
Вихретоковый фазовый метод измерения толщины гальванических покрытий



**Ноймайер
Петер**

Helmut Fischer
GmbH,
г. Зиндельфин-
ген (ФРГ).

Введение

Магнитоиндукционный метод уже в течение нескольких десятилетий успешно применяется для контроля защитных, в том числе гальванических, покрытий на изделиях из ферромагнитных материалов. Для получения корректных результатов при использовании этого метода следует учесть ряд мешающих факторов, особенно влияние материала основы, геометрии изделия в зоне измерения и шероховатости поверхности контролируемого изделия. Методом, имеющим ряд преимуществ, является модификация уже достаточно давно применяемого на практике вихретокового амплитудного метода. В этом методе в качестве первичного информативного параметра для измерения толщины электропроводящих покрытий используется изменение фазы сигнала от измерительной обмотки относительно сигнала возбуждения. Как будет показано в дальнейшем, указанные недостатки магнитоиндукционного метода в модифицированном виде могут быть в значительной мере устранены.

Вихретоковый фазовый метод

В этом методе для определения толщины покрытия используется изменение фазы сигнала от измерительной обмотки относительно сигнала возбуждения (обычно к значению фазы тока в катушке возбуждения). Наглядно это показано на рис. 1 в импедансной плоскости с помощью действительной и мнимой частей комплексного сигнала с измерительной обмотки. Каждой точке, отмеченной кружком, соответствует положение вершины комплексно-

го вектора сигнала с измерительной обмотки (проведенного из начала координат к рассматриваемой точке импедансной плоскости), соответствующего определенной толщине цинка на железной основе и толщине зазора, то есть нетокопроводящего слоя между чувствительным элементом преобразователя и поверхностью цинка, например, лакокрасочного покрытия.

Видно, что фазовый сдвиг сигнала сильно меняется при увеличении толщины покрытия, в то время как величина зазора сказывается в основном только на его амплитуде. Такое поведение вектора имеет большие преимущества при наличии мешающих факторов, что будет показано далее.

Сравнение магнитоиндукционного и вихретокового методов

Геометрия в точке контроля

У малоразмерных деталей, выпускаемых крупными партиями: винтов, гаек, болтов и т. д., часто необходимо производить точечные измерения толщины покрытий. У винтов, например, измерения проводятся на поверхности головки. Магнитоиндукционный метод в таком случае требует корректурную калибровку в соответствующей точке изделия без нанесенного покрытия для уменьшения погрешности при измерениях. При сильно меняющейся геометрии изделия это является недостатком, особенно если поверхности измеряемого объекта имеют большую кривизну.

Вихретоковый фазовый метод значительно слабее подвержен влиянию геометрии. Причина этого объясняется в представленном на рис. 1 поведении вектора сигнала. Увеличение кривизны действует как увеличение зазора и почти не сказывается на изменении фазы сигнала и вычисляемой с его помощью толщины покрытия.

При использовании магнитоиндукционного метода искривление поверхности приводит к заметной погрешности результата. Это следует из сравнительных данных (табл. 1) при измерении покрытия на цилиндрической детали со ступенчато изменяющимся диаметром. Для имитации равнотолщинного цинкового покрытия была использована медно-бериллиевая (CuBe) фольга. Электропроводность CuBe составляет около 9 МС/м и примерно соответствует электропроводности цинка 7 МС/м. Перед проведением измерений приборы — магнитоиндукционный и вихретоковый фазовый — предварительно были откалиброваны на плоской торцевой поверхности изделия.

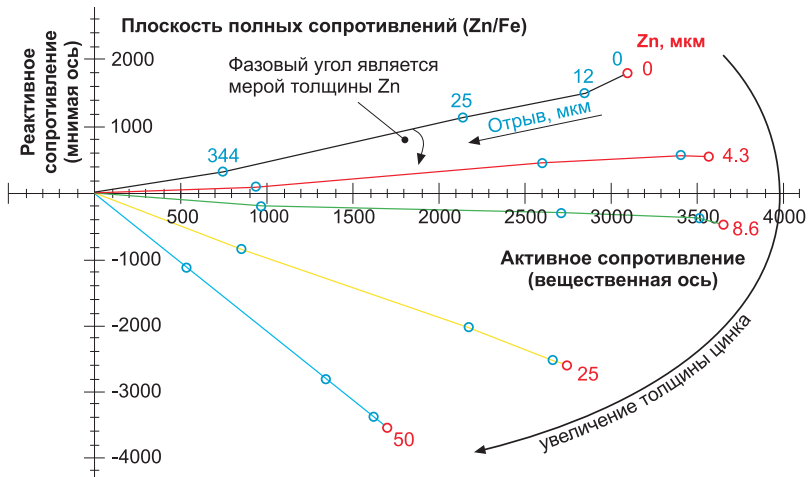


Рис. 1. Импедансная плоскость сигнала с зонда ESD2.4 для цинкового покрытия на основе из железа



Рис. 2. Измерение толщины цинкового покрытия на головке винта с помощью прибора PHASCOPE® PMP10 и преобразователя ESD2.4

малоразмерных изделиях (рис. 2).

Шероховатость поверхности

На рис. 3 изображена гайка с достаточно шероховатой поверхностью. Среднее значение толщины покрытия в точках в серии из 10 измерений, проведенных с помощью магнитоиндукционного преобразователя EGAB 1.3, наиболее часто используемого совместно с приборами фирмы Fischer, составляет 11,5 мкм при среднеквадратичном отклонении

Табл. 1 представляет различие в степени влияния геометрии изделия на погрешность измерения этими методами. При минимальном диаметре 4 мм погрешность измерения магнитоиндукционным методом составляет 80%, в то время как фазовый метод дает погрешность 8%, т. е. в 10 раз меньше.

