

Н.П. КОРБАН, ассистент, ВНУ им. В. Даля, Луганск

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ РАССЕЯНИЯ ДЕФЕКТА НАМАГНИЧЕННОГО ФЕРРОМАГНИТНОГО ТЕЛА

Приводиться методика розрахунку магнітного поля розсіяння дефекту намагніченого ферромагнітного тіла з дефектом за допомогою адаптації методу інтегральних рівнянь. На базі чисельного моделювання проведені експерименти і аналіз розподілення магнітного поля розсіяння дефекту. Встановлені основні закономірності і параметри розподілення.

Приводится методика расчета магнитного поля рассеяния дефекта намагниченного ферромагнитного тела с дефектом посредством адаптации метода интегральных уравнений. На базе численного моделирования проведены эксперименты и анализ распределения магнитного поля рассеяния дефекта. Установлены основные закономерности и параметры распределения.

Вступлення. Для осуществления качественной идентификации дефектов сплошности намагниченного тела путем анализа распределения магнитного поля рассеяния дефекта (МПРД) [1], актуальным вопросом является установление степени зависимости основных параметров распределения МПРД от геометрических параметров контролируемого дефекта. Подобный анализ даст возможность по количественной оценке основных параметров МПРД косвенно определять геометрические параметры дефекта намагниченного тела. В тоже время, ценность достоверной информации о картине распределения внешнего магнитного поля намагниченного тела с дефектом определяется тем, что путем сопоставления рассчитанного и измеренного внешнего магнитного поля представляется возможным качественно определять причину его искажения. Например, искажение внешнего магнитного поля намагниченного тела может быть вызвано, кроме наличия в его объеме дефекта, также локальной неоднородностью магнитной среды ферромагнитного тела.

Проведение анализа МПРД наиболее эффективно производить путем численного моделирования магнитной системы намагничиваемого ферромагнитного тела, содержащего дефект, внешним магнитным полем.

Цель и задачи исследования. Основной целью настоящей рабо-

ты является установление основных параметров распределения МПРД намагниченного тела, на которые в наибольшей степени оказывает влияние изменения геометрических параметров дефекта, а также количественная оценка их соотношений. Для реализации поставленной цели возникает задача выбора и адаптации наиболее эффективного и достаточно точного метода численного расчета магнитных полей.

Методика проведения численных экспериментов. В [2] был проведен анализ методов и современных программных пакетов применимо к расчету внешнего магнитного поля ферромагнитного тела, содержащего дефект. Сложность проведения численных расчетов внешнего магнитного поля намагниченного тела заключается в том, что их реализация требует значительного времени. Кроме того, должна удовлетворяться сходимость итерационного процесса при численном решении уравнений описывающих магнитную систему.

С целью проведения численных экспериментов по расчету внешнего магнитного поля намагниченного ферромагнитного тела с допустимой погрешностью при минимальных затратах машинного времени допускается определенная идеализация условий расчета. В данном случае предполагается, что наличие дефекта в намагниченном объеме вносит существенное изменение в распределение внутреннего магнитного поля ферромагнетика только в определенном объеме, окружающем область дефекта.

Рациональные геометрические параметры ферромагнитного тела, содержащего дефект, определяются из такого условия, когда дальнейшее их увеличение не оказывает существенного влияния на количественные параметры распределения магнитного поля над поверхностью намагниченного тела в области дефекта.

В качестве геометрической модели намагничиваемого тела служит параллелепипед размерами $2a \times 2b \times 2c$, в объеме которого заключен дефект типа трещины размерами $2a_d \times 2b_d \times 2c_d$ и глубиной расположения относительно поверхности параллелепипеда – d [3].

Для реализации численных расчетов в данном случае наиболее эффективным является применение метода пространственных интегральных уравнений [3]. Интегральные уравнения точно учитывают магнитные поля рассеяния намагниченных тел в неограниченном пространстве и имеют минимальную расчетную область. Методика расчета внешнего магнитного поля намагниченного ферромагнитного тела методом интегральных уравнений детально была изложена в работах [3, 4]. Численное решение нелинейного интегрального уравнения осуществляется итеративным методом Гаусса-Ньютона. Критерием схо-

димости итерационного процесса является обусловленность расчетной матрицы, представляющей собой ядро интегрального уравнения [4]. Обусловленность матрицы зависит от дискретизации объема намагниченного тела, характера кривой намагничивания ферромагнитного материала – $M(H)$, и величины напряженности внутреннего магнитного поля ферромагнетика – H .

