



## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЕГО МИНИМИЗАЦИЯ ПРИ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ

О. Г. ЛЕВЧЕНКО, д-р техн. наук, В. К. ЛЕВЧУК, О. Н. ГОНЧАРОВА, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Установлено пространственное распределение магнитного поля (МП), создаваемого машиной контактной точечной сварки, в рабочей зоне с учетом его спектрального состава. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния параметров режимов сварки и расстояния от токоведущих элементов сварочного контура на показатель превышения уровня МП согласно современным медицинским требованиям. Предложены рекомендации по защите сварщиков от МП для разработчиков машин контактной точечной электросварки, технологов и пользователей данными машинами.

*Ключевые слова:* контактная точечная сварка, электромагнитное излучение, показатель превышения уровня магнитного поля, способы защиты сварщиков, защитные магнитные материалы, сплав с аморфной структурой

В настоящее время контактная электросварка нашла широкое применение в отдельных отраслях промышленности Украины и является одним из ведущих технологических процессов современного производства. Имеется большой парк электрооборудования и машин различных типов и назначения мощностью от нескольких до сотен киловольт на ампер, в основном это машины переменного тока частотой 50 Гц.

При эксплуатации этих машин генерируются магнитные поля (МП) значительной напряженности, превышающей значение, которое регламентируется старыми санитарными нормами, в несколько раз [1]. МП такой интенсивности может влиять на здоровье обслуживающего персонала, обуславливая определенные негативные функциональные изменения в организме из-за воздействия на сердечно-сосудистую, нервную, мочеполовую, эндокринную и другие системы. В связи с этим возникла необходимость в контроле электромагнитной обстановки на рабочих местах сварщиков и обеспечении безопасных условий их труда. Актуальность этой задачи возросла с введением в Украине в действие новых нормативов [2], регламентирующих условия безопасности при работе с источниками электромагнитных полей и учитывающих современные медицинские исследования.

При контактной электросварке в рабочей зоне создаются импульсные МП. На рабочих местах сварщиков основными источниками данных полей являются не полностью экранированный корпусом машины сварочный трансформатор и, как

правило, неэкранированные силовоточные элементы сварочного контура (электроды, свечи, консоли, шины), а также токоведущие кабели и свариваемые изделия сложной формы. МП, образующиеся при контактной электросварке в различных частотных диапазонах, и общая методика определения их уровней описаны в работе [3].

Цель настоящей работы — установление пространственного распределения МП возле машины контактной точечной сварки и определение возможностей минимизации его интенсивности.

При проведении экспериментов возможные режимы контактной точечной сварки моделировали на серийной точечной машине МТ-2202 средней мощности с учетом следующих соображений.

Во-первых, режимы сварки определяются конструкцией сварочного оборудования и возможностью их регулирования. Для современного оборудования контактной точечной сварки они достаточно широки и предусматривают следующие регулирования тепловложения в свариваемое соединение: переключение ступеней мощности сварочного трансформатора с тиристорным контактором; изменение длительности протекания импульсов синусоидального полнофазного тока частотой 50 Гц в одной пачке; сварку (и термообработку свариваемого соединения в электродах сварочной машины) несколькими (до трех) пачками синусоидальных полнофазных импульсов с регулированием количества импульсов в пачках и времени пауз между пачками; фазовое регулирование нагрева (сварочного тока) в каждой пачке ( $\alpha_{\phi} = 20 \dots 180^\circ$ ); модуляцию передних и задних фронтов пачек импульсов, т. е. амплитуд определенного количества импульсов от нулевого до максимального значений.

Во-вторых, поскольку аппаратура управления сварочным циклом предусматривает (разрешает) эти регулировки, технологи-сварщики использу-

ют их при работе не всегда обоснованно и без учета требований санитарных норм [2].

Проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона исследования показывают, что для контактной электросварки излучения в диапазоне частот 50...1000 Гц являются определяющим санитарно-гигиеническим фактором при оценке уровней МП. Наименее опасным режимом сварки, спектр МП которого содержит наименьшее количество существенно значимых гармонических составляющих выше основной гармоники частотой 50 Гц, в основном определяющих энергетическую нагрузку МП, является режим сварки одной пачкой синусоидальных полнофазных импульсов сварочного тока, причем как можно большей длительностью и меньшей амплитудой (так называемый мягкий режим сварки). Установлено также, что для этого режима сварки с учетом санитарного аспекта можно принять количество синусоидальных импульсов (периодов) не менее 15, т. е. время сварки одной точки должно составлять  $t_{св} \geq 15 \cdot 0,02 \geq 0,3$  с. Этот режим сварки удобно было бы принять за контрольный, с которым можно было бы сравнивать другие возможные режимы, получаемые в результате гигиенической оценки, и проводить сравнительный анализ. В реальной практике на производстве отдают предпочтение более жестким режимам. Поэтому в качестве контрольного режима был принят жесткий режим сварки образцов (1,5 + + 1,5) мм из углеродистой стали одной пачкой десяти синусоидальных полнофазных импульсов сварочного тока ( $I_2 = 12$  кА,  $U = 0,69$  В) частотой 50 Гц на первой (минимальной) ступени регулирования мощности трансформатора при имеющихся четырех. При переходе от мягкого режима к жесткому напряженность МП в упомянутом выше диапазоне частот увеличивается примерно в 2 раза.

Для объективной оценки уровней МП во всех имеющихся диапазонах частот предложено новый обобщенный показатель — показатель превышения уровня магнитного поля (ППУ МП)

$$\text{ППУ МП} = \sum_n \frac{H_n^2}{H_{n\text{ПДУ}}^2}, \quad (1)$$

где  $H_n$  — фактическая напряженность МП по диапазонам частот  $n$ , А/м;  $H_{n\text{ПДУ}}$  — напряженность предельно допустимых уровней МП по диапазонам частот  $n$ , А/м.

На рис. 1 в качестве примера представлены характерные экспериментально полученные зависимости ППУ МП для пятичасовой экспозиции перед точечной машиной средней мощности от расстояния до ее электродов для различных видов сигналов МП, где 1 — для одной пачки из десяти синусоидальных полнофазных импульсов сварочного тока частотой 50 Гц с модуляцией переднего и заднего фронтов (по одному полупериоду) на

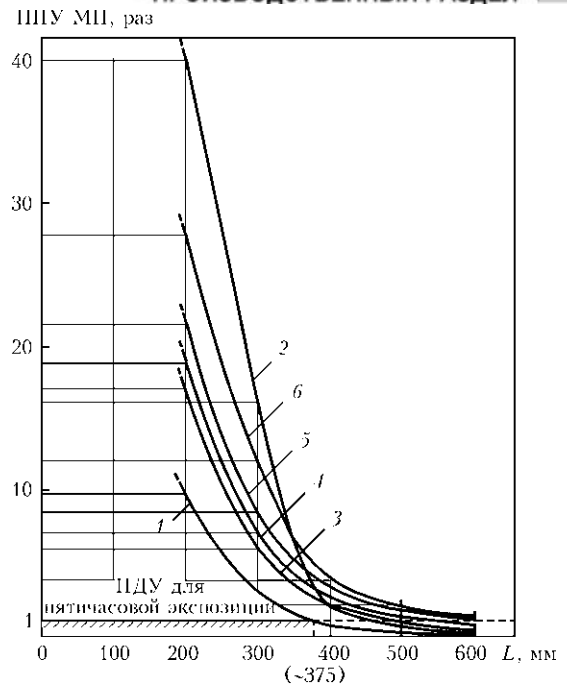


Рис.1. Зависимость ППУ МП от расстояния до электродов машины точечной сварки МТ-2202 и параметров режима сварки в рабочей зоне сварщика (перед машиной) на высоте  $h = 1000$  мм (в плоскости сварного соединения) от пола (обозначения см. в тексте)

