

УДК 620.179.142.6

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ТОЛЩИН СТенок СТАЛЬНЫХ  
КОРПУСОВ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

О. В. БУЛАТОВ

Институт прикладной физики НАН Беларуси  
Минск, Беларусь

Выбор оптимальных размеров стального корпуса магнитодинамического преобразователя позволяет повысить точность измерений толщины никелевых покрытий. Это подтверждают расчетные зависимости радиуса  $R_{из}$  информативной зоны преобразователя, предназначенного для толщинометрии покрытий в диапазоне  $0...700$  мкм, от толщины  $H$  вертикальной цилиндрической и толщины  $S$  горизонтальной плоской стенок корпуса, приведенные в [1, 2]. Там же показано, что для корпуса такого преобразователя толщины  $H = 3,7$  мм и  $S = 1,5$  мм оптимальны, поскольку при них краевой эффект минимален.

Вышеуказанный диапазон актуален только при контроле толщины никелевого покрытия, нанесенного на внутреннюю поверхность камеры жидкостного ракетного двигателя. В остальных случаях приходится иметь дело с диапазонами, верхние пределы которых не превышают 300 мкм. В связи с этим настоящая работа, продолжающая [1, 2], посвящена оптимизации толщин  $H$  и  $S$  стенок стальных корпусов преобразователей с неодимовыми магнитами меньших диаметров. В качестве объекта оптимизации выбраны два преобразователя, магниты которых имеют диаметры 3 и 5 мм. По расчетным графикам, приведенным в [3], видно, что первый из этих преобразователей имеет очень высокую чувствительность к толщине слоя никеля, почти не уменьшающуюся в диапазоне  $0...200$  мкм, тогда как чувствительность второго преобразователя остается практически максимальной во вдвое большем диапазоне. На основе этого можно утверждать, что преобразователь, имеющий магнит диаметром 3 мм, подойдет для большинства случаев, в которых необходимо измерять толщину, не превышающую  $100...150$  мкм, а преобразователь с 5-миллиметровым магнитом будет пригоден и в остальных случаях.

В данной работе все расчеты выполнены методом конечных элементов с использованием пакета прикладных программ FEMM [4]. Оптимизация толщины каждой стенки корпуса основана на нахождении минимума сначала у функции  $R_{из} = f(S)$  при каждом из фиксированных значений толщины  $H$ , а затем у функции  $R_{из} = g(H)$  при постоянных значениях толщины  $S$ . Значения радиуса  $R_{из}$  сначала вычислены для преобразователя с магнитом диаметром 3 мм, а затем – 5 мм. Значения толщин  $S$  и  $H$ , соответствующие минимумам обеих функций при заданных значениях толщин  $H$  и  $S$ , приведены в табл. 1.

Видно, что значение толщины  $S$ , при котором радиус  $R_{из}$  становится минимальным, сильно зависит от диаметра  $D$  и почти не зависит от толщины  $H$ , тогда как аналогичное значение  $H$ , наоборот, существенно зависит от  $S$  и очень

слабо – от  $D$ . На основе табличных данных можно утверждать, что при диаметре  $D = 3$  мм оптимальной является толщина  $S = 0,5$  мм, а при  $D = 5$  мм –  $S = 0,8$  мм. В свою очередь, эти значения позволили определить оптимальные значения толщины  $H$ , приведенные в табл. 2.

Табл. 1. Значения толщин  $S$  и  $H$ , соответствующие минимумам функций  $R_{из} = f(S)$  и  $R_{из} = g(H)$  при фиксированных значениях толщин  $H$  и  $S$  и выбранных значениях диаметра  $D$  магнита преобразователя

$D$ , мм	$H$ , мм		$S$ , мм	
	1	5	1	5
3	0,48	0,50	4,85	5,57
5	0,84	0,80	4,80	5,46

Табл. 2. Оптимальные толщины  $S$  и  $H$ , при которых краевой эффект минимален

$D$ , мм	$S$ , мм	$H$ , мм
3	0,5	4,8
5	0,8	4,7

Таким образом, можно утверждать, что у преобразователя с меньшим магнитом стальной корпус должен иметь вертикальную стенку толщиной  $H = 4,8$  мм, а у другого преобразователя – толщиной  $H = 4,7$  мм.

Использование магнитодинамических преобразователей с корпусами, имеющими оптимизированные по толщине стенки, позволит минимизировать краевой эффект.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булатов, О. В. Влияние толщины стенки стального корпуса преобразователя магнитодинамического толщиномера на краевой эффект / О. В. Булатов // Приборостроение-2020: материалы 13 Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–20 нояб. 2020 г. – Минск: БНТУ, 2020. – С. 21–22.

2. Булатов, О. В. Оптимизация размеров корпуса преобразователя магнитодинамического толщиномера с целью минимизации краевого эффекта / О. В. Булатов // Приборостроение-2021: материалы 14 Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17–19 нояб. 2021 г. – Минск: БНТУ, 2021. – С. 33–35.

3. Лухвич, А. А. Возможности магнитодинамического метода контроля толщины двухслойных покрытий / А. А. Лухвич, О. В. Булатов // Дефектоскопия. – 2008. – № 10. – С. 26–34.

4. Finite Element Method Magnetics [Electronic resource]: User's Manual. – Mode of access: <https://www.femm.info/wiki/Files/files.xml?action=download&file=manual.pdf>. – Date of access: 02.02.2022.