

The results of original researches are resulted, which were conducted with the purpose of choice of the rational modes of film elements treatment for creation of industrial prototypes of integral and hybrid microcircuits.

Keywords: *thin film elements, laser adjustment, exactness and stability of parameters, integrated and hybrid circuits*

Представлено результати експериментальних досліджень параметрів власного магнітного поля електричних розрядів в умовах електроерозійної обробки множинним розрядом, який формується внаслідок магнітогідродинамічних процесів у робочій рідині міжелектродного проміжку

Ключові слова: *власне магнітне поле, електрична дуга, саморозщеплення дуги, багатодугова система, множина нестационарних розрядів*

Представлены результаты экспериментальных исследований параметров собственного магнитного поля электрических разрядов в условиях электроэрозионной обработки множественным разрядом, который формируется вследствие магнитогидродинамических процессов рабочей жидкости межэлектродного промежутка

Ключевые слова: *собственное магнитное поле, электрическая дуга, саморасщепление дуги, многодуговая система, множество нестационарных разрядов*

УДК 669.14.018.298.2

СОБСТВЕННОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ РАЗРЯДА ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

В. И. Носуленко

Доктор технических наук, профессор
Кафедра обработки металлов давлением*
Контактный тел.: (052) 239-04-19
E-mail: nosulenko_wi@mail.ru

П. Н. Великий

Ведущий инженер
Кафедра обработки металлов давлением*
Контактный тел.: (052) 239-04-29
E-mail: velikiy_pm@mail.ru

М. И. Москаленко

Ведущий инженер
Кафедра электротехники*
Контактный тел.: (052) 239-04-29

О. С. Чумаченко

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра экономики и организации производства
Контактный тел.: 050-454-94-25
E-mail: aldjana_flora@mail.ru

*Кировоградский национальный технический университет
пр. Университетский, 8, г. Кировоград, Украина, 25009

1. Введение

Исследование относится к прогрессивным процессам электрофизической обработки металлов – методам электроэрозионной обработки.

Электроэрозионный метод обработки (ЭЭО) токопроводящих материалов существенно расширил возможности современной технологии металлообработки и позволил: использовать для изготовления деталей машин и приборов новые высокопрочные материалы, обработка которых механическими методами вызывает значительные сложности, или вообще невозможная в связи с их высокой твердостью или вязкостью; создавать новые конструкции узлов и деталей сложных форм, которые невозможно выполнить средствами других технологий (внутренние криволинейные и спиральные отверстия, пазы, канавки и т.п.).

Электроэрозионная техника и технология благодаря уникальным возможностям прецизионной обработки пользуется спросом во всем мире, общепризнана, широко применяется в промышленности и продолжает интенсивно развиваться.

Для ЭЭО используют как нестационарные (традиционно), так и стационарные разряды. Способ размерной обработки стационарной электрической дугой (РОД) в поперечном потоке жидкости имеет на порядок большую производительность сравнительно с ЭЭО нестационарным разрядом, меньшие энергозатраты, эксплуатационные расходы, станки более дешевы [1]. Эта разновидность ЭЭО эффективна в условиях серийного производства. Однако, по качеству (точность, шероховатость) – ключевому показателю современных технологических процессов, поверхности, обработанные в условиях РОД, обычно соответствуют показателям черновых режимов ЭЭО

нестационарным разрядом и не могли конкурировать с электроискровой обработкой.

В условиях широкого использования материалов с высокими механическими свойствами, плазма мощных электрических разрядов – это сравнительно дешевый концентрированный источник тепла и эффективный универсальный «режущий инструмент» для современных технологий металлообработки. Например, оборудование для плазменной резки уже стало обычным в заготовительных цехах машиностроительных предприятий благодаря своей высокой экономической эффективности. Столь же обычной в условиях серийного производства может стать и ЭЭО при условии обеспечения высокой производительности одновременно с высоким качеством обработанной поверхности. Для этого необходимо исследование эффектов, сопровождающих протекание электрических разрядов в условиях ЭЭО стационарной дугой в поперечном потоке жидкости, которым ранее не уделяли внимания, и которые можно применить для создания высокоэффективных энергосберегающих технологий и оборудования, что всегда актуально.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Искровые и дуговые электрические разряды могут пропускать ток значительной силы, что обуславливает наличие собственного магнитного поля. Такое магнитное поле при работе сварочной дуги при большой силе тока оказывает значительное влияние на течение металла и качество сварного шва [2].