минимальной ступени трансформатора; 2 — то же, но на максимальной ступени; 3 — для угла фазового регулирования нагрева  $\alpha_{\phi} = 45^\circ$  (импульс соответствует кривой 1); 4 — для одной пачки из десяти импульсов с 50%-й модуляцией переднего фронта пачки, т. е. пяти первых импульсов от нулевого до амплитудного значения; 5 — для двух пачек по пять импульсов с паузой между импульсами в два периода; 6 — для двух пачек по пять импульсов со 100%-й модуляцией передних фронтов пачек с паузой между импульсами в два периода. На рис. 2 представлено ориентировочное пространственное распределение ППУ МП перед сварочной машиной при сварке на жестком режиме одной пачкой из 10 синусоидальных полнофазных импульсов сварочного тока частотой 50 Гц с модуляцией переднего и заднего фронтов (по одному полупериоду) на первой ступени трансформатора. Полученные данные свидетельствуют о существенном превышении уровней магнитных излучений во фронтальной и еще более значительного в профильной области рабочего пространства сварщика.

Как видно из данных рис. 1, любое предусмотренное аппаратурой регулирование параметров режима сварки (отличных от контрольного режима) приводит к увеличению ППУ МП в рабочей зоне. Наибольшее значение ППУ МП наблюдается перед сварочной машиной в горизонтальной плоскости  $xOy$ , проходящей через свариваемую точку, в данном случае на высоте 1 м от неферромагнитного пола. Проаппроксимировав данные гра-

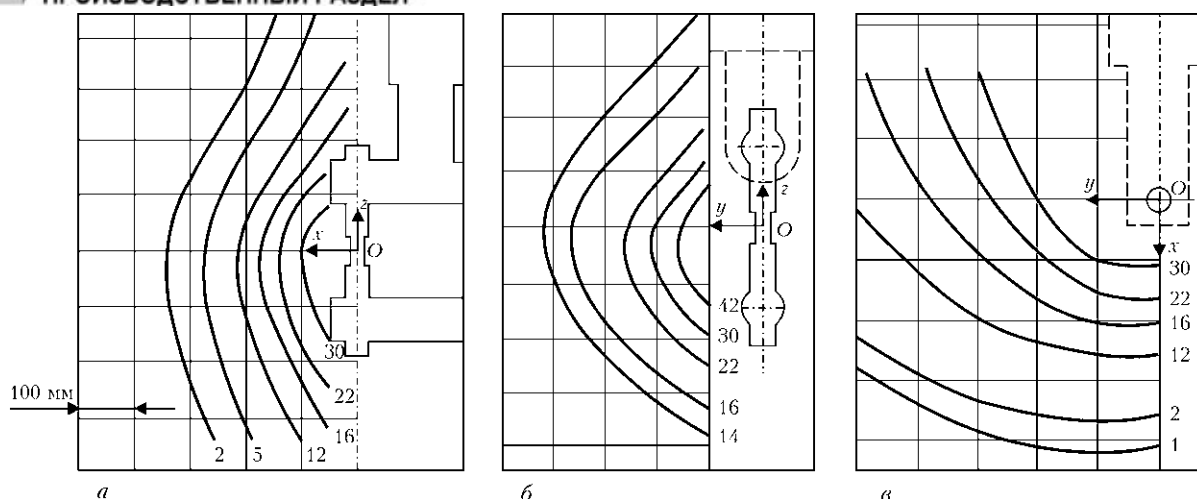


Рис. 2. Распределение ППУ МП (для пятичасовой экспозиции) в плоскости  $xOz$  (а),  $yOz$  (б) и  $xOy$  (в)

фиков рис. 2 на область головы и ног сварщика, установлено, что ППУ МП в этих областях ориентировочно в 4...6 раз ниже, чем на уровне пояса. Расчет ППУ МП сбоку от сварочного контура в вертикальной плоскости  $zOy$  показывает (рис. 2, б), что его пространственное распределение в этой области аналогично распределению перед машиной, но в горизонтальной плоскости он в 2...2,5 раза выше, а в области головы и ног сварщика остается примерно тем же.

