

Б.М. ГОРКУНОВ, канд. техн. наук, проф. НТУ "ХПИ", Харків
А.А. ТИЩЕНКО, аспирант НТУ "ХПИ", Харків

МЕТОД СУПЕРПОЗИЦИИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ГЛУБИНЫ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

У роботі запропоновано метод суперпозиції для визначення глибини зміцненого шару об'єкта за результатами вихрострумового контролю на основі рішення зворотної електромагнітної задачі з використанням методів лінійного програмування.

In work the method of superposition for definition of depth of the hardened layer of object by results eddy current control on the basis of decision of reverse electromagnetic task and with the use of methods of the linear programming is offered.

Введение. Значительное количество деталей производственного оборудования работает в условиях изнашивания, циклических нагрузок, коррозии, при которых максимальные напряжения возникают в поверхностных слоях металла, где сосредоточены основные концентраторы напряжения. Для повышения надежности и долговечности деталей и узлов, а вследствие этого и производственного оборудования в целом применяют методы поверхностного упрочнения. При сохранении достаточно высокой пластичности, вязкости и трещиностойкости данные методы повышают вышеуказанные характеристики и снижают расход металла на их изготовление вследствие уменьшения сечения деталей. Исходя из выше изложенного, можно выделить еще один немаловажный вопрос: контроль упрочненного слоя. Данный контроль можно осуществлять разрушающими и неразрушающими методами [1-3]. Весьма перспективным с точки зрения быстрей действия, достоверности и точности контроля является вихретоковый метод неразрушающего контроля, выходной сигнал которого несет информацию об электромагнитных свойствах исследуемого образца.

Постановка задачи. Исходя из анализа научно-технической литературы [4, 5], можно сделать вывод, что в зависимости от метода упрочнения электромагнитные свойства металлов изменяются в определенных границах, и более того, существует четкий или нечеткий переход между упрочненным слоем и сырым металлом. Таким образом, в качестве основного критерия определения качества изделий можно использовать глубину упрочненного слоя. Задачей настоящей работы является описание влияния структуры упрочненного слоя металлических изделий с учетом изменения электромагнитных свойств на выходные сигналы вихретокового преобразователя (ВТП).

Основная часть. На рис. 1 приведена физическая модель цилиндрического объекта контроля (ОК) в продольном однородном

электромагнитном поле, который представляет собой двухслойную катушку с количеством витков 1-го (упрочненного) слоя W_{k1} , 2-го слоя W_{k2} . Количество витков намагничивающей и измерительной обмотки ВТП W_n и W_i соответственно.

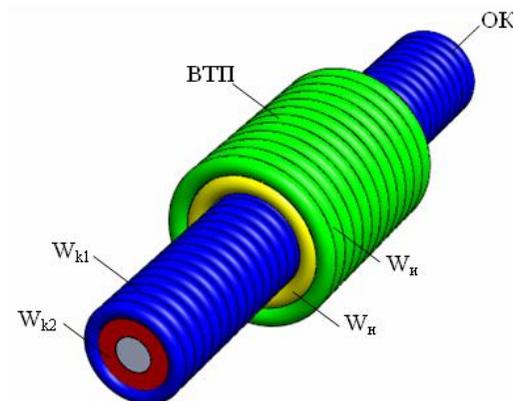


Рис. 1. Модель ВТП с цилиндрическим образцом, поверхность которого представляет собой двухслойную катушку