В работах по исследованию высоковольтного искрового разряда в жидкости отмечается наличие импульсных магнитных полей и мощного электромагнитного излучения [3]. Отметим, что в этой работе обращается внимание на состояние плазмы, которое в искровом разряде после образования катодного пятна соответствует состоянию плазмы импульсной дуги. Это позволяет предположить существование подобных механизмов саморегулирования при взаимодействии с окружающей средой у таких разрядов.

Образование многодуговой системы, состоящей из нескольких маломощных дуг, полученных в результате саморасщепления плазменного канала одной мощной дуги в цилиндрических электродах плазмотронов, объясняется особой гидродинамикой рабочего газа, который прогревается излучением дуги [4]. Известны факты, но не предложено объяснения механизма расщепления и дальнейшего хаотичного движения катодных пятен дуги на плоском электроде, когда сам плазменный столб представляет собой множество «отдельных нитей» [5].

Электрическая дуга в поперечном потоке (при $v > 5$ м/с) жидкости приобретает энергетические характеристики импульсного разряда при ЭЭО. Такая дуга в условиях процесса РОД в диапазоне исследованных режимов ($I = 10...1000$ А, $P_d = 0,01...0,5$ МПа) имеет четкие оптические пределы, характеризуется устойчивыми геометрическими, электрическими и энергетическими характеристиками. Электропроводный канал перемещается по поверхности электродов, оставляя следы-дорожки, в направлении движения потока жидкости со скоростью несколько дециметров в

секунду, что почти на порядок меньше скорости течения жидкости. В результате процесса саморегулирования при увеличении (уменьшении) скорости потока при заданном напряжении уменьшается (увеличивается) длина токопроводящего канала, резко возрастает (уменьшается) плотность тока, напряженность электрического поля, объемная плотность тепловой мощности.

Стационарная дуга также саморасщепляется, образуя несколько каналов, в поперечном потоке жидкости, что может быть вызвано взаимодействием собственного магнитного поля разряда с рабочей жидкостью, в которой возникают ионизированные состояния [6]. Согласно существующим представлениям об электромагнетизме дуговых разрядов, силой, которая удерживает плазму высокого давления в столбе разряда, является его собственное магнитное поле. Предложена гипотеза повышения характеристик магнитного поля (индукции) при увеличении не только силы тока, но и динамического давления потока среды-диэлектрика согласно выражения [1]

$$B = I \times P_d \quad (1)$$

При дальнейшем увеличении динамического давления ($P_d = 0,6...1,2$ МПа) в поперечном потоке жидкости формируется множественный разряд – система распределенных по межэлектродному промежутку (МЭП) плазменных каналов (два, три и больше).

При незначительных колебаниях напряжения (порядка 25-30 В) и питании постоянным током ($I = 100...1200$ А) множественный разряд представляет собой совокупность параллельных нестационарных разрядов (на действующих моделях оборудования $\tau = 600...3500$ мкс). На обработанной поверхности остаются следы-лунки как в традиционной ЭЭО. Количество токопроводящих каналов увеличивается при увеличении силы тока и динамического давления.

Механизм саморасщепления электрической дуги в потоке жидкости в малых зазорах порядка 0,05-0,15 мм и условия формирования множества нестационарных разрядов, раньше не исследовались, как и влияние собственного магнитного поля разрядов на этот процесс.

3. Цель и задачи исследования

Экспериментальное исследование параметров и топографии магнитного поля электрического разряда в условиях РОД и ЭЭО нестационарным множественным разрядом позволит подтвердить теоретические исследования практически, обосновать физический механизм саморегулирования его энергетических, пространственных, динамических, технологических параметров и эффективно ими управлять.

Задачи исследования: используя различные методы измерения магнитных величин, изучить характеристики магнитного поля электрического разряда при различных сочетаниях его электрических параметров и гидродинамических параметров рабочей среды.

4. Экспериментальные данные и их обработка

Существует большое разнообразие способов измерения магнитных величин (магнитной индукции

В, напряженности магнитного поля H , магнитного потока Φ). В частности, методы, основанные на использовании гальваномагнитных явлений; внутримангнитных явлений; силового взаимодействия магнитного поля; изменения магнитных свойств материала в магнитном поле; изменения оптических свойств среды; магнитострикции; индукционный.

Для измерения магнитной индукции используют разные методы, основанные преимущественно на превращении магнитной величины в электрическую с ее последующим измерением.

Для сопоставления, сравнения полученных результатов и проверки их достоверности были использованы два метода:

1. Метод, основанный на изменении магнитного состояния ферромагнитных материалов в магнитном поле. Один из важных параметров ферромагнетиков – относительная магнитная проницаемость μ . Эта величина существенно зависит от напряженности магнитного поля H , которое действует на материал (рис. 1).

