

ИМПУЛЬСНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА

© 2022 г. В.В. Павлюченко¹, Е.С. Дорошевич^{1,*}

¹Белорусский Национальный Технический Университет, Беларусь
220013 Минск, пр-т Независимости, 65
E-mail: *ess.doroshevich@gmail.com

Поступила в редакцию 06.09.2022; после доработки 30.09.2022
Принята к публикации 30.09.2022

Представлены экспериментальные зависимости максимальной напряженности вторичного импульсного магнитного поля вблизи поверхности металлических пластин от их толщины $H(d)$, полученные с помощью дискретного датчика магнитного поля (ДДМП) и отнесенные к напряженности поля первичного источника. Толщина пластин изменялась от 0,015 до 2 мм. На ДДМП с пластинами из алюминия и свинца воздействовали импульсами магнитного поля линейного индуктора со временем нарастания от 5 до 60 мкс. Найдены арктангенсные аналитические функции $H(d)$, которые использованы для расчетов гистерезисной интерференции импульсного магнитного поля в отраженной волне с целью повышения чувствительности и точности контроля толщины металлических объектов, удельной электропроводности их материала и дефектов сплошности в них.

Ключевые слова: импульсное магнитное поле, алюминиевая пластина, магнитный носитель.

DOI: 10.31857/S0130308222110021, EDN: BUBJHX

ВВЕДЕНИЕ

Для осуществления контроля толщины металлических объектов, удельной электропроводности их материала и наличия в них дефектов сплошности и структурных неоднородностей необходимо иметь информацию о магнитных полях на поверхности объекта при воздействии на него импульсными магнитными полями. Экспериментальные зависимости максимальной напряженности вторичного импульсного магнитного поля вблизи поверхности металлических пластин от их толщины получены нами ранее в [1]. Там показано, что начальные участки этих зависимостей являются квазилинейными. В дальнейшем эти результаты были использованы в последующих работах авторов. Так, проведены расчеты с использованием экспериментальной зависимости величины электрического напряжения U , снимаемого с преобразователя магнитного поля, от величины напряженности приложенного магнитного поля H [2]. Там указанная зависимость аппроксимирована шестью линейными участками и применен метод гистерезисной интерференции.

Более точно можно определить толщину объекта из алюминия с помощью магнитного носителя, описанного авторами арктангенсной характеристикой [3], воздействуя на него сериями разнополярных импульсов магнитного поля линейного индуктора из одного, двух, трех, четырех, пяти и пятнадцати импульсов. При этом обеспечивали одинаковую амплитуду гистерезисных колебаний электрического напряжения и получали линейную разностную зависимость напряжения $U(x)$, снимаемого с магнитной головки, от координаты x для клинообразного и плоского алюминиевых объектов.

Отметим значительные успехи контроля различных свойств объектов, их толщины и дефектов сплошности вихретоковым методом [4–7]. Там, в частности, представлены результаты определения параметров трещин, внутреннего диаметра труб, параметров поверхностных дефектов конечной и бесконечной глубины и качества теплообменных труб парогенераторов АЭС. Известны многочисленные работы [8, 9] по описанию вихревых токов проводящих и намагничивающихся включений и влиянию кривизны поверхности трубопровода на результаты контроля.

Огромным преимуществом разрабатываемого метода является тот факт, что метод позволяет записывать мгновенные распределения магнитных полей на большой площади объекта и в пространстве, чего нельзя сделать вихретоковым и другими методами. Развитие метода гистерезисной интерференции может быть осуществлено, например, при использовании перекрывающихся импульсных магнитных полей [10]. При этом следует учитывать дифференциальный фон электрического сигнала преобразователя магнитного поля [11], содержащий фоны электромагнитных помех, резонансные фоны и другие сигналы, не связанные с полезным сигналом.

Методом вихревых токов достаточно полно осуществляется отстройка от электропроводности основания при измерении толщины токопроводящих покрытий [12], а магнитодинамическим методом можно выявлять ферромагнитную составляющую в нержавеющей сталях [13] и вести

контроль толстослойных никелевых покрытий на двухслойных основаниях [14]. Разрабатываемый нами метод имеет существенное преимущество и перед магнитодинамическим методом, так как является не точечным методом, а поверхностным (объемным) с высоким пространственным разрешением и быстродействующим и может быть осуществлен как в отраженной, так и в прошедшей волне [15]. При разработке метода гистерезисной интерференции авторам значительную помощь оказали работы по магнитоиндукционной томографии [16] и работа по контролю токопроводящих покрытий топливных баков летательных аппаратов [17].

