

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ
ПОКРЫТИЙ**

К. В. КОРОЛЕВ

Тульский государственный университет, Тула, Россия, e-mail: kkv120386@mail.ru

Рассмотрены особенности применения неразрушающего контроля толщины покрытий. Сопоставлены возможности известных методов измерения толщины. Проведен сравнительный анализ способов контроля толщины покрытия и определен наиболее рентабельный на примере немагнитных покрытий.

Ключевые слова: толщина, покрытие, мера, операции контроля, трудоемкость.

The features of application of nondestructive control of thickness of coatings are considered. The possibilities of known methods of thickness measurement are compared and the comparative analysis of thickness control methods is carried out. On the example of methods of nonmagnetic thickness control the most profitable method is determined.

Key words: thickness, coating, measure, control operations, labor intensiveness.

В последние годы значительно выросли требования к качеству покрытий, поскольку известно, что потери от коррозии составляют около 40 % всех потерь, связанных с использованием разных защитных покрытий [1]. На практике применяют разнообразные способы нанесения покрытий, различные разрушающие и неразрушающие методы измерений и контроля его толщины. При этом особое внимание уделяется качеству покрытия и достоверности полученной информации о его параметрах. Повышение качества измерений толщины покрытий достигается заменой, когда это допустимо, разрушающих методов на неразрушающие, а также увеличением точности неразрушающих средств измерений (СИ) толщины.

Для воспроизведения и передачи размера единицы длины толщиномерам покрытий служат меры толщины покрытий. Их основными

информативными характеристиками являются толщина и физические свойства материалов покрытий и оснований. Для толщины справедливы отношения эквивалентности, порядка и аддитивности, поэтому ее можно отнести к экстенсивным величинам и применять такие операции как обнаружение, классификация, контроль и измерение [2].

Все СИ толщины покрытий можно объединить в две группы: совмещенные и разобщенные со средствами наведения. Толщинометры первой группы основаны на магнитных отрывных и индуктивном методах, а второй – на бесконтактном методе динамических измерений. В схемах измерения с совмещением линий измерения и наведения соблюдается принцип Аббе. По этому принципу, называемому также принципом исключения компараторной погрешности, эталонный элемент устройства должен быть соосным с его рабочим элементом (или измеряемым объектом). В этом случае уменьшается погрешность взаимного расположения эталонного и рабочего элементов при возникновении поворотов деталей из-за технологических или эксплуатационных погрешностей (зазоров, погрешностей формы контактирующих поверхностей, деформаций, биений и т. п.). Следовательно, при разобщенных СИ и наведения данный принцип не соблюдается.

При сравнении различных методов измерений необходимо учитывать трудность их выполнения. Очевидно, что для СИ второй группы затраты времени на вспомогательные переходы будут намного больше, чем у СИ первой группы. Кроме того, следует учитывать точность выполненных измерений [3].

Оценивать методы определения толщины покрытия целесообразно применительно к толщиномерам с совмещенными средствами измерений и наведения. При этом можно опираться на статистические оценки длительности переходов и данные о вспомогательном времени, связанном с каждым из переходов. Трудоемкость контроля можно считать случайным событием, определяемым суммой трудоемкости переходов, т. е. суммой элементарных событий. При использовании толщиномера необходимо проводить операции градуировки перед выполнением измерений с определенной периодичностью. Длительность и трудоемкость градуировки СИ напрямую связаны как с объектом измерения, так и с типом применяемого толщиномера.

Анализ составляющих операции контроля показал, что в условиях одного завода отсутствуют существенные различия в длительности

выполнения переходов для деталей с близкими габаритными размерами и близкими размерами контролируемых поверхностей. Однако при этом соблюдается равенство длительностей вспомогательных переходов для деталей одной технологической группы, а среднее время перехода, в основном, зависит от размеров детали. При большом количестве переходов целесообразно использовать средние значения длительности переходов у толщиномеров различных видов, что и позволяет определять трудоемкость градуировки. В случае сопоставления трудоемкостей различных способов контроля в первом приближении можно считать время, затрачиваемое на переход одним и тем же для всех толщиномеров. При этом основным фактором, обуславливающим штучное время контроля, является вспомогательное время, связанное с конкретным переходом.

