УДК 620.179.147

КОНТРОЛЬ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ДВУХСЛОЙНЫХ НЕМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ ИМПУЛЬСНЫМ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

© 2019 г. И.В. Терехин[1,*], Е.А. Славинская[1,]**

[1] НИУ «МЭИ», Россия 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 14
*E-mail: *terekhin.iv@mail.ru; **carpe_ugulum@mail.ru*

Поступила в редакцию 12.07.2017; после доработки 14.01.2019;
принята к публикации 01.02.2019

Рассмотрен контроль удельной электропроводности двухслойных немагнитных объектов импульсным вихретоковым методом. Сигналы вихретокового преобразователя исследованы с помощью конечно-элементной модели. По результатам моделирования в зависимости от соотношения параметров покрытия и основания объекта контроля предложены два способа определения удельной электропроводности на основе интегрирования магнитного потока. Работоспособность предложенной методики подтверждена в лабораторном опыте.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, импульсное возбуждение, контроль электропроводности, двухслойный объект контроля, конечно-элементное моделирование, магнитный поток.

DOI:10.1134/S0130308219040055

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных областей применения вихретокового контроля является измерение удельной электропроводности металлических изделий. В настоящий момент эта задача решена для наиболее распространенного случая однородного изотропного объекта контроля. По мере совершенствования промышленных технологий все чаще вместо усредненного значения электропроводности требуется оценивать ее распределение по толщине объекта, а также проводить раздельный контроль покрытия и основания. К таким задачам относится контроль свойств изделий после термообработки, когда твердость (и электропроводность) изменяется по глубине объекта [1]; контроль двухслойных немагнитных объектов [2], таких как алюминиевые листы с гальваническими покрытиями. В металлургии распространена задача контроля заполнения жидкой сталью металлургических емкостей через медную стенку формы. Вихретоковый преобразователь в этом случае проектируется как измеритель электропроводности [3]. Также в металлургии необходимо контролировать соотношение жидкой и твердой фаз непрерывнолитой заготовки в процессе ее кристаллизации для управления усилием при так называемом мягком обжатии слитка, то есть обжатии с не полностью затвердевшей сердцевиной. Излишнее усилие приведет к выплескиванию жидкого металла, а недостаточное — не позволит улучшить качество поверхности слитка [4]. Эту задачу также можно решать на основе контроля электропроводности немагнитных материалов.

Для немагнитных объектов задача контроля электропроводности решается вихретоковым методом при гармоническом или импульсном возбуждении преобразователя. Наиболее полные сведения о гармоническом возбуждении содержатся в справочной литературе [5]. Приведены годографы для частного случая двухслойного объекта с переменной электропроводностью покрытия и основания, контроль предлагается вести с использованием известных способов выделения информации на комплексной плоскости. Работа [6] посвящена оценке возможности получения профиля остаточных напряжений и визуализации распределения электропроводности методом вихревых токов с использованием двухчастотного возбуждения преобразователя.

По сравнению с гармоническим возбуждением импульсное более информативно и характеризуется отсутствием трансформаторной ЭДС [7], являющейся причиной дрейфа при гармоническом возбуждении. Последнее очень важно с практической точки зрения при проведении контроля в промышленных условиях, когда такие внешние факторы, как температура и давление, могут значительно изменяться, а калибровку приборов можно проводить с периодом, достигающим недели.

В справочнике [5] контроль электропроводности однородного объекта при импульсном возбуждении преобразователя предлагается вести, оценивая интеграл под кривой магнитного потока, причем интегрирование за период возбуждения дает линейную зависимость интеграла от электропроводности. Опубликованные в периодической литературе работы по исследованию импульсного возбуждения посвящены в основном толщинометрии покрытий. Толщина объекта влияет на переходный процесс сходно с электропроводностью, поэтому контроль толщины представляет определенный интерес. В [8] и [9] рассмотрен контроль толщины покрытия на немагнитном и магнитном

