

УДК 620.179.14

## ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ВОЛНОВОДА НА МАГНИТНУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИИ

Бурак В. А.<sup>1,2</sup>, Осипов А. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики НАН Беларуси

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Исследованы зависимости величин магнитных проницаемостей, взятых по петле магнитного гистерезиса при импульсном намагничивании и перемагничивании от геометрических размеров гибких волноводов. Дана оценка возможности осуществления неразрушающего импульсного магнитного контроля размеров и структурного состояния волноводов по рассмотренным магнитным информационным параметрам.

**Ключевые слова:** гибкие волноводы, импульсный магнитный контроль, магнитная проницаемость, намагничивание.

## WAVEGUIDE CROSS-SECTION DIAMETER EFFECT ON MAGNETIC PERMEABILITY DURING PULSE REMAGNETIZATION

Burak V.<sup>1,2</sup>, Osipov A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics of NAS of Belarus

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

**Annotation.** The dependences of magnetic permeability values taken from the magnetic hysteresis loop during pulse magnetization on the geometric dimensions of flexible waveguides are investigated. An assessment of the possibility of implementing non-destructive pulse magnetic control of the dimensions and structural state of waveguides using the magnetic information parameters is considered.

**Keywords:** flexible waveguides, pulse magnetic testing, magnetic permeability, magnetization.

Адрес для переписки: Бурак В. А., Академическая 16, г. Минск 220072, Республика Беларусь  
e-mail: veronika.burak@gmail.com

Гибкие волноводы предназначены для решения ряда актуальных задач в области медицины, техники и технологии. Основное назначение волноводов-концентраторов – разрушение путем измельчения нежелательных образований разной природы под действием акустических волн и эффектов, которые ультразвуковые колебания вызывают в среде, где происходит медицинское или технологическое вмешательство. Одним из популярных материалов для изготовления гибких металлических волноводов является хромисто-никелевая сталь, которая является ферромагнитным материалом и поэтому импульсный магнитный метод представляет особый интерес для решения проблемы оценки и контроля свойств и параметров этих изделий медицинского назначения.

Импульсный магнитный метод неразрушающего контроля хорошо зарекомендовал себя для контроля структурного состояния и физико-механических свойств ферромагнитных материалов и изделий из них. Однако при намагничивании, которое неизбежно при применении импульсного магнитного метода, стоит особое внимание уделять размагничивающему фактору, зависящему от геометрических параметров намагничиваемого тела [1]. В представляемом исследовании была предпринята попытка решить обратную задачу – изучить возможность оценивать геометрические параметры ферромагнитных изделий по

изменению намагниченности при импульсном намагничивании и перемагничивании. Для этого фрагменты гибкого металлического волновода с разным диаметром сечения были подвергнуты намагничиванию и перемагничиванию в проходном датчике измерителя магнитной индукции импульсного ИМИ-И [2]. В результате были получены петли магнитного гистерезиса, проанализированы информативные параметры, взятые по полученным петлям. Магнитная индукция при намагничивании и перемагничивании измерялась посередине намагничиваемого образца. Импульсы первичного магнитного поля были симметричны и противоположны по знаку, имели затянутый задний фронт. Их длительность составляла 400 мс, а амплитуда каждого из двух намагничивающих импульсов была 20 кА/м.

Такой выбор системы намагничивания и системы измерения вторичного магнитного поля был вызван тем фактом, исследуемые фрагменты гибких волноводов имеют большое отношение длины к диаметру поперечного сечения и малый диаметр. Для повышения надежности и точности данных, получаемых прибором ИМИ-И, фрагменты волноводов намагничивались дважды. Это также позволило оценить и сходимости величин анализируемых магнитных информативных параметров.

Исследуемые фрагменты волноводов имели цилиндрическую форму. Были исследованы вы-

резанные из одного металлического гибкого волновода фрагменты трех различных диаметров: 1,95, 1,75 и 1,45 мм. Длины фрагментов были 80, 160 и 140 мм. Для среднего по диаметру фрагмента рассмотрены были две близкие длины – 140 и 160 мм. Так как намагничиванию и перемагничиванию подвергались фрагменты одного волновода, то влияние на вторичное магнитное поле химического состава и фазово-структурного состояния одинаково.