Исходя из вышеизложенного, следует, что полученные нами результаты использования гистерезисной интерференции должны быть уточнены, а также проведены дополнительные исследования в широком диапазоне толщин объектов с поиском таких аналитических функций, каждая из которых описывает пространственные распределения магнитных полей во всем измеряемом диапазоне толщин.

Целью работы является повышение чувствительности и точности контроля свойств электропроводящих объектов в импульсном магнитном поле. Поставленная цель достигается путем проведения исследований импульсных магнитных полей вблизи поверхности металлических объектов, получением соответствующих экспериментальных зависимостей, нахождением аналитических функций, описывающих эти зависимости, и использованием этих функций для расчетов магнитных полей при гистерезисной интерференции для контроля свойств объектов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследуем импульсные магнитные поля вблизи поверхности металлических пластин и найдем аналитические функции, описывающие полученные экспериментальные зависимости.

Обозначим через t_{\max} время нарастания импульса. Пусть H_{0m} — максимальная величина тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля первичного источника в результате действия этого импульса в точке измерения, а H_{sm} — максимальная величина тангенциальной составляющей напряженности вторичного магнитного поля в точке измерения. Тогда отношение максимальной напряженности вторичного магнитного поля к максимальной напряженности первичного поля, т.е. величина относительной напряженности вторичного магнитного поля, будет равно: $H_{rm} = H_{sm} / H_{0m}$.

На основании проведенных нами исследований найдено, что зависимость величины H_{rm} от толщины d объекта из алюминия для источника поля в виде линейного индуктора может быть представлена двумя видами формул, первый из которых выглядит так:

$$H_{rm} = 0,6366 \arctg(ad + bd^2), \quad (1)$$

где H_{rm} — величина безразмерная, d измеряется в мм, а коэффициенты a и b — соответственно в мм^{-1} и мм^{-2} .

Измерения проведены на проекции оси линейного индуктора на плоскость магнитного носителя.

Указанному времени нарастания импульсов соответствуют следующие величины коэффициентов a и b : для $t_{\max} = 5$ мкс ($a = 19 \text{ мм}^{-1}$, $b = 250 \text{ мм}^{-2}$); для $t_{\max} = 10$ мкс ($a = 8,5 \text{ мм}^{-1}$, $b = 62 \text{ мм}^{-2}$); для $t_{\max} = 18$ мкс ($a = 6,6 \text{ мм}^{-1}$, $b = 19 \text{ мм}^{-2}$); для $t_{\max} = 60$ мкс ($a = 1,8 \text{ мм}^{-1}$, $b = 2,1 \text{ мм}^{-2}$).

Графики зависимостей величины H_{rm} от толщины d объекта из алюминия для разного времени нарастания импульсов показаны на рис. 1.

Здесь отмечены точки 10 — 13, в которых $H_{rm} = 0,3H_{0m}$, через которые проведены отрезки прямых 5—9. На рис. 1 отрезок прямой 8 сливается с зависимостью 4. Экспериментальные зависимости H_{sm} вблизи поверхности металлических пластин от их толщины получены нами ранее [1]. Начальные участки этих зависимостей являются линейными. Полученные нами в данной работе зависимости описываются функцией арктангенс. Начальные участки этих зависимостей с большой точностью можно считать линейными. Зададим точность измерений 1 %. Тогда с указанной точностью можно считать участки зависимостей 1—4 линейными вплоть до величины $H_{sm} = 0,3H_{0m}$. Параметры каждой экспериментальной точки на рис. 1 (и рис. 2) получены путем нахождения средних значений по 30 измерениям.

Как показано в [1], способность электропроводящего материала отражать электромагнитное поле может быть охарактеризована приведенной толщиной материала d_0 . Это толщина материала, при которой величина максимальной напряженности магнитного поля на его поверхности удваивается при условии выполнения линейной зависимости максимальной напряженности магнитного поля от

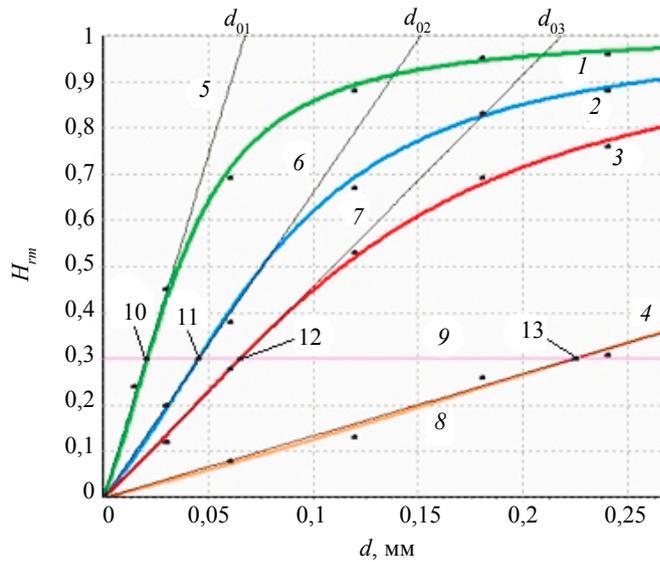


Рис. 1. Зависимости $H_{rm}(d)$ 1, 2, 3 и 4 для t_{\max} равные 5, 10, 18 и 60 мкс, построенные по (1); 5, 6, 7, 8, 9 — отрезки прямых, проходящих через точки 10—13.