основаниях соответственно. В качестве информативных параметров вихретокового сигнала преобразователя использовали пиковое значение, время появления пикового значения и координата пересечения сигнала преобразователя с временной осью. Метод вычисления толщины покрытия образца базируется на калибровочных характеристиках этих параметров и требует знания электропроводности обоих слоев. В [10] для контроля толщины стальных труб без покрытия авторами предлагается использовать длительность вихретокового переходного процесса. Такие информативные параметры сигнала применимы только при оценке электропроводности покрытия и не подходят для оценки электропроводности основания. В исследовании [11] рассмотрен способ отстройки от влияния электропроводности при контроле зазора, основанный на определении интегралов магнитного потока на выбранных интервалах времени. Отмечается, что возможно решение обратной задачи: отстройки от зазора при контроле электропроводности. Публикация интересна тем, что в ней предложено аналитическое выражение для оценки времени достижения вихревыми токами определенной глубины, с помощью которого авторы определяли интервалы времени интегрирования.

Из анализа литературы можно сделать вывод, что в сравнении с гармоническим сведений об импульсном способе возбуждения вихретоковых преобразователей на сегодняшний день мало: известно, что контроль электропроводности покрытия можно осуществлять, используя набор признаков вихретокового сигнала; для оценки свойств основания двухслойного объекта методик в литературе нет. Применять методики, используемые при оценке электропроводности покрытия, для контроля основания нельзя, так как они не учитывают влияние проводящего покрытия на протекание вихретокового процесса в основании.

В настоящей работе рассматривается общая задача раздельного контроля электропроводности покрытия и основания двухслойного объекта с тем, чтобы изучить возможности и ограничения импульсного способа возбуждения. Недостаток общих работ по импульсному вихретоковому контролю, а также обширность потенциальных областей применения раздельного контроля электрофизических свойств покрытия и основания двухслойных объектов определяют актуальность такого исследования. С точки зрения теоретической ценности полученные в работе результаты дополняют представления о вихретоковых процессах в многослойных биметаллических объектах при импульсном возбуждении вихревых токов и дают общие представления о возможностях импульсного контроля двухслойных объектов. В работе предложены способы определения электропроводности основания плоского двухслойного немагнитного объекта контроля в зависимости от соотношения параметров основания и покрытия.

В рамках поставленной задачи рассматривался не один конкретный образец, а модельный объект, соотношения электропроводностей покрытия и основания которого изменяются в широких пределах. Во избежание излишнего усложнения в работе исследовался двухслойный объект с известными постоянными толщинами покрытия и основания, а также постоянным зазором между преобразователем и контролируемым образцом.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЕЕ ДОСТОВЕРНОСТЬ

При моделировании рассматривался двухслойный объект контроля с электропроводностью основания $\sigma_{осн}$ = 38 – 58 МСм/м и толщиной $T_{осн}$ = 20 мм и покрытием толщиной $T_п$ = 4 мм с переменной электропроводностью $\sigma_п$ = 0 – 500 МСм/м. Глубина контроля при импульсном возбуждении определяется радиусом обмотки возбуждения и в разы превышает толщину покрытия, чтобы обеспечить чувствительность к свойствам основания. Толщина нижнего слоя образца была подобрана таким образом, чтобы не влиять на переходный вихретоковый процесс. При иных значениях толщин результаты будут схожи качественно, но при этом отличаться количественно, так как толщина наряду с электропроводностью определяет длительность переходного вихретокового процесса.

Для исследования сигналов вихретокового преобразователя над немагнитной двухслойной пластиной в среде анализа электромагнитных процессов ANSYS Electromagnetics была построена конечно-элементная трехмерная модель, ее геометрия показана на рис.1. Вихретоковый преобразователь состоит из двух соосных обмоток возбуждения и измерения радиусом 7 и 9,5 мм соответственно. Расстояние до объекта контроля составляет 1 мм. Для устранения влияния краевого эффекта размеры объекта контроля были выбраны много больше диаметра преобразователя.

Ток возбуждения задается в сечении преобразователя как идеальный единичный импульс. Анализируемым сигналом является зависимость магнитного потока измерительной обмотки от времени.

