

УДК 620.179.14

Контроль неоднородности структуры сварного шва вихретоковым методом.

Часть I

В. Г. Герасимов, А. А. Переверзев, Л. А. Чернов

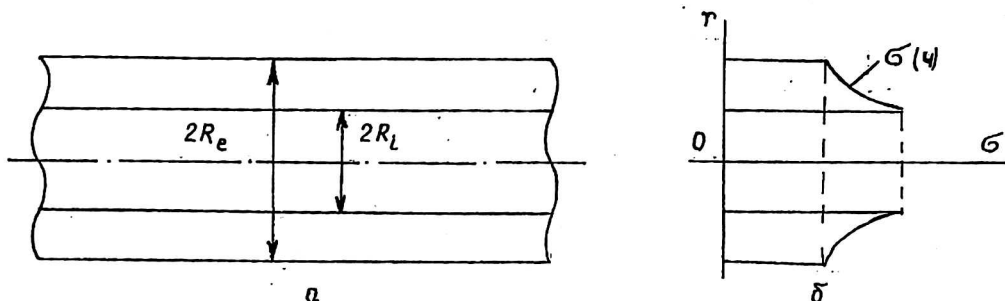
Московский энергетический институт (Технический университет), Москва, Россия

Обоснована постановка и проведен обзор по методам решения обратной задачи вихретокового контроля. Для объекта контроля в виде немагнитной трубы с неравномерным распределением электропроводимости (ЭП) металла по радиусу намечены общий алгоритм и алгоритм решения прямой задачи определения вносимого напряжения для искомого объекта контроля.

Задачи определения срока службы остаточного ресурса объекта могут быть решены при условии знания структурного состояния объекта, в особенности его поверхностных слоев. Поверхностные и приповерхностные слои подвержены воздействию высоких температур (сварка, поверхностная закалка), что приводит к насыщению металла посторонними веществами (углерод, водород, азот и т. п.). Это приводит к изменению механических и коррелирующих с ними электрофизических свойств металла (удельной электропроводимости σ и магнитной проницаемости μ). При вихретоковом контроле эта задача признана важной, и ее решение имеет важное значение в области определения характеристик изделия и параметров дефектов в проводящих материалах.

В работе [1] приведено численное решение задачи о расчете сигналов накладного преобразователя над объектом с изменяющимися по глубине электрическими и магнитными свойствами. В ряде работ [2, 3] в области вихретокового неразрушающего контроля рассмотрены задачи по восстановлению функции распределения ЭП по измеренным значениям вносимого напряжения или импеданса (как функции положения измерительного преобразователя, частоты возбуждения или обоих параметров). К сожалению, не указываются численные результаты проведенных исследований, отсутствуют анализ погрешностей восстановления зависимости ЭП и описание программных реализаций полученных решений.

Таким образом, отсутствует решение задачи о распределении значений электропроводимости (и коррелирующих с ней параметров структурного состояния) по объему объекта контроля. Эта задача решается в данной работе. В качестве объекта контроля рассмотрены немагнитные проводящие цилиндры (трубы) с изменяющейся по радиусу удельной магнитной проводимостью (рисунок).



Объект контроля:

а — немагнитная труба; *б* — распределение электропроводимости по радиусу

Обоснование алгоритма решения задачи

Выбор математической модели

В исходной задаче можно выделить:

прямую задачу расчета вносимого напряжения в присутствии немагнитной проводящей трубы с произвольной зависимостью ЭП вдоль радиуса;

обратную задачу нахождения радиальной зависимости ЭП в описанном выше объекте контроля по результатам измерений определенного количества комплексных значений вносимого напряжения.