толщины материала. Величину d_0 находили путем экстраполяции указанных линейных участков зависимостей 1—4 отрезками 5—8 прямых до удвоенной величины H_{0m} . Времени нарастания импульсов 5, 10, 18 и 60 мкс соответствуют приведенные толщины $d_{01} = 0,068$ мм, $d_{02} = 0,152$ мм, $d_{03} = 0,22$ мм и $d_{04} = 0,75$ мм.

На основании полученных результатов нами найдена зависимость H_{rm} от толщины d объекта из алюминия и времени нарастания импульса t_{\max} :

$$H_{rm} = 0,6366 \arctg(100c \cdot d/t_{\max} + 6250 c^2 \cdot d^2/t_{\max}^2), \quad (2)$$

где d измеряется в мм, t_{\max} — в мкс, а c — единичный коэффициент размерности, равный 1 мкс/мм.

Соответствующие указанным экспериментальным точкам зависимости относительной напряженности магнитного поля от толщины пластин из алюминия могут быть достаточно точно описаны также формулой, учитывающей смещение нулевого уровня сигнала:

$$H_{rm} = 0,11564 + 0,563 \arctg(ad + bd^2 - 0,21), \quad (3)$$

где d измеряется в мм, а коэффициенты a и b — соответственно в мм^{-1} и мм^{-2} .

Графики зависимостей $H_{rm}(d)$ объекта из алюминия, рассчитанные по (3), для разного времени нарастания импульсов показаны на рис. 2. Здесь также отмечены точки 10—13, в которых $H_{rm} = 0,3H_{0m}$, через которые проведены отрезки прямых 5—9. На рис. 2 отрезок прямой 8 (тонкая линия) расположен выше зависимости 4 и практически сливается с ней.

Указанному времени нарастания импульсов соответствуют следующие величины коэффициентов a и b : для $t_{\max} = 5$ мкс ($a = 20 \text{ мм}^{-1}$, $b = 250 \text{ мм}^{-2}$); для $t_{\max} = 10$ мкс ($a = 9 \text{ мм}^{-1}$, $b = 52 \text{ мм}^{-2}$); для $t_{\max} = 18$ мкс ($a = 6,6 \text{ мм}^{-1}$, $b = 19 \text{ мм}^{-2}$); для $t_{\max} = 60$ мкс ($a = 2 \text{ мм}^{-1}$, $b = 2 \text{ мм}^{-2}$).

Времени нарастания импульсов 5, 10, 18 и 60 мкс соответствуют приведенные толщины $d_{01} = 0,071$ мм, $d_{02} = 0,159$ мм, $d_{03} = 0,233$ мм и $d_{04} = 0,746$ мм. Таким образом, указанные значения d_0 близки найденным из графиков на рис. 1.

В этом случае зависимость относительной напряженности вторичного магнитного поля от толщины объекта из алюминия и времени нарастания импульса может быть представлена в виде:

$$H_{rm} = 0,11564 + 0,563 \arctg(100c \cdot d/t_{\max} + 6250 c^2 \cdot d^2/t_{\max}^2 - 0,21), \quad (4)$$

где, как и ранее, d измеряется в мм, t_{\max} — в мкс, а $c = 1$ мкс/мм.

Зависимости (1)—(4) получены для источника поля в виде линейного индуктора и могут отличаться от аналогичных зависимостей, полученных при воздействии на объект полями других