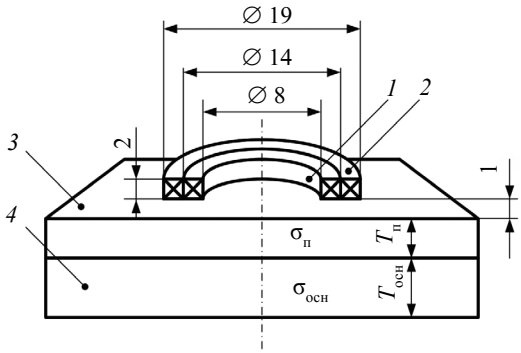

Рис. 1. Геометрия модели:
1 — обмотка возбуждения; *2* — измерительная обмотка; *3* — покрытие; *4* — основание.

Для проверки математической модели использовался лабораторный опыт. Вихретоковый преобразователь представлял собой две пары катушек, показанных на рис. 1, разнесенных по высоте на 30 мм. Катушки возбуждения включены согласно, измерительные катушки включены встречно для компенсации трансформаторной ЭДС. Дифференциальный сигнал измерительных катушек подавался непосредственно на вход 24-разрядного АЦП с частотой дискретизации 8 кГц. Были записаны и рассчитаны ЭДС вихретокового преобразователя, установленного над объектом контроля в виде медной пластины толщиной 10 мм, а затем на двухслойный объект в виде той же медной пластины и помещенной под нею без зазора алюминиевой пластины толщиной также 10 мм. Период тока возбуждения 100 мс, скважность 0,5, постоянная времени катушки возбуждения 1,1 мс.

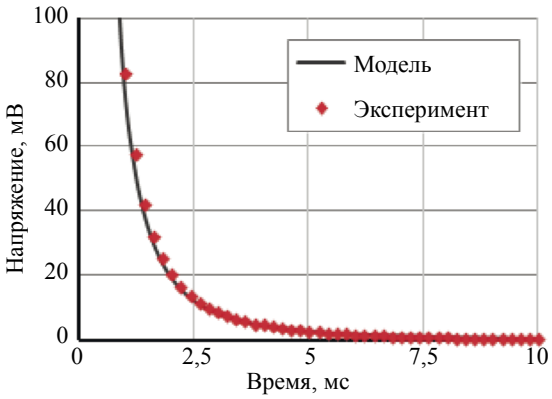

Рис. 2. Сигнал от двухслойного объекта.

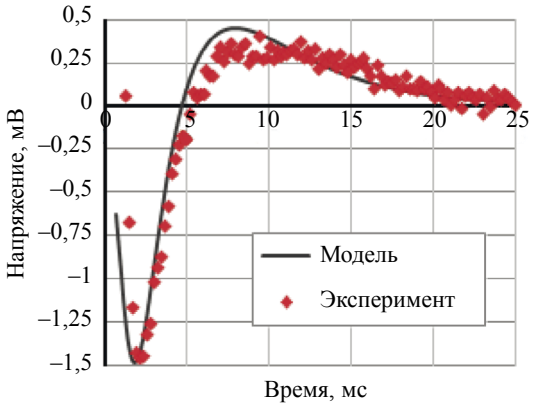

Рис. 3. Сигнал, вносимый основанием.

На рис. 2 показаны зависимость ЭДС дифференциальных катушек на двухслойном объекте, а на рис. 3 — разность между сигналом от двухслойного объекта и сигналом исключительно от покрытия. Сигнал на рис. 3 соответствует внесению основания толщиной 10 мм. Получено хорошее согласие расчетов и экспериментальных данных, за исключением области вблизи нуля на рис. 3, что вызвано неидеальной компенсацией трансформаторной ЭДС в лабораторном опыте.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 4 показаны временные диаграммы магнитного потока $\Phi(t)$, зарегистрированного измерительной обмоткой, для нескольких сочетаний электропроводностей покрытия и основания. Моменту времени $t = 0$ соответствует момент бесконечно быстрого уменьшения тока возбуждения до нуля.

