
Измерение толщины стенок металлических изделий под защитными покрытиями



**Сясько
Владимир
Александрович**
Генеральный директор ЗАО «Константа», д. т. н.

Существующая нормативно-техническая документация предписывает проведение периодического УЗК остаточной толщины стенок изделий в процессе их эксплуатации. В большинстве случаев, особенно для тонкостенных изделий, это предполагает подготовку поверхности (снятие покрытия) в контрольных точках. С учетом того, что операции подготовки поверхности довольно трудоемки и не выполняются по всей поверхности, вероятность пропуска локальных коррозионных дефектов достаточно велика.

Хорошо известны и широко используются электромагнитные методы измерения толщины диэлектрических покрытий на металлических основаниях, которые обеспечивают малые погрешности измерения в широком диапазоне измерения. Помимо этого имеется большое количество ультразвуковых преобразователей различного назначения для измерения времени распространения колебаний в изделиях и измерения их толщины. На основании выполненного анализа была поставлена задача разработки комбинированного преобразователя, который позволит в контрольной точке осуществлять измерение толщины защитного покрытия и суммарного времени распространения ультразвуковой волны в покрытии и металле и вычисления остаточной толщины металла на основании результатов измерений.

Для измерения остаточной толщины стенок изделий из ферромагнитных и неферромагнитных металлов под защитными диэлектрическими покрытиями с высокой локальностью были разработаны два типа преобразователей.

Структурная схема комбинированного преобразователя для измерения остаточной толщины стенок ферромагнитных изделий представлена на рис. 1. Для измерения толщины защитного покрытия используется встроенный индукционный преобразователь с магнитопроводом броневое типа. Внешний контур магнитопровода изготавливается из стали, а центральный сердечник из феррита для увеличения чувствительности преобразователя. Сердечник проходит коаксиально через акустический экран раздельно-совмещенного ультразвукового преобразователя. Первичная W_1 и вторичная W_2 обмотки намотаны на сердечник. Раздельно-совмещенный ультразвуковой преобразователь встроен во внутренний объем индукционного преобразователя.

Принцип измерения толщины защитного покрытия иллюстрируется временными диаграммами, представленными на рис. 2. В момент начала преобразования контроллер посылает сигнал управления на токовый генератор ТГ, питающий первичную обмотку W_1 током $i(t)$. На вторичной обмотке W_2 наводится ЭДС $e(t, h)$, площадь которой $N(h)$ вычисляется в течение

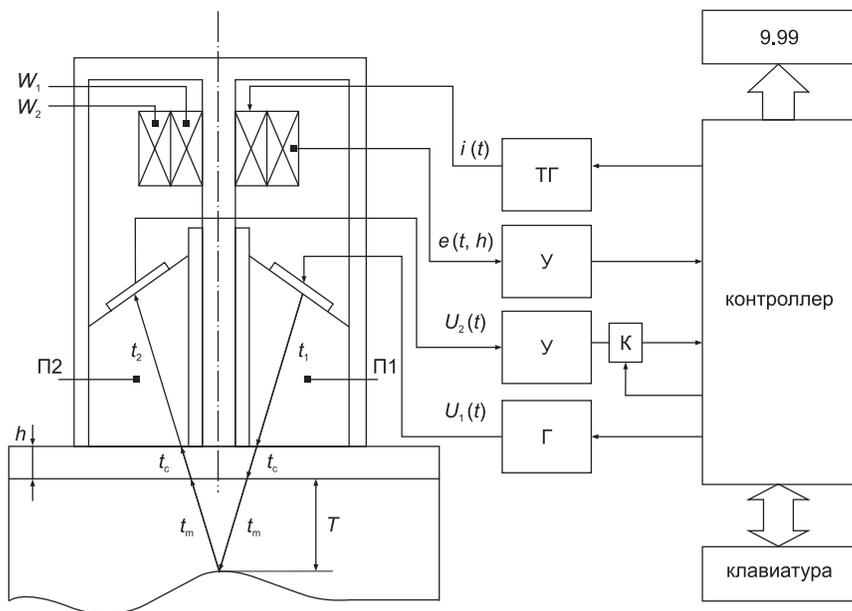


Рис. 1. Структурная схема измерительного преобразователя для ферромагнитных металлов: У — управляемый усилитель; Г — генератор; ТГ — токовый генератор, П — призма, W_1 и W_2 — обмотки, К — ключ