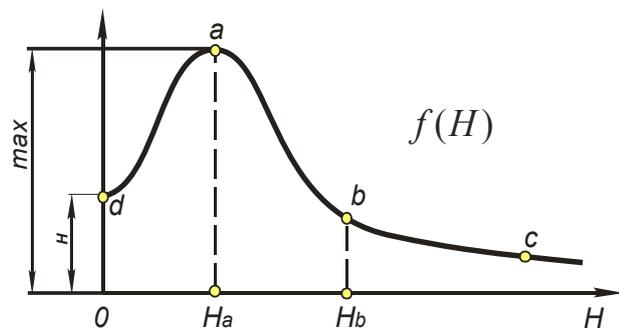


Рис. 1. Зависимость магнитной проницаемости среды от напряженности магнитного поля.

Участок d-a отвечает слабым магнитным полям. Учитывая, что напряженность H магнитного поля в районе горения дуги большая (порядка нескольких десятков кА/м), на участке b-c μ практически не изменяется (режим насыщения).

Участку a-b на кривой отвечает участок H_a-H_b на оси абсцисс – интервал напряженности магнитного поля дуги. Величина H зависит от расстояния к дуге, то есть от диаметра кольца (а также и от силы тока дуги I_d). Кроме того, форма кривой $\mu = f(H)$ зависит от марки феррита. Поэтому, чтобы попасть на участок a-b предусматривалось экспериментировать с ферритовыми кольцами разных диаметров и марок. Измерения проводились по схеме, представленной на рис. 2. Источником питания является генератор синусоидальных колебаний ЗГ-11.

Поэтому, если использовать ферромагнетик как сердечник катушки, то при изменении напряженности поля H будет изменяться μ , а следовательно индуктивнiт X_i и полнiт Z сопротивление катушки.

На этом принципе были разработаны дифференциальные датчики, использованные для решения поставленных задач.

На первом этапе исследований основной задачей было установление функциональной зависимости индукции и напряженности магнитного поля разряда от давления рабочей среды и силы тока разряда:

$$B = f(I_d, P), \quad (2)$$

$$H = \phi(I_d, P). \quad (3)$$

Учитывая особенности среды ($t = 40^\circ$, $P = 4-5$ МПа) и протекания электрического разряда, был использован датчик в виде ферромагнитного кольца с обмоткой.

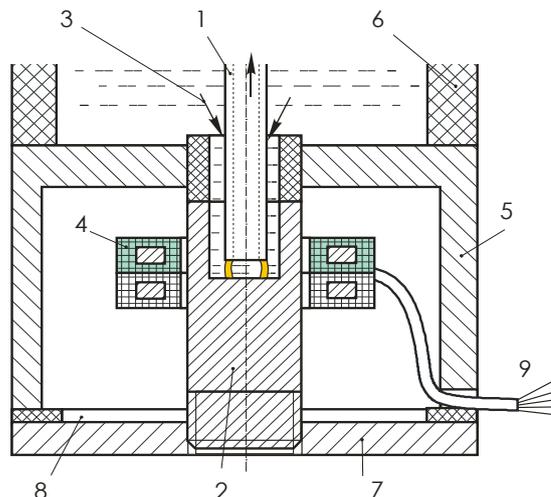


Рис. 2. Схема устройства для исследований: 1 – катод (латунь); 2 – анод (графит); 3 – рабочая жидкость (масло И-20); 4 – датчик; 5 – камера датчика; 6 – камера разряда; 7 – крышка; 8 – прокладка изоляционная; 9 – выходы датчика

Датчик представляет собой два ферромагнитных кольца, на каждом из которых намотано по две обмотки: первичная W_1 (и W_1') и вторичная W_2 (и W_2') (рис. 3, 4).

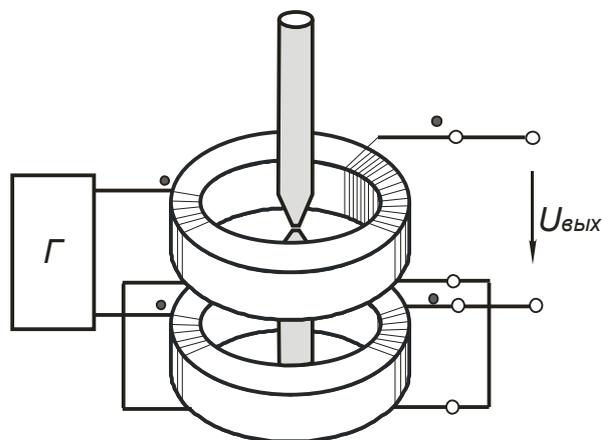


Рис. 3. Схема взаимного расположения датчика и электродов

Электроды, между которыми протекает разряд, вводят внутрь датчика так, чтобы сам разряд находился в плоскости отделения колец. Магнитное поле разряда имеет переменную H и постоянную H_0 составляющие напряженности. Кроме выше отмеченных обмоток существует также обмотка W_3 , которая охватывает оба кольца. Эта обмотка, во-первых, может

