

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОКОЛО ШЕРОХОВАТОЙ МАГНИТОПРОВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

С.М. ПЕРМИНОВ

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», Иваново, Россия
E-mail: psm@upm.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Однородное магнитное поле в равномерном рабочем зазоре электромеханического устройства около шероховатой магнитопроводящей поверхности преобразуется в резко неоднородное. Вопросы перераспределения магнитного поля, обусловленного шероховатостью поверхности, в настоящее время не изучены и представляют интерес для исследования как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Материалы и методы: Экспериментальные способы не позволяют исследовать магнитное поле около шероховатой магнитопроводящей поверхности. Магнитное поле около магнитопроводящей поверхности, неровности которой имеют вид чередующихся борозд, образующихся при токарной обработке деталей, с профилем сечения выступов в виде равносторонних треугольников исследуется методом математического моделирования магнитного поля на основе метода конечных элементов.

Результаты: Представлены результаты численных экспериментов, согласно которым напряженность поля у вершин выступов поверхности более чем в десять раз превышает среднюю напряженность поля над поверхностью, напряженность поля быстро уменьшается при удалении от поверхности и на расстоянии высоты выступа следы перераспределения поля практически отсутствуют. Напряженность поля между выступами шероховатой поверхности ниже базовой напряженности поля и уменьшается до нуля у основания впадины, образуемой соседними выступами.

Выводы: В приповерхностном слое шероховатой магнитопроводящей поверхности магнитное поле преобразуется в резко неоднородное. Толщина слоя неоднородного магнитного поля определяется классом шероховатости поверхности, поэтому класс шероховатости поверхности влияет на работу и характеристики электромеханических устройств с мелкодисперсными магнитными рабочими средами.

Ключевые слова: магнитное поле около шероховатой поверхности, математическое моделирование, магнитные мелкодисперсные среды.

THE STUDY OF THE MAGNETIC FIELD NEAR A ROUGH MAGNETO-CONDUCTING SURFACE

S.M. PERMINOV

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia
E-mail: mizonov@home.ivanovo.ru

Abstract

Background: A uniform magnetic field in the uniform air gap of an electromechanical device near a rough magneto-conducting surface is transformed into strongly inhomogeneous one. In the devices which use finely divided magnetic media the redistribution of the magnetic field can significantly affect the flow parameters of the devices or processes.

Materials and Methods: The experimental methods do not allow us to study the magnetic field near a rough magneto-conducting surface. The method of mathematical modeling of the magnetic field on the basis of the finite element method is used. We investigate the magnetic field near the magneto-conducting surface which has an uneven alternating ridges formed by turning parts, with a profile section of the projections in the form of equilateral triangles.

Results: The results of numerical experiments have shown that the field strength at the edge of the ledge surface is more than ten times higher than the average field strength above the surface. The field strength decreases rapidly with the distance from the surface. And at a distance of a rib height the signs of redistribution of the field is practically absent. The field strength between the surface roughnesses is below the base field strength and decreases to zero at the bottom of the depression formed by the adjacent ribs.

Conclusions: At the surface layer of the rough magneto-conducting surface, the magnetic field is converted into a strongly nonuniform, which affects the characteristics of electromechanical devices with finely divided magnetic work environment. The thickness of the inhomogeneous magnetic field is determined by the class of surface roughness.

Key words: magnetic field near a rough surface, mathematical modeling, the magnetic fine environment.

Постановка задачи. При изготовлении деталей устройств на их поверхностях образуется множество микроскопических выступов и впадин.

Величина и количество выступов определяют шероховатость поверхностей [1]. В электромеханических устройствах при переходе магнитного по-

тока из воздуха в магнитопроводящую деталь в приповерхностном слое шероховатой поверхности детали происходит перераспределение магнитного поля (рис. 1).

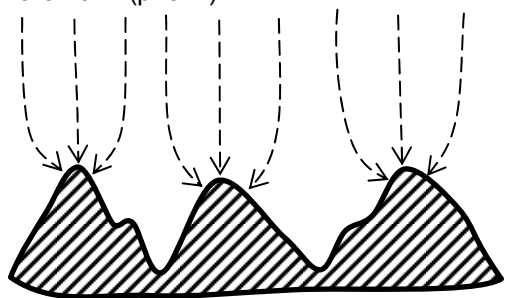


Рис. 1. Перераспределение линий магнитного потока около шероховатой магнитопроводящей поверхности

