

УДК 331.453; 621.791

Е. А. Харчевникова, С. В. Болотов, канд. техн. наук

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ПРИ СВАРКЕ И ЗАЩИТА ОТ ИХ ВОЗДЕЙСТВИЯ

На основе теоретических и экспериментальных исследований магнитных полей в зоне рабочего места сварщика определены безопасные расстояния от токоведущих частей сварочного источника при различных режимах сварки. Разработаны средства защиты сварщика от воздействия магнитного поля.

Электромагнитные излучения, воздействуя на организм человека в дозах, превышающих допустимые, могут явиться причиной профессиональных заболеваний. В результате возможны изменения нервной, иммунной, сердечно-сосудистой, половой и других систем организма человека.

В процессе длительного пребывания в зоне действия электромагнитных полей наступают преждевременная утомляемость, сонливость или нарушение сна, появляются частые головные боли. При систематическом облучении наблюдаются стойкие нервно-психические заболевания, изменение кровяного давления, замедление пульса, трофические заболевания (выпадение волос, ломкость ногтей). При этом наблюдается вялость, снижение точности рабочих движений, возникновение болей в сердце.

При анализе преобразований электрической энергии при сварке существует три источника электромагнитных полей, способных оказать биологическое воздействие на сварщика:

- процессы в источнике питания электрической дуги сварочным током;
- процессы в сварочной цепи, включая электрическую дугу;
- процессы в устройствах для возбуждения или поддержания устойчивости сварочной дуги (осцилляторах и генераторах импульсов).

Магнитное поле как частный случай электромагнитного поля возникает при дуговой сварке и зависит от её режимов, определяющих характер переноса металла через дуговой промежуток, и от типа источника питания. Оно воздействует на жизненно важные органы сварщика, вы-

полняющего работы в непосредственной близости от сварочного аппарата и держащего токоведущий кабель.

Санитарными нормами устанавливаются предельно допустимые уровни (ПДУ) магнитных полей. Так, при 8-часовой работе ПДУ магнитного поля составляет 8 кА/м (10 мТл), а при 1-часовой работе – 16 кА/м (20 мТл).

Для проведения исследований магнитных полей в зоне сварки в качестве измерительного преобразователя выбран датчик Холла в составе магнитометра ИОН-3. Напряжение на выходе датчика Холла пропорционально индукции измеряемого поля, а не производной от индукции по времени, как это имеет место, например, в индукционных датчиках.

Диапазон измерения индукции магнитного поля В 0,01–200 мТл разбит на поддиапазоны: 0,01–20,0 мТл; 0,1–200 мТл. Предел допустимых погрешностей: 0,03 мТл ± 5 %, что обеспечивает соответствующую точность запланированных исследований.

Исследование магнитных полей в рабочей зоне сварщика производили на различном расстоянии от токоведущих частей (рис. 1).

Так как для измерений использовался компонентный датчик, то в каждой точке пространства измерялись три составляющих вектора магнитной индукции с последующим нахождением величины поля по формуле

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}, \quad (1)$$

где B_x^2 , B_y^2 , B_z^2 – составляющие вектора

магнитной индукции.

Для измерения амплитудных значений переменных магнитных полей использовался универсальный импульсный осциллограф С1-70, подключаемый к выходу магнитометра. Прибор позволяет исследовать формы периодических и

импульсных электрических сигналов в диапазоне частот периодических сигналов от 0 до 20 МГц, параметры импульсов длительностью от 0,1 мкс до 0,5 с с частотой следования от 200 Гц до 500 кГц.

