac{e^{-\alpha x - \zeta \sqrt{x^2 + j\beta^2}}}{\mu x + \sqrt{x^2 + j\beta^2}} x dx, \quad (6)$$

запишем суммарный поток, пронизывающий рамку длиной l , высотой h :

$$P = 2C_k \int_0^c d\zeta \int_0^b F(\delta, \zeta) d\delta, \quad (7)$$

где $c = h / R$ – относительная глубина условного дефекта; $b = l / 2 / R$ – половина относительной длины условного дефекта; $C_k = 2\pi f \sigma I \mu_0 R^2$.

На рис. 2, а показаны рассчитанные по (5)–(7) зависимости значений интегрального потока от глубины симметрично расположенных условных дефектов одинаковой длины в образцах из алюминиевого сплава с удельной электрической проводимостью $\sigma = 28 \text{ МСм/м}$. Расчеты выполнены для катушки радиусом $R = 22 \text{ мм}$, содержащей 100 витков провода 0,1 мм, с током $I = 10 \text{ мА}$, при $\alpha = 0,12$; $b = 1,8$; число итераций при интегрировании по глубине $n = 10$.

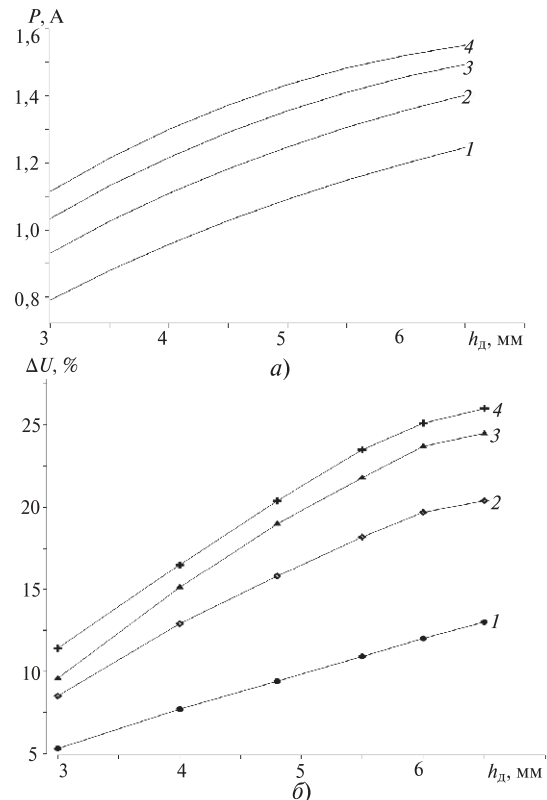


Рис. 2. Расчетные значения интегрального потока в зависимости от глубины условных дефектов длиной 85 мм для витка с радиусом $R = 22 \text{ мм}$ (а) и экспериментальные измерения относительного сигнала на образцах с дефектами длиной 85 мм различной глубины при $\sigma = 28 \text{ МСм/м}$ (б) на частотах: 1 – 400; 2 – 600; 3 – 800; 4 – 1000 Гц

Для проведения соответствующих экспериментов были подготовлены образцы из алюминиевого сплава размером $20 \times 85 \times 110$ мм с удельной электрической проводимостью 28 МСм/м . В каждом из них с помощью фрезы толщиной $0,23$ мм были нанесены прорезы глубиной от 3 до $6,5$ мм. Измерения проводились по аналогии с предыдущими опытами, определялась относительная разность ΔU между значениями сигнала на бездефектном участке образца и на дефектном в соответствии с (5). Результаты измерений показаны на рис. 2,б. Сравнивая его с графиками на рис. 2,а, заключаем, что они подобны.

Зависимость от длины дефекта. Расчеты выполняются для дефектов глубиной 3 мм различной длины в образце из алюминиевого сплава с удельной электрической проводимостью $\sigma = 28 \text{ МСм/м}$. Принято, что дефект располагается симметричным образом на оси модели. Как и в предыдущем случае, используется модель радиусом $R = 22$ мм, ток $I = 10$ мА, число витков $n = 100$. Расчеты выполнены по (7) для частоты $800, 1000, 1500$ и 2000 Гц. При интегрировании по длине число итераций $n = 41$.