Анализ полученных данных показывает, что надежное обеспечение максимальной эффективности защиты сварщика можно достичь увеличением расстояния до источника излучения или применением полной автоматизации и удалением сварщика из зоны действия МП на расстояние не менее 1 м, что в реальных условиях производства вряд ли возможно. Поэтому для разрешения создавшейся ситуации и возможности работы сварщика на контактных точечных машинах во фронтальной области, в так называемом ручном режиме, на расстоянии  $L \geq 150...200$  мм необходимая эффективность защиты  $\mathcal{E}_3$  от магнитных излучений должна составлять не менее 60...40 раз (см. рис. 1). Необходимая эффективность защиты определяется выражением

$$\mathcal{E}_3 = H_M / H_p, \quad (2)$$

где  $H_M$  — максимальное значение напряженности МП на рабочем месте;  $H_p$  — предельно допустимое значение напряженности МП.

При расчете  $\mathcal{E}_3$  используют значение  $H_M$ , измеряемое на рабочем месте сварщика.

Разработка средств защиты сварщиков от электромагнитного излучения при обслуживании машин контактной точечной сварки в ручном режиме с обеспечением  $\mathcal{E}_3$  порядка 100 раз, по-видимому, должна предусматривать использование всех возможных способов снижения магнитного излучения до регламентируемого уровня [2], а именно:

защиту расстоянием (до  $L_{\min} \geq 250...300$  мм);  
защиту временем;

защиту оптимизацией режимов сварки, использование новых способов сварки с более приемлемыми физическими параметрами электрического тока с санитарной точки зрения и новыми принципами регулирования тепловложения при выполнении сварного соединения;

экранирование токоведущих элементов сварочного контура с сохранением максимально возможного рабочего пространства;

применение индивидуальных экранирующих средств;

мониторинг магнитной обстановки на рабочем месте самим сварщиком с помощью сигнализатора уровня МП.

Рассмотрим возможности этих способов.

**Защита расстоянием.** При работе на стационарных точечных машинах в полуавтоматическом режиме наиболее нагруженными МП частями тела являются кисти рук и руки, т. е. локальные части тела. В отличие от европейских украинские санитарные нормы [2] не предусматривают при работе в импульсных МП применение локального повышающего коэффициента для допустимого уровня напряженности МП, равного 2,5, поэтому нахождение кистей рук на расстоянии  $L \leq 300$  мм от электродов машины во фронтальной, а тем более в профильной по отношению к сварочному контуру машины области недопустимо. Допустимое расстояние до кистей рук при работе должно быть таким же, как и до туловища. В этом случае использование таких устройств, как специальная технологическая оснастка, поворотных столов и др., а также пультов управления с двумя сблокированными кнопками включения сварки, обеспечивающих минимально допустимое расстояние, является насущной необходимостью.

Особенно негативные результаты воздействия МП на сварщика возможны при работе с ручным инструментом для контактной электросварки

(клещи, пистолеты для точечной сварки и пистолеты для ударной конденсаторной приварки шпилек) [3]. Так, при пятичасовой экспозиции в этом случае ППУ МП превышает норму примерно в 400 раз для кистей рук и в 100 раз для головы и туловища сварщика. Поэтому при проектировании ручного инструмента необходимо предусматривать расстояние от токоведущих частей пистолетов до его рукояток не менее 250...300 мм, а при возникновении при этом значительных моментов инерции необходимо оснащать инструмент балансировочным устройством. Конструкторская и технологическая документация должны включать эргономическую составляющую, т. е. чертежи, схемы перемещения инструмента в пространстве во время работы, положения инструмента при сварке каждой точки изделия и его расположения относительно тела (головы и туловища) сварщика.

