

7. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. Учеб. для вузов - М.: Высш. шк., 1999.
8. Кульский Л.А. и др. Влияние электрического поля на процесс обеззараживания воды. - Киев, Знание, 1980.
9. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче.- Л.: Госуд. энергет. изд-во, 1959.
10. Наний Е.П. Исследование и разработка электрических нагревателей для животноводческих ферм колхозов и совхозов. Автореф. канд. техн. наук. - М.: Москов. с.-х. акад. им. К.А.Тимирязева, 1962.
11. Рогов И.А. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов. - М.: Агропищепромиздат, 1988.
12. Слюсарев А.А. Биология с общей генетикой. - М.: Медицина, 1978.
13. Тарусов Б.Н. Биофизика. - М.: ИЛ., 1968.
14. Stuart N.O. Electrical properties of agricultural products. "Trans. ASAE", 1973, 16, № 2.
15. Thompson D.R., Zacharian G.L. Dielectric theory and bioelectrical measurements. Part 1. "Trans. ASAE", 1971, 14, № 2.

УДК 621.923.7

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКЕ

Л.М.КОЖУРО, д.т.н., профессор; В.И.ГАЛЬГО, к.т.н., доцент (БАТУ);
А.П.РАКОМСИН, инженер (ГП "МАЗ")

Возбуждение электрического разряда и установление процесса - важные технологические операции электромагнитной наплавки (ЭМН), оказывающие влияние на производительность, качество покрытия, расход порошка и электроэнергии.

Установлено [1], что процесс ЭМН для системы с постоянной подачей порошка в рабочую зону происходит в несколько стадий: формирование "щеток" порошка на рабочем торце полюсного наконечника, замыкание цепи первой цепочкой-электродом, нагрев цепочки-электрода протекающим током, возбуждение, горение и погасание электрической дуги с замыканием цепи последующими цепочками-электродами.

Признаком установления стабильного процесса ЭМН является групповое перекрываемое горение цепочек-электродов в рабочей зоне.

В работе [1] при исследовании протекания электрического разряда в рабочей зоне показано, что образовавшиеся при электрическом разряде объемы жидкого металла выбрасываются из зоны расплавления. Однако точное место зарождения и развития электрического разряда с учетом того, что цепочка-электрод состоит из отдельных зерен, не указано. Определение точки, в которой происходит дуговой разряд в цепочке и управление его местоположением, важно для повышения производительности процесса, срока службы полюсного наконечника, снижения расхода ферропорошка и энергетических затрат.

Согласно теории термической ионизации, возбуждение и развитие электрического дугового разряда происходит в месте выделения наибольшего количества теплоты в системе "токопроводящий наконечник - электрод - деталь".

Для определения места возбуждения электрического разряда в цепочке-электроре и факторов, позволяющих управлять этим процессом, необходимо установить распределение температуры по длине токопроводящей цепочки-электрода в момент, предшествующий зарождению и развитию дугового разряда.

Из теории процессов сварки известно [2], что соприкосновение электрода с основным металлом характеризуется резким падением напряжения и нарастанием силы тока короткого замыкания. Цепочка-электрод на участке между заготовкой и токопроводящим наконечником нагревается протекающим током, согласно закону Джоуля-Ленца. В месте выделения наибольшего количества теплоты происходит перегорание цепочки-электрода и возникновение дугового разряда.

Известно [3], что при ЭМН электрод состоит из N дискретных частиц порошка, между которыми существуют дополнительные контактные сопротивления $R_{12}, R_{23}, \dots, R_{(N-1)N}$. Для рассмотрения нагрева цепочки-электрода принимаем ряд допущений: порошок состоит из одинаковых по форме зерен - эллипсоидов вращения с размерами большой и малой осей соответственно a и b ; в окрестности точки A (рис. 1)

контакта первого зерна с полюсным наконечником часть выделяющейся энергии, которая определяется коэффициентом $0 < K < 1$, поступает к первому зерну, а остальная расходуется на разогрев полюсного наконечника. Так как время импульса составляет 0,01...0,15 с [3], то потерями энергии на конвекцию и излучение пренебрегаем.