Зависимости *1* — *4* иллюстрируют переходный процесс для случая $\sigma_п << \sigma_{осн}$. Кривая *1* соответствует переходному процессу в покрытии с $\sigma_п = 1$ МСм/м. Кривая *2* — переходному процессу в основании с $\sigma_{осн} = 38$ МСм/м, кривая *3* — двухслойному объекту с теми же электропроводностями и толщинами покрытия и основания. В начале переходного процесса имеется информация

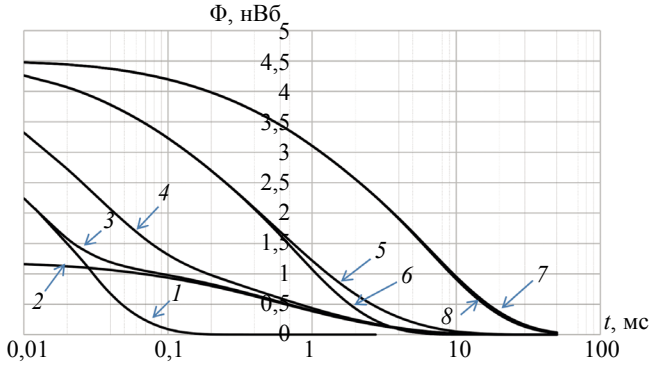

Рис. 4. Зависимость магнитного потока от времени.

только о покрытии и возможно независимое измерение его свойств. Вторая часть переходного процесса несет информацию как о покрытии, так и об основании. Третья часть переходного процесса уже не зависит от покрытия: кривые *2* и *3* сливаются, начиная с момента времени t = 1 мс (около 10 % длительности переходного процесса в основании объекта контроля). Чем больше $\sigma_п$, тем продолжительнее будут первая и вторая части переходного процесса, что видно по кривой *4*, соответствующей $\sigma_п$ = 5 МСм/м и $\sigma_{осн}$ = 38 МСм/м. Выделить в переходном процессе участки, где имеется информация только об основании или покрытии возможно, если длительность переходных процессов в слоях объекта (зависящая от электропроводности и толщины покрытия и основания) отличается более чем в 5 раз. При меньшем отличии переходный процесс оканчивается на условно второй части: области одновременного влияния покрытия и основания (см. кривые *5* и *6* для $\sigma_п$ = 58 МСм/м, $\sigma_{осн}$ = 38 МСм/м и $\sigma_п$ = 58 МСм/м, $\sigma_{осн}$ = 0 МСм/м соответственно). Переходный процесс в покрытии с $\sigma_п$ = 58 МСм/м (кривая *6*) затухает в три раза быстрее, чем в основании (кривая *1*), но переходный процесс в двухслойном объекте (кривая *5*) длится дольше, чем в основании. Следовательно, независимо измерить параметры нижнего слоя в данном случае уже нельзя.

Чем больше электропроводность покрытия, тем меньшее влияние будет оказывать основание на переходный процесс. Кривые *7*, *8* показывают гипотетический случай, когда $\sigma_{осн} << \sigma_п$: кривая *7* соответствует двухслойному образцу с $\sigma_п$ = 500 МСм/м, $\sigma_{осн}$ = 38 МСм/м, а кривая *8* — только покрытию с $\sigma_п$ =500 МСм/м. Говорить о переходном процессе в основании уже не корректно, так как переходный процесс в нем становится вынужденным — вихревые токи в основном определяются скоростью изменения магнитного потока в покрытии, а не постоянной времени основания. Поэтому влияние основания будет наблюдаться, начиная с момента достижения вихревыми токами нижнего слоя и до завершения переходного процесса в покрытии. Проводимость основания определяет только величину магнитного потока в последней части переходного процесса.

После фронта тока возбуждения вихревые токи распространяются с поверхности вглубь объекта контроля. Поэтому электропроводность покрытия при любом соотношении проводимостей следует определять за интервал времени от нуля до того момента, когда вихревые токи достигнут основания. Оценить границу временного интервала можно с помощью кривых вносимого векторного потенциала $A_{вн}(t)$, приведенных в [5], или расчетным путем по методике, предложенной в публикации [11].

Как отмечалось выше, при $\sigma_п << \sigma_{осн}$ переходный процесс в покрытии заканчивается так быстро, что не оказывает влияния на затухание вихревых токов в основании в конце переходного процесса. После окончания переходного процесса в покрытии объект контроля можно рассматривать как однослойный. Для оценки $\sigma_{осн}$ можно вычислять площадь под кривой магнитного потока на последнем участке переходного процесса. Начало этого участка можно приближенно оценить как $3 \cdot \tau_п$, где $\tau_п$ — длительность переходного процесса в покрытии.