Однако видно, что при работе в ручном режиме использования только защиты расстоянием недостаточно.

**Защита временем.** Защита работающих от электромагнитного излучения при различных видах контактной электросварки достигается за счет ограничения суммарного времени воздействия МП с учетом его спектрального состава ([2]) на сварщика в течение рабочего дня путем перевода его на другие операции, не связанные с воздействием МП. С учетом реально возможного снижения времени работы сварщика (времени экспозиции до 2 ч в смену) эффективность защиты этого способа может составить до 2,5 раза.

**Защита путем оптимизации режимов сварки и выбора способа сварки.** Иллюстрацией способа улучшения магнитной обстановки на рабочих местах путем оптимизации режимов в некоторой степени могут служить графики, представленные на рис. 1. Режимы точечной (рельефной, шовной, конденсаторной) сварки можно считать достаточно разнообразными по получаемым спектрам МП, которые и определяют значение энергетической нагрузки на организм сварщика. Разработчикам и изготовителям нового серийного сварочного оборудования необходимо учитывать условия их применения и действующие санитарные нормы, поскольку использование этого оборудования в промышленности будет ограничиваться уровнями электромагнитного излучения в рабочей зоне при его испытаниях на максимальной ступени мощности сварочного трансформатора с различными комбинациями установок регулятора цикла сварки (см. рис. 1). В случае превышения регламентируемых уровней электромагнитных излучений и недостаточности технических возможностей по их снижению производственники и конструкторы сварочного оборудования должны применять дополнительные меры за-

щиты работающих. Например, для улучшения магнитной обстановки вокруг ручного инструмента возможны следующие технические решения:

максимальное ограничение режимов сварки по току (до  $I_2 = 8$  кА);

выполнение сварки по возможности на мягких режимах одной пачкой полнофазных синусоидальных импульсов тока с модуляцией фронтов пачки (по одному полупериоду);

осуществление регулировки мощности нагрева только переключением ступеней мощности трансформатора;

подключение инструмента (клещей, пистолетов и др.) к отдельно стоящему сварочному трансформатору малоиндукционными (бифилярными) кабелями.

Проблему можно было также решить путем более широкого применения технологии сварки распорными пистолетами с дистанционным включением, при котором снимаются все ограничения к используемым регуляторам цикла сварки, значению и форме кривой сварочного тока, структуре сварочного цикла и обеспечивается высокое качество сварных соединений. Проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона работы показывают, что наилучшие санитарно-гигиенические характеристики имеют сварочные процессы, выполняемые выпрямленным или импульсным выпрямленным током достаточно большой длительности (несколько сотен микросекунд). Поэтому технологам-сварщикам и конструкторам сварочного оборудования рекомендуется внимательно отнестись к возможности использования контактной сварки выпрямленным током, особенно при точечной сварке ручным инструментом.

Ориентировочное снижение энергетической нагрузки МП на рабочих местах за счет оптимизации режимов сварки может составить от 2 до 10 раз.

**Экранирование сварочного оборудования и сварщика.** При работе в ручном режиме стационарные экраны, кроме функционального назначения, должны обеспечивать выполнение двух наиболее важных требований: не исказить характер технологического процесса и не существенно снизить производительность труда.

Важно обеспечить первое требование — не изменять электрические параметры вторичного контура трансформатора, сварочного контура внесением дополнительного сопротивления, что приведет к ограничению максимального значения сварочного тока в нем и соответственно к изменению режима сварки.