Как известно, при упрочнении меняются электромагнитные параметры поверхностного слоя [6], т.е. для нашей модели можно принять, что упрочненному слою соответствует относительная магнитная проницаемость μ_{r1} и удельное электрическое сопротивление ρ_1 , сырому металлу – μ_{r2} и ρ_2 . Применение метода суперпозиции элементарных токов в обмотках преобразователя и индуцированных вихревых токов в объекте контроля позволяет свести решение модели к системе линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{pmatrix} \dot{Z}_{nn} & \dot{Z}_{ni} & \dot{Z}_{nk1} & \dot{Z}_{nk2} \\ \dot{Z}_{in} & \dot{Z}_{ii} & \dot{Z}_{ik1} & \dot{Z}_{ik2} \\ \dot{Z}_{k1n} & \dot{Z}_{k1i} & \dot{Z}_{k1k1} & \dot{Z}_{k1k2} \\ \dot{Z}_{k2n} & \dot{Z}_{k2i} & \dot{Z}_{k2k1} & \dot{Z}_{k2k2} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \dot{I}_n \\ \dot{I}_i \\ \dot{I}_{k1} \\ \dot{I}_{k2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{E} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

где \dot{Z}_{nn} , \dot{Z}_{ni} , \dot{Z}_{k1k1} , \dot{Z}_{k2k2} – подматрицы, описывающие взаимодействие между витками одних и тех же обмоток: W_n , W_i , W_{k1} , W_{k2} соответственно; \dot{Z}_{ni} , \dot{Z}_{nk1} , \dot{Z}_{nk2} , \dot{Z}_{in} , \dot{Z}_{ik1} , \dot{Z}_{ik2} , \dot{Z}_{k1n} , \dot{Z}_{k1i} , \dot{Z}_{k1k2} , \dot{Z}_{k2n} , \dot{Z}_{k2i} , \dot{Z}_{k2k1} – подматрицы, описывающие взаимодействие между витками соответствующих обмоток; \dot{I}_n , \dot{I}_i , \dot{I}_{k1} , \dot{I}_{k2} – токи, протекающие в соответствующих обмотках.

Таким образом, мы можем рассчитать сигналы ВТП от упрочненного и сырого металла ОК и совместный сигнал системы ВТП-ОК при упрочнении поверхности металла при разных частотах зондирующего поля.

Применение для описания модели системы линейных алгебраических уравнений позволяет решить обратную электромагнитную задачу, т.е. восстановить структуры объекта контроля по измеренным выходным сигналам вихретокового датчика методами линейного программирования в системе Matlab. В качестве известных параметров принимаются измеренные значения намагничивающего тока \dot{I}_H , амплитуды E_Σ и фазы φ_Σ выходного сигнала ВТП. В качестве неизвестных вихревых токов \dot{I}_{k1} , \dot{I}_{k2} принимаются предварительно рассчитанные значения для идеализированной модели объекта контроля с упрочненным слоем, а соответствующие коэффициенты \dot{Z} рассчитываются согласно предложенным в работах [7, 8] формулам.

В качестве объекта исследования был выбран цилиндрический образец длиной $l=30,5$ мм и радиусом $r=7,5$ мм, выполненный из Ст. 45, который предварительно прошел процесс упрочнения. Образец помещался в трансформаторный вихретоковый преобразователь, имеющий следующие параметры: количество витков намагничивающей и измерительной обмоток $W_H = 525$ витков и $W_H = 20$ витков соответственно, длина обмоток $l_H = l_H = 240$ мм, диаметр измерительной обмотки $d_H = 27,7$ мм. Далее регистрировался сигнал измерительной обмотки в зависимости от частоты электромагнитного поля.

На рис. 2 приведены графики амплитуды (а) и фазы (б) выходного сигнала, на которых зависимость E_Σ и φ_Σ – измеренный сигнал, E_1 и φ_1 – расчетный сигнал от упрочненного слоя, E_2 и φ_2 – сигнал от нижнего слоя (основной металл).