Формальная постановка прямой задачи не вызывает затруднений: полагая функциональную зависимость ЭП от радиуса известной, проводим ее кусочно-постоянную аппроксимацию. Это позволяет свести исходную задачу к расчету напряжения в зависимости от параметров многослойной трубы, в каждом слое которой ЭП принимает постоянное значение. Рекуррентные формулы для произвольного количества и толщин слоев хорошо известны [4]. Существенно сложнее решение обратной задачи нахождения ЭП по результатам измерения вносимого напряжения. С математической точки зрения эта задача относится к разряду некорректных [5]. Это проявляется в том, что “малым” изменениям вносимых величин (спектра вносимых напряжений) соответствуют “большие” изменения контролируемых параметров (локальных значений ЭП). При наличии реальной вычислительной погрешности это приводит к тому, что одному и тому же ограниченному набору измерений может отвечать много (формально бесконечно много) радиальных распределений ЭП. Причем в процессе счета некорректной задачи, если не принять превентивных мер и считать задачу “влоб”, как если бы она была корректной, вычислительный процесс за счет неустойчивости сводится в заведомо худшую сторону. В нашем случае это означает, что полученные реализации хотя и обеспечивали бы требуемое совпадение измеренного и вычислительно-го напряжения, но были бы явно нефизичны за счет осцилляций искомого распределения ЭП. Причем амплитуда и частота осцилляций ЭП росли бы при увеличении числа независимых параметров аппроксимации ЭП (коэффициентов полинома — в случае полиномиальной аппроксимации, количества узлов — при сплайн-аппроксимации).

Ситуация тем более усложняется при наличии реально существующей погрешности измерений вносимого напряжения, которое на несколько порядков превышает вычислительную погрешность и на практике не может быть меньше 1—3 % от измеряемого сигнала. Вследствие этого важнейшую роль в решении обратных задач такого типа играет априорная информация. Эту дополнительную информацию можно получить из общих принципов, гипотез, результатов других экспериментов и естественных ограничений, обусловленных планируемой процедурой эксперимента. Дополнительная информация является определяющей для единственности и устойчивости решения обратной задачи. Более того, природа дополнительной информации в значительной степени определяет характер задачи (обратной или прямой). Поэтому для выделения из множества допустимых реализаций решения именно “истинного”, “физического” решения в алгоритмах расчета ЭП необходимо использовать дополнительно, как априорную информацию, те критерии, которые позволяют отличать “физическое” решение от “недопустимого” [5].

Способы учета таких критериев могут быть различны. Наиболее общим и простым в реализации служит условие минимизации в процессе расчета нормы искомого решения [5, 6]. Этот подход классически реализуется в поста-

новке, соответствующей минимизационной задаче для квадратичного функционала и регуляризации ее в смысле [5–7]. В наших условиях это выглядит следующим образом.

Пусть имеется массив измеренных комплексных значений вносимого напряжения U'_i на N частотах, $i = 1, \dots, N$, отвечающий некоторой радиальной зависимости ЭП.

Требуется определить для выбранного типа аппроксимации ЭП значения аппроксимации σ_k , $k = 1-M$). Согласно классической схеме строится квад-

ратичный функционал невязки измеренных и вычисленных U_i (для текущей зависимости ЭП от радиуса) значений вносимого напряжения, дополненный слагаемым, обеспечивающим минимизацию нормы узловых значений ЭП

$$\Phi_* = a \sum_{k=1}^M \sigma_k^2 + \sum \left| U'_i - U_i \right|^2, \quad (1)$$

где $a > 0$ — дополнительный весовой параметр, регулирующий неявно степень “гладкости” решения.

Схема (1) имеет, как минимум, два преимущества:

обеспечивает регуляризацию простейшим образом в рамках использования квадратичного функционала;

как следствие, позволяет использовать для решения некорректных задач хорошо известные и легко программируемые методы минимизации квадратичных функционалов [5].

Требования минимизации нормы решения и, как следствие, выбор “гладкой” реализации в нашем случае будут приходиться в противоречие с физикой задачи и не позволят в принципе находить решения с выраженным приповерхностным изменением ЭП, соответствующие начальному этапу измерения ЭП в объекте контроля. Кроме того, для выбора параметра регуляризации a в (1) трудно дать какие-то априорные рекомендации, и обычно подходящие значения a можно подобрать только после ряда численных экспериментов решением однотипных задач. Изменение характера искомого решения обычно приводит к необходимости поиска “своего” значения a . Существует также и принципиальный недостаток, состоящий в построении функционала (1) как квадратичного, единого для всех измерений. Минимум (1) в общем случае не гарантирует минимизацию отклонения для произвольного i -го измерения вследствие нелокальности минимизированного условия.