Выступы шероховатой магнитопроводящей поверхности концентрируют магнитный поток, образуя зоны с повышенной напряженностью магнитного поля, во впадинах между выступами создаются зоны с пониженной напряженностью поля. Поле из однородного преобразуется в неоднородное. При удалении от поверхности неоднородность магнитного поля, обусловленная шероховатостью поверхности, постепенно ослабевает и исчезает. Для большинства электромеханических устройств (электрических машин, трансформаторов, магнитных реле и т.д.) данное перераспределение поля в приповерхностном слое практически не влияет на их основные технические характеристики. Но в устройствах, где используются мелкодисперсные магнитные среды (магнитные порошки, магнитные жидкости, тонкие пленки) [2–5], перераспределение напряженности магнитного поля около шероховатой магнитопроводящей поверхности может существенно изменять параметры устройств или происходящих технологических процессов. Поэтому представляют интерес исследование характера перераспределения магнитного поля около магнитопроводящей поверхности, определение толщины слоя около поверхности, где поле является неоднородным, и на каком удалении от поверхности неоднородность поля, вызванная шероховатостью, отсутствует.

Способ исследования магнитного поля.

Величина выступов и впадин шероховатой поверхности измеряется микронами. В настоящее время отсутствуют способы и технические средства измерения магнитного поля систем с микроновыми размерами, поэтому исследование выполнялось методом математического моделирования магнитного поля. Форма выступов шероховатой поверхности разнообразна и зависит от обрабатываемого материала, способов обработки поверхности, используемого инструмента, технологических режимов и т.д. Из существующего многообразия форм выступов рассматривалось распределение магнитного поля около магнитопроводящей поверхности, неровности которой имеют вид чередующихся борозд, образующихся при токарной обработке деталей, с профилем сечения

выступов в виде равнобедренных треугольников. На рис. 2 показана симметричная половина рассматриваемого выступа. Высота выступа h была принята 2,6 микрон, что соответствует 6 классу шероховатости поверхности с $Ra = 1,95$.

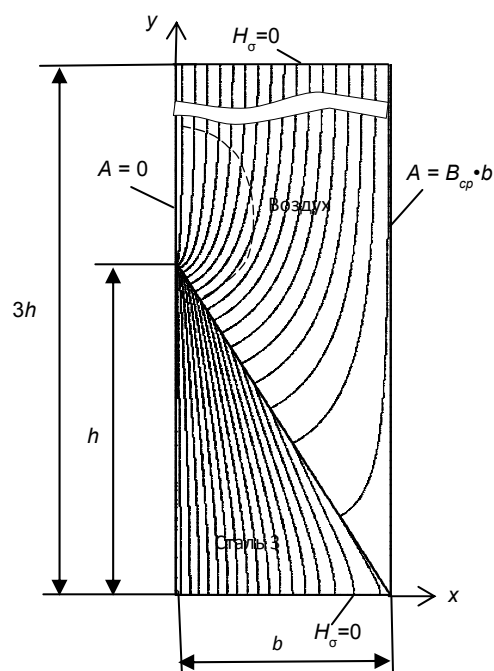


Рис. 2. Расчетная область

Метод расчета поля и область исследования. Расчет магнитного поля проводился методом конечных элементов. Расчетная зона включала в себя половину равнобедренного выступа на поверхности высотой h и воздушный участок над поверхностью. Высота воздушного участка над поверхностью изначально принималась $10h$, а в дальнейшем, после уточнения глубины распространения неоднородного магнитного поля, была сокращена до $3h$. На вертикальных границах расчетной области, совпадающих с плоскостями симметрии, векторный магнитный потенциал задавался постоянным. На левой границе потенциал был равен нулю, на правой границе величина потенциала рассчитывалась через среднюю индукцию над поверхностью и ширину выступа. На верхней и нижней горизонтальных границах касательное поле принималось равным нулю ($H_\sigma = 0$, H_σ – касательная напряженность поля). Расчетная сетка наносилась дифференцированно – с наименьшими элементами в области вершины выступа и более крупными у горизонтальных границ расчетной области. Количество элементов расчетной сетки составляло около 500 000.