Путем проведения ряда численных экспериментов по описанной выше методике были установлены рациональные геометрические параметры намагниченного тела, содержащего дефект, размеры которого не превышают $2a_d = 2,0$ мм; $2b_d = 10$ мм; $2c_d = 6$ мм [3]. При размерах ферромагнитного тела $50 \times 50 \times 50$ мм достигалась удовлетворительная сходимость численного решения и приемлемые затраты машинного времени. Относительная погрешность численного расчета МПРД намагниченного тела с указанным дефектом при различных значениях напряженности внутреннего магнитного поля и дискретизации объема ферромагнетика не превышала 0,6%.

Результаты численных экспериментов и их анализ. Для анализа распределения МПРД намагниченного тела проводились численные эксперименты при вариации следующих параметров: ширины раскрытия дефекта – $2a_d$, длины дефекта – $2b_d$, высоты дефекта – $2c_d$; глубины расположения дефекта – d ; высоты наблюдения – h [3]; напряженности внутреннего магнитного поля ферромагнетика – H . Геометрические параметры намагниченного тела с дефектом для всех опытов принимаются постоянными и равными определенным ранее рациональным для проведения численных экспериментов размерам – $50 \times 50 \times 50$ мм. Пределы варьирования размеров дефекта, заключенного в объеме ферромагнитного тела не превышают $2a_d = 2$ мм; $2b_d = 10$ мм; $2c_d = 6$ мм. В таком случае максимальная относительная погрешность расчетов составляющих напряженности МПРД, заключенного в намагниченном объеме оценивается в 0,6%. Магнитные параметры материала ферромагнетика задаются равными магнитным параметрам конструкционной стали 40Х.

Результаты численных экспериментов для наглядности выводятся в виде графиков распределения составляющих напряженности МПРД в точках наблюдения над поверхностью намагниченного тела. Для возможности сопоставления расчетных данных, во всех экспериментах точки наблюдения располагаются на линии расположенной в плоскости xz параллельно оси x [3] на заданной высоте относительно поверхности параллелепипеда – h . В этом случае из-за симметрии образца с дефектом относительно системы координат [3], поперечная состав-

ляющая напряженности МПРД $H_{ду}$ равна нулю.

Целью проведения анализа является установление степени влияния каждого из параметров, оказывающего влияние, как на характер распределения, так и на количественные значения составляющих напряженности МПРД намагниченного тела. Для установления степени влияния одного из параметров на распределение МПРД проводятся численные эксперименты путем их варьирования при постоянном значении остальных параметров. Такая процедура повторяется для каждого параметра, оказывающего влияние на распределение и количественные значения напряженности МПРД намагниченного тела: $2a_d$, $2b_d$, $2c_d$, h , d , H .

На рис. 1,а,б представлены графики зависимостей составляющих напряженности МПРД соответственно H_{dx} и H_{dz} в зависимости от ширины поверхностного ($d = 0$) дефекта $2a_d$ при постоянных параметрах $2b_d = 6$ мм; $2c_d = 4$ мм; $h = 2,5$ мм; $H = 20000$ А/м; $d = 0$.

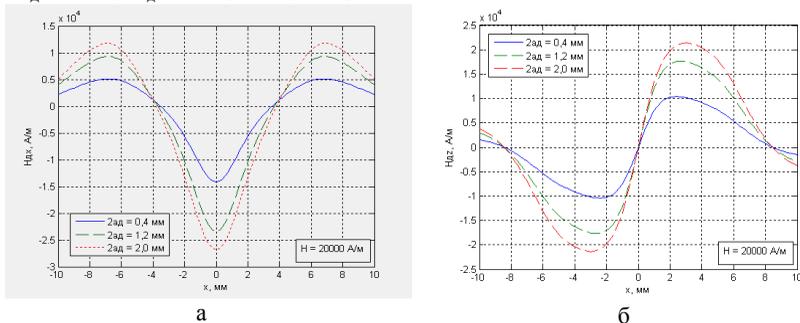


Рис. 1.

По характеру распределения составляющих и амплитудному значению напряженности МПРД можно отметить следующие. Изменение ширины дефекта типа трещины существенно влияет на амплитудные значения составляющих напряженности МПРД. Кроме того, при изменении ширины дефекта наблюдается увеличение расстояния между экстремумами составляющей H_{dz} .

Графики на рис. 2 отображают аналогичные зависимости составляющих напряженности МПРД H_{dx} и H_{dz} от длины поверхностного дефекта $2b_d$ при постоянных параметрах $2a_d = 0,4$ мм; $2c_d = 4$ мм; $h = 2,5$ мм; $H = 20000$ А/м; $d = 0$. Как и в предыдущих экспериментах, амплитудные значения составляющих напряженности МПРД увеличиваются пропорционально величине напряженности внутреннего магнитного поля намагниченного тела.