По результатам расчета построены графики на рис. 3,а. Быстро возрастающие значения на графиках

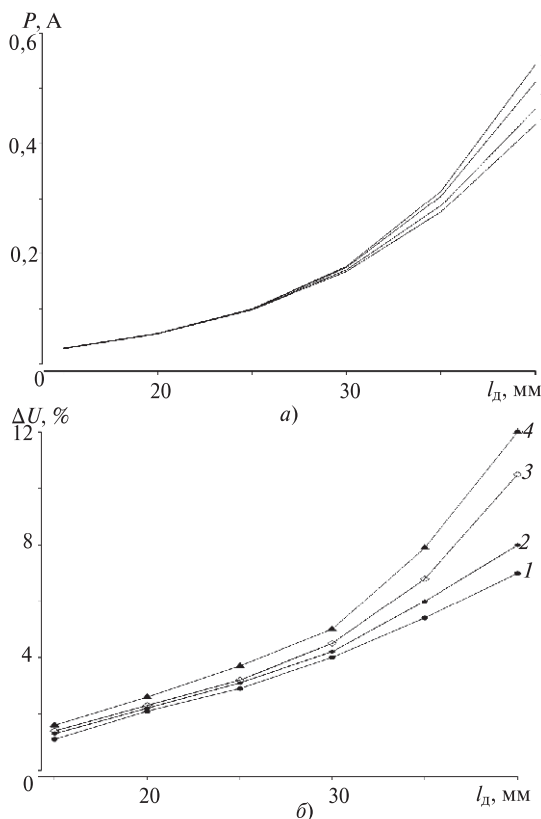


Рис. 3. Расчетные зависимости от длины симметричных относительно оси условных дефектов глубиной 3 мм (а) и экспериментальные измерения относительного сигнала на образце с удельной электрической проводимостью 28 МСм/м , с дефектами глубиной 3 мм различной длины (б) на частотах: 1 – 800 ; 2 – 1000 ; 3 – 1500 ; 4 – 2000 Гц

как обусловлены тем, что длина дефектов в данном случае соответствует их положению в области малых значений плотности вихревых токов. Если фигуру, изображенную графиками на рис. 1,а, вращать вокруг оси, то получится объемное изображение, напоминающее вулкан. Эту фигуру иногда именуют сканирующей кистью. С увеличением длины дефекта его часть достигает области со все увеличивающейся плотностью вихревых токов. Интегральный поток, проходящий через рамку, ограничивающую дефект, быстро возрастает.

Для проведения соответствующего эксперимента был подготовлен образец с удельной электрической проводимостью $\sigma = 28 \text{ МСм/м}$ и дефектами в виде прорезей глубиной 3 мм различной длины. При измерениях дефект расположен симметричным образом, а сами измерения выполняются аналогично предыдущим, т.е. определяется относительная разность (см. (5)) между сигналами измерительной катушки при установке на дефектный участок и затем на бездефектную поверхность.

На рис. 3,б показаны экспериментально полученные зависимости степени влияния дефектов различной длины на изменения интегрального потока вихревых токов. Сравнивая графики на рис. 3,а и б, видим, что они подобны.

Приведем пример несимметричного расположения дефекта. Условия остаются теми же, как и в предыдущем случае, за исключением расположения дефектов: начало дефекта совпадает с осью, а направление совпадает с радиусом. В этом случае также используется формула (7), но параметр $b = 1/R$ и коэффициент 2 исключаются.

Полученные графики существенно отличаются от графиков на рис. 3,а: значительно большая часть каждого из условных дефектов находится в области с большой плотностью потока, однако при этом исключается удвоение результата. При этом соответствующие экспериментальные и расчетные зависимости приблизительно подобны.