Принимаем, что для полюсного наконечника нагреваемая область вокруг точки А ограничивается цилиндрическим объемом металла длиной a и сечением ΔS , равным наибольшей поперечной площади зерна. На участке AA_1 (рис. 1) температурная зависимость запишется уравнением

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \left[\frac{\partial \lambda_{nn}}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda_{nn} \partial^2 \theta}{\partial x^2} \right] / (c_{nn} \rho_{nn})$$

с граничными условиями $\theta(-a, t) = \theta_c$;

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=-0} - \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=+0} = \frac{k I^2 R_{nn1}(t)}{\lambda_{nn} \Delta S},$$

где λ_{nn} - теплопроводность материала полюсного наконечника; c_{nn} - удельная теплоемкость материала наконечника; ρ_{nn} - удельное электрическое сопротивление материала наконечника; θ_c - температура окружающей среды; k - коэффициент распределения энергии; $R_{nn1}(t)$ - контактное сопротивление в точке А.

Процесс нагрева цепочки-электрода можно описать уравнением [4]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \left[\frac{\partial(\lambda \theta / \partial x)}{\partial x} + \frac{I^2 R_1(t)}{\Delta S} \right] / (c \rho),$$

где λ - теплопроводность материала порошка; $R_1(t)$ - сопротивление материала первого зерна; c - удельная теплоемкость материала порошка; ρ - удельное электрическое сопротивление.

Граничное условие для уравнения в точке контакта первого зерна N_1 (рис. 1) определяется выражением

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=a-0} - \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=a+0} = \frac{I^2 R_{12}(t)}{\lambda \Delta S},$$

где $R_{12}(t)$ - контактное сопротивление в точке N_1 .

Процесс нагрева электрода на участке i -го зерна определяется уравнением [5]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \left[\frac{\partial(\lambda \theta / \partial x)}{\partial x} + \frac{i^2 R_i(t)}{\Delta S} \right] / (c \rho),$$

с граничными условиями

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=(i-1)a-0} - \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=(i-1)a+0} = \frac{I^2 R_{(i-1)i}(t)}{\lambda \Delta S};$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=ia-0} - \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=ia+0} = \frac{I^2 R_{i(i+1)}(t)}{\lambda \Delta S}.$$

Здесь $R_i(t)$ - сопротивление материала i -го зерна; $R_{(i-1)i}(t)$ - контактное сопротивление в точке N_{i-1} ; $R_{i(i+1)}(t)$ - контактное сопротивление в точке N_i .

Для зерна, находящегося в контакте с обрабатываемой поверхностью в точке В (рис. 1), граничные условия выражаются уравнениями

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=(n-1)f-0} - \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=(n-1)a+0} = \frac{I^2 R_{n(n-1)}(t)}{\lambda \Delta S},$$

где R_{nn} - контактное сопротивление в точке В; λ_u - теплопроводность материала изделия.

В окрестности точки В будет происходить разогрев заготовки, аналогичный разогреву полюсного наконечника в точке А. В этом случае изменение температуры участка BB_1 можно определить из уравнения

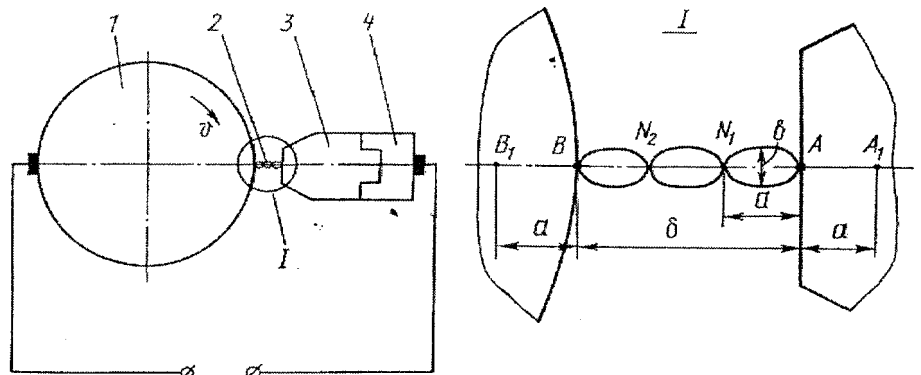


Рис. 1. Расчетная схема нагрева цепочки-электрода:

