

Рисунок 2 – Расчетная собственная форма колебаний кольцевого концентратора для частоты  $f = 22,75$  кГц

УДК 620.179.14

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАМАГНИЧИВАНИЯ ТОНКОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ

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

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>Институт прикладной физики НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Неразрушающий магнитный контроль получил широкое распространение для решения разнообразных задач обеспечения надежности выпускаемых изделий из ферромагнитных материалов, что обусловлено их широким использованием во многих отраслях промышленности. Кроме того, он имеет высокую производительность, надежность, точность и позволяет проводить испытания без разрушения изделия.

Для приборной реализации магнитного контроля необходимы разнообразные источники и измерители магнитного поля. Необходимые расчеты таких устройств и систем проводятся с использованием уравнений Максвелла и соответствующих конкретной задаче граничных условий. Однако из-за гистерезиса и нелинейности магнитных характеристик материала строго решить систему уравнений Максвелла для ферромагнитных изделий затруднительно. Поэтому для моделирования процесса намагничивания ферромагнитных материалов используют численные методы.

Такие численные методы как сеток, конечных элементов, граничных элементов и т.д. для своей реализации требуют учета граничных условий на поверхности объекта контроля (раздельно для нормальной  $\vec{n}$  и тангенциальной  $\vec{\tau}$  составляющих) [1]. Известны подходы, при использовании которых расчет можно ограничить только объемом, занимаемым ферромагнетиком. Одним из

Таким образом, приведенный численный пример показывает возможность усиления ультразвуковых колебаний по амплитуде с помощью неоднородных кольцевых концентраторов.

1. Степаненко, Д.А. Разработка и исследование нового типа концентраторов ультразвуковых колебаний на основе кольцевых упругих элементов / Д.А. Степаненко [и др.] // *Материалы. Технологии. Инструменты.* – 2013. – Т. 18, № 2. – С. 90-94.
2. Степаненко, Д.А. Влияние формы кольцевого концентратора ультразвуковой системы на коэффициент усиления амплитуды колебаний / Д.А. Степаненко, И.В. Луговой, В.П. Луговой // *Наука и техника.* – 2016. – № 3. – С. 209-215.

таких методов является метод пространственных интегральных уравнений, результативность которого подтверждается рядом публикаций [2 – 4].

При моделировании и расчете магнитного состояния тонколистового проката возникает необходимость в решении трехмерной задачи. Это обусловлено геометрией изделия, анизотропией материала (при ее наличии) и использованием для намагничивания прямоугольных катушек [5].

Важным вопросом при численном моделировании процесса намагничивания является выбор способа описания зависимости намагниченности материала образца от величины поля. Для этого часто используются экспериментальные кривые, как наиболее точно соответствующие реальным физическим процессам, происходящим в материале образца при намагничивании. Однако для достижения высокой точности вычислений требуется измерять большие массивы экспериментальных зависимостей  $M(H)$ . Кроме того, возникают трудности при вычислении дифференциальных величин. В связи с этим при расчетах часто используют аналитические выражения [6, 7] для описания нелинейных свойств ферромагнетика.

В настоящей работе рассмотрено численное моделирование тонкого ферромагнитного листа, намагниченного двумя прямоугольными катушками. Расчет проводился для намагничивающей и измерительной системы, которые помещались

на прямоугольный образец низкоуглеродистой стали толщиной 0,786 мм и размером 200x200 мм<sup>2</sup>.

Намагничивающая система представлена двумя прямоугольными катушками с размерами 210x55 мм<sup>2</sup>, включенными согласно по полю (рисунок 1). Расстояние между осями катушек составляло 114 мм. Измерительная система выполнена из двух полузондов, расположенных друг над другом вдоль поля  $H$  над образцом (рисунок 1).

Материал листа полагали изотропным со следующими магнитными характеристиками: коэрцитивная сила  $H_{cs} = 137$  А/м, остаточная намагниченность  $M_r = 872000$  А/м; начальная магнитная проницаемость  $\mu_n = 350$ .

