

**ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НА
ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ**
***EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS ON THE MEASUREMENT
ACCURACY OF COATING THICKNESS***

Рудницкий В.А., Гнутенко Е.В.
Rudnitsky V.A., Hnutsenka Y.V.

В работе рассмотрены вопросы влияния параметров шероховатости поверхности ферромагнитной основы на точность измерения толщины немагнитного покрытия магнитными толщиномерами путем сопоставления результатов измерений с данными металлографического анализа. Показано, что систематическую погрешность измерений вследствие шероховатости основы можно интерпретировать наличием дополнительной немагнитной прослойки, обусловленной шероховатостью, толщина которой равна половине максимальной высоты неровностей профиля $Rz_{оч}$, что должно учитываться при нормировании допустимой погрешности.

The paper discusses the issues of the influence of surface roughness on the accuracy of the measurement of thickness coating by magnetic gauge using comparison the results with the data of metallographic analysis. It is shown that systematic measurement error due to the roughness of the substrate can be interpreted by the presence of additional non-magnetic layer due to surface roughness, the thickness of which is equal to half the maximum height roughness Rz_{sub} that should be considered when setting allowable error

При измерении толщины покрытий, как известно, одним из наиболее распространенных мешающих факторов является шероховатость поверхности покрытия и основного металла. Особенно сильное влияние шероховатости сказывается при малых толщинах покрытий, когда даже определение «толщина покрытия» становится неопределенным. Влияние шероховатости на результат измерений зависит не только от значения толщины, но и от используемого метода измерений. В общем случае, шероховатость приводит к увеличению как систематической, так и случайной погрешности измерений. Шеро-

ховатость, основной причиной появления которой является механическая обработка, является очень разнообразной по геометрии в зависимости от режимов обработки, поэтому в настоящей работе мы в основном ограничимся условием обязательного укладывания в номинальную площадь контакта датчика такого числа неровностей (выступов и впадин), чтобы дисперсия показаний была относительно небольшой и достаточно стабильной величиной. Этому условию в основном соответствует шероховатость, образованная механической, пескоструйной и дробеструйной обработками или шлифованием, являющимися характерными примерами нерегулярной шероховатости.

Обычно считается, что наиболее предпочтительным параметром, характеризующим шероховатость, является среднее арифметическое отклонение профиля Ra [1], определяемое по формуле:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y_i| dx, \quad (1)$$

или, после замены интеграла суммированием:

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (2)$$

где l - базовая длина, y_i - отклонение профиля от средней линии.

Широкое использование параметра Ra объясняется тем, что он дает достаточную информацию не только о высоте, но и о профиле неровностей, что немаловажно, например, для оценки работы сопряженных деталей.

Однако, при неразрушающем контроле толщины покрытия, датчик прибора устанавливается на его поверхность и контактирует только с наибольшими выступами шероховатости, вследствие чего целесообразнее оценивать шероховатость по значению наибольшей неровности профиля Rz , определяемой по формуле:

$$Rz = \frac{\sum_{i=1}^5 H_{max} + \sum_{i=1}^5 H_{min}}{5}, \quad (3)$$

где H_{max} и H_{min} – высота i -го наибольшего выступа и глубина i -ой наименьшей впадины профиля соответственно.

Как видно из формулы (3), величина Rz оценивается по 10 точкам в пределах базовой длины. Рассмотрим вариант измерения толщины немагнитного покрытия на ферромагнитной основе магнитным пондеромоторным методом, который основан на измерении силы притяжения постоянного магнита, являющейся функцией толщины немагнитной прослойки (толщины немагнитного покрытия) между постоянным магнитом и ферромагнитным основанием.

На рисунке 1 представлена схема контакта сферического наконечника постоянного магнита радиусом R с немагнитным покрытием, нанесенным на поверхность ферромагнитного основания.