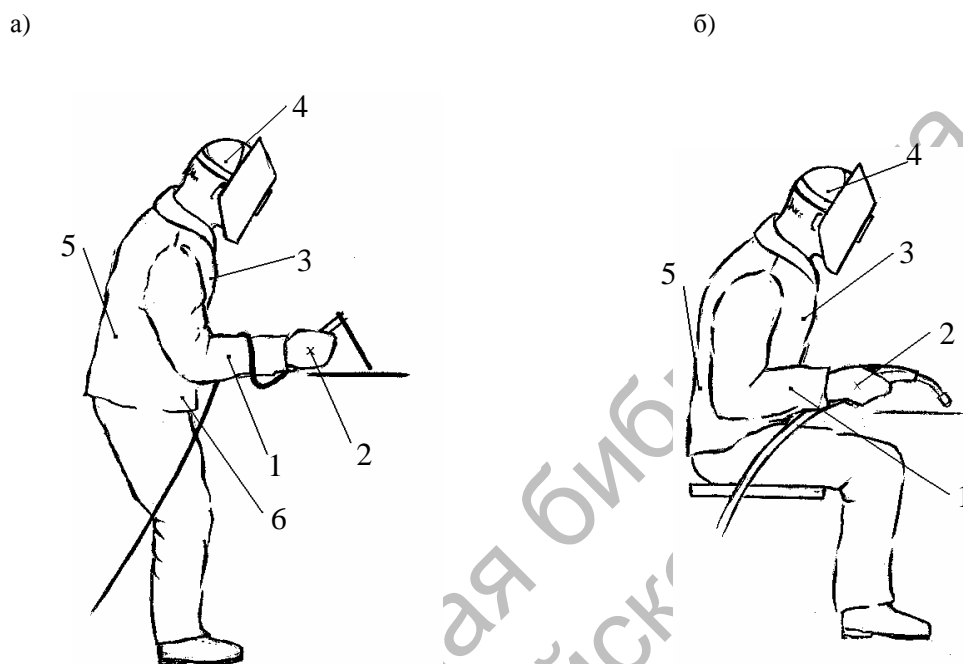


Рис. 1. Схема измерений магнитной индукции и действие нагрузок при дуговой сварке: а – ручная дуговая сварка в положении стоя; б – сварка в защитных газах в положении сидя; 1 – установка датчика на предплечье; 2 – расположение датчика на внутренней поверхности кисти; 3 – расположение датчика в зоне сердца; 4 – размещение датчика в области головного мозга; 5 – положение датчика в области почек; 6 – датчик в области репродуктивных органов

Запись формы магнитного поля в зоне дуговой сварки производили с помощью самописца. Самопишущий быстродействующий прибор типа Н348 является чувствительным прибором, позволяющим регистрировать сигналы в статическом и динамическом режимах.

При сварке плавящимся электродом в защитных газах используется три вида источников питания тока дуги:

- источники постоянного тока с трансформируемыми преобразователями энергии и выпрямителями;

- источники питания импульсного типа, преобразовывающие переменный ток в унipoлярные импульсы частоты, кратной частоте питания 50 Гц;

- источники инверторного типа с частотой преобразования порядка 100 кГц.

Источники первого типа дают низкочастотные поля небольшой напряженности, как правило, экранируются (поле в рабочей зоне небольшое, на порядок меньше ПДУ).

Источники второго типа отличаются достаточно высокой скважностью импульса и большой амплитудой тока, возбуждающего электромагнитные поля относительно невысокой частоты, но напряженность в импульсе высокая, между тем магнитные поля вблизи тела сварщика могут превосходить ПДУ.

Для исследования проведения про-

цессов сварки на постоянном токе выбран выпрямитель сварочный типа ВДУ–506. Он предназначен для комплектации сварочных автоматов и полуавтоматов однопостовой механизированной сварки в среде углекислого газа и под флюсом, а также для сварки порошковой проволокой, для ручной дуговой сварки штучными электродами.

В качестве представителя инверторных источников исследовался выпрямитель Caddy–250. Он является транзисторно-управляемым источником питания, предназначен для сварки на постоянном токе большинства малоуглеродистых, легированных, нержавеющей сталей и чугуна, позволяет выполнять ручную дуговую сварку (ММА), а также сварку неплавящимся электродом в среде аргона (TIG) с возбуждением дуги методом касания и отрыва.