быть использована для получения сигнала, который является функцией переменной составляющей поля разряда $U_{W_3} = f(H-)$,

во-вторых, при наладке датчика через эту обмотку пропускают постоянный ток, который имеет пульсации (от выпрямителя); с помощью осциллографа необходимо достичь минимальных значений пульсаций в последовательно соединенных как первичных обмотках, так и вторичных (путем подгонки количества витков); это необходимо для сводки к минимуму влияния переменной составляющей поля дуги на работу датчика; в-третьих, обмотку W_3 используют для съема тарировочных кривых $U_{вых} = f(I_3W_3)$.

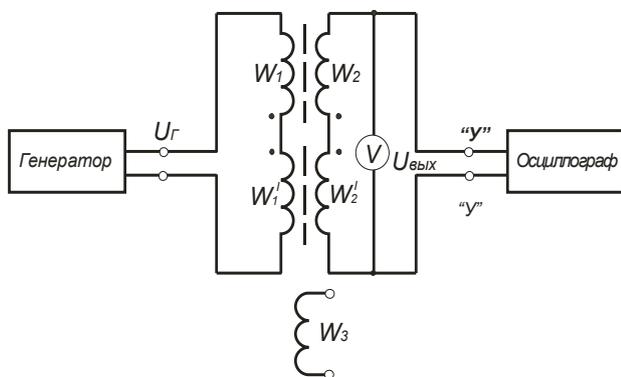


Рис. 4. Схема дифференциального датчика для измерений

В процессе исследований были изготовлены 6 датчиков. 4 датчика – с тороидальными сердечниками из разных материалов: 1-й датчик – из двух ферритовых колец марки М 2000 НМ; 2-й, 3-й, 4-й датчики изготовлены с сердечниками из электротехнической стали 3411.

2-й датчик имел внутреннее отверстие Ø18 и, несмотря на высококачественную термоизоляция, был поврежден. Датчики 3 и 4 имели отверстие Ø25. Для последующих измерений параметров поля оценка и отбор датчиков выполняли на основании тарировки и анализа полученных кривых

$$U_{вых} = f(I_3W_3),$$

где W_3 и I_3 – число витков и сила тока обмотки 3 при $f = 10 \text{ кГц} = \text{const}$.

Датчик 1 при высокой чувствительности к слабым магнитным полям оказался непригодным для измерений (отметим, что $I_3W_3 = Id$) при $Id = 100-300\text{А}$ имел очень низкую чувствительность при напряженности поля, которое отвечает $Id > 10\text{А}$.

На данном этапе было определено влияние давления жидкости в камере электрической дуги на характер распределения магнитного поля дуги, то есть определение зависимости $B = f(P)$ или $U_{вых} = \phi(P)$.

Индуктивность катушки с тороидальным сердечником составляет:

$$L = \frac{\mu\mu_0 W^2 S}{l}, \tag{4}$$

где W – количество витков катушки; S – площадь поперечного сечения сердечника; l – длина средней магнитной линии. В сердечнике действуют два магнитных поля: постоянное поле дуги с напряженностью

H и переменное поле напряженностью H_g , вызванное прохождением тока i через катушку.

При увеличении напряженности магнитного поля дуги H при работе на правой ветви кривой $\mu = f(H)$ уменьшается μ , что вызывает снижение индуктивности катушки L , а следовательно и ее полного сопротивления Z :

$$Z = \sqrt{(R_k + R_n)^2 + (\omega L)^2}, \tag{5}$$

где R_k – активное сопротивление катушки; R_n – сопротивление нагрузки; ω – частота генератора.

