

УДК 621.538

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАБОЧЕМ ЗАЗОРЕ С ШЕРОХОВАТОЙ МАГНИТОПРОВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ТРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

С.М. ПЕРМИНОВ, В.А. ПОЛЕТАЕВ, Т.А. ПАХОЛКОВА
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
Иваново, Российская Федерация
E-mail: psm@upm.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В электромеханических устройствах, где в рабочих зазорах используются мелкодисперсные магнитные среды, перераспределение магнитного поля около шероховатой магнитопроводящей поверхности может существенно влиять на параметры устройств или протекание технологических процессов.

Материалы и методы: С использованием метода математического моделирования на основе метода конечных элементов исследуется магнитное поле около шероховатой магнитопроводящей поверхности, образующейся при токарной обработке деталей, с профилем сечения выступов в виде равнобедренных треугольников.

Результаты: Результаты численных экспериментов показали, что напряженность поля у кромки выступа поверхности в несколько раз превышает среднюю напряженность поля. Напряженность поля между выступами шероховатой поверхности ниже базовой напряженности поля и уменьшается до нуля у основания впадины, образуемой соседними выступами.

Выводы: Расчет магнитного поля около выглаженной поверхности показал, что неоднородность поля около шероховатой поверхности существенно снизилась. Максимальная напряженность поля над поверхностью не превышает 15 % от H_{cp} , а минимальная – 20 % H_{cp} , следовательно, отрицательные эффекты, связанные с потерями в устройстве, заметно снизятся.

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

RESEARCH OF MAGNETIC FIELD IN WORKING GAP WITH RUGGED MAGNETICALLY CONDUCTIVE SURFACE OF FRICTION OF ELECTROMECHANICAL DEVICE

S.M. PERMINOV, V.A. POLETAEV, T.A. PAKHOLKOVA
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: psm@upm.ispu.ru

Abstract

Background: Redistribution of magnetic field near the rugged magnetically conductive surface can seriously influence the device parameters or technological processes in electromechanical devices where the fine-dispersed magnetic environments are used in working gaps.

Materials and methods: The authors use the method of mathematical simulation based on the method of finite elements, and they research the magnetic field near the rugged magnetically conductive surface which is formed while turning works of details with section of lugs like equiangular triangles.

Results: The results of numerical calculations demonstrate that the field strength near the lug edge of surface exceeds average tension of the field in several times. The field strength between lugs of rugged surface is below the basic level of the field strength, and it decreases up to zero at the foundation of concavity formed with the adjacent lugs.

Conclusions: The calculation of magnetic field near a flat surface shows that nonuniformity of a field near the rugged surface brings appreciably down. The maximum value of the field strength above the surface is no more that 15 % H_{cp} , and minimum value is 20 % H_{cp} . Therefore, the negative effects connected with the losses in devices noticeably go down.

Key words: rugged surface, magnetic field near the rugged surface, mathematical simulation, fine-dispersed magnetic liquids.

Постановка задачи. На поверхностях деталей существуют микронеровности, которые образуются в процессе их обработки при изготовлении. Параметры микронеровностей определяют шероховатость поверхностей. В электротехниче-

ских устройствах однородное магнитное поле около шероховатой магнитопроводящей поверхности перераспределяется и становится неоднородным [1]. В устройствах, где используются мелкодисперсные магнитные среды (магнитные по-

рошки, магнитные жидкости, магнитореологические суспензии [2, 3]), перераспределение напряженности магнитного поля около шероховатой магнитопроводящей поверхности может существенно изменять параметры устройств или происходящих в поле технологических процессов. Поэтому представляет 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. Первые оценки перераспределения магнитного поля над идеализированной шероховатой магнитопроводящей поверхностью были выполнены в работе [1].

Ниже ставится задача по заданным технологическим параметрам изготовить на токарном станке с ЧПУ деталь из магнитопроводящего материала, экспериментально исследовать характер распределения микронеровностей на шероховатой поверхности, рассчитать магнитное поле около данной поверхности, определить особенности его перераспределения, вызванные микронеровностями.

Исследуемая поверхность. Исследуется наружная поверхность цилиндрической втулки с диаметром 50 мм, полученная при обработке (точении) на токарном станке 16К20 при $n = 800$ об/мин, $S = 1,5$ мм/об.

Измерение шероховатости R_a производилось на приборе профилометре-профилографе модели АБРИС-ПМ7, запись профилограмм производилась на ЭВМ.

На рис. 1 представлена профилограмма шероховатой поверхности.