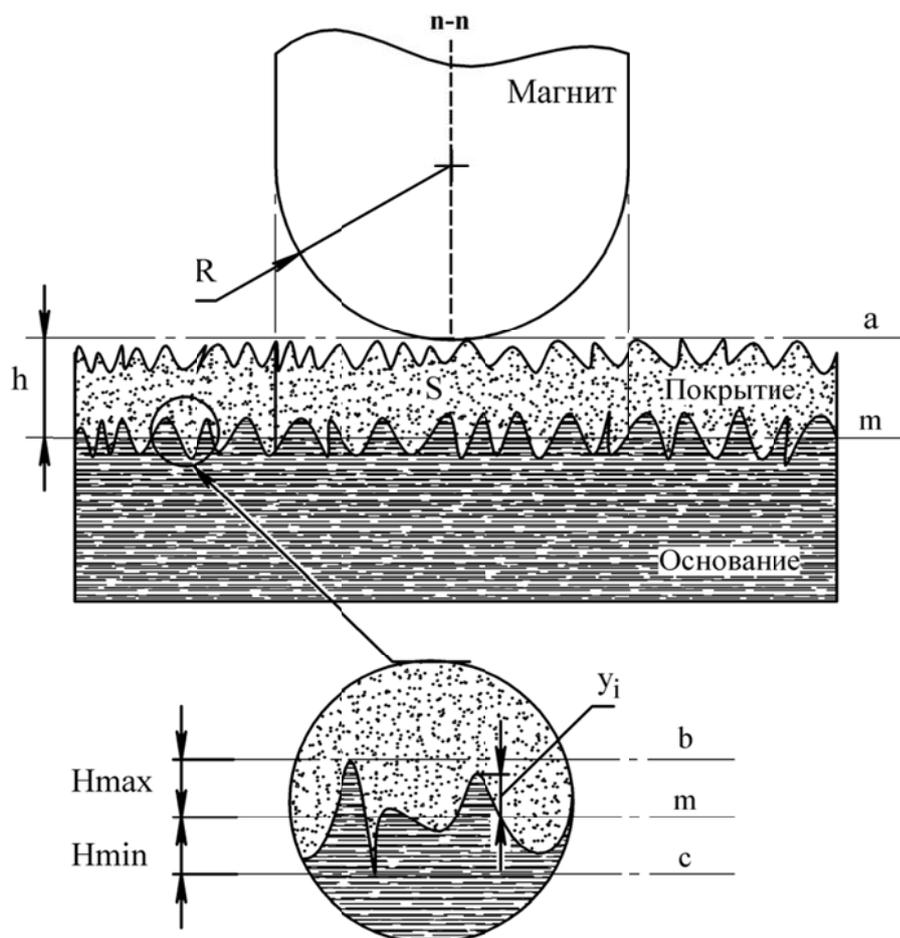


Рис. 1. Схема взаимодействия постоянного магнита с немагнитным покрытием, имеющим параметр шероховатости $R_{zпокp}$, нанесенным на ферромагнитную основу с шероховатостью $R_{zосн}$.

Внешняя поверхность покрытия и поверхность основания имеют в общем случае различную шероховатость. Как показано на рисунке 1, шероховатость отображается чередующимися неровностями, которые ограничены линиями выступов и впадин, характеризующимися значением параметра Rz . Толщиной покрытия, измеряемой магнитным толщиномером, можно считать расстояние h между линией выступов на поверхности покрытия, с которой контактирует постоянный магнит, и средней линией профиля шероховатости основы. В качестве нижней границы толщины покрытия принята средняя линия профиля основы, поскольку слой, занимаемый шероховатостью, можно считать лишь наполовину заполненным ферромагнетиком.

Оценим величину погрешности измерения толщины покрытия толщиномером магнитного пндеромоторного метода.

Физическая сущность метода заключается в следующем: магнитное поле постоянного магнита индуцирует на шероховатой поверхности ферромагнитной пластины магнитные заряды, которые являются источником вторичного поля, взаимодействующего с полем постоянного магнита.