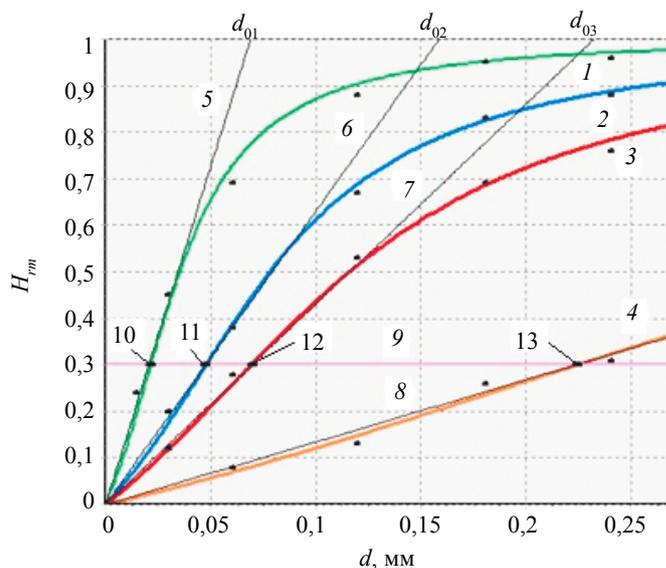


Рис. 2. Зависимости $H_m(d)$ 1, 2, 3 и 4 для t_{\max} , равные 5, 10, 18 и 60 мкс, построенные по (3); 5, 6, 7, 8, 9 — отрезки прямых, проходящих через точки 10—13.

источников, например, полем соленоида. Одной из причин такого отличия является зависимость распределения напряженности отраженного импульсного магнитного поля от соотношения толщины объекта и расстояния от него до оси индуктора.

Воздействуем на дискретный датчик [1] магнитного поля (ДДМП) серией из двух импульсов линейного индуктора. Применим разработанный нами метод нулевого максимума. Положение нулевого максимума соответствует проекции оси индуктора на ДДМП. При осуществлении указанного метода в результате воздействия вторым импульсом противоположного направления величина нулевого максимума должна быть равной нулю для получения максимальной чувствительности и оптимального диапазона измерения с этой чувствительностью. Расчет начальной кривой остаточного намагничивания применяемого ДДМП, представленной в виде зависимости величины электрического напряжения $U_1(H)$, снимаемого с преобразователя магнитного поля, сканирующего магнитный носитель с записанной на нем информацией, от напряженности H приложенного к нему магнитного поля, осуществляли с использованием найденной авторами функции [10]:

$$U_1 = 23,5 + 24,3 \operatorname{arctg}(0,011H - 1,45). \quad (5)$$

Расчет произведен в интервале напряженности магнитного поля $0 \leq H \leq 1000$ А/см. Электрическое напряжение выражено в милливольтгах, а напряженность магнитного поля измерили в А/см.

При намагничивании магнитного носителя вторым импульсом поля в обратном направлении зависимость сигнала от величины напряженности магнитного поля и от результатов предшествующего воздействия находили по [10]:

$$U_{2i} = -23,5 + 0,61U_1 + (24,5 + 0,4U_1) \operatorname{arctg}((0,011 + 0,000087U_1)H + 1,45 - 0,0016U_1). \quad (6)$$

Расчет произведен в интервале напряженности магнитного поля $-1000 \text{ А/см} \leq H \leq 0$.

Гистерезисные ветви магнитного носителя, рассчитанные по (5) и (6), представлены на рис. 3 для разных начальных значений электрического напряжения, соответствующих разным величинам остаточного намагничивания магнитного носителя (МН). Зависимости 1, 2 (восходящие ветви гистерезиса) получены при намагничивании МН в прямом направлении, а зависимости 3, 4 (нисходящие ветви гистерезиса) — при намагничивании в обратном направлении.

Зададим максимальную напряженность магнитного поля первого импульса, равную $H_{0m1} = 360$ А/см (ось б). Воздействуем этим импульсом на МН без объекта и переходим из начальной точки 9 (0 мВ) в точку 10 и далее в точку 11 (54 мВ) на оси 5.