Дефект, смещенный от оси модели. Выше были рассмотрены примеры, когда ось модели лежит в плоскости условного дефекта. В этом случае линии вихревого тока пересекают плоскость дефекта под прямым углом. Если же плоскость условного дефекта сдвигается от оси на расстояние $l_{\text{см}}$, то линии вихревых токов пересекают плоскость дефекта под некоторым углом φ , который зависит как от размера смещения $l_{\text{см}}$, так и от итераций при интегрировании вдоль длины условного дефекта. Для того чтобы использовать при интегрировании формулу (7), необходимо учесть переход к координате ρ . Обозначив участок линии условного дефекта u , находим

$$\rho = \sqrt{y^2 + l_{\text{CM}}^2}; \quad (8)$$

учитывая, что

$$\sin \varphi = \frac{y}{\sqrt{y^2 + l_{\text{CM}}^2}}, \quad (9)$$

формулу (7) запишем с учетом угла φ , под которым линии тока пересекают плоскость дефекта:

$$P = 2C_k \int_0^c \int_0^b F(y, \zeta) \frac{y^2}{y^2 + l_{\text{CM}}^2} dy. \quad (10)$$

По (10) рассчитаем поток вихревых токов для случая длинного ($b = l/2 / R = 1,8$) условного дефекта глубиной 5,5 мм, перемещающегося от центра к периферии. Остальные условия оставим прежними.

На рис. 4,а показаны графики зависимости расчетных значений от смещения l_{CM} в пределах от нуля до 28 мм на частотах 400; 800; 1000 и 1500 Гц. На рис. 4,б показаны экспериментально полученные графики для образца удельной электрической проводимости 28 МСм/м с дефектом длиной 85 мм и глубиной 5,5 мм. Измерения выполнялись при изменении l_{CM} с шагом 2 мм. Из сравнения графиков можно заключить, что они подобны.

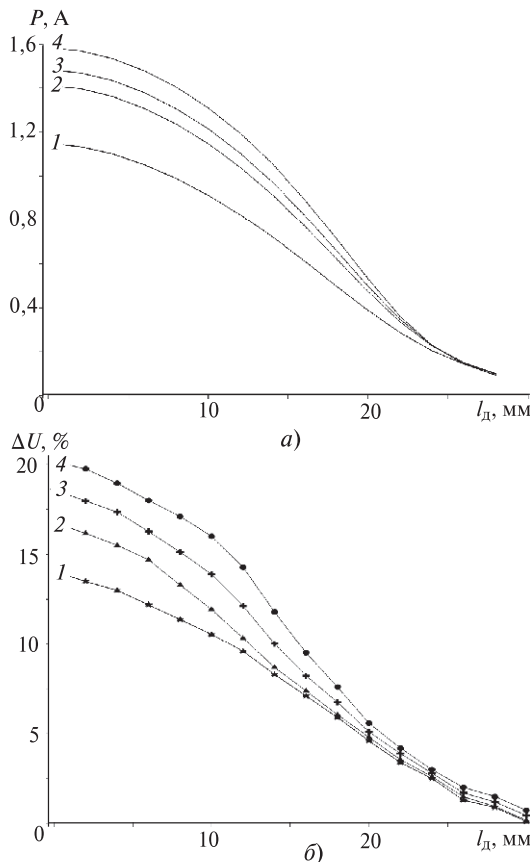


Рис. 4. Расчетные зависимости интегрального потока, пронизывающего условный дефект глубиной 5,5 мм, длиной 85 мм, при его смещении от оси на расстояние l_{CM} (а) и экспериментальные измерения относительного сигнала в зависимости от смещения от оси дефекта глубиной 5,5 мм, длиной 85 мм (б) на частотах: 1 – 400; 2 – 800; 3 – 1000; 4 – 1500 Гц

Рассмотрим теперь случай расположения дефекта любым образом. Для этого удобнее пользоваться разновидностью формулы (10):

$$P = C_k \int_0^c \int_a^b F(y, \zeta) \frac{y^2}{y^2 + l_{\text{CM}}^2} dy, \quad (11)$$

где a и b – пределы интегрирования по длине условного дефекта, соответствующие его началу и концу. Если плоскость, проходящая через ось, перпендикулярна плоскости дефекта и делит его на две части, то интегрирование по длине выполняется в два этапа: от нуля до a и от нуля до b , при этом результирующий интегральный поток будет равен их сумме. Если же дефект расположен по одну сторону от разделяющей плоскости, то интегрирование выполняется просто в пределах от a до b .

