



ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ НАПЛАВКОЙ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОРОШКОВ, С ПОМОЩЬЮ ЛИНЕЙНОГО СИМПЛЕКС-МЕТОДА

И.М. Соцкая (фото)

к.т.н., доцент, заведующая кафедрой технического сервиса
К.А. Зиновьев

к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры электрификации
ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА, г. Ярославль

*Магнитные
характеристики,
электроимпульсная
наплавка,
ферромагнитные
порошки, линейный
симплекс-метод*

*Magnetic characteristics,
electric pulse surfacing,
magnetizable powders,
linear simplex method*

На российском рынке сервиса проявились и будут нарастать следующие тенденции: рост спроса на сервис, на услуги мелких независимых специализированных мастерских, на бывшие в употреблении и восстановленные детали машин.

Для сервисного рынка всех стран характерна общая картина – заказчики, которые купили у официального дилера машину, исправно являлись на сервис в течение гарантийного периода. Однако после истечения срока гарантии до половины этих клиентов предпочитают обращаться в независимые ремонтные фирмы и мелкие специализированные мастерские [1].

Поэтому считается целесообразным организация участков по восстановлению деталей на базе малого ремонтного предприятия.

Восстановление изношенных деталей является важным резервом повышения эффективности использования техники, экономии материальных, топливно-энергетических и трудовых ресурсов в различных сферах народного хозяйства.

Экономическая целесообразность восстановления деталей обусловлена, прежде всего, возможностью повторного и неоднократно использования 65...75% изношенных деталей. Себестоимость восстановления деталей, как правило, не превышает 15...30% стоимости новых, а расход материалов в 15...20 раз ниже, чем на их изготовление [2].

Актуальной задачей современного ремонтного производства является осуществление практических мер по повышению надёжности и долговечности деталей сельскохозяйственной техники, что во многом определяется состоянием их поверхностного слоя.

В подавляющем большинстве детали выходят из строя не в результате поломок, а в результате износа тонкого поверхностного слоя, поэтому требования, предъявляемые к основному материалу детали и к её поверхностному слою, должны быть различны.

По-прежнему одной из лучших технологий восстановления деталей остаётся электроимпульсная наплавка металлопокрытий. Хотя эта технология успешно применяется, но далеко не все её возможно-

сти используются сегодня на практике для повышения качества восстановленных деталей.

В соответствии с проведённым анализом (рис. 1) в работе [3] установлено, что более 50% в общем объёме изнашиваемых деталей составляет износ цилиндрических поверхностей. Причём изнашиваются как внешние, так и внутренние цилиндрические поверхности. Наряду с этим, износы отверстий по диаметру составляют порядка 12%, а их в свою очередь, также можно классифицировать как износ внутренней цилиндрической поверхности. Следовательно, самым многочисленным дефектом, более 60%, является износ внешних и внутренних цилиндрических поверхностей.

Применение в качестве присадочного материала ферромагнитного порошка при восстановлении деталей электроимпульсной наплавкой позволяет улучшить качественный потенциал этой перспективной технологии. При этом возникает возможность прогнозирования качества продукции, т.е. получаемого покрытия.

Однако встаёт вопрос об оптимизации режимов намагничивания ферромагнитных порошков при нанесении покрытий на изношенные детали импортной техники с неопределённым химическим составом. Для этого возникает необходимость в исследовании магнитных свойств материалов.

При исследовании магнитных характеристик материалов применяются магнитометрический, электродинамический, индукционный, вибрационный, пондеромоторный, мостовой, ваттметрический, калориметрический, резонансный,

нейтронографический, баллистический (импульсно-индукционный) методы.

Одним из перспективных методов исследования магнитных характеристик является импульсно-индукционный. Он основан на измерении количества электричества, протекающего через витки катушки, охватывающей образец, при изменении магнитного потока, сцепляющегося с этой катушкой. Изменение магнитного потока осуществляется: удалением катушки из магнитного поля, изменением её положения в пределах магнитного поля и изменением направления поля. Метод позволяет определить основную кривую магнитной индукции или намагниченности, петлю магнитного гистерезиса, различные виды проницаемости и размагничивающий фактор [4]. Достоинством метода является возможность автоматизации процесса и измерения всех магнитных характеристик. На этом методе основано большинство магнитоизмерительных приборов. Однако метод не учитывает объёмную неоднородность магнитных свойств, поэтому не может быть использован для исследования магнитных характеристик деталей сложной формы в производственных условиях.

