

## ЛИТЕРАТУРА

1. Агранат Б.А., Дубровин М.Н., Хавский Н.Н. и др. Основы физики и техники ультразвука. – М.: Высш. шк., 1987.
2. Шилиев А.С. Ультразвуковая обработка расплавов при производстве и восстановлении деталей машин.-Мн.: Навука і тэхніка 1992.
3. Дорожкин Н.Н., Петюшев Н.Н. Дуговая газопорошковая наплавка. – Мн.: Беларусь, 1989.
4. Проценко П.П., Привалов Н.Т. Влияние легирующих элементов на перенос электродного металла при дуговой сварке в защитных газах // Автоматическая сварка. – 1999.– №12.
5. Пархимович Э.М., Сагалевич В.М., Сотников В.И. Сварка в ультразвуковом поле. – Мн.: Навука і тэхніка, 1994.

### **ВОССТАНОВЛЕНИЕ И УПРОЧНЕНИЕ ПОСАДОЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН НА УСТАНОВКЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКИ С ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ**

**Л.М. Кожуро, академик МАНЕ, д-р техн. наук, профессор;  
А.В. Миранович, ассистент; Ю.В. Немизанский, студент  
УО «БГАТУ»**

(г. Минск, Республика Беларусь)

With the purpose to increase the efficiency of process of drawing of wearproof coverings an optimum construction of magnetic system and device of electromagnetic surfacing were implemented. The device uses a constant magnet of E-shaped form. Comparative tests of plants with electric and constant magnets were made. There is shown that use of constant magnets in the plant's system, which fulfill the electromagnetic surfacing, allows to increase productivity surfacing by 25 %, provides steadiness, stability of process and thickness of covering.

Одним из методов получения поверхностных слоев с требуемыми физико-химическими и эксплуатационными свойствами изделий сельскохозяйственных машин является электромагнитная наплавка (ЭМН) композиционных порошков на железной основе [1]. При этом для получения качественных покрытий необходимо обеспечение устойчивого и стабильного процесса наплавки. Требуемые условия можно обеспечить соблюдением постоянства во времени силы технологического тока ( $I$ ), магнитной индукции ( $B$ ), величины рабочего зазора ( $\delta$ ), скоростей главного движения ( $V$ ) и подачи заготовки ( $S$ ), а также подачи смазочно-охлаждающей жидкости ( $q_{жс}$ ) и порошка ( $q_n$ ). Однако практика использования установок ЭМН с различными магнитными системами, например, с электромагнитными катушками, показывает, что они не в полной мере обеспечивают выполнение требуемых условий.

Для обеспечения стабильности и устойчивости процесса наплавки были проведены исследования, направленные на совершенствование различных конструкций магнитных систем с электрическими магнитами. Выявлено, что отдельные схемы последних способствуют частичному улучшению показателей качества поверхностного слоя (сплошность, пористость, шероховатость покрытия). Обусловлено это, в первую очередь, тем, что магнитные системы установок ЭМН, использующие электромагнитные катушки на выпрямленном токе, работают в режиме периодически изменяющейся во времени величины магнитной индукции  $B$  [2].

Анализ явлений, протекающих в рабочей зоне установок ЭМН показывает, что величина магнитной индукции оказывает значительное влияние на интенсивность образования цепочек из зерен порошка в рабочем зазоре и электрическую проводимость по ним [3]. Переменный характер магнитной индукции на границах участков с различным сопротивлением создает неравномерное распределение порошка в рабочей зоне, обусловленное различным магнитным сопротивлением. В результате – градиент магнитной индукции  $grad \vec{B}$  на участках рабочего зазора меняется с частотой возникновения электрических разрядов отдельных цепочек-микроэлектродов. Следовательно, из-за этого изменение величины магнитной индукции во времени в рабочем зазоре способствует формированию неравномерного по толщине покрытия с повышенной пористостью и шероховатостью поверхности.

Поэтому для стабилизации величины магнитной индукции в рабочей зоне перспективно применение постоянных магнитов. Кроме того, использование постоянного магнитного поля в рабочем зазоре позволяет отказаться от источника питания электромагнитных катушек, что упрощает конструкцию магнитной системы установки ЭМН, уменьшает габаритные размеры и ее массу, снижает стоимость, трудоемкость изготовления и обслуживание последней.

Так как основным элементом конструкции магнитной системы является постоянный магнит, изготовленный из дорогостоящего материала, то необходимое при проектировании требование оптимальности этой системы должно быть связано с обеспечением необходимых технических и эксплуатационных характеристик установки ЭМН при минимальной массе магнитотвердого материала.