Приведенная методика может использоваться для теоретических расчетов. Например, рассчитаем, как изменяется интегральный поток по глубине дефекта. Для этого в условиях последней задачи полагаем $l_{\text{CM}} = 4$ мм и изменяем глубину дефекта через 0,5 мм. Результаты расчета по (10) приведены в таблице. В ней указана глубина дефекта h и относительная глубина ζ , а также значения соответствующего интегрального потока при частотах 800 Гц и 2 кГц. Видно, что с увеличением глубины дефекта интегральный поток непрерывно возрастает, но его приращение непрерывно уменьшается. Это происходит потому, что, с одной стороны, с ростом глубины увеличивается рамка, ограничивающая условный дефект, с другой стороны, плотность вихревых токов убывает с глубиной. Для наглядности указаны проценты изменения потока по отношению к предыдущему его значению. Для конкретных условий задачи можно указать значение глубины, больше которой не имеет смысла увеличивать предел интегрирования, так как результат при этом почти не будет изменяться. Кроме того, видно, что с увеличением частоты значение относительной глубины уменьшается.

Глубина h , мм	Относительная глубина ζ	P , А		ΔP , %	
		800 Гц	2000 Гц	800 Гц	2000 Гц
5,5	0,25	1,362	1,584	—	—
6,0	0,27	1,407	1,603	3,2	1,18
6,5	0,30	1,443	1,622	2,5	1,17
7,0	0,32	1,472	1,639	1,97	1,04
7,5	0,34	1,495	1,653	1,73	0,85
8,0	0,36	1,515	1,665	1,12	0,72
8,5	0,39	1,531	1,676	1,04	0,65
9,0	0,41	1,544	1,683	0,84	0,42
9,5	0,43	1,555	1,687	0,71	0,24
10	0,45	1,565	1,689	0,64	0,12

Поэтому при заданных условиях для дефектов различной глубины существует частота, при которой достигается максимум интегрального потока. На рис. 5,а показаны расчетные зависимости интегрального потока от частоты для симметрично расположенного условного дефекта длиной 40 мм различной глубины. В расчетах, как и в предыдущих задачах, приняты параметры $R=22$ мм; $\sigma=28$ МСм/м. Видно, что для каждой глубины условного дефекта существует значение частоты, при которой достигается максимум интегрального потока, проходящего через рамку, ограничивающую данный дефект. Это обстоятельство можно использовать для определения глубины дефектов. На рис. 5,б показана рассчитанная для этих же условий кривая I , которая является градуировочной при определении глубины дефекта. По оси абсцисс отложены значения частоты f_m , соответствующие максимальным значениям интегрального потока для вышезаданных условий, по оси ординат — соответствующие значения глубины для указанного дефекта.

Интересно рассмотреть то же самое и в других условиях. Например, рассчитаем аналогичную кривую для симметрично расположенного условного дефекта длиной 20 мм в том же образце при