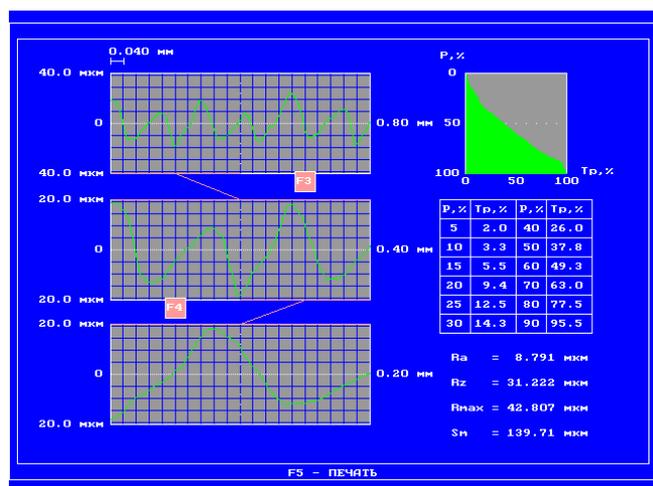


Рис. 1. Профилограмма поверхности

Основные параметры шероховатости следующие: $R_a = 8,791$ мкм; $R_z = 31,222$ мкм; $R_{max} = 42,807$ мкм; $S_m = 132,71$ мкм

Способ исследования магнитного поля.

В настоящее время отсутствуют способы и технические средства измерения магнитного поля

систем с микронными размерами, поэтому исследование выполнялось методом математического моделирования магнитного поля. Расчет магнитного поля проводился методом конечных элементов. Расчетная зона включала часть цилиндрической поверхности с аксиальной длиной $L = 280$ мкм – два шага выступов, т.е. два выступа и две впадины (рис. 2). Высота воздушного участка над поверхностью принималась равной $3L$. На вертикальных границах расчетной области векторный магнитный потенциал задавался постоянным. На левой границе потенциал принимался равным нулю, на правой границе величина потенциала рассчитывалась через среднюю индукцию над поверхностью и длину поверхности L . 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 выступов поверхности и более крупными у верхней горизонтальной границы расчетной области. Количество элементов расчетной сетки составляло около 560000.

Результаты расчета поля. На рис. 2 показана картина распределения линий векторного магнитного потенциала над выступами шероховатой поверхности. Анализ полученного изображения показывает, что равномерное распределение линий магнитного поля нарушается при подходе к выступам шероховатой поверхности. Наибольшая концентрация линий наблюдается у вершин выступов, что говорит о повышенной напряженности поля в этой зоне. Во впадинах между выступами концентрация линий поля уменьшается, что соответствует пониженной напряженности поля.

На рис. 2 выделены четыре точки около шероховатой поверхности, в которых указаны значения индукции магнитного поля: две точки около вершин выступов и две точки во впадинах между выступами.

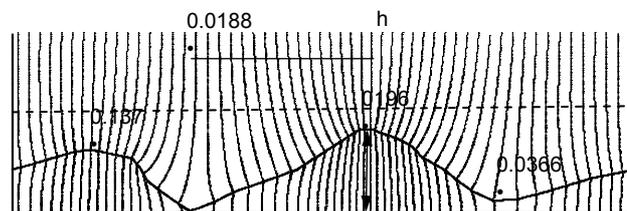


Рис. 2. Картина распределения линий векторного магнитного потенциала над выступом шероховатой поверхности

При средней индукции поля над поверхностью $0,1$ Тл индукция около вершин составляет $0,137$ и $0,196$ Тл, во впадинах – $0,0188$ и $0,0366$ Тл. У одной из вершин индукция практически вдвое выше, а во впадине в 5 раз ниже среднего значения индукции над поверхностью Φ . То есть около рассматриваемой магнитопроводящей поверхно-

сти значение индукции меняется более чем на порядок. У выступа поверхности с большей высотой наблюдается более высокое значение индукции.

Интенсивность магнитного поля в любой точке рассматриваемого пространства удобно выражать относительно базового значения 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 $0,03h$; $0,5h$; $1h$ от вершины выступа, где h – высота наибольшего выступа (рис. 2). Анализ полученных кривых показывает, что неоднородность поля распространяется на расстояние, превышающее высоту выступов шероховатой поверхности. Так, на кривой 3 на расстоянии h от вершины выступа напряженность поля примерно на 10 % превышает среднюю напряженность поля над поверхностью.

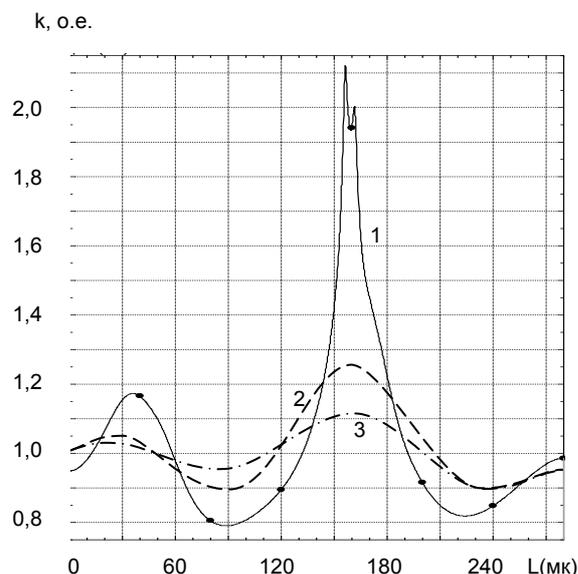


Рис. 3. Изменение коэффициента неоднородности напряженности поля вдоль шероховатой поверхности: 1 – на расстоянии $0,03h$ от вершины; 2 – на расстоянии $0,5h$ от вершины; 3 – на расстоянии $1h$ от вершины

На рис. 4 показано распределение коэффициента неоднородности на вертикальных линиях, проходящих через вершину выступа (рис. 4, кривая а) и впадину между выступами (рис. 4, кривая б). Кривые показывают, как меняется напряженность поля над выступом и над впадиной при приближении к шероховатой поверхности.