Трудоемкость одной контрольной операции (штучное время) можно определить по формуле

$$T_{\text{шт}} = T_{\text{осн}} + T_{\text{доп}} + T_{\text{изм}},$$

где $T_{\text{осн}}$ – основное время, затрачиваемое на градуировку конкретного экземпляра толщиномера; $T_{\text{доп}}$ – дополнительное время, связанное с подготовкой толщиномера к проведению контроля; $T_{\text{изм}}$ – длительность выполнения измерений толщины покрытий.

Дополнительное время, связанное с подготовкой одного и того же технологического оборудования для градуировки его измерительной системы, как и длительность измерений, очень сильно отличается в различных подразделениях даже одного предприятия. Можно выделить следующие элементарные операции процесса измерения: подготовка толщиномера к работе, его установка на измеряемую поверхность и проведение измерений. Целесообразно проводить сравнение только с учетом основного времени, связанного с градуировкой измерительной системы толщиномера.

Основное время можно рассчитать как

$$T_{\text{осн}} = \sum_{i=1}^m T_{\text{уст1}} + \sum_{i=1}^k T_{\text{уст2}} + \sum_{i=1}^p T_{\text{изм1}} + \sum_{i=1}^q T_{\text{изм2}} + \sum_{i=1}^n T_{\text{ф}},$$

где $T_{\text{уст1}}$, $T_{\text{уст2}}$ – время, затрачиваемое на одну установку и снятие эталона, на установку и наведение толщиномера на измеряемую поверхность, соответственно; $T_{\text{изм1}}$, $T_{\text{изм2}}$ – время, используемое на

градуировку толщиномера и измерение толщины покрытия; T_{ϕ} – время на фиксирование толщиномера в рабочем положении; m, k, n, p, q – число перечисленных операций.

Из этого уравнения следует, что распределение продолжительности элементарных переходов имеет вполне определенную закономерность, позволяющую с достаточной точностью вести расчеты трудоемкости контрольных операций по средним арифметическим значениям продолжительностей переходов сопоставляемыми способами. При этом возможны последовательные или параллельно-последовательные переходы.

Дополнительное время, связанное с подготовкой толщиномера к градуировке, не оказывает влияния на саму операцию и его можно принять одинаковым для различных методов контроля толщины покрытия. Поэтому целесообразно проводить сравнение этих методов при сопоставлении $T_{\text{осн}}$ переходов, связанных с основными операциями подготовки и проведения измерений толщиномерами, причем возможно совмещение отдельных элементарных переходов

$$T_{\text{осн}} = \sum_{i=1}^m T_{\text{уст1}} - \sum_{a=1}^{m'} T_{\text{уста}} + \sum_{i=1}^k T_{\text{уст2}} - \\ - \sum_{b=1}^k T_{\text{устb}} + \sum_{i=1}^p T_{\text{изм1}} - \sum_{c=1}^{p'} T_{\text{измc}} + \sum_{i=1}^q T_{\text{изм2}} - \sum_{d=1}^{q'} T_{\text{измd}} + \sum_{i=1}^n T_{\phi} - \sum_{f=1}^{n'} T_{\phi f},$$

где m', n', k', p', q' – число совмещенных переходов; $T_{\text{уста}}, T_{\text{устb}}, T_{\text{измc}}, T_{\text{измd}}, T_{\phi f}$ – времена, используемые на совмещенные переходы.

При анализе методов контроля толщины покрытий необходимо использовать отношение основных времен сравниваемых процессов

$$K_{ij} = T_{\text{оснi}} / T_{\text{оснj}}.$$

С целью упрощения сравнительного анализа будем считать, что при реализации всех методов контроля толщины время одного элементарного перехода, примерно одно и то же.

Рассмотрим пример контроля ряда изделий с немагнитным защитным покрытием. Следует обратить внимание на использование многократных измерений для повышения точности. Для сравнения выберем наиболее доступные методы контроля толщины немагнитных

покрытий: магнитный $T_{\text{осн1}}$, магнитные отрывной $T_{\text{осн2}}$ и индуктивный $T_{\text{осн3}}$, электромагнитный (вихретоковый) $T_{\text{осн4}}$.