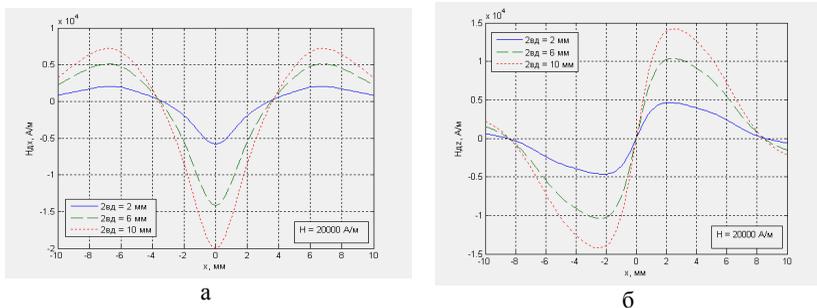


Рис. 2.

При сильной напряженности внутреннего магнитного поля ферромагнетика, содержащего дефект, распределение составляющих H_{dx} и H_{dz} имеет более четко выраженный характер. Вследствие этого эффективность выявления дефектов и точность определения их геометрических параметров будет выше при сильном намагничивании объема ферромагнетика.

Приращение длины дефекта $2b_d$ оказывает существенное влияние только на амплитудные значения составляющих H_{dx} и H_{dz} . Но если сравнивать с влиянием ширины дефекта на эти параметры (рис. 1), то видно, что длина дефекта влияет в значительно меньшей степени на максимальные значения H_{dx} и H_{dz} , чем ширина.

Расстояние между экстремумами составляющей H_{dz} при вариациях длины дефекта изменяется незначительно.

Зависимость составляющих H_{dx} и H_{dz} от высоты поверхностного дефекта $2c_d$ при постоянных значениях $2a_d = 0,4$ мм; $2b_d = 10$ мм; $h = 2,5$ мм; $d = 0$; $H = 20000$ А/м, показана на рис. 3.

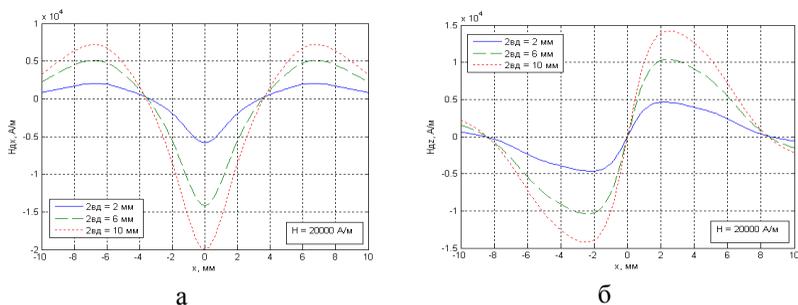


Рис. 3.

Характер влияния высоты дефекта $2c_d$ на распределение составляющих H_{dx} и H_{dz} подобен характеру влияния длины дефекта $2b_d$, так как изменяются в большей степени амплитудные значения составляющих напряженности МПРД. Расстояние между экстремумами составляющей H_{dz} при вариациях высоты дефекта также изменяется не значительно.

С практических соображений важно оценить распределение составляющих напряженности МПРД на различной высоте наблюдения h от поверхности исследуемого объекта. Для этого проводятся численные эксперименты по расчету составляющих H_{dx} , H_{dz} на различной высоте наблюдения h при постоянных значениях геометрических параметров поверхностного дефекта и напряженности внутреннего магнитного поля ферромагнитного тела. Результаты численных расчетов распределения H_{dx} , H_{dz} в зависимости от h при постоянных параметрах $2a_d = 0,4$ мм; $2b_d = 6$ мм; $2c_d = 6$ мм; $H = 20000$ А/м, представлены на рис. 4.

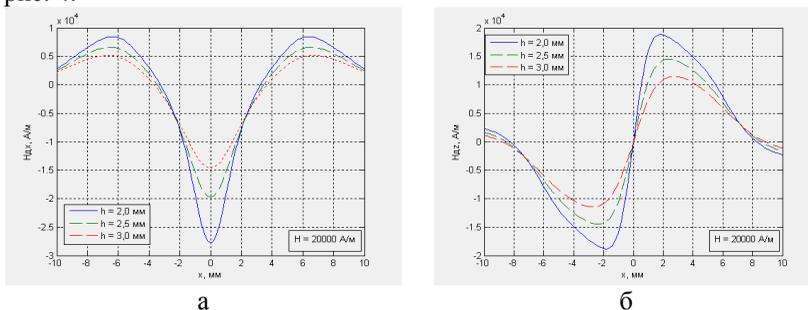


Рис. 4.