Результаты расчета поля. На рис. 2 показана картина распределения линий векторного магнитного потенциала над выступом шероховатой поверхности. Равномерное распределение линий магнитного поля над поверхностью нарушается при подходе к выступам шероховатой поверхности. Наибольшая концентрация линий

наблюдается у острого зубца, что говорит о повышенной напряженности поля в этой зоне. Напряженность магнитного поля в любой точке рассматриваемого пространства удобно выражать через коэффициент неоднородности:

$$k = H / H_B,$$

где H – напряженность поля в рассматриваемой точке; H_B – базисная напряженность (средняя напряженность поля над шероховатой поверхностью). Коэффициент неоднородности показывает, во сколько раз напряженность поля в рассматриваемой точке отличается от средней напряженности поля над магнитопроводящей поверхностью. На рис. 3 показано распределение коэффициента неоднородности магнитного поля на прямой линии, расположенной параллельно магнитопроводящей поверхности на расстоянии $0,03h$ от вершины выступа. Непосредственно у вершины выступа напряженность поля в разы превышает среднюю напряженность поля над поверхностью. Между выступами напряженность поля ниже, чем средняя напряженность.

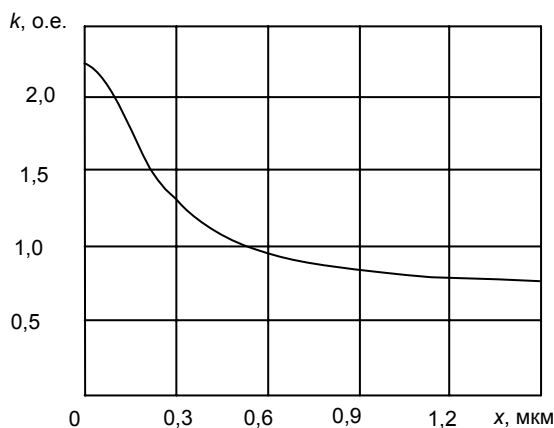


Рис. 3. Изменение коэффициента неоднородности напряженности поля вдоль шероховатой поверхности

На рис. 4 показано распределение коэффициента неоднородности на вертикальных линиях симметрии поля, проходящих через вершину выступа (кривая а) и впадину между выступами (кривая б). Кривые показывают, что напряженность поля у острой кромки выступа очень высокая, более чем в десять раз превышает среднюю напряженность поля над поверхностью. Напряженность поля быстро уменьшается при удалении от поверхности. На расстоянии $0,31h$ от вершины выступа коэффициент неоднородности поля составляет 1,1, а на расстоянии высоты выступа следы перераспределения поля практически отсутствуют. Напряженность поля между выступами шероховатой поверхности ниже базовой напряженности поля и снижается до нуля у основания впадины, образуемой соседними выступами (рис. 4, кривая б). На рис. 2 пунктирной линией выделена зона около вершины выступа, где напряженность поля превышает базовую в 1,05 раза. Эту зону можно назвать зоной повышенной напряженности и градиента напряженности поля.

Если поместить около шероховатой поверхности мелкодисперсную магнитную среду, допустим магнитную жидкость, то магнитные частицы будут стремиться попасть в зону, где напряженность поля максимальна, т. е. к вершине выступа, создавая здесь повышенную концентрацию частиц. Вершины выступов покрываются слоем частиц, которые прочно удерживаются на поверхности. Магнитные частицы выстраиваются также в цепочки по линиям магнитного поля. Силы взаимодействия между частицами тем выше, чем сильнее напряженность магнитного поля. То есть прочность цепочек из частиц существенно выше около вершин выступов шероховатой поверхности, чем на некотором удалении, где поле равномерное. Цепочки прочно связаны с вершинами выступов. Около шероховатой магнитопроводящей поверхности образуется слой магнитной жидкости с более сильным внутренним взаимодействием частиц, вследствие чего этот слой более прочный, чем слои в равномерном поле, и, следовательно, менее подвижный. Каким образом данный слой отразится на параметрах электромеханических устройств с мелкодисперсными рабочими средами? При движении шероховатой поверхности цепочки будут разрушаться в первую очередь в области однородного магнитного поля, где силы взаимодействия между частицами наименьшие. Около шероховатой поверхности будет существовать трудно разрушимый слой мелкодисперсной рабочей среды. Если рассматривается шероховатая поверхность вала, то появление неподвижного слоя мелкодисперсной рабочей среды увеличивает эффективный диаметр вала, следовательно, момент трения вала. Если толщина слоя соизмерима с рабочим зазором устройства, то его появление сокращает величину рабочего зазора, способствует заметному увеличению градиента сдвига и напряжению сдвига дисперсной среды в зазоре, соответственно, повышению потерь в устройстве.

