

УДК 620.179

## ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ НА РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫМ ПОНДЕРОМОТОРНЫМ МЕТОДОМ ТОЛЩИНЫ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ

Е. В. ГНУТЕНКО, В. А. РУДНИЦКИЙ

ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»

Минск, Беларусь

В отличие от толщины немагнитных покрытий, где измеряемая толщина является зазором между взаимодействующими объектами, одним из которых является постоянный магнит, а другим – ферромагнитное основание, никелевое покрытие, представляет объект, непосредственно взаимодействующий с постоянным магнитом. Это взаимодействие можно описать с помощью двойного магнитного слоя, представляющего никелевое покрытие. На рис. 1 представлена схема контакта постоянного магнита с полюсным расстоянием  $a$  с никелевым покрытием толщиной  $h$ . Поле постоянного магнита индуцирует на внешней и внутренней поверхностях никелевого покрытия одинаковые по величине, но разные по знаку поверхностные магнитные заряды, поле которых взаимодействует с полем постоянного магнита в виде силы притяжения и отталкивания соответственно.

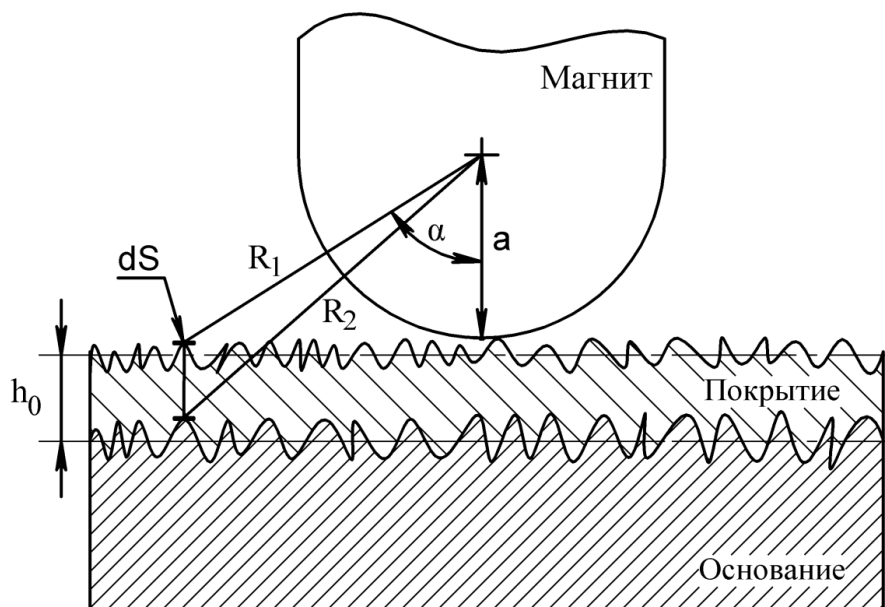


Рис. 1. Схема взаимодействия постоянного магнита с никелевым покрытием с шероховатой поверхностью

Выражение для скалярного потенциала магнитного поля в месте расположения полюса постоянного магнита будет следующим [1]:

$$U = \int_S \frac{IdS}{R_1} - \int_S \frac{IdS}{R_2} = I \int_S \frac{R_2 - R_1}{R_1 R_2} dS, \quad (1)$$

где  $I$  – нормальная составляющая намагниченности никелевого слоя;  $R_1$  и  $R_2$  – расстояния от полюса магнита до рассматриваемого элемента площади  $dS$ .

Для  $R_1 \gg h$  значения  $R_1$  и  $R_2$  связаны следующим соотношением:

$$R_2 = R_1 + h \cdot \cos \alpha = R_1 + h \frac{a}{R_1}, \quad (2)$$

где  $a$  – полюсное расстояние;  $\alpha$  – угол между  $R_1$  и нормалью к поверхности.