1 - заготовка; 2 - зерно ферропорошка; 3 - полюсный наконечник; 4 - сердечник электромагнита.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \left[\frac{\partial \lambda_u}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda_u \partial^2 \theta}{\partial x^2} \right] / (c_u \rho_u)$$

с граничными условиями

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=na-0} - \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=na+0} = \frac{I^2 R_{nu}(t)}{\lambda_u \Delta S};$$

$$\theta[(n+1)a, t] = \dot{\theta}_c,$$

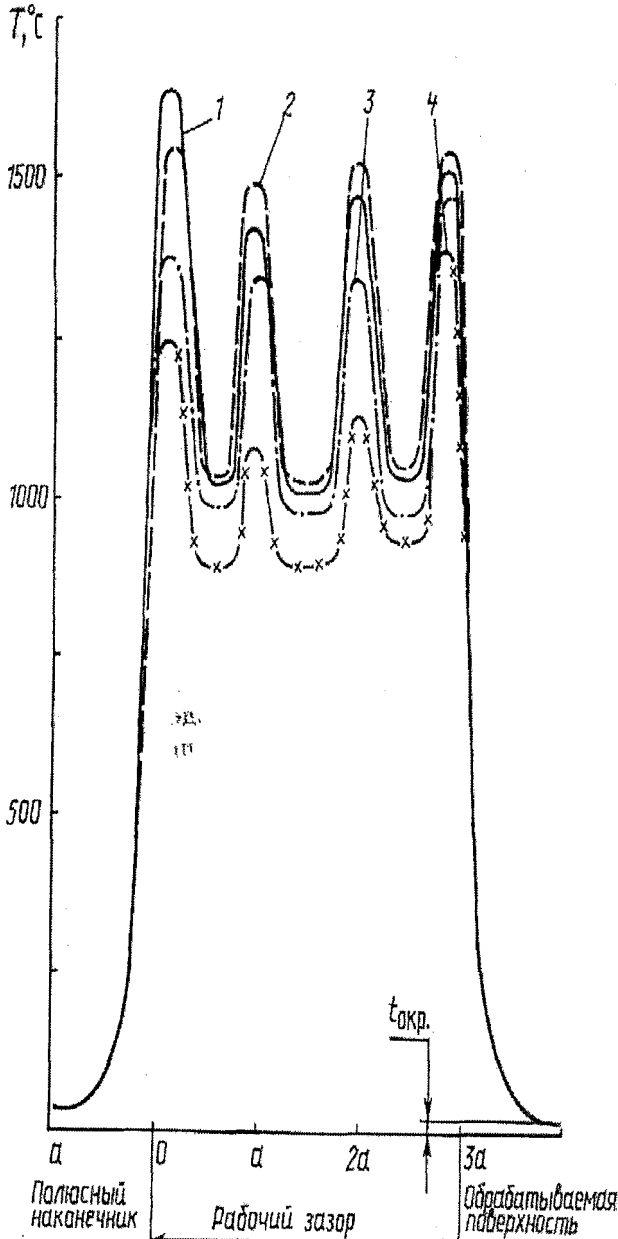


Рис. 2. Распределение температуры T по длине цепочки-электрода при различных значениях коэффициента передачи энергии ($J=100A$; $V=1,0Tл$; $\tau=10^{-3}c$):
1 - $K = 0,8$; 2 - $K = 0,7$; 3 - $K = 0,6$; 4 - $K = 0,5$;

где c_u - удельная теплоемкость материала заготовки; ρ_u - удельное электрическое сопротивление материала заготовки.