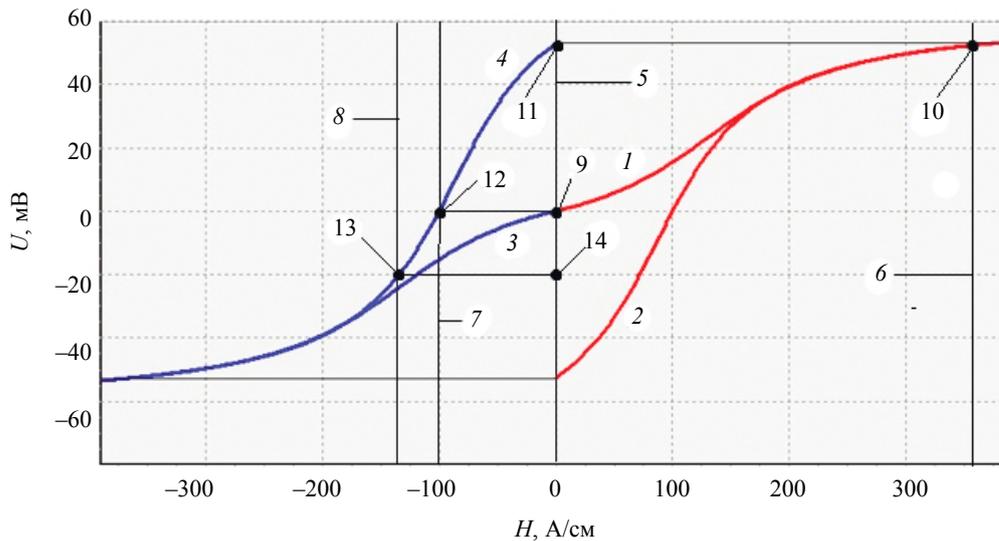


Рис. 3. Зависимость величины электрического напряжения, снимаемого с магнитного гистерезиса (МГ), от напряженности воздействующего магнитного поля $U(H)$.

Зададим максимальную напряженность магнитного поля второго импульса, равную $H_{0m2} = -100$ А/см (ось 7). Воздействуем этим импульсом на намагниченный первым импульсом магнитный носитель без объекта и переходим из точки 11 в точку 12 (0 мВ) и далее в начальную точку 9.

Выведем первым импульсом магнитный носитель в состояние, соответствующее точке 11. Воздействуем на МН с алюминиевой пластиной толщиной 0,05 мм вторым импульсом магнитного поля с $H_{0m2} = -100$ А/см и $t_{\max} = 10$ мкс. Тогда согласно рис. 1 величина $H_{rm2} = 0,34H_{0m2}$ и суммарная максимальная напряженность магнитного поля вблизи поверхности пластины будет равна -134 А/см (ось 8). В результате по гистерезисной ветви 4 мы попадаем в точку 13 и далее в точку 14 (-20 мВ).

Рассчитанные по (1) и (3) на основании экспериментальных данных зависимости и графики на рис. 1 и рис. 2 позволяют более точно определить толщину пластин по сравнению с найденными ранее зависимостями [1].

В (6) используется абсолютная величина напряженности магнитного поля H . Поскольку мы используем метод нулевого максимума, то максимальная величина U_{2i} должна быть равна нулю в отсутствие объекта. На основании зависимости 4 на рис. 3 находим величину напряженности соответствующего магнитного поля $H_{0m} = -100$ А/см. Объект создает вторичное магнитное поле, напряженность которого определяется по (1). С учетом сказанного в (6) подставляем следующее выражение для напряженности магнитного поля:

$$H = H_{0m} (1 + 0,6366 \arctg(ad + bd^2)), \quad (7)$$

где $H_{0m} = -100$ А/см.

Графики зависимостей $U_{2i}(d)$, найденных по (6) с использованием (7) и с соответствующими коэффициентами для разного времени нарастания импульсов магнитного поля, изображены на рис. 4.

Из графиков на рис. 4 следует, что начальные участки всех указанных зависимостей с точностью до 1 % можно считать линейными вплоть до напряжения 15 мВ.

Полученные формулы для построения зависимостей величины сигнала $U_{2i}(x)$ от координаты x могут быть применены для контроля объектов разной формы. Так, на рис. 5 представлены зависимости $U_{2i}(x)$ для клина при разном времени нарастания импульса поля.

Толщина клина изменяется с координатой по его длине по формуле $d = 0,1x$, которую подставили в (7), т.е. толщина клина в точке $x = 0$ равна нулю. Естественно, что графики на рис. 5 имеют такой же вид, что и графики на рис. 4. При этом чувствительность и точность определения толщины объекта в интересующих диапазонах измерения могут быть определены из кривых 1 — 4 и устанавливаемого порогового уровня сигнала 5, обеспечивающего, как и ранее, точность контроля около 1 %.

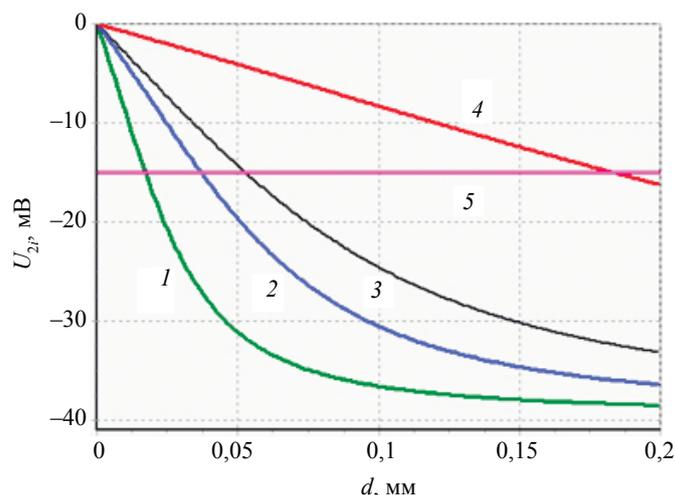


Рис. 4. Зависимости $U_{2l}(d)$ для t_{\max} : 1 — 5 мкс; 2 — 10 мкс; 3 — 18 мкс; 4 — 60 мкс; 5 — уровень чувствительности.