По мере незначительного удаления точек наблюдения от поверхности ферромагнетика, МПРД убывает в значительной степени. При увеличении h на один миллиметр, амплитудные значения составляющих H_{dx} , H_{dz} падают в два раза.

Основной задачей магнитного неразрушающего контроля является выявление наиболее опасных подповерхностных дефектов металлических изделий – поперечных трещин, развитие которых способствует их излому. Важно оценить является искажение внешнего магнитного поля намагниченного изделия следствием магнитной неоднородности объема его локальной области или следствием образования дефекта. С этой целью необходимо провести анализ распределения магнитного поля рассеяния подповерхностного дефекта ферромагнитного тела на базе численных экспериментов.

На рис. 5 представлены результаты численных расчетов составляющих напряженности H_{dx} и H_{dz} для случая подповерхностного де-

фекта при постоянных параметрах дефекта $2a_d = 0,4$ мм; $2b_d = 6$ мм; $2c_d = 2$ мм; $h = 2,5$ мм; $H = 20000$ А/м в зависимости от глубины его расположения d . С целью сопоставления зависимости распределения составляющих напряженности МПРД совместно с графиками для подповерхностного дефекта приводится график поверхностного дефекта с такими же геометрическими параметрами.

Как видно на рис. 5,а, отличие амплитудных значений составляющих H_{dx} , H_{dz} , начиная с глубины $d = 4$ мм, является несущественным. С результатов численных экспериментов было установлено, что идентифицировать глубину расположения дефекта ферромагнитного тела эффективнее в отличие от поверхностного дефекта при относительно небольшой намагниченности ферромагнетика. Кроме изменения амплитудных значений H_{dx} и H_{dz} вследствие увеличения глубины расположения подповерхностного дефекта d , возрастает расстояния между экстремумами составляющей H_{dz} (рис. 5,б).

Анализируя характер распределения составляющих МПРД H_{dx} (рис. 5,а), можно выделить еще одну закономерность свойственную для подповерхностного дефекта. На уровне равном 0,6 от максимального значения $H_{dx} = 0,6H_{dmax}$ ширина раскрытия распределения составляющей H_{dx} изменяется очень мало при варьировании глубины расположения дефекта.

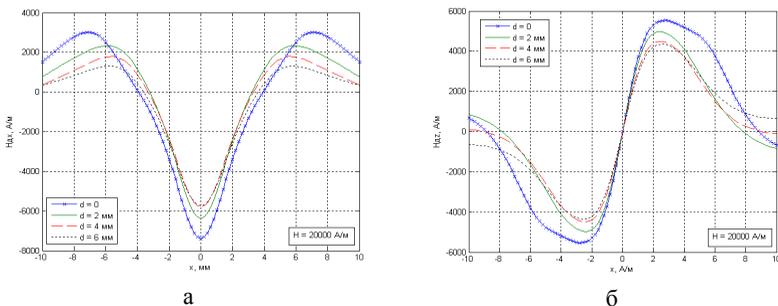


Рис. 5.

Аналогично анализу поверхностного дефекта ферромагнитного тела, для определения влияния геометрических параметров подповерхностного дефекта на характер распределения составляющих напряженности МПРД, проводятся численные эксперименты при различных значениях геометрических параметров подповерхностного дефекта. В частности, на рис. 6 представлены графики составляющих H_{dx} , H_{dz} в зависимости от ширины дефекта при постоянных параметрах: $2b_d = 10$ мм; $2c_d = 2$ мм; $d = 2$ мм; $h = 2,5$ мм; $H = 2000$ А/м.

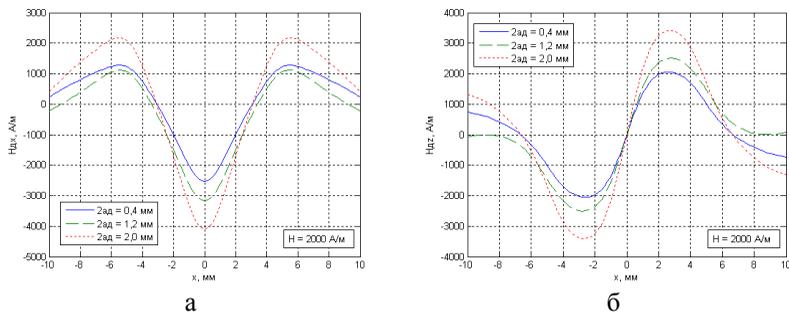


Рис. 6.