В работе [3] были рассмотрены зависимости величин максимальной индукции и остаточной индукции от диаметров продольного сечения фрагментов волновода, однако на петле магнитного гистерезиса при импульсном намагничивании и перемагничивании можно выделить ряд информативных параметров, пригодных для магнитного неразрушающего контроля. В данной работе будут рассмотрены такие основные безразмерные магнитные параметры как начальная  $\mu_{нач}$  и максимальная  $\mu_{max}$  магнитные проницаемости.

Максимальная магнитная проницаемость  $\mu_{max}$  с увеличением диаметров образцов уменьшается почти линейно (рисунок 1). Для этого информативного параметра длина исследуемого фрагмента металлического волновода не оказывает особого влияния, это может быть оценено по близости точек, соответствующих величине рассматриваемой магнитной проницаемости при диаметре 1,75 мм, где фрагменты имели разную длину.

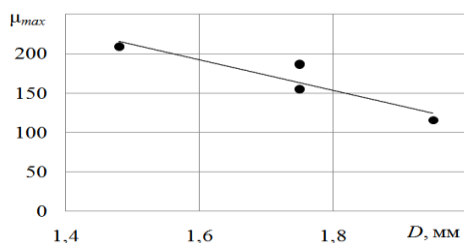


Рисунок 1 – Зависимости максимальной магнитной проницаемости от диаметра поперечного сечения фрагментов гибкого волновода

Величина начальной магнитной проницаемости  $\mu_{нач}$  (рисунок 2) также имеет линейную зависимость от изменения диаметра сечения волновода-концентратора и меньше, чем максимальная магнитная проницаемость  $\mu_{max}$  чувствительна к разнородности образца.

Также для каждого из рассматриваемых параметров, связанных с магнитной проницаемостью, характерна хорошая чувствительность к измене-

нию диаметра, однако начальная магнитная проницаемость  $\mu_{нач}$  имеет чувствительность незначительно, но ниже, чем максимальная магнитная проницаемость  $\mu_{max}$ , соответственно 301 и 313 мм<sup>-1</sup>.

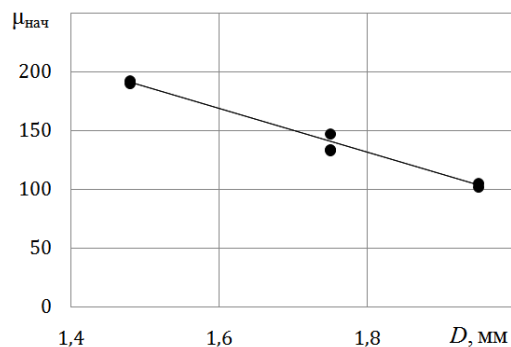


Рисунок 2 – Зависимости начальной магнитной проницаемости от диаметра поперечного сечения фрагментов гибкого волновода

Полученные в работе зависимости и их анализ показывают, что импульсный магнитный метод является перспективным для исследования геометрических параметров, физико-механических свойств и структурного состояния волноводов. Величины начальной и максимальной магнитной проницаемости и максимальная индукция имеют однозначную линейную зависимость с хорошей чувствительностью от изменения диаметра поперечного сечения волновода-концентратора и могут быть взяты в качестве информативных параметров для контроля геометрических параметров металлических волноводов.

### Литература

1. Сандомирский, С. Г. Расчет и анализ размагничивающего фактора ферромагнитных тел / С. Г. Сандомирский. – Минск: Беларуская навука, 2015. – 243 с.
2. Короткевич, З. М. Прибор для измерения магнитной индукции ферромагнитных стержней в процессе импульсного намагничивания-перемагничивания / З. М. Короткевич [и др.] // Приборостроение-2013: Материалы 6-й международной научно-технич. конф. Минск, 20–22 ноября 2013 г.; редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2013. – С. 70–72.
3. Бурак, В. А. Влияние размеров волноводов на параметры петли магнитного гистерезиса при импульсном перемагничивании / В. А. Бурак // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: Материалы международной научно-технической конференции, Могилев, 25–26 апреля 2024 г. / Бел. Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2024. – С. 291–292.