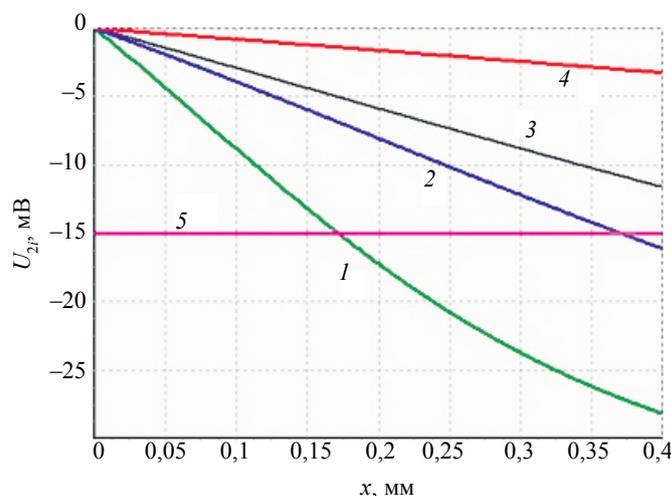


Рис. 5. Зависимости $U_{2l}(x)$ для клина при t_{\max} : 1 — 5 мкс; 2 — 10 мкс; 3 — 18 мкс; 4 — 60 мкс; 5 — уровень чувствительности.

Для определения оптимальных параметров импульсов магнитного поля при использовании метода нулевого максимума провели исследование влияния величины напряженности магнитного поля H_{0m} в (6) на результаты измерений, которые представлены на рис. 6. Графики 1 — 6 зависимостей $U_{21} — U_{26}$ на этом рисунке построены для времени нарастания импульса поля 5 мкс по формуле:

$$H = H_{0m} (1 + 0,6366 \arctg(19d + 250d^2)). \quad (8)$$

Из рис. 6 видно, что максимальная чувствительность (и точность) измерений достигается в интервале зависимостей от $d = 0$ до точек пересечения указанных зависимостей с прямой 7:

$$U_{27} = U_0 + \gamma d, \quad (9)$$

где $U_0 = -60$ мВ; $\gamma = 2330$ мВ/мм. Из графиков на рис. 6 можно найти диапазоны чувствительности при разных величинах H_{0m} .

Как показали исследования, зависимости $H_{rm}(d)$ для пластин из свинца совпадают с аналогичными зависимостями для пластин из алюминия при условии, что их толщина в 9 раз больше. Удельная электропроводность свинца во столько же раз меньше удельной электропроводности

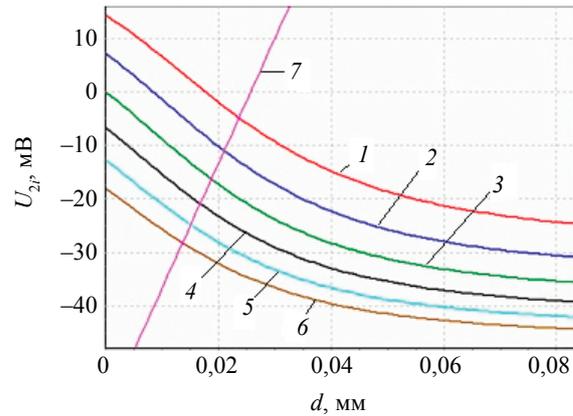


Рис. 6. Зависимости $U_{2r}(d)$ для величины H_{0m} : 1 (- 80 A/см); 2 (- 90 A/см); 3 (- 100 A/см); 4 (- 110 A/см); 5 (- 120 A/см); 6 (- 130 A/см); 7 — уровень чувствительности U_{27} .

алюминия. Тогда для объектов из свинца формулы для относительной напряженности будут выглядеть следующим образом:

$$H_{rm} = 0,6366 \arctg(11c + d/t_{\max} + 77c^2 \cdot d^2 / t_{\max}^2), \quad (10)$$

$$H_{rm} = 0,11564 + 0,563 \arctg(11c \cdot d/t_{\max} + 77c^2 \cdot d^2 / t_{\max}^2 - 0,21), \quad (11)$$

Зависимости $H_{rm}(d)$ для алюминия и свинца, рассчитанные по формулам (10) и (11), изображены на рис. 7.