Исходя из вышеизложенного, оптимизация конструкции магнитной системы установки ЭМН производилась решением следующих задач.

1. Получение требуемой величины магнитной индукции в рабочем зазоре  $B_z$  при отсутствии порошка.

2. Определение минимальных размеров магнитной системы ширины —  $R_m$  и длины —  $L_m$ .

Для этого были проведены:

- 1) ориентировочный расчет принятых магнитных систем;
- 2) математическое планирование эксперимента;

3) установление закономерности зависимостей  $B_z = f(L_m)$  при  $R_m = const$  и  $B_z = f(R_m)$  при  $L_m = const$ ;

- 4) оптимизация конструкции магнитной системы.

Анализ априорной информации по конструкциям магнитных систем [5] дает возможность для ориентировочного расчета в последующем принять три основные формы постоянных магнитов: образную, призматическую и прямоугольную. Магниты дугообразной и С-образной формы, как концентраторы магнитного поля, приближенного к однородному, по конструктивным соображениям не могут быть использованы в установках ЭМН.

Расчет магнитных систем производили по известной методике, использующей эмпирические соотношения и коэффициенты, полученные ранее и проверенные многолетним опытом [5]. Для этого предварительно вычисляли значения  $L_m$ ,  $S_m$  магнитной системы, строили картину рассеяния магнитного потока на основании экспериментальных данных потокораспределения в исследуемой кон-

рукции. Далее рассчитывали проводимость каждого звена магнитной системы: постоянного магнита  $G_H$ , арматуры магнитопровода  $G_A$ , рабочего  $G_B$  и технологических  $G_T$  воздушных зазоров. Определение действительной рабочей точки кривой размагничивания магнита ( $B_m$ ,  $H_m$ ) с учетом марки материала магнита и магнитопровода, потоков утечки  $\Phi_u$ , сопротивления зазоров, стыков производили графическим методом, используя зависимость  $B_m = f(H_m)$ . После этого определяли значения напряженности  $H_z$  и индукции магнитного поля в рабочем зазоре  $B_z$ , а также значение коэффициента рассеяния магнитного поля  $\sigma$  для оптимизируемой конструкции магнитной системы.

Для ориентировочного расчета исследуемых конструкций магнитных систем была разработана специальная программа с использованием языка программирования "Visual Basic 6.0" (рис. 1). Программа позволяла быстро рассчитать варианты конструкций магнитных систем, варьируя различными магнитными материалами и размерами следующих магнитных систем: Е-образной разомкнутой и замкнутой – с двумя opposитно расположенными постоянными магнитами, призматической и прямоугольной форм с дополнительными замыкающими звеньями.

Расчет магнитных систем проводили при следующих постоянных значениях факторов: рабочий зазор ( $\delta_n$ ) – 2,0 мм; материал магнитопровода – отожженная сталь Ст 3 (ГОСТ 380 – 88); диаметр обрабатываемой заготовки 40 мм; материал заготовки – сталь 45 (ГОСТ 1050 – 88); величина индукции в рабочем зазоре  $B_z = 0,7$  Тл.

Анализ полученных данных ориентировочных расчетов систем показал, что наиболее оптимальной является разомкнутая конструкция магнитной системы с Е-образным магнитом из сплава ЮНДК24Т (ГОСТ 17809 – 72), имеющая длину постоянного магнита  $L_m = 12,0$  см и площадь нейтрального сечения последнего  $S_m = 23,5$  см<sup>2</sup>.

Исследуемая система состоит из постоянного магнита Е-образной формы 1 (рис. 2), к торцевым поверхностям которого примыкают два плоских наконечника 4, установленные с зазором  $\Delta_n$  относительно заготовки 5. Сердечник 2 системы со сменным полусным наконечником 3 установлены в центральной части магнита с возможностью регулирования величины магнитной индукции  $B_z$  в рабочем зазоре посредством изменения расстояния  $\Delta_n$  между магнитотвердыми материалами (боковыми полюсными наконечниками) и обрабатываемой поверхностью изделия. При этом величина рабочего зазора  $\delta_n$  остается постоянной, а магнитный поток  $\Phi$ , который проходит по магниту, полюс-

ным наконечникам, рабочим и технологическим воздушным зазорам  
заготовке образует замкнутую  $\Phi$ -образную магнитную цепь.

