

УДК 620.179.142.6

ВЗАИМОСВЯЗЬ ОПТИМАЛЬНЫХ ТОЛЩИН СТЕНОК  
СТАЛЬНОГО КОРПУСА С ДИАМЕТРОМ НЕОДИМОВОГО МАГНИТА  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ТОЛЩИНОМЕТРИИ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ

О. В. БУЛАТОВ

Институт прикладной физики НАН Беларуси  
Минск, Беларусь

Диапазон толщины никелевых покрытий, измеряемый прибором с магнитодинамическим преобразователем, зависит в основном от диаметра постоянного неодимового магнита, размещенного в стальном корпусе преобразователя. По этой причине диаметр магнита должен быть задан изначально, исходя из номенклатуры контролируемых изделий, покрытых защитным слоем никеля. От этого же диаметра зависят и оптимальные толщины обеих стенок стального корпуса. В свою очередь, оптимизация указанных толщин необходима для минимизации краевого эффекта, возникающего в первую очередь при градуировке магнитодинамического толщиномера из-за небольшого расстояния между противоположными краями никелевого покрытия каждой меры. Малая площадь поверхности покрытия обусловлена высокими требованиями к точности воспроизведения его толщины, из-за которых особенно трудно изготавливать меры с очень тонкими покрытиями.

В [1] показано, что оптимизированные толщины вертикальной цилиндрической и горизонтальной плоской стенок стального корпуса существенно зависят от диаметра неодимового магнита преобразователя. Однако рассмотренные в указанной работе примеры относятся только к нескольким заданным значениям диаметра магнита, тогда как для практики не менее важны преобразователи, имеющие магниты и других диаметров. В связи с этим целью настоящей работы является установление характера взаимосвязи каждой оптимальной толщины с диаметром магнита, изменяющимся в диапазоне от 1 до 10 мм. Выбор столь широкого диапазона обусловлен тем, что он обеспечивает толщинометрию никелевых покрытий на изделиях всех типов.

В основу настоящей работы положены данные расчетов, проведенных методом конечных элементов в пакете прикладных программ FEMM [2]. Сначала были установлены значения оптимальной толщины  $S_{\text{опт}}$  вертикальной плоской стенки стального корпуса, соответствующие заданным значениям диаметра  $D$  неодимового магнита. Результаты исследования представлены в виде зависимости  $S_{\text{опт}}(D)$ , график которой приведен на рис. 1, а.

Из приведенного графика следует, что оптимизированная толщина  $S_{\text{опт}}$  постепенно увеличивается во всем вышеуказанном диапазоне по мере возрастания диаметра  $D$ . Это обстоятельство объясняется увеличением числа силовых линий магнитной индукции, проходящих через горизонтальную стенку корпуса, что приводит к необходимости ее постепенного утолщения. По графику видно, что  $S_{\text{опт}}$  изменяется в большом диапазоне (от очень малого значения 0,15 мм до существенного 1,6 мм).

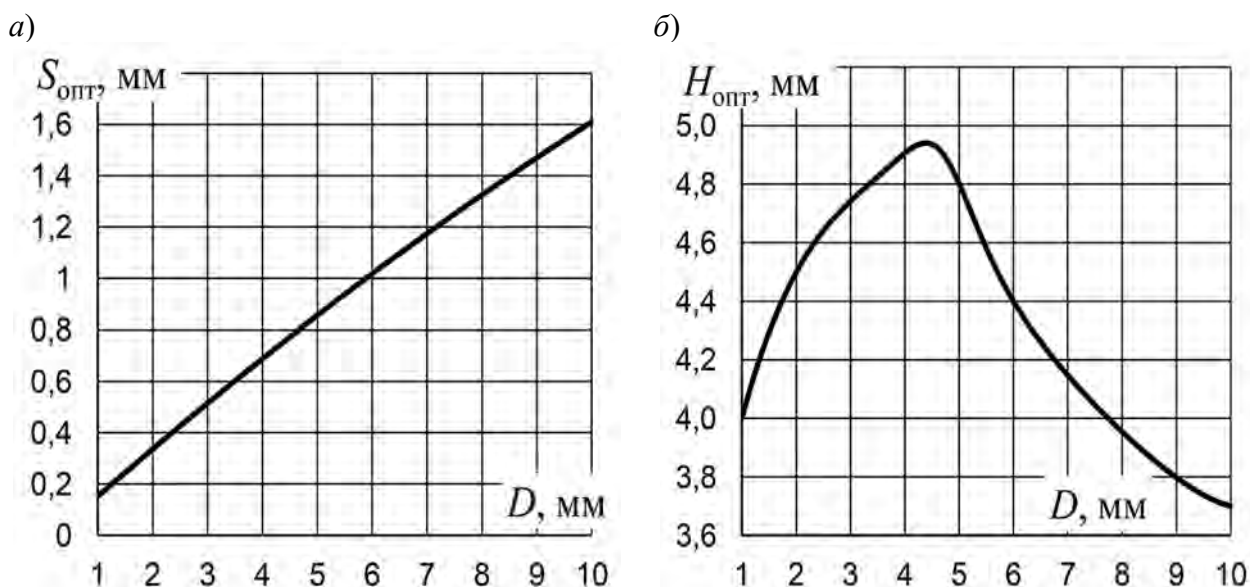


Рис. 1. Взаимосвязь оптимальных толщин обеих стенок стального корпуса с диаметром  $D$  неодимового магнита: *а* – толщины  $S_{\text{опт}}$  горизонтальной плоской стенки; *б* – толщины  $H_{\text{опт}}$  вертикальной цилиндрической стенки

Затем с учетом уже известных значений  $S_{\text{опт}}$  были определены значения оптимальной толщины  $H_{\text{опт}}$  вертикальной цилиндрической стенки стального корпуса преобразователя, соответствующие заданным значениям  $D$ . График зависимости  $H_{\text{опт}}(D)$  показан на рис. 1, б). По данному графику видно, что диаметр  $D$  оказывает существенное влияние на оптимизированную толщину  $H_{\text{опт}}$ , при этом сначала с ростом этого диаметра толщина  $H_{\text{опт}}$  ведет себя практически так же, как и  $S_{\text{опт}}$ . Однако затем  $H_{\text{опт}}$  стремительно убывает, начиная с порогового значения  $D_{\text{пор}} = 4,4$  мм и заканчивая верхним пределом заданного диапазона. Причина столь существенного различия в поведении толщин  $S_{\text{опт}}$  и  $H_{\text{опт}}$  состоит в том, что вплоть до значения  $D_{\text{пор}}$  увеличение наружного радиуса стального корпуса приводит к быстрому возрастанию радиуса  $R_{\text{из min}}$  информативной зоны преобразователя с оптимизированным корпусом, а после превышения  $D_{\text{пор}}$  – наоборот, к постепенному уменьшению  $R_{\text{из min}}$ .

Практическая значимость результатов настоящей работы состоит в возможности их использования при конструировании магнитодинамических преобразователей для толщинометрии никелевых покрытий, наносимых на изделия любого типа (например, на камеры жидкостных ракетных двигателей).

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булатов, О. В. Выбор оптимальных толщин стенок стальных корпусов магнитодинамических преобразователей / О. В. Булатов // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф.* – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 311–312.
2. 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: 01.02.2023.