Как и в случае поверхностного дефекта (рис. 1), изменение ширины подповерхностного дефекта существенно влияет на амплитудные значения составляющих напряженности МПРД и не так значительно на расстояние между экстремумами составляющей $H_{дх}$.

В целом закономерности изменения основных параметров распределения составляющих напряженности МПРД, которые имели место при вариациях геометрических параметров поверхностного дефекта, как показали численные расчеты, сохраняются и в случае подповерхностного дефекта ферромагнитного тела.

Обобщая полученные результаты численных экспериментов и основные положения проведенного анализа распределения составляющих напряженности МПРД намагниченного тела, можно выделить такие моменты.

Варьирование геометрических параметров и глубины расположения дефекта существенно влияет на распределение составляющих напряженности МПРД. В частности это наблюдается по изменению амплитудных значений $H_{дх}$ и $H_{дз}$, расстоянию между экстремумами составляющей $H_{дх}$. Кроме этих параметров распределения $H_{дх}$, $H_{дз}$, как еще один параметр, характеризующий распределение составляющей $H_{дх}$, может быть принята ширина раскрытия распределения составляющей $H_{дх}$ на уровне равном 0,6 от максимального значения $H_{дх}$ – $0,6H_{дмх}$.

Каждый из параметров дефекта сплошности ферромагнетика в различной степени влияет на все приведенные основные параметры составляющих напряженности МПРД. Поэтому не представляется возможным раздельно, по приращению, какого либо из основных параметров составляющих $H_{дх}$, $H_{дз}$, однозначно определить какой из параметров дефекта внес вклад в значение конкретного параметра составляющих $H_{дх}$, $H_{дз}$. Но по результатам проведенного анализа наблюдаются определенные закономерности изменения основных параметров распределения составляющих напряженности МПРД в зависимо-

сти от изменения геометрических параметров дефекта и глубины его расположения при постоянном значении напряженности внутреннего магнитного поля в объеме намагниченного тела.

Выводы. В ходе проведения анализа распределения составляющих напряженности МПРД намагниченного тела, содержащего дефект типа трещины были установлены основные параметры H_{dx} и H_{dz} , на которые преимущественно оказывает влияние изменение геометрических параметров дефекта и глубины его расположения. Такими параметрами являются: амплитудные значения составляющих H_{dx} , $H_{dz} - H_{dmax}$, H_{dmin} ; расстояние между экстремумами $H_{dz} - \Delta x_z$; ширина раскрытия распределения составляющей H_{dx} на уровне $0,6H_{dmax} - \Delta x_x$.

Определенно можно сказать, что совокупность взаимосвязанных зависимостей основных параметров распределения составляющих H_{dx} , H_{dz} от геометрических параметров дефекта и глубины его расположения представляет собой систему, которая обладает наличием однозначных закономерностей. Только путем совокупного анализа основных закономерностей этой системы можно провести качественную идентификацию геометрических параметров дефекта.

Список литературы: 1. ГОСТ 24450-80. Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения. 2. Корбан Н.П., Яковенко В.В., Додонов В.И. Обзор методов и программных пакетов применимо к расчету внешнего магнитного поля ферромагнитного тела, содержащего дефекты // Праці Луганського відділення МАІ. – 2009. – № 2 (20). – Ч. 2. – С. 19-23. 3. Корбан Н.П. Расчет магнитных полей дефекта типа "трещина" // Збірник тез доповідей 5-ої науково-технічної конференції "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання", Івано-Франківськ, 2008. – С. 29-31. 4. Корбан Н.П. Расчет магнитного поля, индуцируемого остаточной намагниченностью ферромагнитной детали // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. Михайла Остроградського. – 2009. – № 3 (56). – Ч. 2. – С. 67-69.



Корбан Николай Петрович. Защитил диплом инженера в Восточноукраинском национальном университете по специальности "Научные, аналитические и экологические приборы и системы" в 2005 г. Ассистент кафедры "Электромеханика", а также аспирант заочного отделения по специальности 05.11.13. "Приборы и методы контроля и определения состава вещества" ВНУ им. В. Дяля.

Научные интересы связаны с теоретическим построением и численным моделированием магнитных полей при неразрушающем контроле металлоконструкций, вопросами измерения магнитных полей.

Поступила в редколлегию 15.01.2010