

Другим типом интересных наноструктур с широким потенциалом применения являются углеродные нанотрубки. Они представляют собой графитовые сетки, свернутые в трубки. Однослойная нанотрубка может иметь диаметр 2 нм и длину 100 мкм, что делает ее структурой, способной служить нанопроволокой. Многостенные нанотрубки могут содержать от нескольких до нескольких десятков одностенных нанотрубок, вставленных друг в друга. Широкие перспективы использования нанотрубок в материаловедении открываются при капсулировании внутри углеродных нанотрубок сверхпроводящих кристаллов, что позволяет изолировать сверхпроводящие материалы от вредного воздействия внешней среды.

### Литература

1. Витязь, П.А. Фуллерены и фуллереносодержащие материалы / П. А. Зезин, Э. М. Шпилевский, В. Ф. Стельмах. – Сборник научных трудов, Минск: БГУ, 2001. – С. 5–26.
2. Кужир, П. Г. Физика конденсированных сред / П. Г. Кужир, А. А. Баранов, А. П. Каравай, Н. П. Юркевич. – Минск: Технопринт, 2002. – С. 155–169.
3. Леонович, С. Н. Основы физики твердого тела для строителей / С. Н. Леонович, С. И. Петренко. – Минск: БНТУ, 2010. – С. 202–217.

УДК 620.130

### Гистерезисная интерференция магнитных полей

Павлюченко В. В., Дорошевич Е. С.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Представлены расчетные начальные и гистерезисные ветви электрического напряжения датчика, прямо пропорциональные остаточной намагниченности магнитного носителя (МН). Воздействие на МН осуществляли импульсными магнитными полями двух источников. Построены фигуры гистерезисной интерференции, позволяющие повысить точность контроля структурных и магнитных свойств объектов.*

Гистерезисная интерференция ( $HI$ ) на магнитном носителе и других носителях информации впервые получена авторами и изложена, в частности, в [1; 2; 5–8; 11]. Так, в [1; 2] представлены расчеты распределений  $HI$  и ее использования при контроле объектов из электропроводящих матери-

алов. Отметим одну из основополагающих работ по магнитографии [3], в которой в том числе, рассмотрены записи магнитных полей на магнитную ленту. Для определения параметров импульсов магнитного поля приняты во внимание магнитограммы поперечного намагничивания [4]. Определение нарушений сплошности с использованием пленочных флюкс-детекторов осуществлено авторами и описано в [5]. При записи информации на магнитный носитель и считывании ее магнитной головкой авторами учитывается дифференциальный фон электрического сигнала датчика [6]. Распределение импульсного магнитного поля, прошедшего через металлический объект, изучено в [7]. В работе также использованы результаты работы [8], в которой получены распределения импульсных магнитных полей вблизи металлических объектов разной толщины и учтены способы контроля материалов, изложенные в [9; 10]. В [11] проведен анализ алгоритмов гистерезисной интерференции. Дополнительно выделим материалы, изложенные в [12] по применению вихревого метода контроля.

Для поиска информации свойств объектов необходимо использовать распределения магнитных полей разных источников, в том числе источников, обусловленных структурными, магнитными и другими неоднородностями объектов.

Использование нескольких внешних источников магнитного поля одновременно на заданных участках объектов может значительно повысить уровень информации о свойствах объектов.

Таким образом, целью работы является повышение точности контроля объектов путем построения гистерезисных интерференций электрических сигналов, характеризующих ветви остаточного намагничивания магнитного носителя в импульсных магнитных полях при воздействии на объект с магнитным носителем одновременно однородным полем и полем локального источника.

Воздействуем на магнитный носитель импульсами магнитного поля двух источников и воспроизведем записанную на нем информацию с помощью магнитной головки.

Начальную остаточную ветвь применяемого МН для первого (прямого) импульса описываем найденной нами ранее [2] формулой

$$U_1 = 23,5 + 24,3 \arctg(0,011H_1 - 1,45).$$

Здесь электрическое напряжение  $U_1$  выражено в милливольтгах, а напряженность магнитного поля  $H_1$  – в А/см.

При воздействии вторым (обратным) импульсом магнитного поля используем следующую остаточную гистерезисную ветвь [2]:

$$U_2 = -23,5 + 0,61U_1 + (24,3 + 0,42U_1) \times \arctg((0,011 + 0,000087U_1) H_2 + 1,45 - 0,0016U_1), \quad (1)$$

а при воздействии третьим (прямым) импульсом используем остаточную гистерезисную ветвь (1) с соответствующими знаками перед коэффициентами.

Воздействуем на размагниченный магнитный носитель импульсами магнитного поля и получим ветви  $U(H)$ , соответствующие циклам перемагничивания МН и изображенные на рис. 1. Напряженностям поля первого источника 100 А/см, -35,5 А/см и 20 А/см соответствуют суммарные напряженности двух источников 110,5 А/см, -40 А/см и 21,5 А/см.