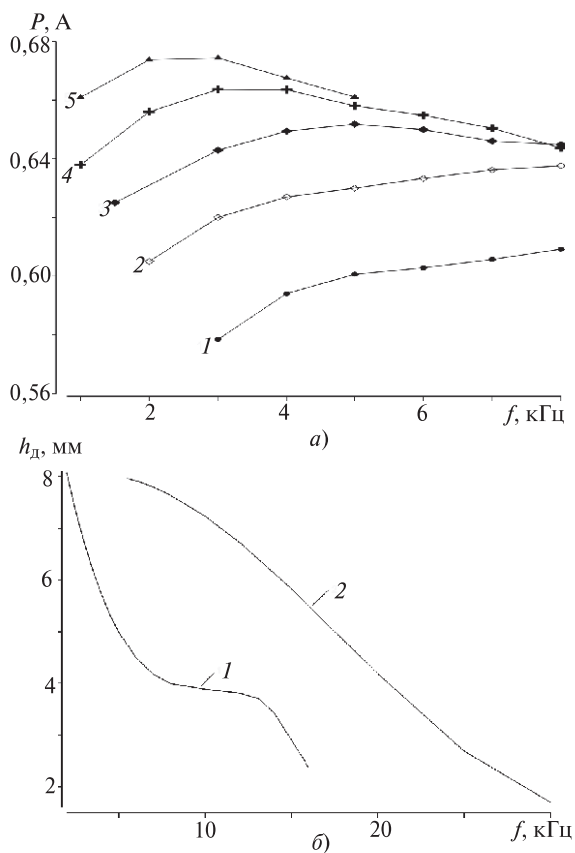


Рис. 5. Расчетные зависимости от частоты значений интегрального потока, пронизывающего условный симметрично расположенный дефект длиной 40 мм различной глубины: 1 — 3; 2 — 4; 3 — 5; 4 — 6; 5 — 7 мм; $R=22$ мм (а) и градуировочные кривые для определения глубины дефекта: 1 — $R=22$ мм; длина дефекта $l=40$ мм; 2 — $R=8$ мм; $l=20$ мм (б)

радиусе витка $R=8$ мм. На рис. 5,б она обозначена цифрой 2. В первом случае искажение кривой I обусловлено тем, что длина дефекта меньше диаметра витка (дефект находится в кратере сканирующей кисти), а во втором случае дефект больше диаметра витка. В первом случае изменение частоты более существенно сказывается на изменении формы распределения плотности вихревых токов.

На практике максимальное значение интегрального потока соответствует наибольшей разности ΔU между измерениями на бездефектном участке образца и над дефектом. С целью усовершенствования опытов используют два одинаковых преобразователя, один из которых устанавливается на бездефектном участке образца, а второй — над дефектом. Для получения разностного сигнала преобразователи включаются по дифференциальной схеме. При этом, изменяя частоту генератора, наблюдают за сигналом на выходе дифференциальной схемы. При достижении сигналом максимума фиксируют значение частоты f_m и по нему определяют глубину дефекта с использованием градуировочной кривой.

Обсуждение полученных результатов. В основу работы положено изучение распределения плотности вихревых токов в образце (рис. 1,а). В объеме можно представить себе фигуру, которая при сканировании поверхности беспрепятственно передвигается в поверхностном слое образца. Поэтому эту фигуру иногда называют сканирующей кистью.

Если точечный дефект быстро передвигать в непосредственной близости к возбуждающему элементу, то сигнал на измерительной катушке можно будет наблюдать в виде импульса на экране осциллографа. Изменяя траекторию движения дефекта, можно изменять и форму импульса, который в этом случае воспроизводит сечение сканирующей кисти. Если осциллограф с запоминанием, то можно записать форму сигнала от любого дефекта и использовать эти измерения в компьютерной программе для получения дополнительной полезной информации о дефекте.

Метод точечного дефекта иногда используют для практических целей описания формы сканирующей кисти, например в случае катушек с ферритовым сердечником.

Интересно сравнить сопротивление, оказываемое дефектом несплошности вихретоковому потоку, с сопротивлением паруса потоку воздуха или с сопротивлением потокам жидкости погруженными в нее предметами. Потоки воздуха и жидкости оказывают реальное давление на встречающиеся препятствия, тогда как поток вихревых токов испытывает всего лишь эффект «торможения», что уменьшает его интенсивность.