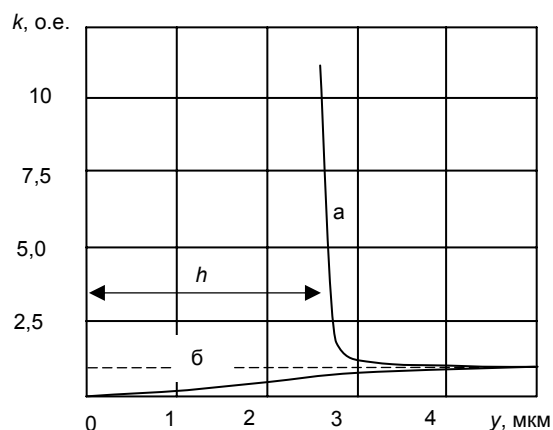


Рис. 4. Изменение коэффициента неоднородности напряженности поля при удалении от шероховатой поверхности: а – по линии выступа; б – по линии впадины

Связь величины шероховатости поверхности с толщиной слоя из мелкодисперсной среды повышенной прочности. При отсутствии магнитного насыщения материала выступов шероховатой поверхности картина распределения магнитного поля над выступами одинаковой формы, но разной высоты будет одинаковой, исходя из условий подобия магнитных полей. Это значит, что высота слоя неоднородного магнитного поля около поверхности определяется высотой выступов, или классом шероховатости поверхности. Чем выше класс шероховатости поверхности, тем меньше толщина слоя неоднородного магнитного поля и прочного слоя дисперсной среды. Чем ниже класс шероховатости поверхности, тем выше толщина слоя неоднородного магнитного поля и прочного слоя рабочей среды. Следовательно, задавая шероховатость магнитопроводящей поверхности, можно регулировать толщину неподвижного приповерхностного слоя мелкодисперсной рабочей среды и момент электромеханического устройства. Так, если в магнитожидкостной или магнитной порошковой муфте поверхности деталей, контактирующие с мелкодисперсной магнитной рабочей средой, выполнить с низким классом шероховатости, то можно увеличить максимально передаваемый момент муфты. В магнитожидкостном уплотнении, особенно высокоскоростном, класс шероховатости рабочих поверхностей необходимо увеличивать для снижения внутренних потерь и исключения перегрева магнитных жидкостей.

Заключение

Таким образом, на основе моделирования магнитных полей в приповерхностном слое шероховатой магнитопроводящей поверхности показано, что около поверхности магнитное поле

преобразуется в резко неоднородное. Толщина слоя неоднородного магнитного поля определяется классом шероховатости поверхности. Приповерхностный слой неоднородного магнитного поля влияет на характеристики электромеханических устройств с мелкодисперсными магнитными рабочими средами, что нужно учитывать при их проектировании.

Список литературы

1. **Анурьев В.И.** Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. Т.1. – М.: Машиностроение, 1992. – 816 с.
2. **Патент** на изобретение РФ №2340821. Магнито-жидкостное уплотнение вала / С.М. Перминов; опубли. в Б.И. №34, 10.12.2008. МПК F 16 J 15/53.
3. **А. с. 1217031** (СССР). Магнитный подшипник качения / С.М. Перминов, Ю.И. Страдомский, Д.В. Орлов; опубли. в Б.И. № 9. 1985. МКИ F 16 15/00.
4. **Патент** на изобретение РФ 2399165. Электродинамическая головка с нанодисперсной магнитной жидкостью / С.М. Перминов; Опубли. в Б.И. №25 от 10.09.2010. МПК H04R 9/06.
5. **Патент** на изобретение РФ №2373496. Датчик угла наклона / С.М. Перминов; опубли. в Б.И. №32, 20.11.2009. МПК F 16 J 15/00.

References

1. **Anur'ev, V.I.** Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya [Reference book of a designer-machine builder], vol. 1, Moscow: Engineering, 1992, 816 p.
2. **Perminov, S.M.** Magnitozhidkostnoe uplotnenie vala [Magneto-liquid Seal], Patent FR №2340821, 2008, IPC F 16 J 15/53.
3. **Perminov, S.M. Stradomskiy, Ju.I., Orlov, D.V.** Magnitnyy podshipnik kacheniya [RollingMagnetic bearing], Patent SU №1217031. 1985, IPC F 16 15/00.
4. **Perminov, S.M.** Elektrodinamicheskaya golovka s nanodispersnoy magnitnoy zhidkost'yu [Electro-magnetic head with a nano-dispersed liquid], Patent FR 2399165. 2010, IPC H04R 9/06.
5. **Perminov, S.M.** Datchik ugla naklona [Tilt angle sensor], Patent FR №2373496. 2009, IPC F 16 J 15/00.

Перминов Сергей Михайлович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, докторант кафедры электромеханики, зав. проблемной научно-исследовательской лабораторией прикладной феррогидродинамики,
телефон (4932) 38-57-98,
e-mail: psm@upm.ispu.ru.