Это приводит к увеличению силы тока в цепи и увеличению падения напряжения $U_{вых}$ на нагрузке R_n :

$$i = \frac{U_{живл}}{Z} = \frac{U_{живл}}{\sqrt{(R_k + R_n)^2 + (\omega L)^2}} = \frac{U_{живл}}{\sqrt{(R_k + R_n)^2 + \left(\omega \frac{\mu\mu_0 W^2 S}{l}\right)^2}}, \tag{6}$$

$$U_{вых} = iR_n = \frac{U_{живл} R_n}{\sqrt{(R_k + R_n)^2 + \left(\omega \frac{\mu\mu_0 W^2 S}{l}\right)^2}}. \tag{7}$$

Предусматривается, что при минимальном давлении рабочей среды магнитное поле дуги в пределах ферритового кольца равномерно. На рис. 5 условно представлена картина линий вектора H магнитного поля дуги в плоскости, перпендикулярной к электродам. При увеличенном давлении рабочей среды (смесь нефтепродуктов) площадь поперечного сечения дуги уменьшается. Поэтому представляет интерес выяснение причин этого явления. Предусматривается, что причиной является изменение конфигурации магнитного поля дуги: концентрация линий вектора H в непосредственной близости от дуги увеличивается, а на некотором расстоянии от дуги (в ферритовом кольце) – уменьшается. При этом μ феррита вырастет, а $U_{вых}$ уменьшится.

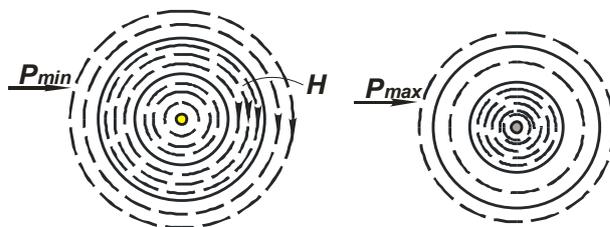


Рис. 5. Вероятная зависимость напряженности магнитного поля разряда от давления потока рабочей среды

В другом варианте схемы исследования для устранения гальванической связи между источником питания (генератором) и исходной цепью (резистором R_n) предусматривается использование трансформаторного датчика (с двумя обмотками). На первую обмотку подают напряжение от генератора, а из второй снимают исходный сигнал $U_{вых}$.

Э.д.с., которая наводится во второй обмотке (то есть исходный сигнал $U_{вих}$), согласно уравнению Максвелла составляет:

$$U_{вих} = e_2 = -\frac{d\Phi}{dt} = -W_2 \frac{d\Phi}{dt} = -W_2 S \frac{dB_r}{dt}, \quad (8)$$

где B_r – индукция переменного магнитного поля в сердечнике, равная $B_r = \mu\mu_0 H_r$; H_r – напряженность переменного магнитного поля; S – площадь поперечного сечения сердечника; W_2 – число витков второй обмотки.

Изменение напряженности H магнитного поля дуги вызовет изменения μ и $U_{вих}$. При этом увеличение H вызовет уменьшение $U_{вих}$. Для измерений $U_{вих}$ использовали осциллограф. Это позволяет наблюдать форму основного сигнала $U_{вих}$ и сигнал, связанный с переменной составляющей магнитного поля дуги.

В сердечнике действуют два магнитных поля: постоянное поле дуги с напряженностью H и переменное поле напряженностью H_r , вызванное прохождением тока i через катушку. В процессе экспериментов выяснилась практическая невозможность отделения переменной и полезной составляющей сигнала. Поэтому в дальнейшем использовали дифференциальный трансформаторный датчик, который состоит из двух одинаковых датчиков. Их вторичные обмотки соединены последовательно встречно, благодаря чему напряжение, приведенное переменной составляющей поля дуги, в этих обмотках вычитаются, а первичные обмотки, соединенные так, чтобы напряжения полезного сигнала во вторичных обмотках складывались (тоже последовательно встречно).

В результате выполненных исследований получен график (рис. 6), который отображает зависимость индукции магнитного поля разряда от силы тока и давления потока рабочей жидкости. Они показывают, как и предполагалось, что индукция магнитного поля разряда в поперечном потоке жидкости, является функцией не только силы тока, но и динамического давления потока жидкости.

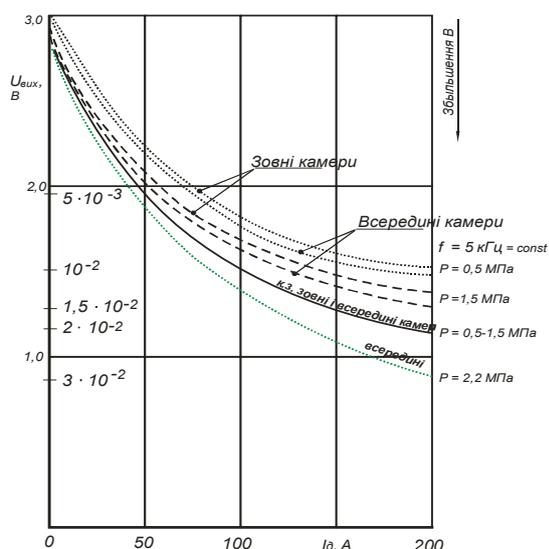


Рис. 6. Зависимость индукции магнитного поля разряда от I и $P_{ст}$ рабочей жидкости. (Дифференциальный датчик) Метод измерения, основанный на изменении магнитного состояния ферромагнитных материалов в магнитном поле