Не менее интересным является то, что уменьшение интенсивности вихретокового потока эквивалентно уменьшению электропроводимости материала образца. Это доказывается соответствующим экспериментом. Если измерить годограф [9–11] на бездефектном участке образца и на участке этого же образца с дефектом, то разность этих годографов на комплексной плоскости определит вектор приращения сигнала за счет наличия дефекта. Если взять другой, бездефектный, образец с несколько меньшим значением электропроводимости, то снятый на нем годограф полностью воспроизведет годограф, измеренный на дефектном участке первого образца, причем даже в достаточно широком частотном диапазоне. Эти эксперименты неоднократно проводились с различными образцами и разными дефектами.

Заключение. В качестве источника переменного электромагнитного поля использовалась катушка с малым сечением, что позволило выбрать для исследований расчетную модель в виде витка с током. При этом появилась возможность рассмотрения всех вариантов расположения дефектов по отношению к источнику. Предложенный простой метод расчета позволяет единообразно и наиболее полно отразить сложное взаимодействие электромагнитного поля и плотности вихревых токов в металле с дефектами.

Стоит заметить, что источником может быть и более сложная система, например катушка с ферритовым сердечником. В этом случае расчет будет затруднен, но принципиальные моменты, рассмотренные на более простом примере, останутся. Тем не менее, сложный источник может быть составлен из двух или более катушек, и если их смоделировать витками [12], то в расчетах можно будет использовать тот же самый принцип, что и в случае одной катушки.

Рассмотренные дефекты типа несплошности идеализированы, но хорошо совпадают с реальными, так как в трещинах металлов образуется окисная пленка, играющая роль изолятора. В экспериментальных образцах дефекты нанесены путем фрезерования, однако выбранные большие размеры катушек делают относительную ширину дефектов также близкой к реальной. Поэтому получен-

ные в работе экспериментальные результаты вполне могут использоваться в практических целях.

Учитывая, что в последнее время развивается направление по совершенствованию диагностики с применением электромагнитных методов, особый интерес представляет запись сигналов при перемещении датчиков относительно дефектов с последующей компьютерной обработкой. В этом отношении методика выполнения эксперимента также может оказаться полезной. Существенное значение имеет возможность использования показанной в статье частотной зависимости сигнала для определения глубины дефекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. — М.: Физматгиз, 1978, 589 с.
2. Самарский А.А., Карамзин Ю.Н. Разностные уравнения. — М.: Знание, 1978, 342 с.
3. Лаврентьев М.А. Вариационный метод в краевых задачах для систем уравнений эллиптического вида. — М.: Изд-во АН СССР, 1962, 212 с.
4. Дмитриев В.И., Захаров В.Е. Метод решения задач электродинамики неоднородных сред // Журнал вычислительной математики и математической физики, 1970, т. 10, № 6, с. 1458–1464.
5. Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Щелкин А.П. Магнитометрические преобразователи, приборы, установки. — Л.: Энергия, 1972, 272 с.
6. Гринберг Г.А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. — М.: Л.: Изд. АН СССР, 1948, 647 с.
7. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Основные дифференциальные уравнения математической физики. — М.: Физматгиз, 1962, 767 с.
8. Морс Ф.М., Фешбах Г. Методы теоретической физики, ч. 2. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1960, 245 с.
9. Dodd C.V., Deeds W.E., Spoeri W.C. Optimizing defect detection in eddy current testing. — Mater. Eval., 1971, vol. 29, No 3, pp. 59–63.
10. Герасимов В.Г., Клоев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. — М.: Энергоатомиздат, 1983, 272 с.
11. Дякин В.В., Сандовский В.А. Задачи электродинамики в неразрушающем контроле. — Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2007, 390 с.
12. Сандовский В.А. Формирование электромагнитного поля в контролируемом образце. — Дефектоскопия, 1984, № 2, с. 46–49.

[30.11. 2015]

Автор: Сандовский Владимир Аронович окончил Уральский политехнический институт в 1962 г. Докторскую диссертацию защитил в 1980 г. Ведущий научный сотрудник Института физики металлов Уральского отделения РАН.