Проведенные исследования нагрева цепочки-электрода позволяют представить модель процесса уравнениями

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \left[\frac{\partial \lambda_{nu}}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda_{nu} \partial^2 \theta}{\partial x^2} \right] / (c_{nu} \rho_{nu}); \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \left[\frac{\alpha \lambda a}{\partial x} + \frac{I^2 R_1(t)}{\Delta S} \right] / (c\rho); \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \left[\frac{\alpha \lambda a}{\partial x} + \frac{I^2 R_2(t)}{\Delta S} \right] / (c\rho); \\ \dots \dots \dots \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \left[\frac{\alpha \lambda a}{\partial x} + \frac{I^2 R_i(t)}{\Delta S} \right] / (c\rho); \\ \dots \dots \dots \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \left[\frac{\alpha \lambda a}{\partial x} + \frac{I^2 R_n(t)}{\Delta S} \right] / (c\rho); \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \left[\frac{\partial \lambda_u}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda_u \partial^2 \theta}{\partial x^2} \right] / (c_u \rho_u). \end{aligned} \right\} (1)$$

Распределение температуры по длине цепочки-электрода исследовалось в зависимости от силы проходящего по ней тока и коэффициента распределения энергии в момент времени, предшествующий дуговому разряду. Для определения контактных сопротивлений между зёрнами порошка использовали зависимость [6]

$$R_k = r_k / p^z,$$

где r_k - контактное сопротивление, Ом; p - давление в контакте, МПа; z - показатель степени (для стали и сплавов на основе железа $z = 0,75$).

Контактное сопротивление, согласно [6], складывается из сопротивления стягивания линий тока, проходящего через контактную площадку радиусом R , и последовательного с ним сопротивления окисных пленок, присутствующих на поверхности зёрен порошка

$$r_b = r_1 + r_2 + r_f = \rho_1 / 4R + \rho_2 / 4R + \rho_f S / \pi R^2$$

где r_1, r_2 - сопротивление зерен порошка в зоне контакта; r_f - сопротивление окисной пленки; ρ_1, ρ_2 - удельное сопротивление контактирующих металлов; ρ_f - удельное сопротивление окисной пленки; S - суммарная толщина пленки; R - радиус зоны кон-

такта. В условиях ЭМН в контакте между зернами действуют небольшие сжимающие усилия, их величина не превышает 0,3 МПа. Окисные пленки не могут быть разрушены механическим путем, поэтому они оказывают решающее влияние на контактное сопротивление, а сопротивлением зерен можно пренебречь [6].

С учетом вышесказанного величина контактного сопротивления определится по формуле

$$R_k = \rho_f S / (\pi R^2 p_z).$$

Магнитное давление между частицами ферропорошка определяется выражением [7]

$$p = \frac{\varepsilon}{2\mu_0} B^2 \left[1 - \left(\frac{1}{\mu_n} \right)^2 \right],$$

где ε - объемное содержание ферромагнитного материала в единичном объеме порошковой среды; μ_0 - магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ_n - магнитная проницаемость порошковой среды при индукции B .

Расчет по модели (1) нагрева цепочки-электрода с учетом контактных сопротивлений между зернами порошка, сжимающими силами магнитной индукции проведен с использованием пакета прикладных программ для реализации численных методов интегрирования дифференциальных уравнений.

При расчетах принимали размеры зерен равными: $a = 0,4$ мм; $b = 0,2$ мм; площадь контакта зерна $DS = 0,008$ мм² [8]. В качестве материала наплавляемого порошка принимали порошок ПЖРВ2, для которого $r = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $r_f = 10^3$ Ом·м и $DS = 10^{-8}$ м² [9]. Результаты расчета представлены на рис. 2 и 3 в виде графиков.

Анализ распределения температуры по длине цепочки-электрода (рис. 2 и 3) показывает, что при коротком замыкании происходит ее неравномерный нагрев. При распределении температуры наблюдается ряд температурных максимумов: у полюсного наконечника, в местах контакта зерен порошка, у поверхности обрабатываемой заготовки. Возбуждение и развитие электрической дуги объясняется тем, что благодаря высокой плотности тока температура контакта сильно возрастает, металл зерен расплавляется и частично испаряется. Образуется промежуток, заполненный парами металла, потенциал которых ниже потенциала ионизации воздуха. Ввиду малого расстояния между электродами и высокой степени ионизации развивается дуговой разряд [10]. Следовательно, место возникновения и протекания электрического разряда определяется расположением температурного максимума.

