

УДК 620.179.142.6

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРОВ КОРПУСА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО ТОЛЩИНОМЕРА С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ КРАЕВОГО ЭФФЕКТА

Булатов О.В.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Методом конечных элементов оптимизированы толщины стенок стального цилиндрического корпуса преобразователя магнитодинамического прибора для толщинометрии никелевых покрытий в диапазоне от 0 до 700 мкм. Установлено, что преобразователь с корпусом, имеющим вертикальную стенку толщиной 3 мм, горизонтальную толщиной 1,5 мм и удаленным на расстояние не более 1 мм от поверхности покрытия, обеспечивает практически максимальную точность толщинометрии возле краев покрытия.

Ключевые слова: магнитодинамический преобразователь, никелевое покрытие, повышение точности.

OPTIMIZATION OF THE CASE SIZES OF THE TRANSDUCER OF THE MAGNETO-DYNAMIC THICKNESS GAUGE WITH THE PURPOSE OF EDGE EFFECT MINIMIZING

Bulatov O.

*Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus*

Abstract. The walls thicknesses of the transducer steel cylindrical case of the magneto-dynamic gauge for thickness measuring of nickel coatings in the range from 0 up to 700 micrometers are optimized by means of the finite element method. It is established that the transducer with the case, which has the vertical wall with thickness 3 mm, the horizontal wall with thickness 1.5 mm, and locates at a distance no more than 1 mm from the coating surface, provides practically maximal accuracy of thickness measurement near the coating edges.

Key words: magneto-dynamic transducer, nickel coating, improved accuracy.

*Адрес для переписки: Булатов О.В., ул. Академическая, 16, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: lab1@iapf.bas-net.by*

Введение. В работе [1] исследовано влияние на краевой эффект толщины H вертикальной стенки стального (ферромагнитного) цилиндрического корпуса преобразователя магнитодинамического прибора, предназначенного для измерений толщины никелевых покрытий в диапазоне от 0 до 700 мкм, актуальном для камер жидкостных ракетных двигателей. Там же показано, что краевой эффект очень существенно снижается в том случае, когда значение указанной толщины оказывается в определенном диапазоне. В настоящей работе, являющейся продолжением указанной, завершена комплексная оптимизация размеров корпуса преобразователя, необходимая для минимизации краевого эффекта.

Так как внешние размеры корпуса регламентированы заданным диапазоном значений измеряемой толщины, для достижения минимального краевого эффекта необходимо оптимизировать три геометрических параметра корпуса: толщину H цилиндрической вертикальной и толщину S плоской горизонтальной стенок, а также воздушный зазор Z между нижним торцом корпуса и покрытием. Исходя из практических рекомендаций, изложенных в работе [1], в данном случае выбрана толщина $H = 3$ мм.

Методика и результаты исследования. В настоящей работе с помощью пакета прикладных программ FEMM по изложенной в [1] методике в первую очередь определено влияние радиуса R

никелевого диска (аналога покрытия) толщиной 700 мкм на магнитную индукцию в материале полюсного наконечника постоянного магнита преобразователя при разной толщине S . Так как информативный сигнал любого магнитодинамического преобразователя формируется изменением нормальной составляющей магнитной индукции [1], на рис. 1 приведены линии зависимостей $B_{n\text{ ср}}(R)$ и $B_{n\text{ ср}}(S)$, при этом каждое значение $B_{n\text{ ср}}$ вычислено для всего наконечника при зазоре $Z = 1$ мм. Линия, соответствующая толщине $S = 0$, относится к предельному случаю, когда у преобразователя отсутствует корпус.

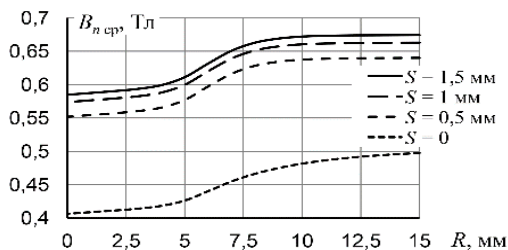
На рис. 2 показан график зависимости радиуса $R_{\text{из}}$ информативной зоны преобразователя от толщины S при зазоре $Z = 1$ мм.

На рис. 3, а показан график $B_{n\text{ ср}}(R)$ при различных значениях зазора Z между нижним торцом корпуса и диском. Линии зависимости $B_{n\text{ ср}}(Z)$, соответствующие различным значениям радиуса R , изображены на рис. 3, б.

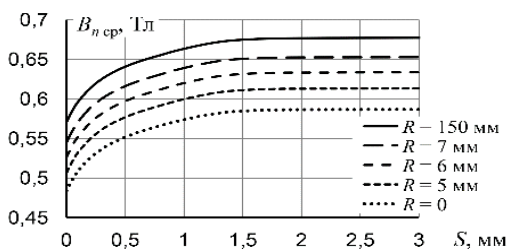
Влияние зазора Z на информативную зону преобразователя можно оценить по графику зависимости $R_{\text{из}}(Z)$, приведенному на рис. 4.