Наибольшее распространение при расчёте электромагнитных полей получили численные методы. Преимущества метода конечных элементов (МКЭ) по сравнению с другими численными методами широко известны [1]. Конечно-элементный подход позволяет рассматривать неоднородные анизотропные тела нерегулярной геометрической структуры при различных граничных условиях и внешних воздействиях. МКЭ отличает алгоритмичность вывода разрешающих уравнений, которые в итоге приводятся к системе алгебраических уравнений высокого порядка с симметричной редкозаполненной матрицей. Для решения систем уравнений МКЭ использованы современные прямые методы (Гаусса и его модификации, факторизации и т. д.) и итерационные (Гаусса-Зейделя, сопряжённых градиентов, верхней релаксации и т. д.).

В задачах расчёта метод приводит к системе уравнений, минимизирующих потенциальную энергию системы. Такая реализация метода позволяет приспособить его для решения самых разнообразных задач, включая проблемы электромагнетизма.

Наиболее прогрессивным программным обеспечением, осуществляющим

электромагнитный расчёт методом конечных элементов, в настоящее время является COSMOS/M [2]. COSMOS/M – это построенная по модульному принципу автономная система анализа МКЭ.

Магнитная проницаемость областей, занятых воздухом, принималась $\mu = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м. Магнитная проницаемость защитного экрана определяется нелинейной зависимостью

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 \cdot H}, \quad (2)$$

где магнитная индукция задаётся следующим образом:

$$B(H) = k B_s^\infty \frac{H}{H_c^\infty}, \quad (3)$$

где k – безразмерная постоянная, $0 < k < 1$; B_s^∞ – намагниченность насыщения; H_c^∞ – коэрцитивная сила предельного цикла.

$$B(H) = B_s^\infty \left[1 - (1 - k) \exp\left(-\frac{k}{1 - k} \frac{H - H_c^\infty}{H_c^\infty}\right) \right] \quad (4)$$

для $H \geq H_c^\infty$.

При ручной дуговой сварке открытыми электродами и механизированной сварке в защитных газах токи составляют 70–500 А. Токоподводящий провод или шланг с проводом при механизированной сварке располагается близко к телу сварщика. В токоподводящем проводе, находящемся в положении, параллельном руке, возникает постоянное магнитное поле, воздействующее на кисть и предплечье. Поэтому была построена модель области токоведущего кабеля, которая содержит 233 узловые точки и 224 конечных элемента типа MAG2D. Граница нулевого магнитного потенциала располагается на расстоянии 0,5 м от кабеля.

В результате расчета были получены следующие картины распределения магнитной индукции (рис. 2).

MAGNETIC Step=20

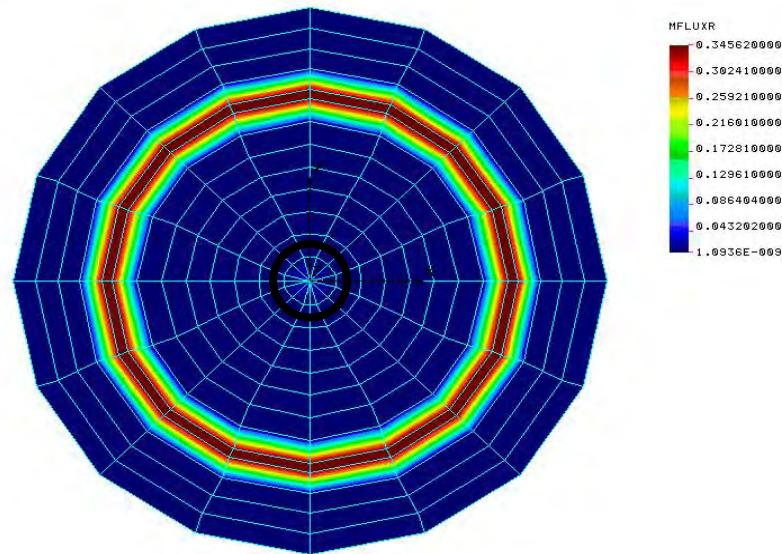


Рис. 2. Картина распределения магнитной индукции в области витка из токоведущего кабеля

При намотке токоподводящего провода на руку величина магнитных полей существенно увеличивается. Магнитное поле в этом случае способно взаимодействовать с биологическими жидкостями, обладающими определенной теплопроводностью (кровью и плазмой). В результате в месте расположения витка появляется дополнительный насос.