Анализ изменения температуры по длине цепоч-

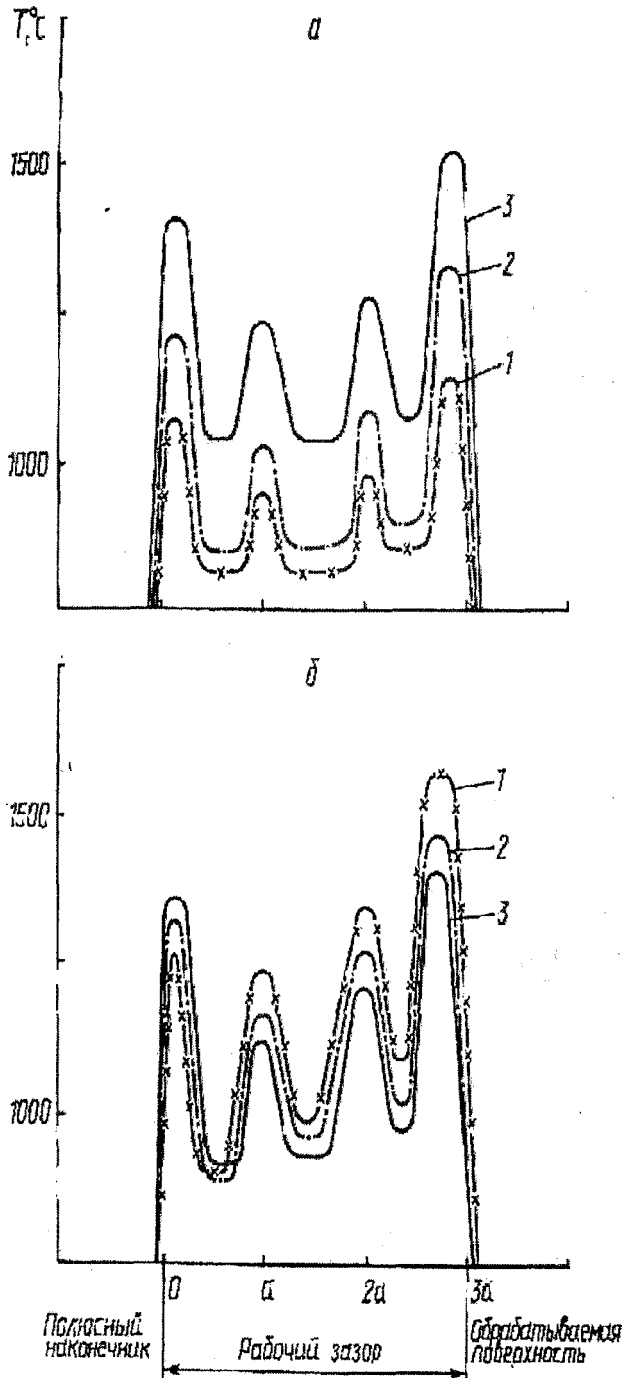


Рис. 3. Распределение температуры T по длине цепочки-электрода при различных значениях силы разрядного тока (а) и магнитной индукции в рабочей зоне (б) ($K=0,65$; $\tau=10^{-3}$ с):

1 - $J = 100$ А, $B = 0,6$ Тл; 2 - $J = 120$ А, $B = 0,8$ Тл;

3 - $J = 140$ А, $B = 1,0$ Тл.

Электромагнитная наплавка порошка ПЖРВ2 с охлаждением (ОН) и без охлаждения (БОН) полюсного наконечника

№ п/п	Режим ЭМН			Увеличение массы образца, мг		Уменьшение массы полюсного наконечника, мг	
	I , А/мм ²	В, Тл	G , г/(с·мм ²)	ОН	БОН	ОН	БОН
1	1,2	0,6	2,0	152	114	4	8
2	1,2	0,6	2,4	162	123	5	9
3	1,4	0,7	2,8	168	132	6	12
4	1,4	0,7	3,2	172	139	6	12
5	1,6	0,8	3,6	183	144	7	14
6	1,6	0,8	4,0	186	148	9	15
7	1,8	0,9	4,0	182	152	12	15
8	1,8	0,9	3,6	178	155	12	17
9	2,0	1,0	3,2	174	157	10	22
10	2,0	1,0	2,8	172	158	11	23

ки-электрода в зависимости от условий ЭМН показывает, что расположение температурного максимума зависит в основном от перераспределения теплоты в контакте полюсный наконечник - порошок. При коэффициенте распределения энергии $K > 0,7$ температурный пик находится в точке А (рис. 1) и электрический разряд развивается у поверхности полюсного наконечника, при этом процесса наплавки на обрабатываемую поверхность не происходит. Когда $K < 0,7$, место возникновения дугового разряда определяется значением контактных сопротивлений между зернами порошка.