Анализ результатов. По графику на рис. 1, а видно, что ферромагнитный корпус существенно усиливает информативный сигнал преобразователя: даже при относительно тонкой ($S = 0,5$ мм) горизонтальной стенке величина $B_{n\text{ ср}}$ в среднем почти на 35 % больше, чем при отсутствии кор-

пуca. Наиболее интенсивный рост $B_{n\text{cp}}$ наблюдается на участке от $R \approx 5$ до $8,5$ мм, т. е. примерно от границы наконечника до середины вертикальной стенки.



a



б

Рисунок 1 – Зависимости $B_{n\text{cp}}$ от R (a) и от S (б) при $H = 3$ мм

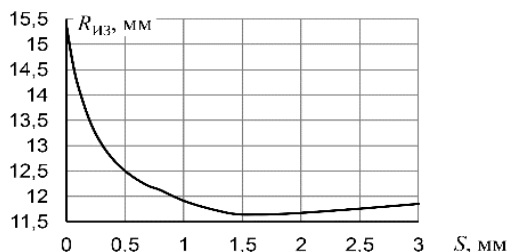
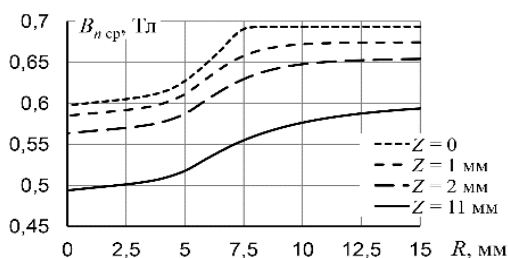
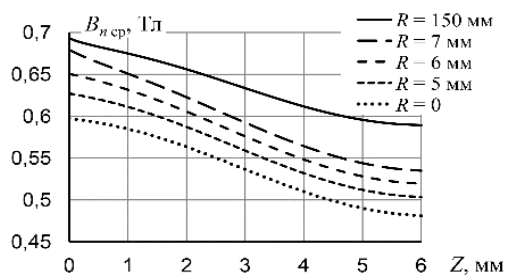


Рисунок 2 – Зависимость $R_{\text{из}}$ от S ($H = 3$ мм)



a



б

Рисунок 3 – Зависимости $B_{n\text{cp}}$ от R (a) и от Z (б) при $H = 3$ мм и $S = 1,5$ мм

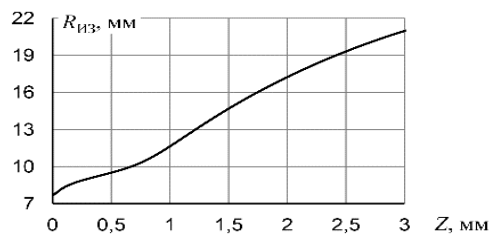


Рисунок 4 – Зависимость $R_{\text{из}}$ от Z ($H = 3$ мм, $S = 1,5$ мм)

Сильное смещение нижней линии на рис. 1, a обусловлено отсутствием горизонтальной стенки, увеличивающей концентрацию силовых линий магнитной индукции в материале наконечника. В целом по рис. 1 видно, что указанная концентрация возрастает при увеличении не только радиуса R , но и толщины S . Следовательно, правильный выбор этой толщины актуален не меньше оптимизации толщины H . Данный вывод подтверждается графиком зависимости $R_{\text{из}}(S)$, изображенным на рис. 2.

Из рис. 3, a следует, что увеличение зазора Z влечет за собой расширение вышеуказанного участка значений радиуса R . Например, в случае $Z = 2$ мм величина $B_{n\text{cp}}$ продолжает возрастать даже при $R = 10$ мм, тогда как при отсутствующем зазоре ($Z = 0$) рост $B_{n\text{cp}}$ полностью прекращается, как только радиус R становится больше 7,5 мм. В целом это свидетельствует о том, что уменьшение зазора Z приводит к снижению краевого эффекта.

Последний вывод подтверждается сопоставлением обоих рис. 1, б (один из них приведен выше, а другой – в работе [1]) с рис. 3, б. Видно, что $B_{n\text{cp}}$ увеличивается с ростом толщины S или H , но уменьшается по мере приближения торца корпуса к диску. Это объясняется тем, что утолщение любой стенки корпуса приводит к возрастанию концентрации силовых линий магнитной индукции в его материале (равно как и в материале наконечника магнита), влекущему за собой снижение краевого эффекта, а увеличение зазора Z – наоборот, к большему рассеиванию этих линий в воздухе.