Направление перекачки жидкости этим насосом зависит от полярности тока. В результате длительного воздействия магнитогидродинамического насоса может возникнуть нарушение крове- и лимфообмена в руке. Наряду с непосредственным действием на ткани магнитного поля, это вызывает боль и онемение в кисти, предплечья и плече, часто замечаемые сварщиками. Следовательно, требуется исследовать распределение напряженности и индукции электромагнитного поля в руке сварщика при намотанном токоведущем кабеле. Для этого построена универсальная модель расчета, для которой в одном случае рука сварщика не защищена экраном, а в другом – используется экранирующая вставка.

Модель магнитного расчета витка из токоведущего кабеля содержит 157 узловых точек и 188 конечных элементов типа MAG2D. Граница нулевого магнитного потенциала располагается на расстоянии 0,5 м от центра витка (рис. 3).

Наибольшее влияние на рабочего, осуществляющего дуговую сварку, оказывает магнитное поле от токоведущего кабеля. Его распределение представлено на рис. 4.

Из полученных зависимостей следует, что безопасным расстоянием от токоведущего кабеля до жизненно важных органов сварщика являются расстояния 0,1; 0,25 и 0,35 м при токах 200, 300 и 400 А соответственно. При кратковременной работе в течение 1 ч превышение ПДУ может происходить на расстоянии до 0,15 м только на сварочном токе около 400 А.

Использование экранирующих вставок в спецодежде сварщика существенно снижает величину напряженности поля и тем самым защищает сварщика от воздействия магнитных излучений.

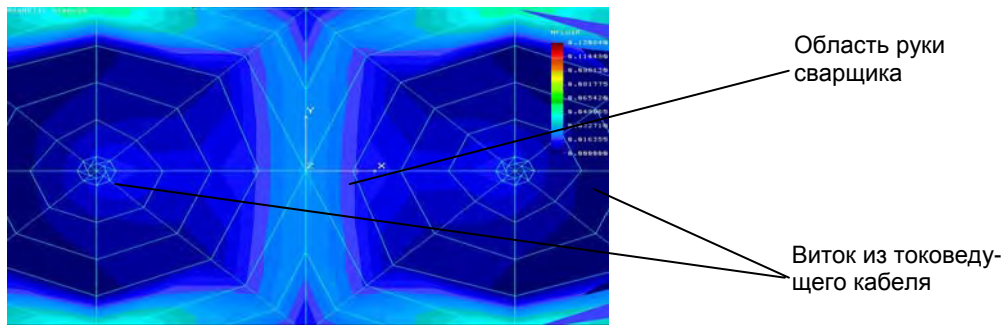
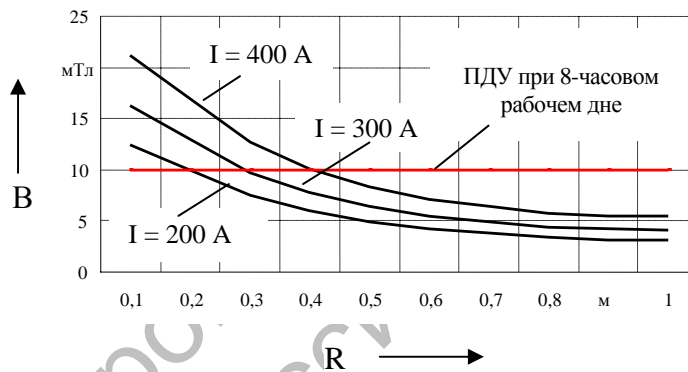


Рис. 3. Картина распределения магнитной индукции в руке сварщика

а)



б)