Экспериментальная проверка полученной математической модели нагрева цепочки-электрода затруднена тем, что истинную силу тока и контактные сопротивления определить с достаточной степенью точности не представляется возможным. Однако проведенные теоретические исследования позволяют выявить факторы, с помощью которых можно задавать место возбуждения дугового разряда в цепочке-электроде.

Анализ распределения температуры по длине цепочки-электрода, проведенный по рассмотренной модели, позволяет утверждать, что при обеспечении условий для существования дугового разряда у поверхности заготовки там происходит наибольшее тепловыделение, формируется температурный максимум, равный температуре плавления зерен порошка, и осуществляется ЭМН капель расплава материала порошка.

Следовательно, уменьшение количества теплоты,

выделяющейся у полюсного наконечника, и создание условий для возникновения и развития дугового разряда у поверхности обрабатываемой заготовки - путь обеспечения устойчивости и повышения производительности и качества покрытия, полученного ЭМН.

С целью проверки результатов теоретических исследований проведен следующий эксперимент. Обрабатывали две партии образцов из стали 45. При этом на одну партию образцов наплавляли покрытия, охлаждая полюсный наконечник, на другую - без охлаждения. Для этого была разработана специальная конструкция полюсного наконечника из стали 10, которая охлаждалась проточной водой. Наплавку покрытия из порошка ПЖРВ2 производили при различных режимах. Результаты экспериментов представлены в таблице.

Таким образом, выявлено, что место возникновения и протекания электрического разряда определяется расположением температурного максимума, равного температуре плавления зерен порошка. Расположение температурного максимума зависит от перераспределения теплоты в системе "полюсный наконечник - цепочка-электрод - обрабатываемая заготовка". При коэффициенте распределения энергии по длине цепочки-электрода $K > 0,7$ температурный максимум находится у поверхности полюсного наконечника, при $K = 0,7$ - определяется контактными сопротивлениями между зернами порошка, при $K < 0,7$ - расположен у обрабатываемой поверхности. В последнем случае наблюдается устойчивый перенос расплава материала ферропорошка на обрабатываемую поверхность изделия.

Анализ распределения температуры по длине цепочки-электрода позволил определить путь обеспечения устойчивого процесса ЭМН: уменьшение количества теплоты, выделяемой у поверхности полюсного наконечника, и создание условий возникновения и развития дугового разряда у обрабатываемой поверхности заготовки.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект 98-181).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кожуро Л.М., Акулович Л.М., Мрочек Ж.А., Иванов А.А. Механизм переноса расплава материала порошка при электромагнитной наплавке // Весці АН Беларусі. Сер.фіз.-тэхн.наук. 1996. № 4. С. 39...42.
2. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. - М.: Машиностроение, 1984. - 280с.
3. Ящерицын П.И., Кожуро Л.М., Ракомсин А.П. и др. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле. - Мн.: Изд. ФТИ НАНБ, 1997. - 416с.

4. Хахимов А.Н. Электрошлаковая сварка с регулированием термических циклов. - М.: Машиностроение, 1984. - 208с.
5. Хольм Р. Электрические контакты. - М.: Изд. ИЛ, 1961. - 348с.
6. Гельман А.С. Основы сварки давлением. - М.: Машиностроение, 1970. - 312с.
7. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. - Л.: Машиностроение, 1986. - 176с.
8. Кравченко Л.Н., Барон Ю.М., Кожуро Л.М., Приходько С.П. Магнитно-абразивное полирование плоскостей деталей машин и приборов. - М.: Машиностроение, 1987. - 148с.
9. Роман О.В., Габриенов И.П. Справочник по порошковой металлургии: порошки, материалы, процессы. - Мн.: Беларусь, 1988. - 175с.
10. Ленивкин В.А., Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. - М.: Машиностроение, 1989. - 264 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЖИВОТНОВОДСТВА В СОВХОЗЕ «ЗАКОЗЕЛЬСКИЙ»