По рис. 2 видно, что толщина S в начале диапазона ее значений сильно влияет на радиус $R_{\text{из}}$ информативной зоны преобразователя, однако в дальнейшем влияние данной толщины резко ослабевает. Значение $S \approx 1,5$ мм является оптимальным, так как при нем краевой эффект оказывается наименьшим. Из рис. 4 следует, что функция $R_{\text{из}} = f(Z)$ имеет минимум при $Z = 0$.

Заключение. В настоящей работе завершено исследование влияния размеров ферромагнитного корпуса магнитодинамического преобразователя на краевой эффект, зависящий от радиуса $R_{\text{из}}$. Показано, что на данный радиус сильно влияют толщины H вертикальной и S горизонтальной стенок корпуса, а также зазор Z между ниж-

ним торцом корпуса и покрытием. Учитывая результаты работы [1], можно утверждать, что краевой эффект будет минимальным при использовании корпуса, соответствующего условиям $H = 3$ мм и $S = 1,5$ мм. Для минимизации дополнительной погрешности, обусловленной неровностями или кривизной по-верхности покрытия, необходим зазор $Z = 1$ мм.

Литература

1. Булатов, О. В. Влияние толщины стенки стального корпуса преобразователя магнитодинамического толщиномера на краевой эффект / О. В. Булатов // Приборостроение – 2020 : материалы 13 международной науч.-техн. конф., Минск, 18–20 ноября 2020 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. : О.К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 21–22.

УДК 620.179.142.6

ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ ИНФОРМАТИВНОЙ ЗОНЫ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И ЕГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ТОЛЩИНЕ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ ОТ ТОЛЩИН СТЕНОК СТАЛЬНОГО КОРПУСА

Булатов О.В.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе методом конечных элементов впервые исследовано влияние толщин вертикальной и горизонтальной стенок стального корпуса магнитодинамического преобразователя на модуль намагниченности его информативной зоны и обеспечиваемую им чувствительность к никелевым покрытиям толщиной от 0 до 700 мкм. Установлено, что при толщинах стенок, сводящих краевой эффект к минимуму, минимизируется дополнительная погрешность, обусловленная вариацией внутренних напряжений никеля, а также обеспечивается очень высокая чувствительность даже в самом конце указанного диапазона.

Ключевые слова: магнитодинамический преобразователь, никелевое покрытие, модуль намагниченности, толщина покрытия, чувствительность.

DEPENDENCE OF THE MAGNETIZATION MODULUS OF THE INFORMATIVE AREA OF THE MAGNETO-DYNAMIC TRANSDUCER AND ITS SENSITIVITY TO THE THICKNESS OF NICKEL COATINGS ON THICKNESSES OF THE STEEL CASE WALLS

Bulatov O.

*Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus*

Abstract. In the paper the effect of the thicknesses of steel case vertical and horizontal walls of the magneto-dynamic transducer on the magnetization modulus of its informative area and providing by it sensitivity to nickel coatings with thickness from 0 up to 700 micrometers is for the first time investigated by means of the finite element method. It is established that with the walls thicknesses minimizing the edge effect, the additional error conditioned by the variation of nickel internal stresses is minimized, and also very high sensitivity is provided even at the very end of the mentioned range.

Key words: magneto-dynamic transducer, nickel coating, magnetization modulus, coating thickness, sensitivity.

*Адрес для переписки: Булатов О.В., ул. Академическая, 16, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: lab1@iaph.bas-net.by*

Введение. Необходимость отстройки от влияния вариации внутренних напряжений никелевых покрытий на точность их магнитодинамической толщинометрии подтверждена экспериментально еще в работе [1]. Там же показано, что эта отстройка достигается в случае сильного первичного поля, намагничивающего информативную зону преобразователя до состояния, достаточно близкого к техническому насыщению никеля. В настоящей работе методом конечных элементов исследована зависимость модуля намагниченности информативной зоны от толщин обеих стенок стального цилиндрического корпуса магнитодинамического преобразователя, предназначенного для толщинометрии

никелевых покрытий в диапазоне от 0 до 700 мкм. Кроме того, установлено влияние указанных толщин на чувствительность преобразователя к толщине покрытий.

Методика и результаты исследования. Модуль $I_{Лиз}$ вычислен во всем объеме информативной зоны вышеуказанного преобразователя, ограниченной ее радиусом $R_{из}$, зависящим от толщин H вертикальной и S горизонтальной стенок корпуса, и толщиной b никелевого покрытия. Зависимости $I_{Лиз}(H)$ и $I_{Лиз}(S)$, построенные при оптимизированных толщинах S и H [2] соответственно, представлены на рис. 1 и 2, при этом верхние графики приведены для малого значения толщины b , а нижние – для максимального.