Таким образом, фазовый метод предпочтителен для измерения гальванических покрытий на

Табл. 1. Влияние кривизны поверхности образца при магнитоиндукционном и вихретоковом фазовом методах измерения

Диаметр основания		Бесконечн. (∞)	16 мм	12 мм	8 мм	6 мм	4 мм
Магнитоиндукционный метод	Ср. значение толщины при $N = 5$ мкм	24,6	29,1	30,5	34,4	37,7	44,2
	Среднеквадратичное отклонение s , мкм	0,38	0,30	0,45	0,15	0,21	0,45
	% — относит. откл. $[d(k) - d(\infty)]$		18,29	23,98	39,84	53,25	79,67
Вихретоковый метод	Ср. значение толщины при $N = 5$ мкм	24,6	24,2	24,1	24,0	23,7	22,6
	Среднеквадратичное отклонение, мкм	0,07	0,08	0,10	0,07	0,23	0,33
	% — относит. откл. $[d(k) - d(\infty)]$		-1,63	-2,03	-2,44	-3,66	-8,13

3,8 мкм. Разность между наибольшим и наименьшим значениями результатов измерения составляет 12,5 мкм. Причина этого кроется в сущности самого магнитоиндукционного метода измерения, по которому происходит измерение расстояния от преобразователя до поверхности изделия. В зависимости от точки нахождения полюса зонда — на вершине или в низине шероховатости — получают отличающиеся друг от друга значения



Рис. 3. Оцинкованная гайка с шероховатой поверхностью

при одинаковой толщине покрытия. Если подобные измерения будут осуществляться с помощью вихретокового фазового метода, то будет получено среднее значение толщины 10,8 мкм при среднеквадратичном отклонении 0,17 мкм и разностью между минимальным и максимальным значениями 0,59 мкм. Причиной столь малого разброса результатов измерений является то обстоятельство, что принцип, используемый в этом методе, связан с возникновением вихревых токов в электропроводящем слое покрытия. Чем толще покрытие, тем больше возникает вихревых токов, что приводит к увеличению фазового сдвига. Наличие шероховатости эквивалентно зазору, а как было уже отмечено, он не влияет на погрешность измерения. Важно отметить, что при использовании магнитоиндукционного метода

наличие шероховатости всегда приводит к завышению толщины покрытия. В рассматриваемом примере действительная толщина цинка, определенная с помощью рентгенофлуоресцентного метода, который практически не зависит от шероховатости, составляет 10,7 мкм. Такое же значение было получено с помощью вихретокового фазового метода.

Влияние магнитных свойств материала основания

При использовании магнитоиндукционного метода разброс магнитных свойств материала основы приводит к ошибкам измерений. Магнитные свойства могут значительно меняться при наличии легирующих примесей, тепловой (закалка, отпуск) или механической (прокат, шлифование и др.) обработки. Если данные об этом не будут учтены при калибровке, что часто сопряжено с определенными трудностями, особенно при проведении входного контроля, то будут получены неверные результаты.

Вихретоковый фазовый метод также подвержен внешним мешающим воздействиям, но их масштаб значительно меньше. При сравнительных измерениях на основаниях из сталей с отличающимися магнитными свойствами, проведенных опять же с использованием CuBe фольги, имитирующей цинковый слой на различных стальных изделиях (магнитомягких, магнитотвердых), ошибка в результатах измерений, полученных по магнитоиндукционному методу, достигала 150%, в то время как при использовании вихретокового фазового метода для тех же изделий составляла всего 2,5%.

Это объясняется тем обстоятельством, что при использовании вихретокового фазового метода при оптимизации рабочей частоты магнитное поле из-за вихревых токов в покрытии настолько ослабляется, что различия в свойствах основы не оказывают заметного воздействия на результат измерения в отличие от магнитоиндукционного метода.

Степень влияния различных материалов основы при одинаковой юстировке прибора зависит от изменения вектора в импедансной плоскости (рис. 1). Если изменяется фаза, то влияние на погрешность измерения будет сильнее, чем в случае изменения длины вектора.

Влияние электропроводности материала покрытия

Вихретоковый фазовый метод основан на возбуждении вихревых токов в электропроводящих слоях. В связи с этим изменения электро-

проводности оказывают непосредственное воздействие на получаемые этим методом значения, в то время как такие изменения практически не играют никакой роли при использовании магнитоиндукционного метода. Этот недостаток метода на практике может быть преодолен благодаря предварительной юстировке прибора на деталях с покрытием, толщина которого была определена с помощью иного метода. Например, для наиболее часто встречающихся на практике случаев измерения толщины цинковых покрытий бывает достаточно провести калибровку на деталях, прошедших через электролитическую ванну с одинаковым типом электролита (кислотным, алкалоидно-цианидным или безцианидным), так как электропроводность цинка определяется типом электролита. Для мелких изделий обычно используются цианидные электролиты, поэтому влияние электропроводности в этом случае играет незначительную роль.

Выводы

Вихретоковый фазовый метод может быть успешно применен для определения толщины металлических покрытий массово выпускаемых изделий с сильно искривленными поверхностями, с малыми размерами, а также для изделий с сильной шероховатостью поверхности. При измерениях покрытий изделий с различающимися магнитными свойствами основы этот метод по сравнению с традиционным магнитоиндукционным методом также демонстрирует существенные преимущества.