Учтем, что время установки датчика на меру приблизительно равно времени съема датчика, а время выполнения градуировочных измерений практически такое же, как и время позиционирования датчика. Остаются отдельно стоящими только процедура градуировки и процедура перехода между основными операциями. Это позволит приравнять две пары составляющих (пары выделены одинарным и двойным подчеркиванием) основного времени калибровки, тогда получим следующие формулы:

$$T_{\text{осн1}} = n \left(\underline{2T_{\text{с}}} + T_{\text{град}i} + \underline{2T_{\text{изм}}} + T_{\text{пер}i} \right);$$

$$T_{\text{осн2}} = n \left(\underline{2T_{\text{с}}} + T_{\text{град}i} + T_{\text{изм}} \right);$$

$$T_{\text{осн3}} = n \left(\underline{2T_{\text{с}}} + \underline{2T_{\text{изм}}} + T_{\text{разм}i} \right);$$

$$T_{\text{осн4}} = n \left(\underline{2T_{\text{с}}} + \underline{2T_{\text{изм}}} + T_{\text{разм}i} \right),$$

где $T_{\text{с}}$ – время установки и съема датчика; $T_{\text{изм}}$ – время выполнения градуировочных измерений и позиционирования датчика; $T_{\text{град}}$ – процедура градуировки; $T_{\text{пер}}$ – процедура перехода; $T_{\text{разм}}$ – время размагничивания меры.

Во всех четырех методах выделяется общая часть трудоемкости процессов. Для наглядности преобразуем формулы, что позволит сравнить методы в относительных единицах

$$T_{\text{осн1}} = nT_{\text{изм}} (2 + 2k_{\text{с}} + k_{\text{град}i} + k_{\text{пер}});$$

$$T_{\text{осн2}} = nT_{\text{изм}} (1 + 2k_{\text{с}} + k_{\text{град}i});$$

$$T_{\text{осн3}} = nT_{\text{изм}} (2 + 2k_{\text{с}} + k_{\text{разм}i});$$

$$T_{\text{осн4}} = nT_{\text{изм}} (2 + 2k_{\text{с}} + k_{\text{разм}i}),$$

где $k_{\text{сд}} = T_{\text{сд}}/T_{\text{изм}}$; $k_{\text{град}i} = T_{\text{град}i}/T_{\text{изм}}$; $k_{\text{разм}i} = T_{\text{разм}i}/T_{\text{изм}}$; $k_{\text{пер}} = T_{\text{пер}i}/T_{\text{изм}}$.

Таким образом, целесообразнее попарно сравнивать методы контроля по некоторому коэффициенту отношения значений времени $T_{\text{осн}}$,

затрачиваемого на выполнение переходов, связанных с основными операциями подготовки и проведения измерений толщиномерами:

$$K_{12} = \frac{T_{\text{осн1}}}{T_{\text{осн2}}} = \frac{2 + 2k_c + k_{\text{гради}} + k_{\text{пер}}}{1 + 2k_c + k_{\text{гради}}},$$

$$K_{32} = \frac{T_{\text{осн3}}}{T_{\text{осн2}}} = \frac{2 + 2k_c + k_{\text{размi}}}{1 + 2k_c + k_{\text{град}}},$$

$$K_{42} = \frac{T_{\text{осн4}}}{T_{\text{осн2}}} = \frac{2 + 2k_c + k_{\text{размi}}}{1 + 2k_c + k_{\text{град}}}.$$

Отсюда следует, что при коэффициенте $K > 1$ метод измерения будет менее рентабельным, чем сравниваемый с ним. Поэтому, наиболее простым в использовании и наименее трудоемким является магнитный отрывной метод.

В заключение отметим, что сравнительный анализ методов контроля толщины покрытия позволяет на стадии подготовки к измерениям спрогнозировать затраты на те или иные технологические операции и выбрать наиболее экономичный и быстрый метод измерения. Это дает возможность повысить эффективность измерений толщины покрытия.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Защита** от коррозии. Покрытия лакокрасочные: Сборник. Ч. 2. М.: Изд-во стандартов, 1991.
2. **Асташенков А. И. и др.** Измерения. Контроль. Качество. Неразрушающий контроль. М.: Изд-во стандартов, 2002.
3. **Бабаджанов Л. С.** Метрологическое обеспечение измерения толщины покрытий // Образцовые высокоточные средства измерений. М.: ВНИИКИ, 1990. № 47.

Дата принятия 13.11.2012 г.