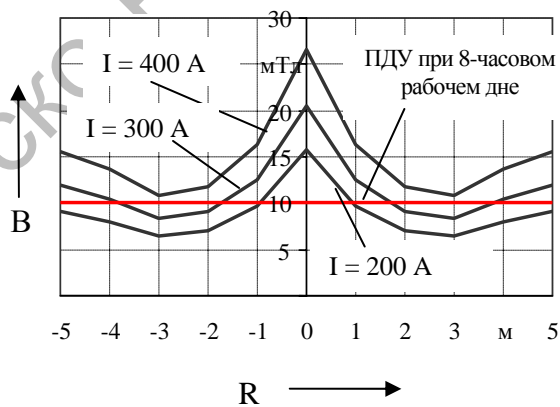


Рис. 4. Распределение индукции магнитного поля: а – в области токоведущего кабеля при дуговой сварке; б – в области витка из токоведущего кабеля

Результаты расчёта магнитных полей в центре наматываемого на руку витка из токоведущего кабеля свидетельствуют о том, что при работе в течение смены такой прием приводит к превышению ПДУ на токах до 200 А. При кратковременной работе в течение часа намотка витка из кабеля на руку не приводит к превышению ПДУ для сварочного тока до 400 А.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что индукция поля вблизи корпуса выпрямителя ВДУ-506 при токах до 400 А составляет 620–890 А/м, что на порядок ниже ПДУ. Это связано с тем, что выпрямитель экранируется металлическим корпусом.

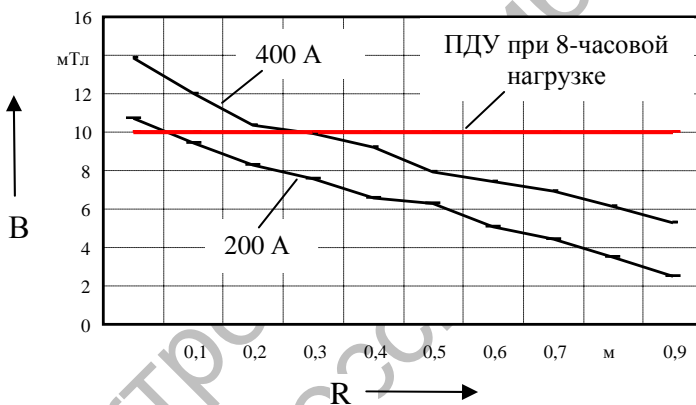
Поля, измеренные вокруг источни-

ка Caddy-250, выполненного в пластмассовом корпусе, показали превышение ПДУ магнитного поля более чем в 1,5 раза. Это свидетельствует о необходимости использования металлических экранов для снижения уровней магнитной индукции.

Наибольший интерес представляет исследование магнитных полей в области токоведущего кабеля источников ВДУ-506 и Caddy-250 на различных режимах сварки.

На рис. 5, а представлено распределение индукции магнитного поля в области токоведущего кабеля при работе от источника ВДУ-506 на токах 200 и 400 А при ПДУ 10 мТл.

а)



б)

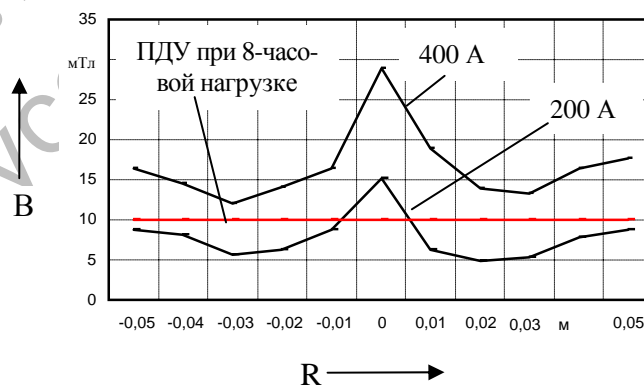


Рис. 5. Распределение индукции магнитного поля: а – в области токоведущего кабеля от ВДУ-506; б – в области витка из токоведущего кабеля для ВДУ-506

При постоянной работе сварщика в течение смены превышения ПДУ индукции магнитного поля не наблюдается на расстоянии более 0,05 м для тока 200 А и более 0,25 м для тока 400 А соответственно. Между тем токоведущий кабель, как правило, может располагаться гораздо ближе к телу сварщика. Некоторые сварщики используют при работе намотку кабеля на руку с целью облегчения его удержания.