При близких значениях длительности переходных процессов в покрытии и основании контроль электрофизических свойств нижнего слоя усложняется, так как имеется одновременное влияние обоих слоев, а значит, каждую задачу следует рассматривать как частный случай.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ДВУХСЛОЙНОГО ОБЪЕКТА С МАЛЫМ РАЗЛИЧИЕМ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

В качестве основного информативного параметра для оценки электропроводности в работе использовался интеграл кривой магнитного потока по времени. Это наиболее помехоустойчивый параметр вихретокового сигнала, пропорциональный электропроводности и толщине объекта контроля. Информация, поступающая с преобразователя, носит накопительный характер: по мере проникновения вихревых токов по глубине объекта измеряемый сигнал в каждый момент времени зависит от электрофизических свойств всех лежащих выше слоев. Основная идея при определении электропроводности основания заключается в оценке интеграла под кри-

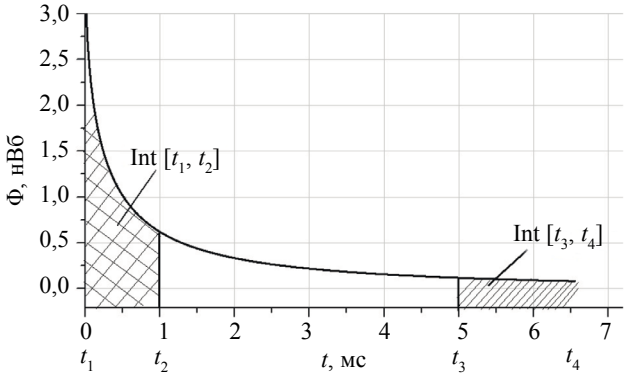

Рис. 5. Интервалы интегрирования магнитного потока.

вой магнитного потока от времени на нескольких интервалах. Условно, начальный участок переходного процесса соответствует области влияния покрытия, а конечный временной промежуток — совместному влиянию покрытия и основания. Чтобы выделить информацию об электропроводности основания из интеграла на конечном временном интервале вычитается поправка, определяемая с помощью интеграла за начальный временной интервал. Таким образом, информативный параметр для оценки электропроводности нижнего слоя объекта контроля можно определить как $\Delta\mathrm{Int} = \mathrm{Int}_{[t_3,t_4]} - \mathrm{Int}_{[t_1,t_2]} \cdot k$, где ΔInt — информативный параметр, $\mathrm{Int}_{[t_3,t_4]}$, $\mathrm{Int}_{[t_1,t_2]}$ — интегралы за конечный и начальный временной участок переходного процесса соответственно (см. поясняющий рис. 5), k — коэффициент пропорциональности. Коэффициент k подбирался таким образом, чтобы при равенстве электропроводностей покрытия и основания ΔInt равнялся бы нулю. В этом случае величина ΔInt оказывается пропорциональна разности электропроводностей $\Delta\sigma = \sigma_п - \sigma_{осн}$, и $\sigma_{осн}$ вычисляется на основе измерения $\sigma_п$ и разности электропроводностей покрытия и основания Δσ. По модулю и знаку ΔInt можно определить разницу между электропроводящими свойствами основания и покрытия. Выбор интервалов интегрирования можно проводить, ориентируясь на кривые векторного потенциала $A_{вн}(t_*)$ [5]. Для определения электропроводности покрытия следует выбирать интервал времени от $t_1 = 0$ до $t_2 = 0{,}3\tau_п$, где $\tau_п$ — длительность переходного процесса в покрытии с учетом его толщины. Конечный временной интервал интегрирования целесообразно выбирать от $t_3 = 3\tau_п$ до t_4, где t_4 ограничивается общей длительностью переходного процесса во всем объекте контроля. Пределы интегрирования определяют величину коэффициента k, поэтому для каждого объекта контроля требуется отдельная математическая модель. Зависимость k от $\sigma_п$, построенная по модели, описанной выше, показана на рис. 6. Зависимость линейна в заданном диапазоне электропроводности покрытия. Этот результат важен, поскольку на практике настройка может проводиться с использованием минимум двух образцов. Нужно заметить, что выбором пределов интегрирования можно в определенной степени ослабить влияние толщины основания, если выбирать t_4 в несколько раз меньше длительности переходного процесса в двухслойном объекте.