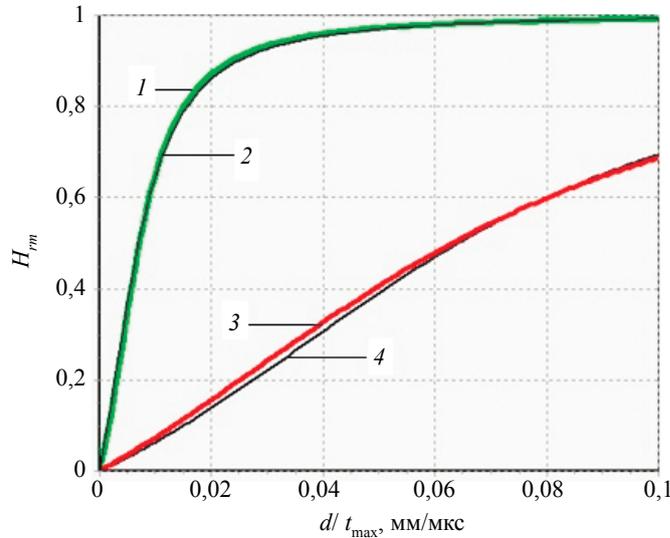


Рис. 7. Зависимости $H_{rm}(d)$: 1 и 2 для алюминия, построенные по (2) и (4), и зависимости 3 и 4 для свинца, построенные по (10) и (11); $t_{\max} = 18$ мкс.

Пример использования полученных зависимостей $H_{rm}(d)$ для пластин из алюминия разной толщины при воздействии на них полем линейного индуктора с $t_{\max} = 10$ мкс показан на рис. 8. Здесь представлена зависимость 1 (часть зависимости 2, рис. 1) и оптические изображения магнитных полей для этих пластин, совмещенные с соответствующими точками зависимости 1. Размах сигнала составляет 1,7 мВ для толщины пластины 0,055 мм (отрезок белой вертикальной прямой). Для пластины 0,06 мм он равен 0, а для пластины 0,065 мм размах сигнала составляет -1,6 мВ. Отрицательный знак означает, что соответствующий участок МН перемагничен вторым

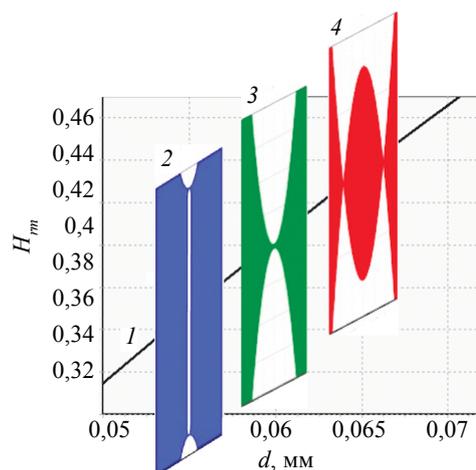


Рис. 8. Зависимость $H_m(d)$ 1 и оптические изображения магнитных полей 2, 3 и 4 для d соответственно 0,055 мм, 0,06 мм и 0,065 мм; $t_{\max} = 10$ мкс.

импульсом поля противоположного направления. Здесь использован разработанный метод нулевого максимума, значительно повышающий чувствительность и точность контроля толщины объектов. При этом найдены такие параметры двух импульсов магнитного поля, в результате воздействия которыми сигнал, снимаемый с МГ, равен 0 для пластины из алюминия толщиной 0,06 мм. Диапазон измерения $1,7 \text{ мВ} + 1,6 \text{ мВ} = 3,3 \text{ мВ}$ при интервале толщин $0,065 \text{ мм} - 0,055 \text{ мм} = 0,01 \text{ мм}$. Отсюда находим чувствительность 330 мВ/мм .

Чувствительность и точность контроля могут быть значительно повышены, если настройку на нулевой уровень считываемого сигнала производить не в отсутствие объекта, а для объекта заданной толщины, например для пластины толщиной 0,06 мм.

Из зависимостей (10) и (11) с учетом удельной электропроводности материалов могут быть найдены также обобщенные зависимости $H(d)$ для пластин из алюминия и свинца.

Получаемые гистерезисные картины не являются просто результатом алгебраических операций с изображениями магнитных полей. Они соответствуют реальным распределениям остаточных магнитных полей МН (остаточной намагниченности МН) в результате воздействия на них последовательностями импульсов. Точность контроля в случае использования HI увеличивается, в частности, благодаря тому, что увеличивается отношение величины измеряемого сигнала к диапазону измерения. Поскольку количество вариантов составления серий из нескольких импульсов по амплитуде, знаку, времени нарастания и их последовательности практически неисчерпаемо, то можно получать разные соотношения максимумов интерференции в разных интервалах измерения и составлять алгоритмы их оптимального использования.

