

УДК 620.179.142.6

**ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ СТАЛЬНОГО КОРПУСА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО ТОЛЩИНОМЕРА НА КРАЕВОЙ ЭФФЕКТ**

Булатов О.В.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Введение. Краевой эффект во многих случаях становится одним из основных факторов, снижающих точность измерений толщины покрытия. Так как при магнитодинамической толщинометрии данный фактор в немалой степени зависит от геометрических параметров стального цилиндрического корпуса преобразователя, целесообразно осуществить их оптимизацию при разработке конструкции толщиномера.

Из общих соображений следует, что сильное влияние на краевой эффект должна оказывать толщина вертикальной стенки корпуса магнитодинамического преобразователя [1]. В связи с этим целью настоящей работы стал поиск значения данной толщины, оптимального для толщинометрии никелевого покрытия на неферромагнитном основании.

Как правило, толщина никелевого покрытия промышленных изделий не превышает 100 мкм. Одним из исключений является камера жидкостного ракетного двигателя: в этом случае покрытие может иметь толщину вплоть до 700 мкм. Так как с увеличением толщины никелевого покрытия краевой эффект возрастает, в данной работе исследована его зависимость от толщины стенки корпуса преобразователя при большем из двух указанных значений. Исследование проведено методом конечных элементов в пакете прикладных программ FEMM [2], предназначенном для работы с осесимметричными моделями.

Методика и результаты исследования. Расчетным аналогом информативного сигнала магнитодинамического преобразователя является информативный поток F_E , представляющий собой разность двух магнитных потоков, проходящих через контур центрального витка измерительной обмотки преобразователя в его начальном и конечном положениях относительно покрытия. С другой стороны, поток F_E можно выразить через изменение ΔB_n нормальной составляющей магнитной индукции, обусловленное удалением преобразователя от покрытия на условно бесконечное расстояние:

$$F_E = \Delta B_n S, \quad (1)$$

где S – площадь плоской поверхности, ограниченной центральным витком обмотки.

Так как информативный сигнал формируется всеми витками обмотки, охватывающими стальной полюсный наконечник, сопряженный с постоянным магнитом преобразователя, в первую очередь исследована зависимость величины B_n ср

(нормальной составляющей магнитной индукции, усредненной по всему объему материала наконечника) от расстояния между краем никелевого покрытия и точкой контакта наконечника с покрытием, расположенной на оси симметрии преобразователя (это расстояние равно радиусу R никелевого диска, заменившего собой покрытие при компьютерном моделировании). Графики зависимостей B_n ср(R) и B_n ср(H) приведены на рисунке 1.

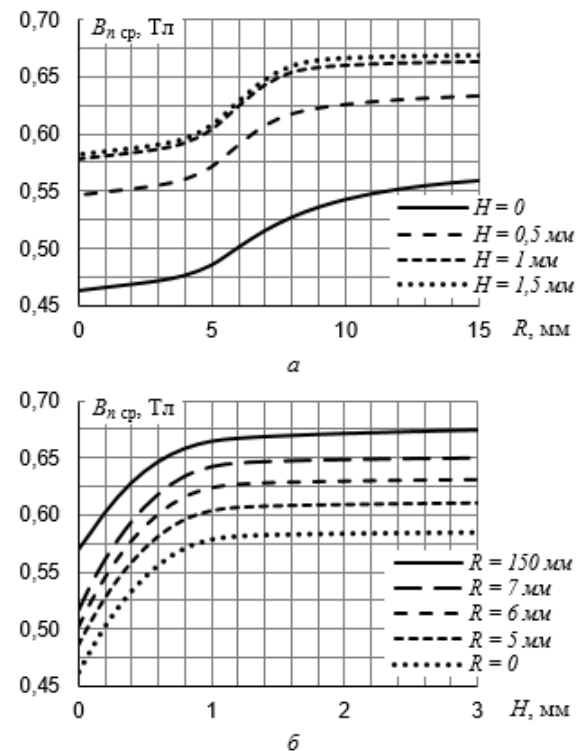


Рисунок 1 – Зависимость величины B_n ср от радиуса R никелевого диска толщиной 700 мкм (а) или от толщины H вертикальной стенки цилиндрического корпуса магнитодинамического преобразователя (б)

Из формулы (1) следует, что влияние толщины H на краевой эффект можно также оценить по изменению нормальной составляющей B_n в материале наконечника на уровне центрального витка обмотки, имеющего радиус 6 мм и расположенного на расстоянии 2,5 мм от поверхности диска. В связи с этим на рисунке 2 показано радиальное распределение B_n в наконечнике при разной H .

Количественная оценка краевого эффекта основывалась на анализе влияния радиуса R на поток F_E . Краевой эффект считался значительным только при выполнении условия $R < R_{из}$ (последняя величина является радиусом информативной

зоны преобразователя). О достижении равенства $R = R_{из}$ свидетельствовало двухпроцентное изменение потока F_E , так как оно соответствует основной допускаемой погрешности толщиномеров МТЦ [1], причем исходным было значение F_E , вычисленное при считавшемся бесконечным $R = 150$ мкм. При таком подходе получена зависимость $R_{из}(H)$, изображенная на рисунке 3.