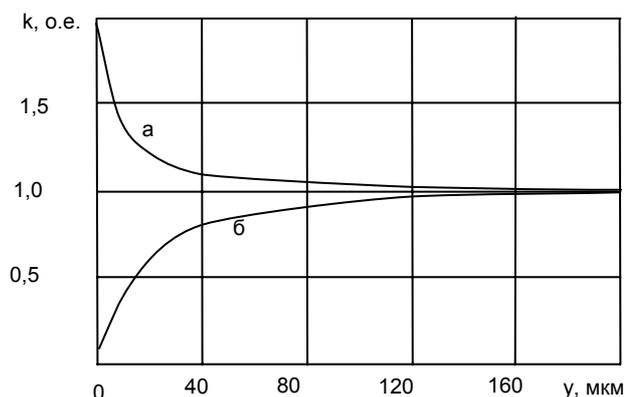


Рис. 4. Изменение коэффициента неоднородности напряженности поля при удалении от шероховатой поверхности: а – по линии выступа; б – по линии впадины

Перераспределение поля начинается на высоте $3-4h$, над выступом напряженность поля растет, над впадиной снижается. Напряженность поля в канавке не падает до нуля, как наблюдалось ранее в [1] при рассмотрении идеализированной поверхности с коническими выступами, и максимальная напряженность возрастает не столь значительно, как над острой формой выступа. Следовательно, степень перераспределения напряженности магнитного поля определяется формой и соотношением ширины и высоты выступов шероховатой поверхности.

Если поместить около шероховатой поверхности мелкодисперсную магнитную среду, допустим магнитную жидкость, то магнитные частицы будут стремиться попасть в зону, где напряженность поля максимальна, то есть 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 слой более прочный, чем слои в равномерном поле, и, следовательно, менее подвижный. Каким образом данный слой отразится на параметрах электро-механических 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 меньше. 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, возрастает момент трения вала устройства. 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.

Для снижения вышеуказанных отрицательных эффектов необходимо снизить степень перераспределения магнитного поля около шероховатой поверхности. Этого можно достичь уменьшая высоту выступов магнитопроводящей шероховатой поверхности. Одним из возможных способов уменьшения высоты выступов является алмазное выглаживание поверхности.

Обработка поверхностей деталей алмазным выглаживанием может осуществляться на токарном станке типа 16К20 после точения или шлифования (скорость вращения детали – 200 об/мин, подача – 0,015 мм/об; сила выглаживания – 200–300 Н в зависимости от материала детали).

Обработанная таким образом поверхность была исследована с помощью прибора и построен ее профиль (рис. 1). Расчет магнитного поля около выглаженной поверхности показал, что неоднородность поля около шероховатой поверхности существенно снизилась.

Перминов Сергей Михайлович,

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

Полетаев Владимир Алексеевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии автоматизированного машиностроения,
телефон (4932) 26-97-72,
e-mail: poletaev@tam.ispu.ru

Пахолкова Татьяна Александровна,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
соискатель кафедры технологии автоматизированного машиностроения,
телефон (4932) 26-97-73,
e-mail: tanypah@mail.ru

Максимальная напряженность поля над поверхностью не превышает 15 % от H_{cp} , а минимальная – 20 % от H_{cp} , следовательно, отрицательные эффекты, связанные с потерями в устройстве, заметно снизятся.

Работа выполнена по Госконтракту № 133.G25.31.0057 с Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства.

Список литературы

1. Перминов С.М. Исследование магнитного поля около шероховатой магнитопроводящей поверхности // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 1. – С. 31–33.
2. Перминов С.М. Патент на изобретение РФ №2340821. Магнитоэжидкостное уплотнение вала. Оpubл. в Б.И. №34, 10.12.2008, МПК F 16 J 15/53.
3. Полетаев В.А., Перминов С.М. Пахолкова Т.А. Роль площадки на острие зубца в формировании магнитного поля и удерживающей способности рабочего зазора магнитоэжидкостного уплотнения // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 5. – С. 32–34.

References

1. Perminov, S.M. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 1, pp. 31–33.
2. Perminov, S.M. Patent na izobretenie RF №2340821. Magnitozhidkostnoe uplotnenie vala [Magnetic Liquid Shaft Seal], B.I. №34, 10.12.2008, MPK F 16 J 15/53.
3. Poletaev, V.A., Perminov, S.M. Pakholkova T.A. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 5, pp. 32–34.