Впервые уравнение для силы притяжения F (в относительных единицах) стержневого постоянного магнита было получено Акуловым [2] в виде:

$$F = \frac{b}{(1+ch)^2}, \quad (4)$$

где h – толщина немагнитного покрытия, b – коэффициент, пропорциональный квадрату намагниченности, c – величина, обратная полюсному расстоянию (расстоянию между концом магнита и его полюсом).

Из формулы (4) следует, что при равенстве нулю толщины покрытия h сила притяжения определяется только намагниченностью магнита. Однако, как мы отмечали выше, шероховатость поверхности тоже будет влиять на величину F в виде дополнительного промежуточного немагнитного слоя толщиной $R_{zочн}/2$. В связи с этим, формулу (4) можно переписать в более общем виде:

$$F = \frac{b}{(1+c(h+R_{zочн}))^2}. \quad (5)$$

Как следует из формулы (5), сила притяжения меньше на шероховатой поверхности и нелинейно убывает с ростом h , а градиент убывания зависит от полюсного расстояния магнита ($1/c$).

Результатом определения толщины покрытия толщиномером является усредненное значение толщины по площади поверхности, непосредственно примыкающей к постоянному магниту. Величина этой информативной поверхности зависит от параметров постоянного магнита: площади его поперечного сечения и намагниченности. На практике, при измерении силы притяжения, с известной степенью достоверности можно считать, что съём информации о толщине покрытия осуществляется с площади равной площади проекции постоянного магнита: $S = \pi R^2$.

Оценка погрешности приборов-толщиномеров обычно осуществляется путем сопоставления результатов измерения толщины покрытия с данными эталонных измерений. В нашем случае мы будем сравнивать с данными металлографических исследований на поперечных шлифах, которые позволяют оптически измерить толщину покрытия в любой точке площади S . Толщина $h_{мет}$, измеренная на шлифе вдоль произвольной линии n - n , показанной на рисунке 1 и перпендикулярной к поверхности шлифа, будет равна:

$$h_{мет} = h - y_{i,покр} + y_{i,осн}, \quad (6)$$

где $y_{i,покр}$ и $y_{i,осн}$ – отклонения от средней линии профиля шероховатости покрытия и основы на произвольной линии площади S .

Для самых неблагоприятных случаев, когда значения y_i равны максимальным отклонениям H_{max} либо H_{min} , погрешность будет максимальна.

В соответствие с рисунком 1, для максимальной отрицательной погрешности можно записать:

$$-\Delta_{max} = h - h_{мет} = h - (h + H_{min,осн}) \quad (7)$$

и для максимальной положительной погрешности:

$$+\Delta_{\max} = h - h_{\text{мет}} = h - \{h - (H_{\max, \text{покр}} + H_{\min, \text{покр}}) - H_{\min, \text{осн}}\}. \quad (8)$$

Учитывая, что $Rz \approx H_{\max} + H_{\min}$, перепишем уравнения (7) и (8):

$$-\Delta_{\max} = -Rz_{\text{осн}}/2, \quad (9)$$

$$+\Delta_{\max} = Rz_{\text{покр}} + Rz_{\text{осн}}/2. \quad (10)$$

Из приведенных равенств можно сделать следующий практический вывод. Если конструкторскими чертежами оговорена допустимая шероховатость покрываемого изделия и покрытия параметрами Rz , то измерение толщины покрытия прибором даже с нулевой основной погрешностью возможно с погрешностью, оговоренной равенствами (9) и (10). Другими словами, требования к точности измерений должны предъявляться, принимая во внимание конкретную шероховатость изделия.