На рис. 5, б представлено распределение индукции магнитного поля в зоне витка из токоведущего кабеля. Результаты исследования показывают, что превышение ПДУ в центре витка наблюдается для токов от 200 А. Это, в свою очередь, свидетельствует о нецелесообразности намотки кабеля на руку при работе. Таким образом, необходимо отказаться от данного приема в сварке либо экранировать рукав спецодежды сварщика защитным материалом.

Источники инверторного типа излучают поле высокой частоты и достаточной индукции. Наши замеры индукции поля в рабочей зоне источника тока Caddy–250 в пластмассовом корпусе показали ее превышение ПДУ в зоне сварки. При использовании источников такого же типа с экранирующими стальными кожухами напряженность поля существенно снижается до ПДУ.

Основная частота возбудителя горения дуги типа осциллятор составляет 100 кГц, магнитное поле достаточно большое, сильно мешает радио- и телеприему, однако не превышает ПДУ. Устройство для поддержания горения дуги импульсного типа, как показали проведенные замеры, дают небольшую индукцию поля до 0,4 ПДУ вблизи корпуса.

При сварке в углекислом газе проволоками любого диаметра выявляются два вида переноса металла, характерные для оптимальных режимов: область режимов сварки с периодическими замыканиями дугового промежутка и область капельного переноса без коротких замыканий. При сварке в смеси $Ar + CO_2$ область режимов сварки с короткими замыканиями дугового промежутка отсутствует.

Имеется область сварки с капельным переносом и область сварки со струйным переносом. Значения критических токов перехода от капельного перехода к струйному в этом случае достаточно высоки.

Осциллограмма тока инверторного источника питания Caddy–250, представленная на рис. 6, позволяет выделить участок осциллограммы, отвечающий за активный процесс сварки. Колебания тока незначительны, поэтому зафиксировать их сложно.

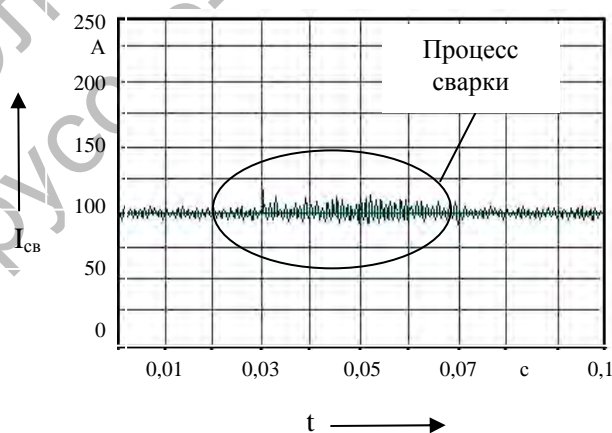


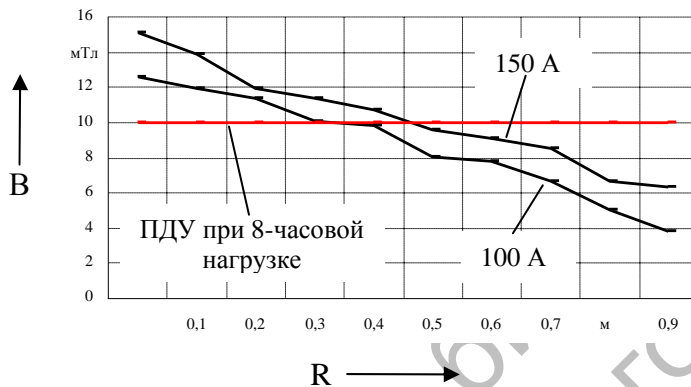
Рис. 6. Осциллограмма тока инверторного источника питания Caddy–250

На рис. 7 представлено распределение индукции магнитного поля в области токоведущего кабеля при работе от источника Caddy-250 на токах 100 и 150 А.