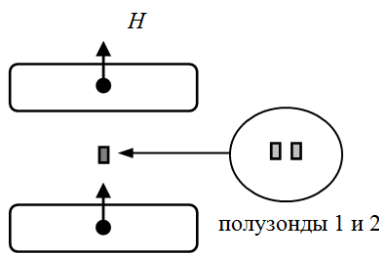


Рисунок 1 – Расположение намагничивающей и измерительной систем

За основу численного расчета взято нелинейное уравнение

$$\vec{H}(Q) = -\frac{1}{4\pi} \text{grad}_Q \int_{V_M} \vec{M}(N) \text{grad}_N \left( \frac{1}{r_{NQ}} \right) dV_n, \quad (1)$$

где  $N$  – точка источника поля;  $\vec{H}(Q)$  – вектор напряженности магнитного поля в точке  $Q$ ;  $\vec{M}(N)$  – вектор намагниченности в точке  $N$ ;  $V_M$  – объем ферромагнетика;  $\vec{r}_{NQ}$  – радиус-вектор из точки источника  $N$  в точку наблюдения  $Q$ .

Моделируемый образец разбивался на заданное число элементов по каждой координате. В методе пространственных интегральных уравнений поле  $\vec{H}_{рез,i}$  в каждой точке наблюдения определялось как векторная сумма намагничивающего поля  $\vec{H}_{нам,i}$  и поля от элементов ферромагнетика  $\vec{H}_{фер,j}$ :

$$\vec{H}_{рез,i} = \vec{H}_{нам,i} + \sum_j \vec{H}_{фер,j}. \quad (2)$$

При расчете использовались аппроксимирующие выражение [7] для основной кривой намагничивания, которое следует из формулы для петель магнитного гистерезиса:

$$M_m = \frac{M_s k_{ts} (H = H_m) H_m^2 / \pi + k_1 k_3 (H_m) H_{cs}^2}{H_m^2 + k_2 H_m^{3/2} H_{cs}^{1/2} + k_1 H_{cs}^2} \times$$

$$\times \left( \arctg \frac{H_{cs} + H_m}{H'_0} - \arctg \frac{H_{cs} - H_m}{H'_0} \right); \quad (3)$$

$$M = \pm \frac{M_s H_m^2 k_{ts} (H) / \pi + k_1 H_{cs}^2 k_3 (H_m)}{H_m^2 + k_2 H_m^{3/2} H_{cs}^{1/2} + k_1 H_{cs}^2} \times \left[ 2 \arctg \frac{H_{cs} \pm H}{H'_0} - \left( \arctg \frac{H_{cs} + H_m}{H'_0} + \arctg \frac{H_{cs} - H_m}{H'_0} \right) \right], \quad (4)$$

где знак «+» относится к нисходящей ветви петли гистерезиса, знак «-» – к восходящей;  $M$  – намагниченность;  $M_s$  – намагниченность насыщения;  $H_{cs}$  – коэрцитивная сила по предельной петле гистерезиса;  $H_m$  – максимальная величина напряженности перемагничивающего поля;  $k_{ts}$ ,  $k_1$  и  $k_2$  – безразмерные коэффициенты,  $H'_0$  и  $k_3(H_m)$  – параметры.

Задача численного моделирования параметров контроля сводится к расчету поля в области наблюдения (расположения измерительных датчиков) по аналогии с формулой (2). Величину градиента вычисляют по значениям поля в двух точках и расстоянию между ними по соответствующей оси.

На рисунке 2 приводится пример зависимости поперечного градиента магнитного поля в зависимости от значения  $y$ . В центре графика имеется область малых изменений градиента, что показывает уменьшение чувствительности данного магнитного параметра как к смещениям намагничивающей системы, так и измерительной системы, что особенно важно при контроле в потоке производства, где при изготовлении на прокатном стане движущийся лист колеблется.

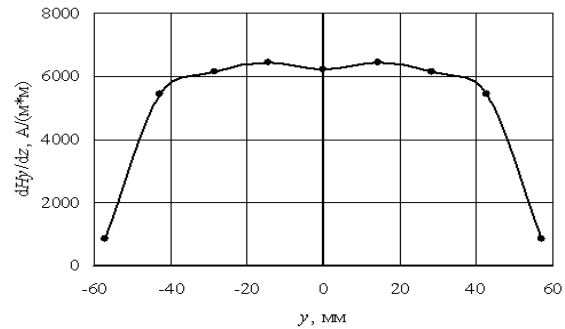


Рисунок 2 – Поперечный градиент магнитного поля  $\partial H_y / \partial z$  по оси  $y$

Сравнение модели и эксперимента показало, что различие между рассчитанными и измеренными магнитными параметрами составляет не более 10 %, что объясняется погрешностью параметров петли гистерезиса, неоднородностью образцов, недостаточным числом элементов разбиения и т.д.