Кроме того, шероховатость влияет на установление нижнего диапазона измерения толщины покрытия. Наличие шероховатости не позволяет определить нулевое или близкое к нему значение толщины покрытия. Поэтому допустимую величину погрешности обычно записывают в виде суммы слагаемых, первое из которых обозначает абсолютную погрешность, а второе – относительную. Например, запись погрешности: $\delta = \pm(t \pm 0,05h)$ мкм допускает на непокрытой поверхности погрешность, равную t мкм.

Рассмотрим, какое значение может принимать t при различных допустимых параметрах Rz . При производстве толщиномеров покрытий в них заложена градуировочная зависимость: сила притяжения – толщина покрытия, для получения которой использовались эталонные образцы толщины покрытий, состоящие из основы в виде пластины со строго плоскопараллельными гранями и нанесенным на одну из них покрытием заданной толщины. Изготавливаются эталонные образцы с учетом минимизации параметров шероховатости поверхностей пластины и покрытия. Поэтому при измерении на непокрытом изделии, имеющем шероховатость, толщиномер будет показывать наличие толщины немагнитного покрытия, величина которо-

го в соответствии с равенствами (9) и (10) будет равна половине параметра $\pm Rz$.

Откуда следует, что величина t как минимум должна быть равна $Rz/2$.

Рассмотрим следующий характерный случай, когда толщина покрытия h , измеренная толщиномером, равна $Rz_{осн}$. Учитывая, что в начале процесса гальванизации покрытие, как правило, повторяет микрорельеф основания, можно определить следующую максимальную погрешность: $-\Delta_{max} = -Rz_{осн}/2$ и $+\Delta_{max} = +\frac{3}{2}Rz_{осн}$.

Для повышения соответствия результатов измерений заданной точности из приведенных данных следует, что величина абсолютной составляющей погрешности t должна быть равна $t = \pm\frac{3}{2}Rz_{осн}$.

С увеличением толщины шероховатость поверхности покрытия может изменяться различным образом: увеличиваться или уменьшаться по сравнению с основанием и изменять свой рельеф [3], вследствие чего $Rz_{осн}$ постепенно будет переходить в $Rz_{покр}$ и в дальнейшем максимальные систематические погрешности, обусловленные шероховатостью, будут в общем виде определяться равенствами (9) и (10).

Из сказанного выше видно, что наибольшее влияние на точность измерений шероховатость оказывает в области малых толщин покрытий. При увеличении толщины немагнитного покрытия влияние шероховатости будет ослабевать и относительная погрешность уменьшаться.

Экспериментальная проверка приведенных выше результатов проводилась на пяти образцах из стали марки Ст3 с шероховатостью Rz в диапазоне от 0,1 до 4,5 мкм. В качестве толщины немагнитного покрытия использовалась гладкая фольга толщиной 90 мкм, накладываемая на образцы из стали. На каждом образце производилось 40 измерений прибором МТА-1Э с округлением измеряемой толщины до одного микрометра. Как и ожидалось, рассеивание показаний на исследуемых образцах соответствовало нормальному закону распределения. Параметры распределения определялись на основе полученных экспериментальных данных в виде средних значений и средних квадратических отклонений. Результаты измерений представлены на рисунке 2, на котором по оси ординат отложены относительные значения показаний толщиномера к показанию на гладкой поверхности

образца ($Rz=0,1$), а по оси абсцисс – погрешность показаний в виде разности значений толщины измеренных прибором МТА-1Э и толщины фольги 90 мкм.