Высокую производительность труда фактически можно обеспечивать свободным доступом к месту сварки, сохранением необходимых размеров рабочего объема для выполнения технологического процесса, т. е. установки и снятия деталей,



ППУ МП, раз

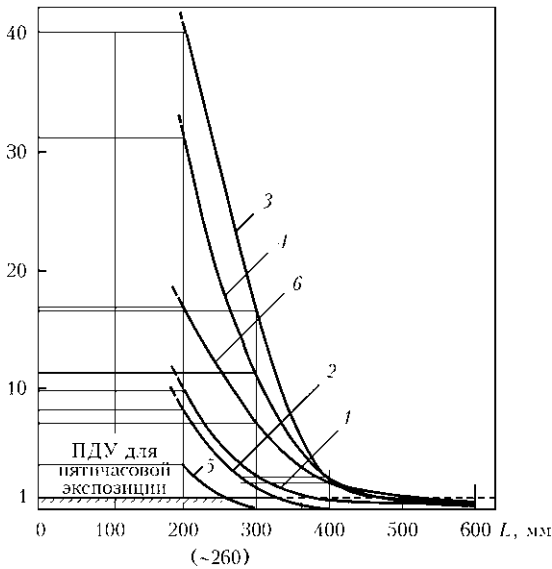


Рис. 3. Зависимость ППУ МП от расстояния до электродов машины точечной сварки МТ-2202 при экранировании туловища сварщика эластичным экраном в виде фартука [4] (обозначения см. в тексте)

предотвращением дополнительных операций на перемещение защитного экрана.

С конструктивной и технико-экономической точки зрения наиболее приемлемым материалом при изготовлении экранов для сварочного оборудования являются ферромагнитные материалы (электротехническая сталь, углеродистая сталь). Специфика работы сварочного оборудования и особенности конструктивного выполнения рабочих электродов и токоподводящих шин не позволяют применять наиболее эффективные замкнутые электромагнитные экраны, а представляется возможным устанавливать полузамкнутые экраны, которые менее эффективны.

Снижение напряженности МП, создаваемых рабочими элементами и токоподводящими шинами точечных стационарных машин, может быть достигнуто с помощью экранирующих устройств (цилиндра, замкнутого экрана, магнитного шунта), эффективность которых составляет от 2 до 30 раз. Под эффективностью экранирования понимают отношение напряженности (максимального значения) на рабочем месте  $H_M$  при отсутствии экрана к напряженности в той же точке рабочего места при наличии экрана  $H_{M,Э}$ :

$$\mathcal{E}_3 = H_M / H_{M,Э} \quad (3)$$

Для расчета  $\mathcal{E}_3$  используют параметр  $H_M$ , измеряемый на рабочем месте сварщика при непрерывной работе трансформатора и допустимом токе

$$I_{2 \text{ доп}} = I_{2н} \sqrt{\frac{ПВ}{100}}, \quad (4)$$

где  $I_{2н}$  — номинальный сварочный ток, А; ПВ — продолжительность включения, %.

Оценка  $\mathcal{E}_3$  по выражению (3) является вполне приемлемой, хотя интегральная эффективность экранирования импульсных МП по аналогии с выражением (2) и в соответствии с требованиями [2] определяется как

$$\mathcal{E}_3 = \sum H_n^2 / H_{нПДУ}^2 \quad (5)$$

Окончательная проверка эффективности экранирования проводится экспериментально с учетом спектрального состава МП по выражению (5).

Зависимость ППУ МП от расстояния до электродов машины точечной сварки МТ-2202 (характеристики тока те же, что и на рис. 1) при экранировании туловища сварщика эластичным экраном в виде фартука [4] представлена на рис. 3, где 1, 3 — для одной пачки импульсов сварочного тока соответственно на минимальной и максимальной мощности; 2 — с эластичным экраном из двух сплошных незамкнутых слоев при сварке на минимальной мощности; 4 — за эластичным однослойным незамкнутым экраном при сварке на максимальной мощности; 5 — за эластичным однослойным экраном при сварке на минимальной мощности для одной пачки сварочного тока с фазовым регулированием нагрева  $\alpha_\phi = 45^\circ$ ; 6 — то же, что и 5, но без экрана.