Н.С. ЯКОВЧИК, к.с.-х.н., директор совхоза «Закозельский»;
С.И. ПЛЯЩЕНКО, д.в.н., профессор; В.И. САПЕГО, д.с.-х.н., профессор (БАТУ);
А.М. ЛАПОТКО, д.с.-х.н., (БелНИИЖ)

В животноводстве Республики Беларусь одним из наиболее доступных возобновляемых источников энергии может стать энергия Солнца. Это связано в первую очередь с использованием для получения энергии недорогого оборудования, а также простотой эксплуатации энергопринимающих устройств и установок в целом.

Нагрев воды для бытовых и технических нужд - одна из важных статей энергетических расходов на животноводческих фермах. Значительная часть этих затрат может быть снижена оборудованием, использующим солнечное излучение.

В совхозе «Закозельский» Брестской области для молочной фермы и летнего лагеря разработана конструкция плоского коллектора и бака-аккумулятора (рис. 1). В этой установке площадь коллектора 2,8м², а объем бака-аккумулятора 140 л.

Расчеты показывают, что нагрев воды в солнечном подогревателе возможен до 65°С. Поэтому наряду с прямым набором воды (без дополнительного подогрева) на мойку молочной посуды и

доильного оборудования установку можно использовать для запитки подогретой водой паровых котлов и других целей, где не требуется кипяченая вода. Подсчитано, что в период с апреля по октябрь установка может выработать 32,7 тыс. кВт*ч тепловой энергии. Это обеспечит экономию 32 % электроэнергии от ее общих затрат на нужды фермы. В совхозе

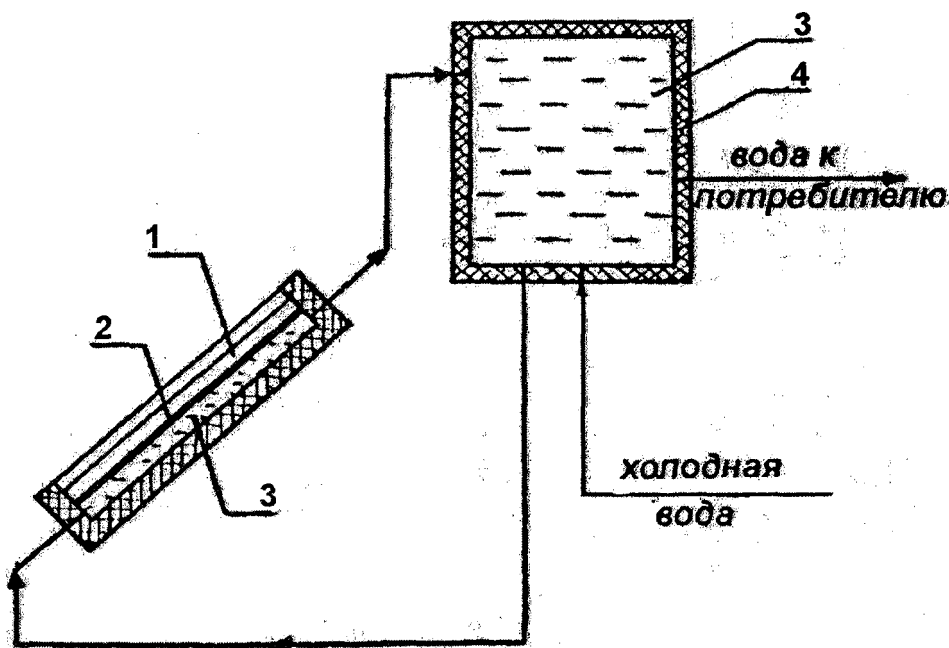


Рис. 1. Солнечный коллектор: 1 - двойное остекление; 2 - зачерненная поверхность; 3 - вода; 4 - теплоизоляция.