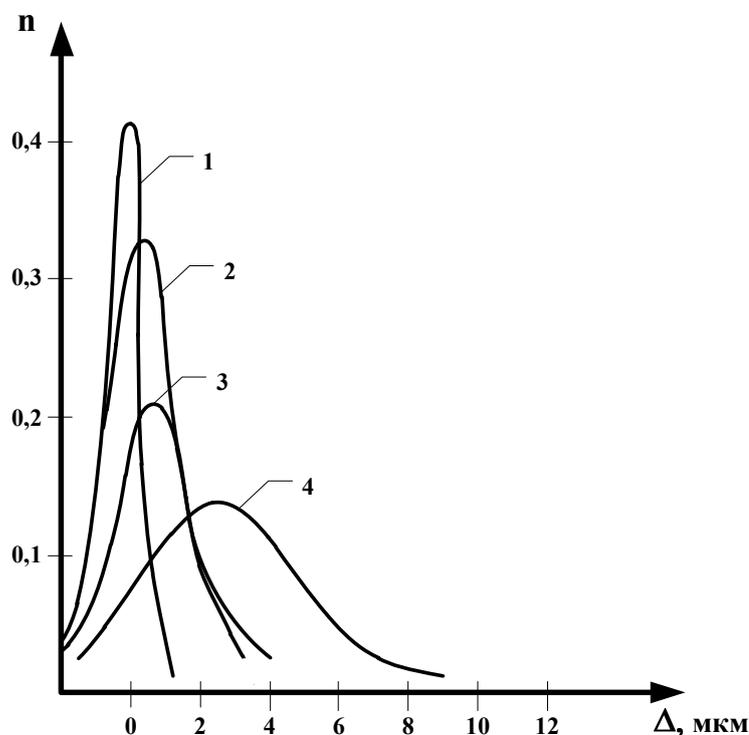


Рис.2. Влияние шероховатости основного металла на рассеяние показаний прибора МТП-1Э. Кривые 1, 2, 3 и 4 относятся соответственно к параметрам шероховатости: $Rz = 0,1; 1,55; 2,1$ и $4,5$ мкм

Как видно из рисунка 2, с ростом шероховатости увеличивается разброс показаний, растет дисперсия и появляется систематическая погрешность, сдвигающая среднее арифметическое в сторону больших значений.

Из формул (8) и (9) следует, что для рассматриваемого случая гладкой фольги на шероховатой основе максимальная систематическая погрешность не должна превышать величину равную $Rz_{\text{осн}}/2$.

Если принять во внимание полученные из представленных кривых средние арифметические значения при измерении толщины фольги, которые эквивалентны систематической погрешности, то можно сделать вывод о достаточно хорошем их соответствии с величиной $Rz_{\text{осн}}/2$.

Зависимость результатов измерений толщины от шероховатости, полученная на конкретной толщине фольги 90 мкм, характерна для любой толщины немагнитного покрытия и не зависит от параметров постоянного магнита, используемого в толщиномере покрытий. Для уменьшения случайной погрешности, обусловленной шероховатостью, рекомендуется проводить несколько измерений и за результат брать среднее из трех для шероховатости $Rz \leq 4$ и среднее из пяти измерений при $Rz \geq 4$ мкм.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. При контроле толщины в первую очередь тонких немагнитных покрытий на ферромагнитной основе на результат измерений значительное влияние оказывает шероховатость основного металла и шероховатость внешней поверхности покрытия, которые являются причинами появления случайной и систематической погрешности измерений.

2. Экспериментально показано, что систематическую погрешность измерений вследствие шероховатости основного металла можно интерпретировать наличием дополнительной немагнитной прослойки, обусловленной шероховатостью, толщина которой равна половине максимальной высоте неровностей профиля $Rz_{\text{осн}}$.

3. Вне зависимости от величины основной погрешности конкретных толщиномеров, требования к точности измерений толщины покрытий должны предъявляться, учитывая конкретную шероховатость изделия, оговоренную конструкторскими чертежами на продукцию, подлежащую контролю.

Литература

1. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – Введен 01.01.1975. – М: Стандартиформ, 2005. – 12 с.
2. Акулов, Н.С. К вопросу определения толщины покрытий / Н.С. Акулов // Вестник металлопромышленности. – 1939. – №9. – С. 78–80.
3. Гнусин, Н.П. Шероховатость электроосажденных поверхностей / Н.П. Гнусин, Н.Я. Коварский. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1970. – 232 с.

Статья поступила в редакцию 22.09.14