Рис. 7, а показывает, что при постоянной работе сварщика на источнике Caddy-250 небезопасным для него является расстояние менее 0,3 м, если подается сварочный ток 100 А и менее 0,4 м, если сва-

рочный ток равен 150 А. На рис. 7, б описано распределение индукции магнитного поля в зоне витка из токоведущего кабеля при использовании Caddy-250. Результаты исследования показывают, что превышение ПДУ в центре витка токоведущего кабеля наблюдается как для тока 100 А, так и для тока 150 А.

а)



б)

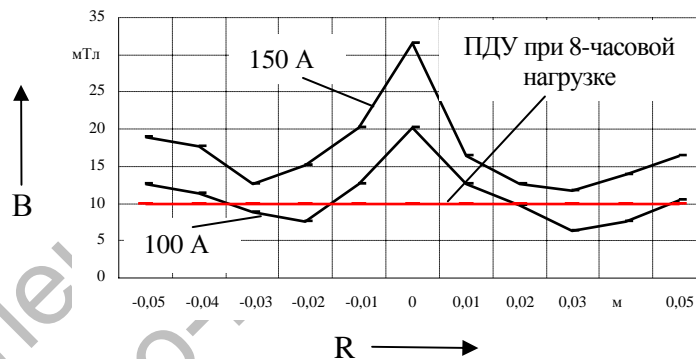


Рис. 7. Распределение индукции поля: а – в области токоведущего кабеля для Caddy-250; б – распределение индукции поля в области витка из токоведущего кабеля для Caddy-250

Исследования показали, что при работе на токах более 200 А и питания дуги от обычного источника, а также при использовании инверторных источников индукция поля в области руки, предплечья и грудной клетки сварщика может превосходить ПДУ, равный 10 мТл, а в некоторых случаях это превышение двукратно. Результаты исследований наглядно

демонстрируют опасность, связанную с намоткой кабеля на руку, и необходимость применения специальных средств защиты.

На основании исследований выявлены зоны напряженности магнитного поля, превосходящего ПДУ в области расположения жизненно важных органов сварщика. В связи с этим наиболее

подвержены излучению магнитного поля сердце, печень, репродуктивные органы, рука с электрододержателем или горелкой.

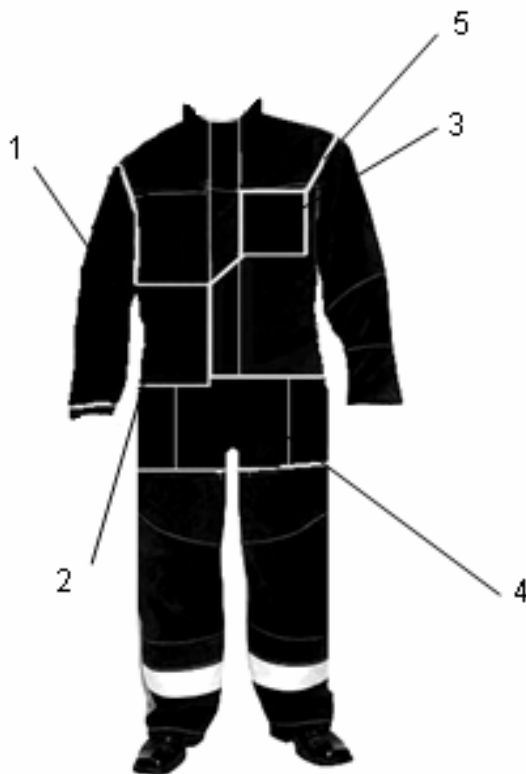
Разработана и запатентована новая конструкция спецодежды сварщика, содержащая, в отличие от существующих вариантов, защитные экранируемые вставки.