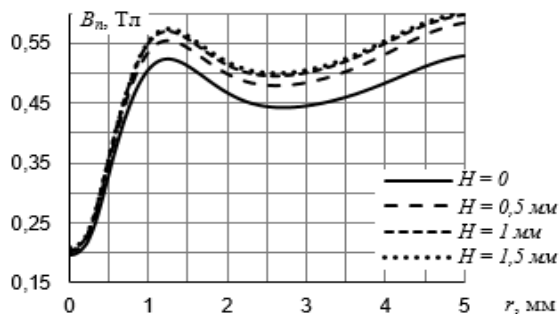


Рисунок 2 – Распределение нормальной составляющей B_n магнитной индукции в материале наконечника диаметром 5 мм по радиальной координате r

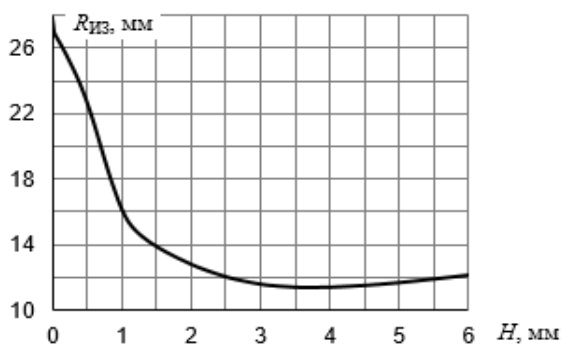


Рисунок 3 – Зависимость радиуса $R_{из}$ информативной зоны преобразователя от толщины H вертикальной стенки его корпуса

Анализ результатов исследования. По графику на рисунке 1, а видно, что приближение радиуса R к нулю приводит к существенному уменьшению величины $B_{n, ср}$, наиболее заметному в том случае, когда край никелевого диска проходит под двухмиллиметровым воздушным зазором между наконечником и стенкой корпуса, так как именно здесь в никеле наиболее сконцентрированы силовые линии магнитной индукции. Значительное возрастание $B_{n, ср}$ при утолщении стенки корпуса, наблюдаемое вплоть до $H = 1$ мм, объясняется резким увеличением концентрации указанных линий в материале стенки, что в конечном итоге приводит к существенному увеличению магнитной индукции в материале наконечника. В целом же первый график свидетельствует о том, что магнитодинамический преобразователь становится очень чувствительным к изменению R , когда сужающийся край диска доходит до стенки корпуса.

По взаимному расположению линий на втором графике видно, что величина $B_{n, ср}$ начинает существенно уменьшаться только при $R < 10$ мм (этим подтверждается достоверность первого графика), а по их характеру – что $B_{n, ср}$ при любом R очень сильно зависит от толщины H , пока последняя не превысит 1 мм. Дальнейшее увеличение H практически не приводит к росту $B_{n, ср}$, поскольку концентрация силовых линий магнитной индукции в материале стенки корпуса уже почти не возрастает. Следовательно, для значительного снижения краевого эффекта стенка корпуса должна быть достаточно толстой.

Минимум функции $B_n = f(r)$ при $r = 0$ на рисунке 2 объясняется наличием шарика диаметром 2,5 мм, предотвращающего износ наконечника и выполненного из закаленной подшипниковой стали, которая по магнитной проницаемости существенно хуже незакаленной низкоуглеродистой стали наконечника. Также видно значительное влияние H на B_n при $H < 1$ мм, подтверждающее важность выбора оптимального значения этой толщины.

Для практики наибольший интерес представляет график, изображенный на рисунке 3. В отличие от предыдущих графиков, здесь уже можно выбрать оптимальное значение H , при котором краевой эффект будет минимальным. Как и следовало ожидать, величина $R_{из}$ стремительно убывает только до $H \approx 1$ мм, а дальше ее зависимость от H быстро ослабевает и, начиная с $H \approx 3$ мм, оказывается практически несущественной. Далее функция $R_{из} = g(H)$ плавно достигает минимума при $H = 3,7$ мм, а затем наблюдается тенденция слабого возрастания $R_{из}$, которая и должна иметь место при увеличении внешнего диаметра корпуса.

Заключение. Расчетные данные, полученные в настоящей работе, свидетельствуют о сильном влиянии толщины вертикальной стенки стального корпуса магнитодинамического преобразователя на краевой эффект. Кроме того, они позволяют утверждать, что для минимизации краевого эффекта указанная толщина должна быть достаточно большой, но не избыточной. График на последнем рисунке показывает, что при толщиномерии никелевого покрытия на неферромагнитном основании оптимальной является стенка толщиной 3,7 мм, однако на практике можно использовать преобразователь, корпус которого имеет более тонкую стенку (толщиной 2,5–3 мм).

Литература

1. Лухвич А.А. Магнитные толщиномеры нового поколения / А.А. Лухвич // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2010. – № 4. – С. 3–15.
2. Finite element method magnetics. Version 4.2 [Electronic resource]: user's manual. – Mode of access: <http://www.femm.info/wiki/Files/files.xml?action=download&file=manual.pdf>. – Date of access: 09.10.2020.