Так как повышение точности определения толщины объектов связано с повышением точности нахождения распределений импульсных магнитных полей на их поверхности, то полученные гистерезисные картины позволяют повысить точность контроля удельной электропроводности их материала и дефектов сплошности в них, как это показано в предшествующих работах авторов.

ВЫВОДЫ

На основании полученных экспериментальных зависимостей максимальной напряженности вторичного импульсного магнитного поля вблизи поверхности металлических пластин от их толщины $H(d)$ найдены арктангенсные аналитические функции $H(d)$, позволяющие повысить чувствительность и точность контроля толщины металлических объектов, электропроводности их материала и дефектов сплошности в них.

Зависимости $H(d)$ представлены двумя практически равнозначными функциями арктангенс и использованы для расчетов гистерезисной интерференции импульсного магнитного поля в отраженной волне. Зависимости $H(d)$ получены с помощью дискретного датчика магнитного поля и отнесены к напряженности поля первичного источника, в качестве которого использовали линейный индуктор. Из полученных зависимостей с учетом удельной электропроводности материалов могут быть найдены также обобщенные зависимости $H(d)$ для пластин из алюминия и свинца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Nondestructive control of objects made of electroconductive materials in pulsed magnetic fields // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2010. V. 46. No. 1. P. 810—818.
2. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S., Pivovarov V.L.* Calculation of residual magnetic-field distributions upon hysteretic interference of a pulsed magnetic field // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. V. 51. No. 1. P. 8—16.
3. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Imaging Electric Signals of a Magnetic Field Transducer with Hysteretic Interference for Testing Metals in Pulsed Magnetic Fields // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 11. P. 907—914.
4. *Астахов В.И., Данилина Э.М., Еришов Ю.К.* К вопросу о диагностике пластины с трещиной вихретоковым методом // Дефектоскопия. 2018. № 3. С. 39—49.
5. *Киселев Е.К., Гольдштейн А.Е.* Вихретоковая система контроля внутреннего диаметра труб // Дефектоскопия. 2019. № 3. С. 25—30.
6. *Ферстер Ф.* Неразрушающий контроль методом магнитных полей рассеяния. Теоретические и экспериментальные основы выявления поверхностных дефектов конечной и бесконечной глубины // Дефектоскопия. 1984. № 12. С. 13—18.
7. *Жданов А.Г., Щукис Е.Г., Лунин В.П., Столяров А.А.* Алгоритмы предварительной обработки вихретоковых сигналов при контроле теплообменных труб парогенераторов АЭС // Дефектоскопия. 2018. № 4. С. 54—64.
8. *Печенков А.Н., Щербинин В.Е.* Вихревые токи и поля проводящих и намагничивающихся шаров включений в немагнитную среду // Дефектоскопия. 2016. № 4. С. 48—55.
9. *Санников М.А.* Влияние кривизны поверхности трубопровода при диагностике вихретоковыми приборами // Контроль. Диагностика. № 9. 2006. С. 24—27.
10. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Hysteretic Interference of Time-Overlapping Magnetic Field Pulses // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 12. P. 949—956.
11. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Differential Background of Electric Signal Readfrom an Induction Magnetic Head // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 8. P. 706—716.
12. *Атавин В.Г., Узких А.А., Исхужин Р.Р.* Отстройка от электропроводности основания при измерении толщины токопроводящих покрытий методом вихревых токов // Дефектоскопия. 2018. № 1. С. 58—64.
13. *Лухвич А.А., Шарандо В.И., Шукевич А.К., Янушкевич К.И.* Выявление ферромагнитной составляющей в нержавеющей сталях магнитодинамическим методом // Дефектоскопия. 2015. № 3. С. 3—10.
14. *Лухвич А.А., Булатов О.В., Лукьянов А.Л.* Контроль толстослойных никелевых покрытий на двухслойных (неферромагнетик—ферромагнетик) основаниях магнитодинамическим методом толщинометрии // Дефектоскопия. 2014. № 4. С. 3—12.
15. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Testing for Defects in Pulsed Magnetic Field Transmitted Through Metal // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 10. P. 856—864. [*Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С.* Контроль дефектов в прошедшем через металл импульсном магнитном поле // Дефектоскопия. 2021. № 10. С. 25—33.]
16. *Суханов Д.Я., Совпель Е.С.* Магнитоиндукционная томография электрических схем и приборов // Известия высших учебных заведений. 2015. Т. 58. № 10/3. С. 73—75.
17. *Скворцов Б.Г., Самсонов А.С., Борминский С.А., Живоносная Д.М.* Теоретические основы контроля токопроводящих покрытий топливных баков летательных аппаратов // Дефектоскопия. 2017. № 5. С. 46—54.