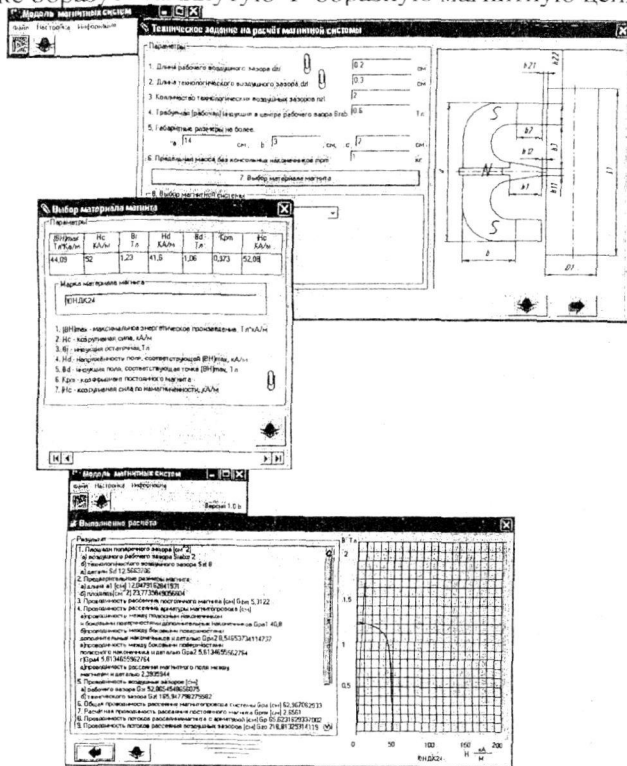


Рис. 1. Фрагменты интерфейса программы ориентировочного расчета конструкций магнитных систем установки ЭМН

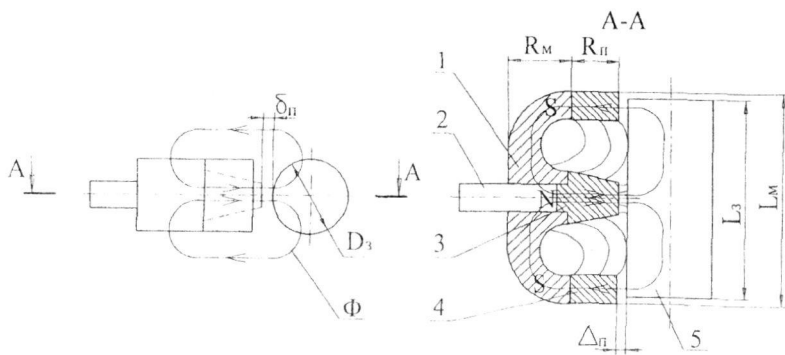


Рис. 2. Схема конструкции E-образной магнитной системы с разомкнутым магнитопроводом

Для оптимизации конструкции магнитной системы установки ЭМН применили центральный композиционный ортогональный план (ЦКОП) второго порядка. В качестве параметра оптимизации приняли магнитную индукцию в рабочем зазоре  $B_s$ , а независимыми переменными – факторы  $L_n$  и  $R_n$ .

Постоянными факторами на основании анализа расчетов магнитных систем приняли: рабочий зазор ( $\delta_n$ ) – 2,0 мм; технологические зазоры ( $\Delta_n$ ) – 1,5 мм; диаметр обрабатываемой заготовки 40 мм; длину обрабатываемой заготовки  $L_s=100,0$  мм; длину полюсных наконечников  $R_n=15$  мм; материал постоянного магнита – ЮНДК24Т (ГОСТ 17809 – 72).

С учетом работ [5, 6] установили условия проведения экспериментов (см. таблицу 1), опыты которых рандомизировались во времени при помощи таблицы случайных чисел.

Таблица 1. Условия проведения опытов

Уровень факторов	Технологические факторы	
	$L_n$ , мм	$R_n$ , мм
	$X_1$	$X_2$
Основной (0)	110,0	30,0
Верхний (+1)	125,0	35,0
Нижний (-1)	95,0	25,0
Звездная точка (+ $\alpha$ )	140,0	40,0
Звездная точка (- $\alpha$ )	80,0	20,0
Интервалы варьирования:		
основной	15,0	5,0
по $\alpha$	30,0	10,0

Измерения величины магнитной индукции  $B_s$  производили теслаамперметром Ф4354/1 и специальными датчиками Холла, установленными в контрольных точках рабочего зазора (на краях и в центре).