Для защиты сварщика от магнитных полей использованы защитные экраны, выполненные из ферромагнитных материалов (железо или никель). Экраны выполняются в виде сетки из многожильной ферромагнитной проволоки, образующей замкнутый контур с шагом 10 мм, состоящий из проволок диаметром 0,05 мм и толщиной плетения 0,5–1 мм или из ферромагнитных пленок.

Конструкция костюма предусматривает защитный экран, который вшивается в

защитный костюм сварщика в области расположения жизненно важных органов, а также плеча и предплечья руки, держащей сварочную горелку. В области сердца расположен защитный экран шириной 20–35 см и длиной 30–55 см, в раструб рукава рабочей руки вшит экран длиной 650–700 см и шириной 25–35 см в зависимости от размера одежды рабочего-сварщика. Данные параметры защитных экранов оптимальны для выполнения поставленной задачи.

Лучшим из разработанных костюмов по результатам испытаний является костюм с защитными вставками в области сердца, руки, почек, печени и репродуктивных органов [4]. Общий вид представлен на рис. 8.



- 1 – экран, вшитый в рукав куртки
- 2 – экран, вшитый в область печени и почек
- 3 – экранирующая накладка, защищающая сердце
- 4 – экранирующая накладка, защищающая репродуктивные органы
- 5 – замкнутый ферромагнитный контур, соединяющий экраны между собой

Рис. 8. Схема расположения защитных экранирующих накладок

Результаты исследований показали, что использование на производстве такого костюма снижает воздействие маг-

нитных полей на организм рабочего с 29 до 1,5 мТл.

Заключение

1. Индукция и характер изменения во времени магнитного поля, генерируемого сварочным током и электрическими процессами в его источнике при дуговой сварке, зависят от режимов сварки, определяющих характер переноса металла через дуговой промежуток, и от способа преобразования энергии в источнике тока. При питании дуги током более 200 А и от источников постоянного тока при использовании инверторных источников при силе тока сварки более 100 А магнитная индукция возле руки, предплечья и грудной клетки превосходит ПДУ, в связи с чем требуется специальная защита сварщика путем экранирования руки, держащей электрододержатель, и органов грудной клетки. Такая защита может быть обеспечена при использовании костюма сварщика с экранирующими ферромагнитными вставками, экранированием источника тока, сварочного кабеля и сварочной горелки.

2. Использование приема сварки, при котором сварщик ручной или полуавтоматической сварки для облегчения работы наматывает сварочный кабель на руку, приводит к тому, что в зоне кисти

и предплечья руки напряженность магнитного поля превосходит ПДУ в 3 раза. Такое поле оказывает физиологическое воздействие на руку, вызванное возникновением дополнительного магнитодинамического насоса в ее сосудах, вследствие чего к концу рабочей смены возникает ощущение онемения и болей в руке, исчезающих только спустя несколько часов после окончания работы. Такой прием удержания сварочного кабеля должен быть запрещен инструкциями по охране труда сварщика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Секулович, М. Метод конечных элементов / М. Секулович. – М. : Стройиздат, 1993. – 661 с.
2. Лашкари, М. Руководство по эксплуатации COSMOS / М / М. Лашкари. – Санта Моника, США, 989. – 326 с.
3. Харчевникова, Е. А. Магнитные поля в рабочей зоне сварщика и средства защиты от их воздействия / Е. А. Харчевникова, С. В. Болотов // Сварка и родственные технологии. – № 8. – 2006. – С. 108.
4. Пат. 8811 С 1 ВУ, МКИ⁷ А 11 D 13/00. Защитная одежда сварщика / С. К. Павлюк [и др.]. – № а 20040709 ; заявл. 27.07.04 ; опубл. 28.02.06.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 07.02.2008

E. A. Kharchevnikova, S. V. Bolotov
Magnetic fields at welding and
protection against their influence

On the basis of theoretical and experimental researches of magnetic fields in the zone of a workplace of the welder safe distances from current carrying parts of a welding source at various modes of welding have been defined. Protection means of the welder from magnetic field influence have been developed.