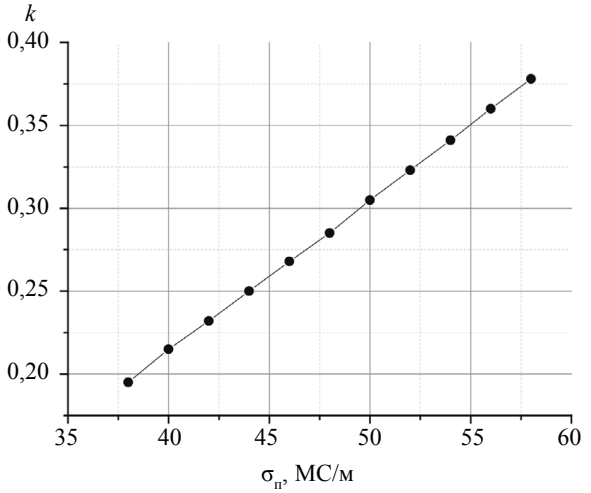

Рис. 6. Зависимость коэффициента пропорциональности от электропроводности покрытия.

Описанная методика была применена к вихретоковым сигналам, полученным в процессе численного моделирования и лабораторном эксперименте. Вихретоковый преобразователь соответствует рис. 1. В лабораторном эксперименте исследовались сигналы от нескольких образцов в виде пластин толщиной 7 мм из различного металла — дюралюминий, алюминий и медь, удельная электропроводность которых составляет 18, 38 и 58 МСм/м соответственно. Покрытие моделировалось алюминиевой пластиной, материал основания менялся: дюралюминий и медь. Зависимость ΔInt от Δσ, рассчитанная с помощью

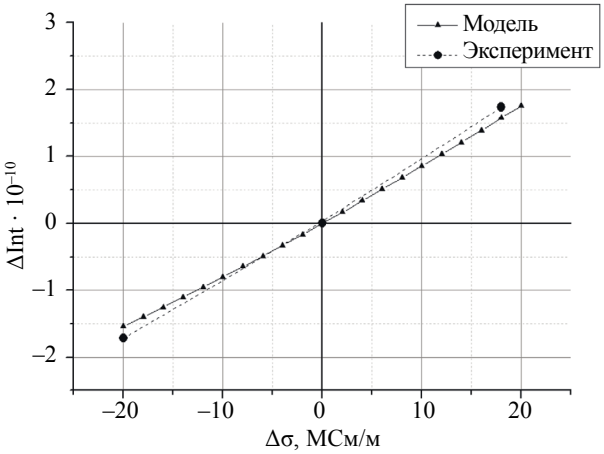

Рис. 7. Зависимость информативного параметра от приращения электропроводности.

модели, показана на рис. 7, она использовалась в лабораторном опыте при оценке электропроводности основания. Пунктиром на рис. 7 обозначена зависимость, соответствующая лабораторному эксперименту, подтверждающая достоверность модели и работоспособность предложенной методики. При использовании расчетной зависимости ΔInt от Δσ абсолютная погрешность определения электропроводности основания составила 2,5 МСм/м при разности электропроводностей 20 МСм/м. Погрешность предложенного способа контроля электропроводности основания, вероятно, можно снизить, используя для настройки (получения зависимости ΔInt от Δσ) стандартные образцы вместо математического моделирования, об этом говорит систематический характер отличия результатов модели и эксперимента (см. рис. 7). Поэтому вопрос достижимых точности и разрешающей способности является предметом дальнейшей работы.

Предложенная методика может использоваться и в случае, когда электропроводность основания заметно меньше электропроводности покрытия, но с некоторыми отличиями. Выбор интервалов времени интегрирования t_3 — t_4 осуществляется иначе: $t_3 > 0{,}3\tau_п$, t_4 ограничено постоянной времени переходного процесса в покрытии.