Обработка результатов экспериментов, полученных по матрице ЦКОП второго порядка, с использованием прикладной программы Excel пакета MS Office, работающей в среде Windows, позволила получить математическую модель, определяющую зависимость исследуемого параметра  $B_s$  от факторов  $X_1 = L_n$  и  $X_2 = R_n$ .

$$Y = B_z = -5,980 + 0,615 \cdot X_1 + 1,202 \cdot X_2 - 0,051 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,018 \cdot X_1^2 - 0,0145 \cdot X_2^2.$$

Выявлено, что все коэффициенты регрессии (1) значимы с процентной доверительной вероятностью по критерию Стьюдента. Также установлено, что математическая модель адекватна при процентном уровне значимости по критерию Фишера.

Степень влияния факторов  $R_m$  и  $L_m$  на параметр  $B_z$ , определяли по величине коэффициентов модели (1), геометрическая интерпретация которой представлена в виде одномерных сечений в двумерной системе координат (рис. 3). Для определения параметра  $B_z$  в уравнении регрессии (1) аргументом служил фактор – длина постоянного магнита  $L_m$  при трех фиксированных значениях ширины последнего –  $R_m = 30,0; 35,0$  и  $40,0$  мм.

Зависимость величины магнитной индукции в рабочем зазоре  $B_z$  от длины постоянного магнита  $L_m$  приведена на рисунке 3.

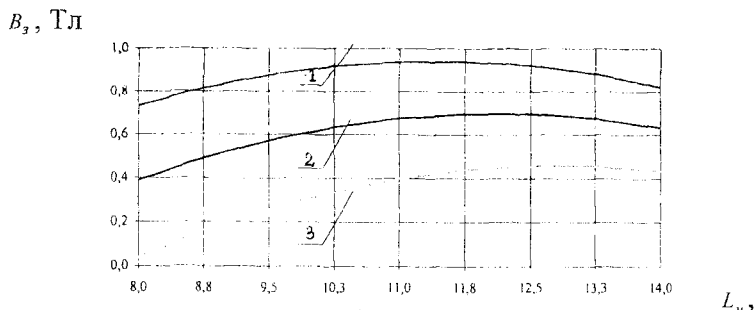


Рис. 3. Зависимость величины магнитной индукции в рабочем зазоре от длины постоянного магнита при различных значениях его ширины: 1 –  $R_m = 4,0$  см; 2 –  $R_m = 3,5$  см; 3 –  $R_m = 3,0$  см

На основании ориентировочного расчета для определения минимального объема магнита  $V_{min}$  принимали следующие ограничения:  $9,5 \text{ см} < X_1 < 12,5 \text{ см}$ ;  $3,0 \text{ см} < X_2 < 4,0 \text{ см}$ ;  $Y = B_z = 0,7 \text{ Тл}$ .

Для нахождения  $V_{min}$  функцию  $Y$  сводили к функции одной переменной  $X_1$

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_{11} \cdot X_1^2.$$

На рисунке 4 представлена зависимость объема магнита  $V_m$  от его длины  $L_m$ . Видно, что она имеет четко выраженный экстремум

$V_{min}$ . Анализ рис. 3 и 4, позволил определить оптимальные геометрические размеры магнитной системы, равные  $L_m = 11,5$  см,  $R_m = 3,5$  см.

$V_{m2}$ , см<sup>3</sup>

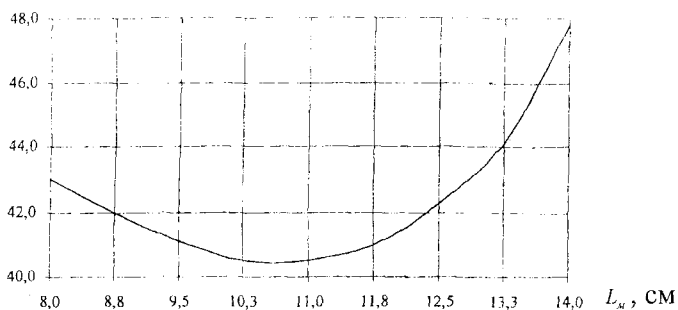


Рис. 4. Зависимость объема постоянного магнита от длины при величине магнитной индукции  $B_z = 0,7$  Тл

С целью проверки эффективности разработанной магнитной системы с использованием постоянных магнитов по обеспечению стабильности и устойчивости процесса ЭМН проведены сравнительные испытания [2, 4]. Производительность наплавки определяли методом взвешивания заготовок до и после наплавки. Пористость покрытий оценивали методом гидростатического взвешивания. Насыщающей жидкостью служил керосин, в котором время выдержки образцов при нормальной температуре составляло 24 ч.