Шероховатость поверхности покрытия будем моделировать гармонически меняющейся функцией с амплитудой равной параметру шероховатости  $Rz$ :

$$h = h_0 + Rz \cdot \sin \frac{2\pi\rho}{l}, \quad (3)$$

где  $h_0$  – средняя толщина покрытия или расстояние между средними линиями профилей наружной и внутренней стороны покрытия;  $l$  – длина волны шероховатости,  $\rho$  – расстояние от оси магнита до рассматриваемой площадки.

Выражение (1) с учетом уравнений (2) и (3) можно записать в виде:

$$U = I \cdot a \int_S \frac{h_0 + Rz \cdot \sin \frac{2\pi\rho}{l}}{R_1} dS. \quad (4)$$

После операций интегрирования и последующего дифференцирования по  $a$  получаем выражение для силы притяжения магнита:

$$F = \frac{K}{4a^3} \left\{ h_0 + Rz \cdot \frac{\pi^2}{2} e^{-\frac{2\pi a}{l}} \frac{a^3}{l^3} \cdot \left( 2\pi^2 + \frac{\pi l}{a} + \frac{l^2}{2a^2} \right) \right\}. \quad (5)$$

Первое слагаемое в круглых скобках с учетом множителя  $K/4a^3$ , являющегося функцией намагниченности и полюсного расстояния магнита, дает значение для отрывной силы магнита при отсутствии шероховатости ( $Rz = 0$ ).

Из формулы (5) следует важный вывод о наличии прямо пропорциональной зависимости между отрывной силой и толщиной никелевого покрытия.

Второе слагаемое в формуле (5) показывает вклад в отрывную силу шероховатости никелевого покрытия:

$$F = F_0 + \Delta F. \quad (6)$$

Взяв отношение  $\Delta F/F_0$ , получим относительную погрешность измерения отрывной силы, обусловленную шероховатостью:

$$\delta = \frac{Rz}{h_0} \cdot \frac{\pi^2}{4} (4\pi^2 \gamma^3 + 2\pi \gamma^2 + \gamma), \quad (7)$$

где  $\gamma = a/l$ .

Принимая, что  $Rz$  не превышает  $0,5h_0$ , а для постоянных магнитов, используемых в толщиномерах, всегда выполняется условие  $a/l > 4$ , то погрешность не превысит доли процента.

При измерениях приборами МТА-НЦ, разработанными в ИПФ НАН Беларуси, использующих постоянные магниты из редкоземельных матери-

алов, на пленках с различными участками шероховатости было подтверждено, что погрешность от шероховатости никелевого покрытия близка к нулю.

Отсюда следует принципиальное отличие характера влияния шероховатости немагнитных покрытий на точность измерения толщины от влияния шероховатости на ферромагнитных никелевых покрытиях. При измерении толщины немагнитных покрытий на немагнитной основе шероховатость обуславливает как систематическую, так и случайную погрешность. При измерении толщины никелевых покрытий отрывная сила магнита определяются только эффективным объемом покрытия, находящимся под магнитом и толщиной покрытия, аналогично показанной на рис. 1. Поясняется это тем, что магнитное поле постоянного магнита, изготовленного, например, из редкоземельных материалов, воздействующее на покрытие, на расстоянии до 200–300 мкм практически по величине однородно и неизменно. Если использовать постоянные магниты с полусферическим наконечником, диаметр полусферы которого более 4 мм, то градиент магнитного поля будет минимален. В этом случае можно наблюдать независимость показаний толщиномера от толщины немагнитной прокладки, помещаемой между постоянным магнитом и никелевым покрытием, если толщина прокладки не превышает указанных 200–300 мкм. Косвенное подтверждение выше сказанному может служить наблюдаемая прямо пропорциональная зависимость отрывной силы от толщины никелевого покрытия во всем диапазоне измеряемых толщин.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудницкий, В. А. Особенности измерений тощины никелевых покрытий магнитным методом / В. А. Рудницкий, В. А. Антипенко // Докл. АН БССР. – 1977. – № 3. – Т. XXI.

E-mail: [gnutenkoev@gmail.com](mailto:gnutenkoev@gmail.com)  
[rudnitsky@iaph.bas-net.by](mailto:rudnitsky@iaph.bas-net.by)