Работа выполнялась при поддержке БРФФИ и РФФИ договор № Т16Р-040.

1. Демирчян К.С., Чечурин В.Л. Машинные расчеты электромагнитных полей. – М.: Высш. шк., 1986. – 240 с.
2. Пеккер И.И. К расчету магнитных систем методом интегрирования по источникам поля // Изв. вузов. Электромеханика. – 1968. – № 9. – С. 940-943.
3. Курбатов П.А., Аринчик С.А. Численный расчет электромагнитных полей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 168 с.
4. Матюк В.Ф., Чурило В.Р., Стрелюхин А.В. Численное моделирование магнитного состояния ферромагнетика в неоднородном постоянном поле методом пространственных интегральных уравнений. I. Описание методики расчета // Дефектоскопия. – 2003. – № 8. – С. 71-84.
5. Счастный А.С., Осипов А.А. Исследование возможности контроля анизотропии листового проката // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 3. – С. 20-33.
6. Мельгуй М.А. Формулы для описания нелинейных и гистерезисных свойств ферромагнетиков // Дефектоскопия. – 1987. – № 11. – С. 3-10.
7. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Математическая модель намагничивания ферромагнетиков // Доклады НАН Беларуси. – 2004. – Т. 48. – № 5. – С. 43-45.

УДК 620.179.14

### ОЦЕНКА АНИЗОТРОПИИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ Счастный А.С., Осипов А.А., Бурак В.А.

*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси  
Минск, Республика Беларусь*

Анизотропия механических свойств плоских ферромагнетиков формируется при производстве и во многом обусловлена технологическими процессами изготовления. Учет анизотропии позволяет повысить качество как изготавливаемой продукции, так и повысить технологичность производства, поскольку анизотропия оказывает влияние на качество и экономичность механической обработки (резка, штамповка и т.д.), причем это влияние неоднозначно и зависит от ряда факторов, среди которых особое значение имеют вид выпускаемой продукции, технологический процесс используемой при изготовлении механической операции и дальнейшие эксплуатационные условия работы изделия.

Контроль величины механической анизотропии листового проката стали на предприятиях обычно осуществляется выборочно механическими (разрушающими) методами согласно ГОСТ 9045-93, а также неразрушающими методами контроля [1, 2]. Использование неразрушающих методов контроля анизотропии позволяет более экономно использовать листовой прокат, идущий в производство, повышают качество и надежность изделий, но требуют анализа и исследований, проводимых как на стадии внедрения, так и при дальнейшем использовании на производстве. Для контроля механической анизотропии стального проката широкое распространение получили магнитные методы контроля [3], основой для использования кото-

рых является связь магнитных параметров со структурным состоянием вещества.

В ряде работ [4-6], проведенных коллективом авторов, было показано, что импульсный магнитный метод имеет значимые коэффициенты корреляции с коэффициентом нормальной анизотропии  $R_n$ , а в ряде случаев коэффициенты корреляции составляли 0,8 и более. В этих работах связь между магнитными параметрами и механической анизотропией листового проката стали в зависимости от температуры термообработки металла не исследовалась, но данная задача представляет особый интерес для дальнейшего исследования возможностей магнитного метода при контроле механической анизотропии и для практического использования.

Измерения проводились на листах низкоуглеродистой стали толщиной 3 мм и размерами 1000x1000 мм<sup>2</sup>. Листы стали имели различную температуру отжига после прокатки. Как и ранее [4-6], в качестве областей для измерения градиента напряженности остаточного магнитного поля были выбраны четыре точки в диагоналях прямоугольного образца, одинаково отстоящие от краев.

Намагничивающая система состояла из двух согласно по полю (вдоль оси  $y$ ) включенных прямоугольных катушек с размерами 210x55 мм<sup>2</sup>. Расстояние между осями катушек составляло 114 мм. Для намагничивания использовался импульсный магнитный анализатор ИМА-5Б. Измерения выполнялись