При любом соотношении электропроводностей контроль электропроводности основания подразумевает хотя бы приблизительное знание толщины слоев, так как толщинами слоев определяются пределы интегрирования магнитного потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрена задача контроля удельной электропроводности основания двухслойных немагнитных объектов импульсным вихретоковым методом. Выяснено, что возможности импульсного вихретокового контроля электропроводностей покрытия и основания меняются в зависимости от соотношения электропроводности слоев. В работе предложены новые методики оценки электропроводности основания, различающиеся в зависимости от соотношения параметров покрытия и основания.

Показано, что если длительность переходного процесса в покрытии меньше длительности процесса в основании более чем в 5 раз, существуют интервалы времени в начале и в конце переходного процесса, где магнитный поток измерительной катушки зависит только от параметров покрытия и основания соответственно. Возможен раздельный контроль электропроводности каждого слоя по ранее известным методикам. Возможность независимого контроля $\sigma_{осн}$ положительно отличает импульсное возбуждение от гармонического.

Если электропроводность обоих слоев объекта контроля одного порядка, для контроля электропроводности основания авторами предложена новая методика. Она предусматривает определение разности электропроводностей покрытия и основания по разности интегралов магнитного потока на двух интервалах времени с использованием расчетной калибровочной зависимости. Интеграл на конечном временном интервале несет информацию о покрытии и основании, а интеграл на начальном интервале — только о покрытии. Верность методики подтверждена лабораторным опытом, полученная абсолютная погрешность определения электропроводности основания составила 2,5 МСм/м при электропроводности основания 38 МСм/м, электропроводности покрытия 58 МСм/м. Вопрос достижимых погрешностей и разрешающей способности требует дополнительного исследования.

При электропроводности основания много меньше электропроводности покрытия импульсный контроль электропроводности основания крайне затруднен малостью полезного сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mercier D., Lesage J., Decoopman X., Chicot D.* Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing // NDT & E International. 2006. V. 39. I. 8. P. 652—660.

2. *Атавин В.Г., Исхужин Р.Р., Терехов А.И.* Измерение толщины токопроводящих покрытий с отстройкой от зазора и электропроводности основания // Дефектоскопия. 2016. № 5. С. 33—35.

3. *Катанкин Р.А., Покровский А.Д.* Вихретоковый преобразователь для контроля уровня жидкой стали // Дефектоскопия. 2010. № 3. С. 82—87.

4. *Сотников А.А.* Системы мягкого обжатия на МНЛЗ и их влияние на качество макроструктуры заготовок // Сталь. 2011. № 2. С. 17—19.

5. Неразрушающий контроль / Справочник. В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2. Кн. 2. Вихретоковый контроль. М.: Машиностроение, 2003. 688 с.

6. *Annamalai S., Fan Z., Castagne S.* Residual stress profiling of sub-surface treated nickel-based superalloy using electromagnetic NDE method // Non-Destructive Evaluation. 2016. P. 17—22.

7. *Ali Sophian, Guiyun Tian, Mengbao Fan.* Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing and Evaluation: A Review // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2017. V. 30. I. 3. P. 500—514.

8. *Cheng-Chi Tai, Rose J.H., Moulder J.C.* Thickness and conductivity of metallic layers from pulsed eddy current measurements // Rev. Sci. Instrum. 1996. V. 67. No. 11. P. 3965—3972.

9. *Hung-Chi Yang, Cheng-Chi Tai*. Pulsed eddy-current measurement of a conducting coating on a magnetic metal plate // Measurement Science and Technology. 2002. V. 13. No. 8. P. 1259—1265.

10. *Angani C.S., Park D.G., Kim C.G., Leela P., Kollu P., Cheong Y.M.* The pulsed eddy current differential probe to detect a thickness variation in an insulated stainless steel // Journal of Nondestructive Evaluation. 2010. V. 29. I. 4. P. 248—252.

11. *Li J., Wu X., Zhang Q.* et al. Measurement of lift-off using the relative variation of magnetic flux in pulsed eddy current testing // NDT & E International. 2015. V. 75. P. 57—64.