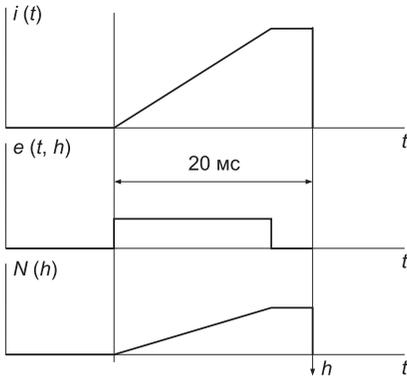


Рис. 2. Временные диаграммы, описывающие алгоритм функционирования индукционного преобразователя при измерении толщины покрытия h

временного интервала 20 мс. $N(h)$ обратно пропорциональна толщине покрытия h . Площадь импульса вычисляется контроллером с использованием встроенного аналого-цифрового преобразователя, после чего толщина покрытия h вычисляется с использованием хранимой в памяти градуировочной характеристики.

Такой алгоритм преобразования позволяет сократить время вычисления толщины h до 80 мс с подавлением влияния сетевых и высокочастотных импульсных

наводок при обеспечении требуемой погрешности.

Возбуждение ультразвуковой волны осуществляется расположенным на призме П1 пьезопреобразователем, возбуждаемым генератором Г. Прием волны, прошедшей через покрытие и металл, обеспечивается пьезопреобразователем, приклеенным к призме П2. Сигнал с пьезопреобразователя поступает через управляемый усилитель У на вход контроллера, который определяет суммарное время t прохождения ультразвуковой волны, равное

$$t = t_1 + t_2 + 2t_c + 2t_m, \quad (1)$$

где t_1 , t_2 , $2t_c$, $2t_m$ — времена распространения ультразвуковой волны в призмах П1 и П2, покрытии и металле, соответственно. Время распространения ультразвуковой волны в покрытии равно

$$t_c = h/V_c, \quad (2)$$

где V_c — скорость ультразвука в покрытии.

Для определения диапазона скоростей V_c в покрытиях были выполнены исследования на специально разработанной установке. Исследования показали, что для лаков, красок, эмалей, шпаклевок (которые представляют собой сочетание пигментов и наполнителей в органических растворителях или воде и формируют гомогенную твердую пленку после высыхания), а также порошковых красок скорость ультразвука V_c находится в диапазоне 2190–2270 м/с (среднее значение — 2230 м/с).

Время распространения в призмах, сделанных из кварца или термостабильных наполненных полимеров

$$t_1 + t_2 = \text{const.} \quad (3)$$

Время распространения в металле

$$t_m = T/V_m, \quad (4)$$

где T — толщина металла в контрольной точке, V_m — скорость ультразвука в металле.

Выражение (1) с учетом (2) и (4) может быть преобразовано в следующую форму

$$t = (\text{const} + 2h/V_c + 2T/V_m). \quad (5)$$

Отсюда следует

$$T = 0,5 (t - \text{const} - 2h/V_c) V_m. \quad (6)$$

Таким образом, преобразователь, работающий в соответствии с описанным алгоритмом, позволяет компенсировать влияние толщины покрытия h при измерении остаточной толщины металла T под защитным покрытием.

Если при вычислении толщины металла T скорость ультразвука в покрытии принята равной $V_c = 2230$ м/с, то из (6) следует, что погрешность измерения ΔT , возникающая из-за несоответствия принятого при расчетах V_c и действительного ($V_c + \Delta V_c$), не превысит величины

$$\Delta T < (hV_m/V_c) [\Delta V_c/(V_c + \Delta V_c)]. \quad (7)$$

Для большинства диэлектрических покрытий $\Delta V_c < 40$ м/с, поэтому для низколегированных сталей ($V_m \sim 6000$ м/с) можно принять

$$\Delta T < 0,047h. \quad (8)$$

В диапазоне толщин покрытий h до 500 мкм погрешность измерения ΔT не превысит 0,025 мм.

В случае проведения измерений традиционными ультразвуковыми толщиномерами погрешность, вызванная наличием защитного покрытия (например, лакокрасочного) при параметрах, аналогичных указанным, может достигать величины

$$\Delta T < hV_m/V_c = 2,69h. \quad (9)$$

Из (9) следует, что при $h = 500$ мкм ΔT может достигать величины 1,34 мм. Таким образом, использование описанного преобразователя и алгоритма проведения измерения и вычислений позволит уменьшить примерно в 50 раз влияние толщины покрытия на результат измерения остаточной толщины стенки металлического изделия.