2. Метод, основанный на эффекте Холла (при пропускании постоянного тока через полупроводниковую пластину, размещенную в магнитном поле с индукцией B , между ее боковыми гранями возникает ЭДС), для чего используют так называемый измеритель магнитной индукции Ш 1-8 с датчиком Холла (зонд). Прибор позволяет исследовать топографию магнитного поля – установить значение магнитной индукции в разных точках пространства вокруг исследуемой системы. Для этого датчик размещают в исследуемых точках пространства так, чтобы угол между вектором B и плоскостью датчика составлял 90° .

Были проведены измерения магнитной индукции как внутри камеры (в районе дуги), так и снаружи камеры (рядом с проводом питания). При этом важным было соблюдение определенного расстояния от датчика к дуге (или проводу, когда измерения проводили вне камеры). Эти измерения были выполнены для разных расстояний от датчика до оси дуги (или провода).

В приборе использован компенсационный метод измерения, который дает возможность повысить точность измерений, а также устранить погрешности, вызванные изменениями напряжения сети. Датчик Холла питается переменным током от генератора ($f = 1\text{кГц}$). Э.д.с. Холла сравнивается в блоке компенсатора с частью исходного напряжения генератора (полученной с помощью специального усилителя. Разностный сигнал после усиления или детектирования с помощью фазового детектора подается на индикатор (микроамперметр).

При изменении индукции поля э.д.с. Холла будет изменяться, что вызовет появление тока в индикаторе. С помощью специального делителя, что входит в состав компенсатора, выполняют (вручную) компенсацию э.д.с. Холла – нулевое значение индикатора. Ручки делителя оснащены шкалами, по которым оценивают индукцию B (Тл). Измерения индукции таким способом требуют определенных затрат времени. Поэтому для быстрых измерений индукции B были использованы показатели индикатора и снята таровальная кривая $B = f(I_{вих})$, по которой можно определить B . Але целью измерений было не установление абсолютных значений B , а характера изменения B в зависимости от разных факторов (давлению жидкости в камере, відтані от дуги и силы тока дуги).

Были проведены многократные измерения магнитного поля дуги, целью которых было определение зависимостей

$$B = f(I_d) \text{ когда } P = \text{const и } l = \text{const}$$

$$B = \phi(P) \text{ когда } I_d = \text{const и } l = \text{const}$$

$$B = \psi(l) \text{ когда } I_d = \text{const и } P = \text{const}$$

как внутри камеры, так и снаружи (около провода питания). Измерения поля внутри камеры проводились для двух случаев: при работе дуги и при коротком замыкании электродов.

Таким образом, следует считать, что при протекании разрядов в поперечном потоке жидкости собственное магнитное поле разряда удерживает плазму разрядного канала, в котором достигается высокое давление. При таких условиях индукция магнитного поля может быть представлена выражением

$$B = I \times R_d.$$

Исследование параметров магнитного поля разряда в поперечном потоке жидкости выполнялись также с помощью датчиков-герконов (рис. 8), реагирующих на изменение магнитных параметров среды. Электрический разряд протекал между электродами 1 и 2, расположенными в герметизированной камере 6. Между электродами была организована обратная прокачка рабочей жидкости при статическом давлении в камере 1 МПа. Зазор между электродами составлял 0,1 мм.

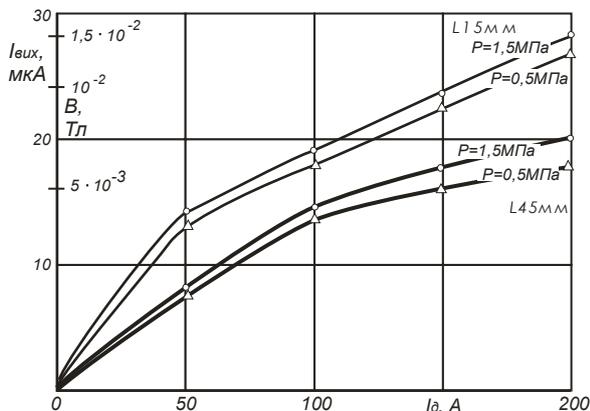


Рис. 7. Индукция магнитного поля разряда в функции силы тока и статического давления рабочей жидкости. (расстояние от датчика Холла Ш 1-8 до электрода - 15 и 45 мм)