Пусть $M = f(H)$ – искомая магнитная характеристика материала, из которого изготовлена деталь, которая представляется аппроксимирующей функцией с числом неизвестных параметров (n):

$$X = x_1, x_2, \dots, x_n. \quad (1)$$

В качестве искоемых параметров (X) взяты точки на кривой намагничивания или параметры выбранной модели магнитного гистерезиса.

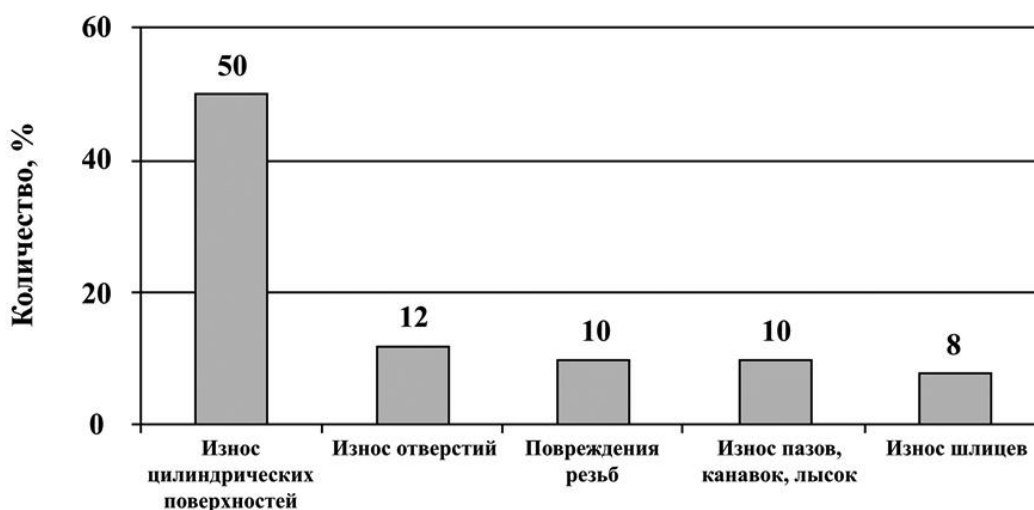


Рисунок 1 – Характерные износы автотракторных деталей

При импульсном намагничивании детали, помещённой в индуктор, регистрируются временные зависимости тока, а также магнитной индукции или магнитных потоков. Измерения параметров магнитного поля производятся в той области, где влияние намагничиваемой детали на результирующее магнитное поле наиболее значительно.

Предположим, что магнитная индукция:

$$B^n(t) = \{B_1^n(t), \dots, B_m^n(t)\}, \quad (2)$$

где m – набор измеренных в различных точках временных зависимостей параметров поля.

Применение критерия Чебышева позволяет сформулировать задачу поиска искомым параметров X как минимизацию отклонений измеренных значений параметров поля от расчётных.

Расчётные значения параметров поля:

$$B^{pac}(X, t) = \{B_1^{pac}(X, t), \dots, B_m^{pac}(X, t)\}, \quad (3)$$

получают из результатов анализа электромагнитного поля в системе «индуктор-деталь» по импульсу тока в индукторе $i(t)$, текущему приближению искомым параметров X , а также геометрии индуктора. Если использовать фиксированные моменты времени, на k -м шаге вычислений определяется вектор X^k , который обеспечивает:

$$\min_X \Phi(X^k) = \min_X \max_i |B_i^{pac}(X^k, t_j) - B_i^n(t_j)|, \quad (4)$$

где i – номер параметра;

$|B_i^{pac}(X^k, t_j) - B_i^n(t_j)|$ – разница между расчётными и измеренными временными зависимостями параметров поля;

t_j – выбранные моменты времени.