Указанные проблемы в заметной степени можно смягчить подходом, основанном на выборе более жесткого критерия минимизации, а именно локального (в смысле Чебышева), и постановкой исходной минимизационной задачи как задачи нелинейного программирования с явно заданными ограничениями на искомые переменные. В этом случае исчезает необходимость формальной регуляризации в смысле [5], т. е. путем “искажения” исходного функционала регуляризирующими членами. Это происходит потому, что значительную часть опорных требований к искомому решению можно удовлетворить, управляя ограничениями на параметры минимизации (в нашем случае узловых значения ЭП). Тем не менее, как показывают численные эксперименты, проблема некорректности задачи остается и в этом случае.

Аппроксимация решения

В связи с критичностью алгоритмов решения обратных (некорректных) задач несколько большее значение, чем для корректных, приобретает выбор

характера аппроксимации искомого решения [5]. В выбор в качестве искомого параметра непосредственно значений ЭП следовало бы признать неудачным вследствие получаемого при этом чрезмерно большого количества искомого параметра. Наиболее естественным путем снижения числа независимых параметров минимизации (т. е. размерности задачи) являются использование какой-либо аппроксимации с M -узловыми параметрами и последующее вычисление M' значений ЭП для кусочно-постоянной аппроксимации. Поскольку при удачном выборе характера аппроксимации $M < M'$ или даже $M \ll M'$, то это снижает размерность минимизационной задачи и облегчает процесс практического нахождения решения.

В общем случае удачным следует признать сплайн-аппроксимацию как обладающую, при прочих равных условиях, лучшими точностью и устойчивостью при росте числа узлов, чем другие виды (полиномиальная, тригонометрическая и пр.). Но все же для приповерхностного измерения ЭП, характерного для нашей задачи, требуется использование сплайна не менее чем для семи узлов, а для этой размерности уже заметна некорректность задачи даже при отсутствии погрешности измерения (модельная задача) и даже при использовании постановки задачи как локальной минимизационной в смысле Чебышева. Учитывая качественный характер измерения механических свойств в объекте контроля и соответствующий ему характер распределения ЭП, будем в своих алгоритмах расчета использовать трехпараметровую экспоненциальную аппроксимацию ЭП вида

$$\sigma(x) = Ae^{-2x} + B, \quad x \in [0, 1], \quad (2)$$

где условная координата x направлена внутрь тела от поверхности, которой соответствует $x = 0$.

Выражая параметры A, B через узлы электропроводности на $x = 0$ (σ_0) и на "бесконечности" (σ_∞ для исходного значения ЭП материала), из (2) получим

$$\sigma(x) = (\sigma_0 - \sigma_\infty)e^{-ax} + \sigma_\infty,$$

причем, если $x = 0$ соответствует внешней поверхности трубы (см. рисунок, б)

$r = R_e, r \in [R_i, R_e]$, имеем $x = \frac{R_e - r}{R_e - R_i}$; $\sigma_0 = \sigma_e$, то для внутренней поверх-

ности имеем $x = \frac{r - R_i}{R_e - R_i}$; $\sigma_i = \sigma_\infty$.

Ограничения для σ_0, σ_∞ выбираются естественным образом. Параметр $a \in [0..a_0]$, где a_0 имеет смысл связать с наименьшей возможной шириной интервала h , на котором ЭП уменьшается в δ раз по сравнению со значением на поверхности, где $x = 0$, т. е. $e^{-a_0 h} = \delta$ или

$$a_0 = \frac{1}{h} \ln \frac{1}{\delta}.$$

Тем самым ограничение на параметр a связано с минимально возможной шириной h приповерхностного слоя.

Решение прямой задачи

Как уже указывалось, после выбора аппроксимации и сведения задачи к задаче о многослойной трубе, построение схемы расчета прямой задачи не вызывает принципиальных затруднений. В соответствии с [4] вносимое нормированное напряжение в этом случае определяется следующим выражением:

$$U_{\text{вн}}^* = j(\mu_n - 1), \tag{3}$$

где эффективная магнитная проницаемость μ_i i -го слоя определяется из рекуррентного соотношения

$$\mu_i = \frac{2}{x_{ii}} \frac{K_1(x_{ij})I(x_{ii}) - I_1(x_{ij})K_1(x_{ii}) + \frac{x_{ij}}{2} \mu_j [K_0(x_{ij})I(x_{ii}) + I_0(x_{ij})K_1(x_{ii})]}{K_1(x_{ij})I(x_{ii}) + I_1(x_{ij})K_1(x_{ii}) + \frac{x_{ij}}{2} \mu_j [K_0(x_{ij})I(x_{ii}) - I_0(x_{ij})K_1(x_{ii})]},$$

$$j = i - 1; \quad i = 2, \dots, n; \quad \mu_1 = \frac{2}{x_{11}} \frac{I_1(x_{11})}{I_1(x_{11})}; \quad x_{ij} = R_j \sqrt{j\omega\mu_0\sigma_i}; \quad x_{ii} = R_i \sqrt{j\omega\mu_0\sigma_i}.$$