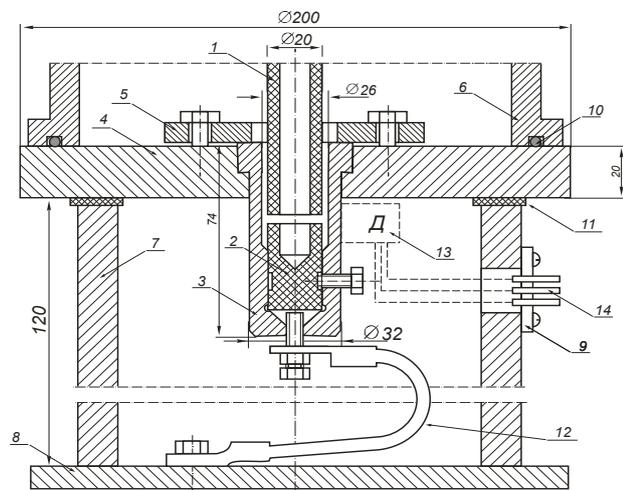


Рис. 8. Схема исследования магнитного поля с помощью датчиков-герконов: 1, 2 – электроды (графитовые $\varnothing 20$, латунные $\varnothing 7, \varnothing 32$); 3 – электрододержатель; 4 – промежуточная плита; 5 – прижим; 6 – герметизирующая камера; 7 – подставка; 8 – нижняя плита; 9 – крепление светодиодов; 10 – уплотнение резиновое; 11 – изолятор; 12 – токопровод; 13 – датчики

Для непосредственного наблюдения за работой датчиков, они были соединены со светодиодами (рис. 9, 10). При достижении магнитным полем определенных значений подвижные пластины в датчиках смыкаются, вследствие чего светодиоды реагируют свечением. В таблице 1 показано, при каких условиях наблюдалось свечение, что соответствует работе датчиков с соответствующим номером. Если при прохождении постоянного тока датчики 1 и 2 включаются при силе тока 150 А, то

при зажигании разряда в поперечном потоке жидкости эти датчики работают уже при 25 А. Очевидно, что электрический разряд между электродами создает мощное магнитное поле, на которое реагируют датчики.

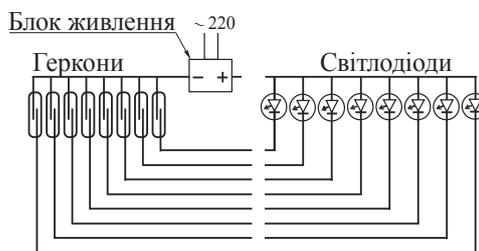


Рис. 9. Схема датчика для измерений

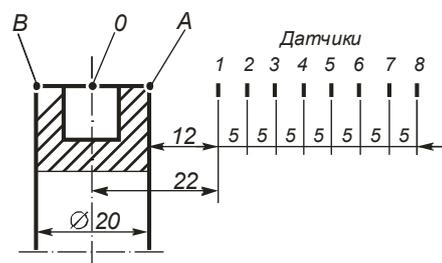


Рис. 10. Расположение датчика относительно электродов

Таблица 1

Зависимость работы датчиков от силы тока

Сила тока, I, А	№ геркона (и, соответственно, светового датчика)	
	Тарировка (постоянный ток)	Разряд в поперечном потоке ($P_{ст}=1 \text{ МПа}$, $U=30 \text{ В}$, графитовые электроды)
25		1 2**
50		1 2*
100		1 2*
150	1	1 2* 3** 4**
200	1	1 2 3* 4*
250	1 2	1 2 3 4* 5* 6*
300	1 2 3 4	1 2 3 4 5* 6* 7**
350	1 2 3 4	*) постоянно мигает
400	1 2 3 4	**) отдельные вспышки
450	1 2 3 4	

Как известно, значение магнитной индукции можно определить так, Тл:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r}, \tag{8}$$

где I – сила тока, А; r – расстояние от центра проводника до точки измерения, м; μ_0 – магнитная проницаемость среды, $B \times c / A \times m$ ($\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$); $\mu = 1$ – в вакууме.