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 9, pp. 60–67.

Resistance Offered to Eddy Current Flux by Discontinuity Flaws

SANDOVSKII Vladimir Aronovich (*The Physics Metals Institute of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia*) — *Leading scientific researcher, Dr. Sci. (Eng.)*

The article considers the possibility of using the eddy current density distribution in a flawless conducting semispace to calculate the effect discontinuity flaws have on the flux value. With the proposed

calculation method, it becomes possible to reflect complex interaction of electromagnetic field and the eddy current density in metal with the flaws contained in it in a unified and most comprehensive manner. It has been found from a comparison between the experimental data and theoretical calculation that the extent to which the flux varies due to the presence of flaws is proportional to the integral flux passing through the boundaries enclosing this flaw. Results from calculations and experiments are given.

Key words: *eddy currents, flaw in metal, integral flux, frequency, penetration depth*

REFERENCES

1. **Samarskii A.A., Nikolayev E.S.** *Metody resheniya setochnykh uravnenii* (Methods solving grid equations). Moscow, Fizmatgiz, 1978, 589 p.
2. **Samarskii A.A., Karamazin Yu.N.** *Raznostnye uravneniya* (Difference equations). Moscow, Publ. «Znaniye», 1978, 342 p.
3. **Lavrent'yev M.A.** *Variatsionnyi metod v krayevykh zadachakh dlya system uravnenii ellipticheskogo vida* (The Variational Method in Boundary-value Problems for Systems of Elliptical Equations). Moscow, Publ. of SSSR Academy of Sciences, 1962, 212 p.
4. **Dmitriyev V.I., Zakharov V.E.** *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki – in Russ. (Computational mathematics and mathematical physics journal)*, 1970, Vol. 10, No. 6, pp. 1458–1464.
5. **Afnas'yev Yu.V., Studentsov N.V., Shchelkin A.P.** *Magnitometricheskiye preobrazovateli, pribory, ustanovki* (Magnetometric converters, devices, equipment). Leningrad, Publ. «Energiya», 1972, 272 p.
6. **Grinberg G.A.** *Izbrannyye voprosy matematicheskoi teorii elektricheskikh i magnitnykh yavlenii* (Selected problems of mathematical theory of electrical and magnetic phenomena). Moscow, Leningrad: Publ. of SSSR Academy of Sciences, 1948, 647 p.
7. **Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M.** *Osnovnye differentsial'nye uravneniya matematicheskoi fiziki* (Basic differential equations of mathematical physics). Moscow, Fizmatgiz, 1962, 767 p.
8. **Mors F.M., Feshbakh G.** *Metody teoreticheskoi fiziki, ch. 2* (Theoretical physics methods, part 2). Moscow, Publ. «Inostrannaya literatura», 1960, 245 p.
9. **Dodd C.V., Deeds W.E., Spoeri W.C.** Optimizing defect detection in eddy current testing. – *Mater. Eval.*, 1971, vol. 29, No 3, pp. 59–63.
10. **Gerasimov V.G., Klyuyev V.V., Shaternikov V.E.** *Metody i pribory elektromagnitnogo kontrolya promyshlennykh izdelii* (Methods and devices for the electromagnetic control of industrial products). Moscow, Energoatomizdat, 1983, 272 p.
11. **Dyakin V.V., Sandovskii V.A.** *Zadachi elektrodinamiki v nerazrushayushchem kontrole* (Electrodynamic problems in non-destructive testing). Ekaterinburg, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 2007, 390 p.
12. **Sandovskii V.A.** *Defektoskopiya – in Russ. (Flaw detection)*, 1984, No. 2, pp. 46–49.

Редакция и редколлегия журнала «Электричество» с прискорбием сообщают о трагической гибели 3 июля с.г. доктора технических наук, профессора кафедры инженерной экологии и охраны труда Московского энергетического института

Егора Сергеевича Колечицкого

и выражают глубокие соболезнования его родным, сотрудникам кафедры, друзьям.