Для приведения соотношений (3) к расчетному виду выразим модифицированные функции Бесселя $I_m(z)$, $K_m(z)$, $m = 0, 1$ от комплексного аргумента вида $x = x_j$, $j = \sqrt{-1}$, x — действительно, через функции Кельвина с помощью соотношений [8]:

$$\begin{cases} I_m(x_j) j^m = ber_m(x) + jbei_m(x), \\ I_m(x_j) j^{-m} = ker_m(x) + jkei_m(x) \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} I_0(x_j) = ber_0(x) + jbei_0(x) & K_0(x_j) = ker(x) + jkei(x), \\ I_1(x_j) = ber_1(x) + jbei_1(x) & K_1(x_j) = -kei_1(x) + jker_1(x). \end{cases} \tag{4}$$

Для функций ber , bei , ker , kei и их производных ber' , bei' , ker' , kei' аппроксимационные формулы обеспечивают погрешность не выше 10^{-8} для всего диапазона действительного аргумента $x \in [0... \infty]$. Тогда, выражая в (4) функцию Кельвина первого порядка через производные функций Кельвина нулевого порядка с помощью соотношений:

$$\begin{aligned} ber_1 &= \frac{ber' - bei'}{\sqrt{2}}, & ker_1 &= \frac{ker' - kei'}{\sqrt{2}}, \\ bei_1 &= \frac{ber' + bei'}{\sqrt{2}}, & kei_1 &= \frac{ker' + kei'}{\sqrt{2}}, \end{aligned}$$

получим для (4) в окончательном виде для модифицированных функций Бесселя первого порядка:

$$\begin{cases} I_i(x_j) = ber' \frac{1-j}{\sqrt{2}} + bei' \frac{1+j}{\sqrt{2}}, \\ K_1(x_j) = -ker' \frac{1-j}{\sqrt{2}} - kei' \frac{1+j}{\sqrt{2}}. \end{cases} \tag{5}$$

Соотношения (4) и (5) с аппроксимациями для функций Кельвина [8], согласно (3), полностью решают проблему вычисления вносимого напряжения.

Литература

1. Кулаев Ю. В. Возможности применения методов теории синтеза излучающих систем в задачах электромагнитного контроля: Тр. МЭИ, 1980. № 453. С. 12–18.
2. Bowler J. R. Eddy current calculations using half-space Green's functions//Journal of Applied Physics. 1987. V. 61. № 3. P. 833–839.
3. Bowler J. R., Norton S. J. Theory of eddy current inversion//Ibid. 1993. V. 73. P. 501–512.

4. Герасимов В. Г. Электромагнитный контроль однослойных и многослойных изделий. — М.: Энергия, 1972. С. 160.
5. Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1990. С. 230.
6. Сухарев А. Г., Тимохов А. Г., Федоров В. В. Курс методов оптимизации. — М.: Наука, 1986. С. 326.
7. Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченова Н. В. Вычислительные методы решения инженерных задач. — М.: Изд-во МЭИ, 1992. С. 118.
8. Справочник по специальным функциям/Под ред. М. Абрамовица и Н. Смиган. — М.: Наука, 1979. С. 523.

Eddy current impure composition testing of weld.

Part I

V. G. Gerasimov, A. A. Pereverzev, L. A. Chernov
Moscow Power Engineering Institute (Technical University), Moscow, Russia

The problem definition was vindicated and the review of different methods of inverse problem of eddy current monitoring solution was accomplished. For the monitored object in a form of antimagnetic tube with non-uniform radial distribution of electrical conduction in metal the basic (common) algorithm and the algorithm for solution of primal problem of inducted voltage determination for the desired monitored object were outlined.