При условиях импульсного намагничивания деталей справедлива система уравнений Максвелла:

$$J = \nabla \cdot H, \quad (5)$$

$$\nabla \cdot E = -\frac{dB}{dt}, \quad (6)$$

где $J = J^B + J^{cm}$ – сумма плотностей вихревого и стороннего тока;

E – вектор напряжённости электрического поля;

B – вектор магнитной индукции;

H – вектор напряжённости магнитного поля.

В систему уравнений переменного электромагнитного поля входят уравнения непрерывности линий магнитной индукции (B) и полного тока (J):

$$\nabla \cdot B = 0, \quad (7)$$

$$\nabla \cdot J = 0. \quad (8)$$

Так как поле вектора магнитной индукции соленоидальное, то его можно выразить через векторный магнитный потенциал (A):

$$B = \nabla \cdot A \quad (9)$$

и записать интегральные выражения для A в виде:

$$A(t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\int_V \frac{J(t) + \nabla \cdot M(t)}{r} dV - \oint_S \frac{n \cdot M(t)}{r} dS \right] + A^{cm}(t), \quad (10)$$

где A^{cm} – векторный потенциал, созданный сторонним током.

Напряжённость электрического поля (E) из уравнения (5) определяется через векторный магнитный потенциал с точностью до градиента скалярного электрического потенциала (φ_e):

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \varphi_e. \quad (11)$$

Источником потенциальной составляющей $E^n = -\nabla \varphi_e$ при постоянной электрической проводимости (γ) служит слой электрических зарядов с плотностью (ξ), наведённых на поверхности детали:

$$E^n = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \oint_S \frac{\xi r}{r^3} dS = -\frac{1}{\epsilon_0} \nabla L \xi. \quad (12)$$

Пространственные интегральные уравнения для определения источников электромагнитного поля строятся из формул (10)–(12). Подставив (10) и (12) в (11) и умножив левую и правую части полученного равенства на электрическую проводимость среды, в которой находится точка наблюдения, получим уравнение для распределённого в объёме ферромагнитной детали вихревого тока:

$$J = -\gamma \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left[L_v (J + \nabla \cdot M) - L(n \cdot M) + \frac{1}{\mu_0} A^{cm} \right] - \frac{\gamma}{\epsilon_0} \nabla L \xi, \quad (13)$$

где L_v, L – интегральные операторы, действующие в объёме и на поверхности детали:

$$L_v f = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{f}{r} dV, \quad (14)$$

$$L f = \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{f}{r} dS. \quad (15)$$

Составим систему уравнений, для чего из выражения (10) выразим магнитную индукцию и дополним полученное равенство магнитной характеристикой материала детали:

$$B = \mu_0 \nabla_Q [L_v (J + \nabla \cdot M) - L(n \cdot M)] + \nabla_Q A^{cm}, \quad (16)$$

$$M = f(B). \quad (17)$$

Уравнение для скалярного электрического заряда выводится из известного граничного условия $nE = 0$ (линии тока касательные к поверхности проводника). Устремив точку наблюдения к поверхности со стороны проводника, с учётом предельных свойств интегрального оператора L получаем граничное интегральное уравнение второго рода для определения ξ :

$$\frac{\xi}{2\epsilon_0} = -n \left\{ \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left[L_v (J + \nabla \cdot M) - L(n \cdot M) + \frac{1}{\mu_0} A^{cm} \right] + \frac{1}{\epsilon_0} \nabla L \xi \right\}. \quad (18)$$

В системе уравнений (13), (16)–(18) искомыми оказываются два пространственных J и M и один поверхностный ξ источники.

В качестве временных зависимостей параметров поля при решении задачи восстановления магнитных характеристик принята зависимость потокоцепления, получаемая интегрированием по времени, от ЭДС, которая наводится в измерительной катушке при импульсном намагничивании детали. Массив измеренных параметров поля выглядит следующим образом:

$$B^n(t) = \{\Psi(t)\}, \quad (19)$$

где $\Psi(t)$ – временная зависимость потокоцепления, полученная интегрированием измеренной зависимости ЭДС(t), тогда:

$$B^{pac} = (X, t) = \{\Psi^{pac}(X, t)\}, \quad (20)$$

где $\Psi^{pac}(X, t)$ – зависимость, получаемая на каждом шаге в ходе прямого расчёта численным методом.