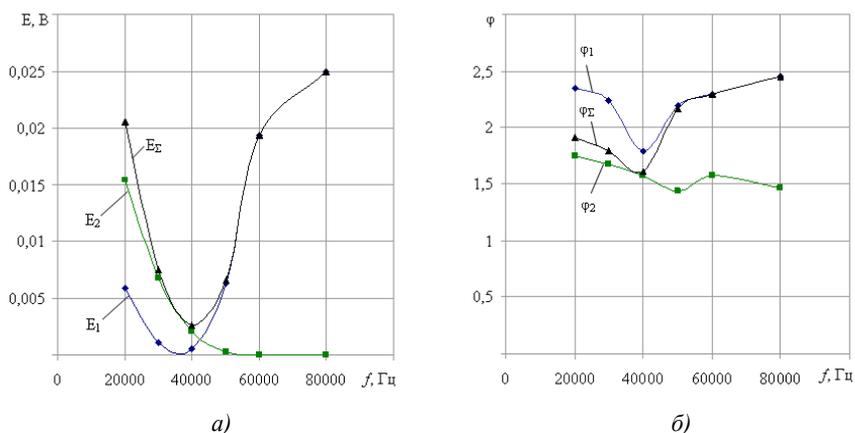


Рис. 2. Зависимости амплитуды а и фазы б сигнала ВТП

Анализируя графические зависимости можно сделать вывод, что, сканируя образец электромагнитным полем изменяющейся частоты, можно найти минимум амплитуды E_Σ и фазы φ_Σ выходного сигнала ВТП, который соответствует теоретической границе перехода между упрочненным слоем и чистым металлом (зависимости E_1 и E_2). Без учета зоны неопределенности (усредненная частота 43 кГц) существует однозначное решение системы (1) относительно коэффициентов \dot{Z}_{k1k1} , \dot{Z}_{k2k2} , что дает возможность восстановить геометрию упрочненного слоя с глубиной δ , которая показана на рис. 3.

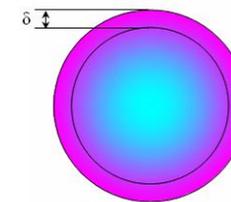


Рис. 3. Сечение образца со структурой упрочненного слоя

Заключение. Таким образом, в работе показано, что путем проведения экспериментальных исследований по выявлению глубины упрочненного слоя с помощью сканирования сечения цилиндрического образца электромагнитным полем по выходному сигналу ВТП можно зафиксировать границу перехода, которая коррелирует с теоретическими расчетами и восстановить структуру исследуемого образца.

Список литературы: 1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.2: В 2 кн.-М.: Машиностроение, 2003.-688 с. 2. Федосов С.А., Пешек Л. Определение механических свойств материалов микроиндентированием: Современные зарубежные методики. – М.: Физический факультет МГУ, 2004. – 100 с. 3. Д.А. Коновалов, С.В. Смирнов, А.В. Коновалов. Определение кривых деформационного упрочнения металлов по результатам вдавливания конических инденторов // Дефектоскопия. – 2008. – № 12. – С. 55-63. 4. Е.В. Долбилин, А.В. Кокорин. Новые методы химико-термической обработки в электрическом разряде // Технология машиностроения. – 2007. – № 6. – С. 40-45. 5. А.М. Нежинский. Совершенствование технологии обработки поверхностей деталей машин методами поверхностно-пластического деформирования // Технология машиностроения. – 2007. – № 10. – С. 14-17. 6. Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Смирнов С.М. и др. Взаимосвязь между параметрами напряженно-деформированного состояния и магнитными характеристиками углеродистых сталей при одноосном растяжении / Тезисы докладов 5-й Международной конференции «Неразрушающий контроль: техническая диагностика в промышленности». М.: Машиностроение, 2006. 7. Горкунов Б.М., Тюпа И.В., Тищенко А.А. Модель вихретокового преобразователя проходного типа с токопроводящим цилиндрическим образцом. // Технічна електродинаміка, тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність", ч.5, 2007, Київ, С. 45-48. 8. Горкунов Б.М., Тюпа И.В., Авраменко А.А. Модель вихретокового преобразователя с зеркально отображенными токами в плоском образце. Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПИ"- №35.- 2007. –С.51-56.

Поступила в редколлегию 20.05.11