Цикл напряжения < 1, 2, 3, 4, 5 > МН получен при напряженности импульсов источника однородного магнитного поля 100 А/см и -35,5 А/см.

Цикл напряжения < 1, 7, 8, 9, 10 > МН – при напряженности импульсов двух источников магнитного поля 110,5 А/см и -40 А/см.

Цикл напряжения < 1, 7, 8, 16, 1, 12, 13 > МН – при напряженности импульсов двух источников магнитного поля 110,5 А/см, -80 А/см и 35,5 А/см, а цикл < 1, 7, 8, 16, 1, 14, 15 > МН построен при напряженности также двух источников поля 110,5 А/см, -80 А/см и 40 А/см.

На рис. 1 показаны прямая 17 и обратная 18 начальные остаточные ветви МН, а также отрезки прямых 5–6 и 10–11.

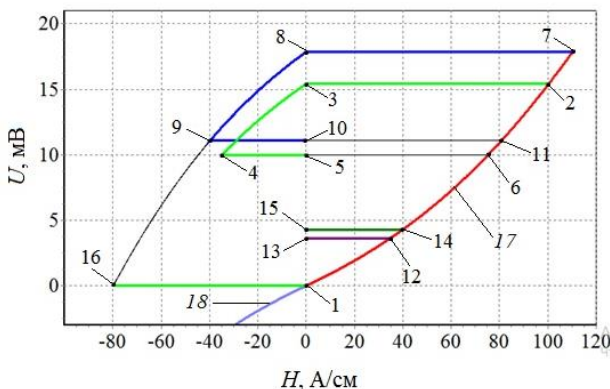


Рис. 1. Циклы напряжения  $U(H)$ , соответствующие циклам перемагничивания МН

В результате воздействия на размагниченный МН первым (прямым) импульсом поля с напряженностью 100 А/см и определенной ранее напряженностью поля второго источника 10,5 А/см переходим из 1 (рис. 1) через 2 через 3 с прибавлением этого поля в 4 и далее по отрезку прямой 5 в 6.

После воздействия на МН вторым (обратным) импульсом напряженностью  $-40$  А/см переходим из 8 в 9 и далее в 10 и 11. При воздействии на МН вторым (обратным) импульсом напряженностью  $-80$  А/см переходим через 16 в 1.

В результате воздействия одним первым импульсом из размагниченного состояния МН 1 попадаем в 12 и 13 при напряженности 35 А/см и в состояние 14 и 15 при напряженности 40 А/см.

Поскольку сигнал в точке 11  $U > 0$ , то действие третьим (прямым) импульсом может быть результативным только при его напряженности больше 80 А/см при движении по начальной остаточной ветви 17. Это обусловлено тем, что дальнейшее увеличение намагниченности материала в одном и том же направлении возможно только при превышении напряженности магнитного поля, приведшего ранее материал в это состояние [8].

Пусть первый источник создает однородное магнитное поле, а вторым источником является линейный индуктор.

Построим картины гистерезисных интерференций  $U(x)$ , где  $x$  – расстояние от проекции оси линейного индуктора на плоскость МН для разных серий импульсов. Для этого найдем зависимости  $U(x)$ ,

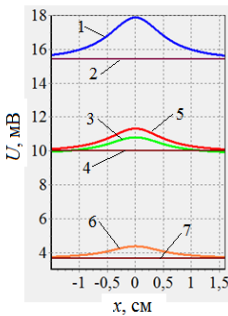


Рис. 2. Зависимости напряжения  $U(x)$  от расстояния  $x$  до проекции оси второго источника

соответствующие циклам электрического напряжения на рис. 1.

На рис. 2 показаны зависимости  $U(x)$  при следующих воздействиях на МН: 1 –  $H_1 = 100$  А/см;  $H_2 = 10,4$  А/см; 2 –  $H_1 = 100$  А/см; 3 –  $H_1 = 100$  А/см;  $H_2 = 10,4$  А/см;  $H_{11} = -35$  А/см;  $H_{22} = -5,6$  А/см; 4 –  $H_1 = 100$  А/см;  $H_{11} = -35$  А/см; 5 –  $H_1 = 75$  А/см;  $H_2 = 7$  А/см; 6 –  $H_1 = 35$  А/см;  $H_{22} = 4,6$  А/см; 7 –  $H_1 = 35$  А/см.

Здесь  $H_1$  и  $H_{11}$  – амплитуды первого и второго импульсов первого источника поля, а  $H_2$  и  $H_{22}$  – амплитуды первого и второго импульсов второго источника. Линейный индуктор находится на расстоянии 0,6 см над объектом, его ось параллельна поверхности объекта.