Установлено, что разброс значений производительности наплавки и величины пористости покрытий для магнитных систем с электрическими магнитами находился соответственно в пределах 203 – 221 мг, 8 – 15 %; для магнитных систем с постоянными магнитами соответственно – 254 – 263 мг, 5 – 9 %. Для каждой партии образцов были определены дисперсии исследуемых показателей качества покрытия и производительности процесса ЭМН. Анализ результатов испытаний показал, что дисперсии партий образцов с параметрами производительности процесса ЭМН, пористости покрытий для магнитных систем с электрическими магнитами составили соответственно 18% и 11%, для магнитных систем с постоянными магнитами – 8% и 4%.



## Выводы

1. Разработана методика оптимизации магнитной системы постоянными магнитами установок ЭМН, которая основана на применении метода математического планирования экспериментов и ориентировочных расчетов системы.

2. Получена математическая модель конструкции магнитной системы установки ЭМН, позволившая установить закономерные зависимости  $B_z = f(L_m)$  при  $R_m = const$ ,  $B_z = f(R_m)$  при  $L_m = const$  и оптимизировать габаритные размеры постоянного магнита.

3. Установлено, что для установок ЭМН оптимальной является магнитная система с постоянным магнитом E-образной формы обеспечивающая величину индукции в воздушном рабочем зазоре  $B_z = 0,7$  Тл, стабильный и устойчивый процесс нанесения покрытия также позволяющая повысить производительность наплавки до 25%

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кожуро Л.М., Чемисов Б.П. Обработка деталей машин в магнитном поле. – Мн.: Навука і тэхніка, 1995.

2. Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А., Миранович А.В. Повышение эффективности процесса электромагнитной наплавки / Материалоборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении: Материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск 26-30 мая 2003. – Мн.: Машиностроение. – 2003.

3. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицын, Л.М. Кожуро, А.П. Ракомсин и др. – М.: Изд-во ФТИ, 1997.

4. Арнольд Р.Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами. – М.: Энергия, 1969.

5. Постоянные магниты: Справ. / А. Б. Альтман, Э. Е. Верниковский, А. Н. Герберг и др.; под ред. Ю. М. Пятина. – М.: Энергия, 1980.

6. Быстрицкая Н.Б., Волченков В.И., Шильникова Е.А. Применение теории планирования эксперимента при автоматизации проектирования серий оптимальных магнитных систем на заданные технические условия // Труды МЭИ. – 1980. – Вып. 483.

7. Курбатов П.А. Упрощенный метод расчета магнитных систем с редкоземельными магнитами с тонкой ненасыщенной арматурой // Электричество. – 1976. – № 12.

## **УПРАВЛЕНИЕ СВОЙСТВАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ ИЗДЕЛИЙ**

### **В КОМБИНИРОВАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЯХ**

**П.А. Витязь, академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор; Л.М. Кожуро, академик МАНЕ, д-р техн. наук, профессор; М.Л. Хейфец, д-р техн. наук, профессор;**

**А.В. Миранович, ассистент**

*НАН Беларуси, УО «БГАТУ», УО «ППУ»*

*(г. Минск, Республика Беларусь)*

*(г. Новополоцк, Республика Беларусь)*

### **Management of the technological environment properties during the combined physical fields processing of ware**

At the automated designing methods of processing of ware in the combined physical fields is offered to use the domination of properties of relations of technological decisions. The mathematical model and the criteria describing domination of controllable parameters of technological system is given. Designing electromagnetic surfacing with superficial plastic deformation plasma mechanical and magneto-abrasive processing of ware is considered.

Перспективным направлением является создание новых методов обработки изделий в комбинированных физических полях, основанных на сочетании в одном процессе различных видов энергии или разных способов воздействия на обрабатываемый материал [1].

В общем виде системная модель технологии [2] представляется сочетанием трех входных потоков: вещества, энергии, информации. Метод обработки целесообразно рассматривать в виде материальной и информационной подсистем. Первая доставляет и преобразует энергию, необходимую для воздействия на заготовку с целью изменения ее физико-химических свойств, снятия или нанесения материала. Она определяется видом процесса обработки. Вторая управляет потоками энергии и вещества, обеспечивая их доставку в необходимом количестве в заданное место рабочего пространства с целью получения определенной формы, размеров и свойств изделия.