Одной из главных особенностей рассматриваемого метода измерения является то, что чем больше толщина покрытия, тем больше амплитуда сигнала, отраженного от границы покрытие–металл. В то же время, чем



Рис. 3. Временная диаграмма, описывающая алгоритм функционирования комбинированного преобразователя при измерении остаточной толщины металла

меньше остаточная толщина металла, тем меньше амплитуда донного сигнала. При определенных условиях, например при измерении сильно корродированных изделий под толстыми покрытиями, возможно ложное срабатывание ультразвукового преобразователя от отраженного сигнала покрытие-металл. Для исключения этого эффекта, предлагаются следующие структурные и алгоритмические дополнения: в качестве пьезопреобразователей использовать композитные пьезопластины из метаниобата свинца для существенного снижения реверберационных шумов; в схему преобразователя ввести управляемый ключ K , который по команде от контроллера запрещает прохождение сигналов от приемного пьезопреобразователя к измерительной схеме на время распространения в покрытии ультразвуковой волны, отраженной от поверхности металла. Измерительный алгоритм работы толщиномера приведен на рис. 3. Вначале с использованием индукционного преобразователя контроллер определяет толщину покрытия h и в соответствии с (2) вычисляет время распространения ультразвуковой волны в покрытии. Затем, после посылки ультразвукового импульса $u_1(t)$ микроконтроллер подает команду $u_3(t)$, запрещающую прохождение импульсов $u_1(t)$ с выхода управляемого усилителя U на вход измерительной схемы в течение временного интервала распространения ультразвукового импульса через призмы и покрытие $t_1 + t_2 + 2t_c$. Это позволяет изменять по командам с микроконтроллера коэффициент усиления управляемого усилителя в широких пределах и измерять остаточную толщину в зонах с малой эквивалентной площадью дефектов (при питинговой или плоскостной коррозии).

Структурная схема преобразователя для неферромагнитных металлов представлена на рис. 4. Для измерения толщины защитного диэлектрического покрытия используется встроенный вихретоковый преобразователь, который подключен к автогенераторной схеме, управляемой от контроллера. Частота автогенератора f обратно пропорциональна толщине покрытия h . В точке измерения контроллер вычисляет f , с использованием градуировочной характеристики рассчитывает h , после чего

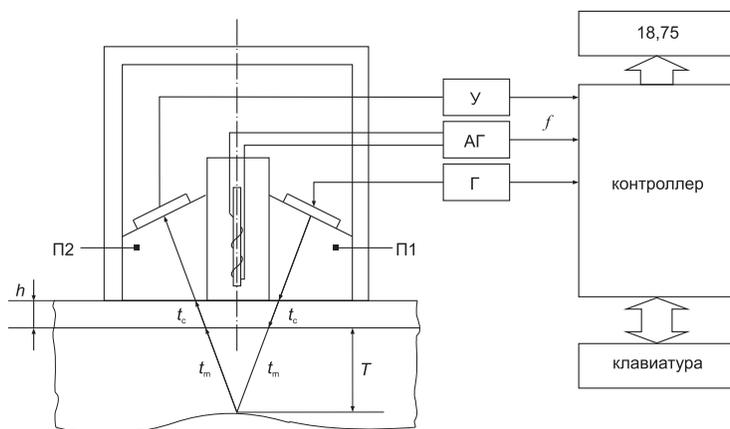


Рис. 4. Структурная схема измерительного преобразователя для неферромагнитных металлов: У — усилитель; АГ — автогенератор; Г — генератор, П — призма

последовательность работы аналогична описанной выше. Конструкция преобразователей позволяет производить измерения не только на плоских, но и на цилиндрических поверхностях.

Использование разработанного измерительного алгоритма позволило поднять чувствительность преобразователей и обеспечить зону контроля диаметром 5,5 мм.

Для работы с преобразователями были разработаны ультразвуковые толщиномеры БУЛАТ 2 и БУЛАТ 1S, сертифицированные в Госстандарте России и Федеральной службе воздушного транспорта России.

Опыт эксплуатации показал, что приборы с малогабаритными совмещенными преобразователями позволяют производить измерения остаточной толщины стенок изделий из черных и цветных металлов в диапазоне от 0,4 мм и более при толщине защитных покрытий до 0,6 мм. Также разработана серия преобразователей для измерения толщины металлических изделий в диапазоне от 1 до 60 мм при толщине покрытия до 4 мм. Толщиномеры нашли применение на авиа- и судоремонтных предприятиях, на энергетических и нефтегазоперерабатывающих комплексах.

Литература

1. Сясько В. А., Булатов А. С. Ультразвуковой толщиномер. — Патент РФ № 2225592, 10.03.2004.
2. Koleske J. V. Paint and coating testing manual. — Ann Arbor, MI, 1995. — 925 p.
3. Кикучи Е. Ультразвуковые преобразователи. — М.: Мир, 1972. — 424 с.