На рис. 3 показаны оптические изображения магнитных полей. Изображение 1 построено с использованием кривой 1 (рис. 2) и зеркальной ей кривой, смещенной на 30,8 мВ. Изображение 2 – кривая 3 (рис. 2) и зеркальная ей кривая, смещенные соответственно на 3 мВ и 9 мВ. Изображение 3 – кривая 6 (рис. 2) и зеркальная ей кривая, усиленные в 2,1 раза с последующим смещением соответственно на -10,5 мВ и 32 мВ.

Таким образом, могут быть найдены оптимальные режимы контроля объектов с учетом гистерезисных свойств как материала объекта, так и используемого магнитного носителя.

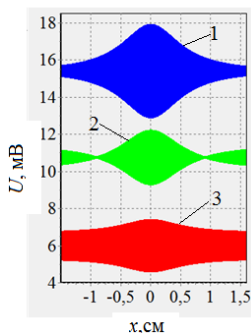


Рис. 3. Оптические изображения магнитных полей

Применение разработанных методов расчета полей позволяет повысить точность контроля магнитных и механических свойств объектов. Это достигается за счет построения гистерезисных интерференционных картин электрических сигналов, соответствующих ветвям остаточного намагничивания магнитного носителя в импульсных магнитных полях при воздействии на объект с магнитным носителем одновременно однородными полями и полями локальных источников, моделирующих поля структурных неоднородностей материала объекта. Последующая обработка результатов расчета

или измерений методами гистерезисной интерференции с построением оптических изображений магнитных полей разной конфигурации позволяет выделять любые локальные отклонения сигнала от заданного уровня, повышая тем самым точность контроля параметров объектов.

### Литература

1. Pavlyuchenko, V. V. Calculating Distributions of Pulsed Magnetic Fields under Hysteretic Interference Russian Journal of Nondestructive Testing / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich, V. L. Pivovarov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – Vol. 54, № 2. – P. 121–127.
2. Павлюченко, В. В. Использование магнитного гистерезиса при контроле объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2013. – № 6. – С. 53–68.
3. Козлов, В. С. Техника магнитографической дефектоскопии / В. С. Козлов. – Мн.: Вышэйшая школа, 1976. – 256 с.
4. Павагин, В. А. Идентификация кольцевых сварных швов на магнитограммах дефектоскопов поперечного намагничивания / В. А. Павагин, А. Ф. Матвиенко // Дефектоскопия. – 2009. – № 8. – С. 13–18.
5. Pavlyuchenko, V.V. Testing for Discontinuities in Metals Using Film Flux / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2019. – Vol. 55, № 1. – P. 48–58.

6. Pavlyuchenko, V. V. Differential Background of Electric Signal Read from an Induction Magnetic Head / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2021. – Vol. 57, № 8. – P. 706–716.

7. Pavlyuchenko, V.V. Testing for Defects in Pulsed Magnetic Field Transmitted Through Metal / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2021. – Vol. 57, № 10. – P. 856–864.

8. Pavlyuchenko, V. V. Pulsed Magnetic Field near Metal Surface/ V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2022. – Vol. 58, № 11. – P. 983–991.

9. Суханов, Д. Я. Магнитоиндукционный интроскоп для дефектоскопии металлических объектов / Д. Я. Суханов, Е. С. Совпель // Дефектоскопия. – 2015. – № 5. – С. 56–62.

10. Шлеенков, А. С. Оценка возможности обнаружения микродефектов сварных соединений прямошовных электросварных труб, изготовленных стыковой высокочастотной сваркой, магнитным методом контроля / А. С. Шлеенков, В. Г. Бычков, О. А. Булычев, Н. М. Лядова, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 2010. – № 2. – С. 23–29.

11. Pavlyuchenko, V. V. Hysteretic Interference Algorithms / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich // Russian Journal of Nondestructive Testing, – 2023. – Vol. 59, №5. – P. 537–546.

12. Печенков, А. Н. Вихревые токи и поля проводящих и намагничивающихся шаровых включений в немагнитную среду / А. Н. Печенков, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 2016. – № 4. – С. 48–55.

УДК 620.130

### **Циклы напряжения датчика, соответствующие циклам перемагничивания объектов**

Павлюченко В. В., Дорошевич Е. С.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Представлены циклы электрического напряжения датчика  $U(H)$ , соответствующие циклам перемагничивания объекта из ферромагнитного материала. Циклы  $U(H)$ , содержащие начальные и гистерезисные остаточные ветви, получены в импульсных магнитных полях с чередующейся полярностью. Воздействие на объект осуществляли полями двух источников. Построены распределения  $U(x)$  по координате  $x$  и картины гистерезисной интерференции, позволяющие повысить точность определения структурных и магнитных свойств объекта.*