Представим в качестве искоемых параметров X координаты точку магнитного насыщения на кривой намагничивания $M(H) - (M_s, H_s)$:

$$X = (M_s, H_s). \quad (21)$$

Схема алгоритма разработанного метода контроля включает в себя следующие этапы.

Этап 1. Задание исходных данных и выбор нулевых приближений искоемых параметров X . Исходные данные для решения обратной задачи включают в себя геометрию магнитной системы «деталь-индуктор». Нулевые приближения искоемых параметров X выбираются с учётом ограничений, то есть $X \in S$.

Этап 2. Приближенное определение вектора \bar{D}^k , указывающего направление изменения переменных X^{k-1} при поиске минимума истинного критерия выражения (4).

Поиск вектора \bar{D}^k связан с тем, что формула (4) неявным образом зависит от искоемых параметров X . Точный анализ этой функции затруднителен, поэтому в окрестности исследуемой точки X^{k-1} она заменяется аппроксимирующей её функцией вида $\Phi'(X)$.

В качестве функции $\Phi'(X)$ выберем уравнение гиперплоскости, касательной к поверхности $\Phi(X)$ в точке X^{k-1} , которое получается численным разложением $\Phi(X)$ в ряд Тейлора по переменным X с использованием первых производных:

$$\Phi'(X^{k-1}) = \max_i \left| B_i^{pac}(X^{k-1}, t_j) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial B_i(X^{k-1}, t_j)}{\partial x_j} (x_j - x_j^k) - B_i^n(t_j) \right|, \quad (22)$$

где x_j – текущее значение j -го параметра при поиске экстремума $\Phi'(X)$.

Замена дифференциалов в формуле (22) конечными приращениями сводит расчёт коэффи-

циентов разложения к анализу изменений искоемых параметров X .

Задача минимизации критерия $\Phi'(X)$ может быть решена с помощью линейного симплекс-метода [5], который является наиболее эффективным методом решения линейных задач оптимизации с ограничениями переменных.

Алгоритм линейного симплекс-метода включает в себя следующие шаги:

1. Выбор начального базиса.
2. Определение переменной, которая должна войти в очередной базис.
3. Определение максимально допустимой величины новой базисной переменной.
4. Преобразование системы уравнений.

Этот алгоритм отличается высокой сходимостью.

Предположим, что минимум формулы (22) наблюдается в точке, характеризуемой вектором X_1 . Тогда наилучшее направление изменения переменных при стремлении критерия $\Phi(X)$ к минимуму даёт вектор

$$\bar{D}^k = \bar{X}_1 - \bar{X}^{k-1}.$$

Этап 3. Определение оптимальной длины шага α_{opt}^k с помощью которого рассчитывается новое приближение компонент вектора X^k в направлении \bar{D}^k , дающее минимальное значение истинного критерия $\Phi(X)$.

Вектор \bar{X}_1 может значительно отличаться от вектора \bar{X}^{k-1} , полученного на предыдущей итерации. Однако ввиду непрерывности $\Phi(X)$ и её частных производных существует вектор:

$$\bar{X}^k = \bar{X}^{k-1} + \alpha^k (\bar{D}^k - \bar{X}^{k-1}), \quad (23)$$

где $0 \leq \alpha^k \leq 1$ (24) обеспечивает выполнение условия $\Phi(X^k) \leq \Phi(X^{k-1})$.

Так как соотношение (23) предполагает изменение параметров A в пропорции α^k к компонентам вектора \bar{D}^k , то на этом этапе функцию $\Phi(X)$ можно считать зависящей только от величины одной переменной α^k . Поэтому для определения оптимальной длины шага α_{opt}^k необходимо решить задачу минимизации $\Phi(X)$ как функцию одной переменной α^k при ограничениях выражения (24).

Поскольку функция $\Phi(X)$ не может быть выражена явным образом, то для каждого промежуточного значения вектора \bar{X} необходимо проводить полный расчёт параметров (20). В связи с этим воспользуемся алгоритмом для поиска экстремума нелинейной функции одной переменной – алгоритмом «золотого сечения», который является модификацией метода Фибоначчи [5].