Учитывая, что $\frac{\mu_0}{2\pi} \approx 2 \cdot 10^{-7}$ и если измерять в мм, то $\frac{\mu_0}{2\pi \cdot 10^{-3}} \approx 2 \cdot 10^{-7}$, можем рассчитать значения магнитной индукции в условиях эксперимента при 50А (табл. 2)

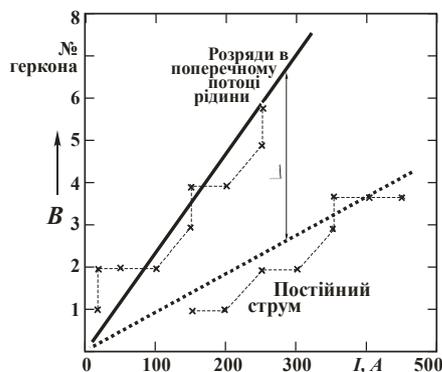


Рис. 11. Зависимость магнитной индукции от силы тока и вида токопроводящего канала (электроды – графит, латунь)

Таблица 2

№ светодиода	1	2	3	4	5	6	7	8
r_0 , мм (10^{-3} м)	22	27	32	37	42	47	52	57
V_A , (м×Тл)	83,33	58,82	45,45	37,03	31,25	27,02	23,80	19,23
V_0 , (м×Тл)	45,45	37,03	31,25	27,02	23,8	21,27	19,23	17,54
V_B , (м×Тл)	31,25	27,02	23,8	21,27	19,23	17,54	16,12	14,93

Обозначения:

r_0 – на оси; r_A – в точке А; r_B – в точке В

$r_A = r_0 - 10$; $r_B = r_0 + 10$ Другие значения получим, умножив данные значения на коэффициент $n = 1/50$

6. Выводы

На основании экспериментальных исследований магнитного поля различными методами установлено, что электрические разряды в условиях ЭЭО как стационарным, так и нестационарным разрядом имеют мощное собственное магнитное поле, магнитная индукция и напряженность которого на порядок выше, чем у электрической дуги такой же силы тока в воздухе. Такое магнитное поле может вызывать различные магнитогидродинамические явления в среде протекания разряда, в том числе ее нагревание и образование новых токопроводящих плазменных каналов – пробоя новых участков без повышения напряжения до значений пробоя. Наличие у стационарного дугового разряда в поперечном потоке жидкости мощное магнитное поле позволяет через воздействие на разряд потока жидкости управлять его энергетическими и пространственными параметрами, а значит и технологическими.

Литература

- Носуленко В. И. Размерная обработка металлов электрической дугой // Электронная обработка материалов. – 2004. – № 3. – С. 15-22.
- Щетинина В. И., Щетинин С. В., Чапни Н. И., Щербина А.В. Влияние скорости сварки на магнитное поле сварочного тока // Автоматическая сварка. – 2002. – №2. – С. 14-17.
- Динамика электровзрыва в жидкости / Кривицкий Е.В. – Киев: Наук. думка, 1986. – 208 с.
- Устойчивость горения электрической дуги / П.А. Кулаков, О.Я. Новиков, А.Н. Тимошевский. – Новосибирск, Наука. Сиб. отд-ние, 1992, 199 с. – (Низкотемпературная плазма. Т. 5).
- Райзер Ю.П. Физика газового разряда: Учеб. руководство. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 592 с., ил.
- Головко Л. Ф., Чумаченко О. С. Вплив власного магнітного поля на динаміку стаціонарного електричного розряду в поперечному потоці рідини при обробці листового металу // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. - 2008. - № 2. – С. 83- 87.

Abstract

Electroerosive processing of stationary discharge in fluid crossflow is a famous technological process, but physical mechanism of inherent regulation of discharge and, in particular, the importance of magnetic field, had not been examined thoroughly. For the first time, the experimental research of magnetic fields of such discharge was carried out. The transducers were produced from ferromagnetic material, which changes their properties in magnetic field. There were also transducers that use Hall effect and formation of electromotive force under the influence of magnetic field. The measuring during the electric charge helped to establish the dependence of magnetic value from the current stress, dynamic fluid pressure and the distance between the transducer and the radiation source. The measurements were taken at current stress 25-450A, voltage 30 V, and statistic fluid pressure in pressurized cabin 0,5-1,5 MPa. Interelectrode gap was 0,1 mm. the diagrams of dependence of magnetic induction of discharge from the current strength and dynamic fluid pressure were drawn. Magnetic induction and intensity of discharge magnetic field during electroerosive processing is vastly higher than of electric arc of the same current strength in the air.

Such magnetic field causes various magnetic-hydrodynamic phenomena in discharge area, as well as its heating and formation of new conducting plasma channels. The existence of powerful magnetic field of stationary arc discharge in fluid crossflow helps by the influence on the fluid flow discharge to manage its energy and spatial parameters and, correspondingly, to expand technological possibilities.

Key words: magnetic field, arc self-splitting, non-stationary discharges