Конструктивно экраны, установленные на рабочие электроды и токоведущие шины, могут представлять собой параллелепипед или цилиндр, выполненный из углеродистой стали толщиной 2...3 мм.

Применение средств индивидуальной защиты (халатов с капюшонами, фартуков, накидок, курток с брюками и др.), разработанных для сверхвысоких частот, в диапазоне низких частот практически теряет смысл, так как исчезает эффект отражения электромагнитных волн от материала с сетчатой или ячеистой структурой.

Средства индивидуальной защиты, например, сплошной эластичный магнитный экран с высокой магнитной проницаемостью из магнитомягкого кобальтового сплава системы легирования Co-Fe-Cr-Si-B с аморфной структурой в виде фартука сварщика [4], дополненного нарукавниками, могут быть полезными в определенных ситуациях при экранировании туловища в локальных МП средней напряженности (до 1500 А/м по основной гармонике) и должны рассматриваться как последнее средство обеспечения магнитной безопасности, поскольку для их эффективной работы необходимо предварительное снижение уровня МП до 1500 А/м; уменьшение времени установления МП в тонком экране граничной толщины (0,015 мм) путем увеличения крутизны фронта нарастания импульсов сварочного тока, что приводит к увеличению энергетической нагрузки МП в области кистей и головы сварщиков (при

этом в области живота и груди сварщика эффективность экранирования может составить от 2 до 5 раз (см. рис. 3)); обеспечение условий, исключающих прикосновение к открытым токоведущим частям сварочного оборудования [2], поскольку основа эластичного экрана металлическая.

1. *Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц.* — М., 1986. — № 3206–85. — 7 с.

2. *ДСН 3.3.6.096–2002.* Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. — К.: МОЗ України, 2002. — 16 с.
3. *Левченко О. Г., Левчук В. К.* Безопасный уровень напряженности электромагнитного поля при контактной сварке // Автомат. сварка. — 2008. — № 5. — С. 46–55.
4. *Пат. UA50293 МПК G 12B 17/00 Україна.* Фаргух електрозварника / Л. М. Лобанов, О. Г. Левченко, В. К. Левчук та ін. — Опубл. 25.05.2010, Бюл. № 10.

Spatial distribution of the magnetic field (MF) generated by the resistance spot welding machine in the work zone was determined with allowance for its spectral composition. Results of experimental studies of the effect of welding process parameters and distance from current-conducting elements of the welding circuit on the indicator of excess of the MF level, according to the current medical requirements, are presented. Recommendations on protection of welders from MF are suggested, intended for designers of the resistance welding machines, production engineers and users of these machines.

Поступила в редакцию 12.03.2012

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ, ВЫЗЫВАЮЩИХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКУЮ ДЕСТРУКЦИЮ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ И КОРРОЗИОННОЕ РАЗРУШЕНИЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

*Научно-исследовательская работа по указанной теме была завершена в 2011 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона (руководитель темы — канд. техн. наук А. О. Рыбаков)*

### **Результаты и их новизна:**

- *исследованы свойства и частичное изменение состава продуктов электрохимической деструкции полимерных покрытий, которые образуются при катодной защите на начальной стадии;*
- *уточнен механизм влияния продуктов деструкции полимерных покрытий на КРН трубных сталей;*
- *определены условия, которые вызывают электрохимическую деструкцию защитных покрытий и коррозионное разрушение магистральных трубопроводов: наличие дефекта в защитном покрытии, коррозионно-активная среда и катодная поляризация;*
- *установлено наличие влияния составляющей фактора стресс-коррозионного растрескивания магистральных газопроводов, связанного с электрохимической деструкцией покрытия при катодной защите;*
- *уточнены критерий оценки составляющей фактора «защита трубы от коррозии», связанный с электрохимической деструкцией покрытия при катодной защите, и численные показатели к диапазонам нормированных значений потенциалов для вычисления вероятности КРН на участке магистрального газопровода по компьютерной программе.*