Этап 4. Минимизация истинного критерия.

Повторение расчёта новых приближений переменных X^k при $\alpha^k = \alpha_{opt}^k$ до получения требуемого значения критерия стабилизации решения:

$$\left| \frac{\Phi(X^k) - \Phi(X^{k-1})}{\Phi(X^{k-1})} \right| \leq \varepsilon, \quad (25)$$

где ε – заданное число.

При поиске минимума истинного критерия Φ на каждом k -м шаге производится численный расчёт магнитной системы «деталь-индуктор», с использованием вектора $\bar{X}^{k-1} = (M_S^{k-1}, H_S^{k-1})$. По этим значениям вычисляется аппроксимирующая зависимость, которая может быть аппроксимирована th -функцией (гиперболическим тангенсом):

$$M = M_S \cdot th\left(\frac{H}{H_S}\right). \quad (26)$$

Формула (26) используется в качестве магнитной характеристики образца при расчёте электромагнитного поля в импульсном магнитном поле.

Выводы

Таким образом, решена задача по определению магнитных характеристик для деталей сложной формы. Предложен метод контроля магнитных свойств ферромагнитных материалов в импульсных магнитных полях и составлен алгоритм, который позволит контролировать и оптимизировать режимы намагничивания ферромагнитных порошков, используемых для нанесения покрытий на изношенные детали не только отечественной, но и импортной сельскохозяйственной техники.

Литература

1. Волгин, В.В. Автосервис: создание и сертификация [Текст]: практическое пособие; 3-е изд. / В.В. Волгин. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2006. – 620 с. – ISBN 5-91131-001-5.
2. Вашурина, М.А. Намагничивание ферропорошков на детали с неопределённым химическим составом в условиях малых ремонтных предприятий [Электронный ресурс] / М.А. Вашурина, М.Н. Горохова, И.М. Соцкая и др. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ. – 2013. – № 07 (091). – С. 467–475. – IDA [article ID]: 0911307029. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2013/07/pdf/29.pdf>.
3. Сайфуллин, Р.Н. Повышение эффективности технологии восстановления деталей электроконтактной приваркой порошковых материалов [Текст]: дисс. ... докт. тех. наук: 05.20.03 / Сайфуллин Ринат Назирович. – Уфа, 2010. – 425 с.
4. Чечерников, В.И. Магнитные измерения [Текст] / В.И. Чечерников. – М.: МГУ, 1969. – 387 с.
5. Харчистов, Б.Ф. Методы оптимизации [Текст]: учеб. пособие / Б.Ф. Харчистов. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 140 с.

References

1. Volgin, V.V. Avtoservis: sozдание i sertifikacija [Tekst]: prakticheskoe posobie; 3-e izd. / V.V. Volgin. – M.: Izdatel'sko-torgovaja korporacija «Dashkov i Ko», 2006. – 620 s. – ISBN 5-91131-001-5.
2. Vashurina, M.A. Namagnichivanie ferroporoshkov na detali s neopredelennym himicheskim sostavom v uslovijah malyh remontnyh predpriyatij [Jelektronnyj resurs] / M.A. Vashurina, M.N. Gorokhova, I.M. Sotskaya i dr. // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU). – Krasnodar: KubGAU. – 2013. – № 07 (091). – S. 467–475. – IDA [article ID]: 0911307029. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2013/07/pdf/29.pdf>.
3. Sajfullin, R.N. Povyshenie jeffektivnosti tehnologii vosstanovlenija detalej jelektrokontaktnoj privarkoj poroshkovyh materialov [Tekst]: diss. ... dokt. teh. nauk: 05.20.03 / Sajfullin Rinat Nazirovich. – Ufa, 2010. – 425 s.
4. Chechernikov, V.I. Magnitnye izmerenija [Tekst] / V.I. Chechernikov. – M.: MGU, 1969. – 387 s.
5. Kharchistov, B.F. Metody optimizacii [Tekst]: ucheb. posobie / B.F. Kharchistov. – Taganrog: Izd-vo TRTU, 2004. – 140 s.