

УДК 621.791.

Сітніков Борис Валентинович, канд. техн. наук, sitnikovboris@mail.ru.

Барташ Светлана Николаївна, канд. техн. наук, svetlana.bartash@yandex.ua

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна. Вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002

**ПРО ФОРМУВАННЯ ШВА ПРИ ЗВАРЮВАННІ НА ВАЗІ ПОПЕРЕЧНИМ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ**

*Наведено відомості про формування шва при зварюванні на вазі поперечним магнітним полем які можуть бути використані для підвищення якості зварних з'єднань, виконуваних вольфрамовим електродом в інертних газах.*

**Ключові слова:** зварювання на вазі, вольфрамовий електрод, аргон, шов, провисання, зварювальний струм, рідкий метал, поперечне магнітне поле, дуга, пристрій.

Ситников Борис Валентинович, канд. техн. наук, sitnikovboris@mail.RU.

Барташ Светлана Николаевна, канд. техн. наук, svetlana.bartash@yandex.ua

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина. Ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

**О ФОРМИРОВАНИИ ШВА ПРИ СВАРКЕ НА ВЕСУ ПОПЕРЕЧНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

*Приведены сведения о формировании шва при сварке на весу поперечным магнитным полем которые могут быть использованы для повышения качества сварных соединений, выполняемых вольфрамовым электродом в инертных газах.*

**Ключевые слова:** сварка на весу, вольфрамовый электрод, аргон, шов, провисание, сварочный ток, жидкий металл, поперечное магнитное поле, дуга, устройство.

Sitnikov Boris Valentinovich, Cand. Sc. (Eng.), sitnikovboris@mail.RU.

Bartash Svetlana Nikolaevna, Cand. Sci. (Eng.), svetlana.bartash@yandex.ua

National technical University is the "Kharkov polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine. Frunze st., 21, Kharkov, Ukraina, 61002

**ABOUT FORMATION OF THE WELD WHEN WELDING ON WEIGHT OF THE TRANSVERSE MAGNETIC FIELD**

*Provides information about the formation of the weld when welding on the weight of the transverse magnetic field which can be used to improve the quality of welds performed by a tungsten electrode in inert gases*

**Keyword:** welding on weight, tungsten electrode, argon, seam, sagging, welding current, liquid metal, transverse magnetic field, the arc device.

**Общая постановка проблемы**

В общем объёме работ по производству сварных металлоконструкций сварка на весу занимает значительную часть и ответственное место (корневой шов трубопроводов, завершающий шов закрытых полостей и т.п.). В ряде случаев применение сварки на весу существенно упрощает процесс. Однако, при этом, возрастает опасность протекания жидкого металла, образования прожогов и чрезмерного повисания металла в корне шва. Помимо нарушения герметичности и ухудшения прочностных характеристик изделий, наличие указанных дефектов снижает коррозионную стойкость сварных соединений и может приводить к коррозионному растрескиванию в месте перехода от основного металла к проплаву. При сварке стыков трубопроводов, кроме уменьшения проходного сечения, существенным является и то, что в месте перехода от основного металла ко шву скапливаются осадки продуктов, транспортируемых по трубопроводу, которые способствуют усиленной коррозии шва. Поэтому разработка способов, позволяющих повысить качество формирования шва при сварке на весу, остаётся одной из актуальных проблем.

**Анализ проведенных исследований**

Для получения стыковых швов без прожогов с допустимой высотой провисания металла в корне шва, увеличения толщины свариваемых листов за один проход и повышения производительности процесса сварки используют различные способы,

удерживающие жидкий металл сварочной ванны. Силы поверхностного натяжения, удерживающие жидкий металл при сварке на весу, ограничены. Поэтому, для снижения величины провисания металла в корне шва, сварку выполняют на минимальных режимах, обеспечивающих небольшой объем жидкого металла. При сварке деталей толщиной 3–4 мм и более приходится делать разделку кромок.

Изменением состава газа, контактирующего с жидким металлом и применением различных шлакообразующих компонентов можно лишь незначительно увеличить силы поверхностного натяжения [1]. Более существенного увеличения удерживающих сил поверхностного натяжения, толщины свариваемого металла за один проход и скорости сварки можно достичь за счет применения концентрированных источников тепла. Однако качество сборки изделия, колебание режима сварки, точность направления электрода по стыку ограничивают применение этих методов.

Применение импульсных методов сварки позволяет получить форму проплава близкую к сферической. Силы поверхностного натяжения, в этом случае, достигают своего максимума. При всех прочих равных условиях, провисание жидкого металла под действием веса сварочной ванны и давления дуги должно быть значительно меньше, чем при сварке дугой постоянного действия [2].

Сварка на подкладках обеспечивает значительное увеличение толщины изделий, свариваемых за один проход. Но использование подкладок ограничивается необходимостью доступа к обратной поверхности шва и невозможностью регулирования высоты провисания шва в процессе сварки [1].

Формирование шва за счет создания перепада давлений на наружной и внутренней сторонах сварочной ванны позволяет получать любую высоту провисания шва, в том числе и при сварке изделий, не имеющих доступа к обратной стороне шва. Однако высокие требования к качеству сборки стыка, необходимость плотного прилегания камеры к поверхности стыка, налагают ограничения на применение этого способа [1].

Для удержания сварочной ванны и получения швов заданной геометрической формы, без резкого перехода от основного металла ко шву, увеличения толщины свариваемых деталей за один проход и повышения производительности дуговых способов сварки, представляет значительный интерес использование внешних магнитных полей. Из – за отсутствия непосредственного контакта устройств для магнитного удержания жидкого металла со свариваемыми заготовками, этот метод нечувствителен к наличию превышения кромок, кривизне заготовок и другим факторам, затрудняющим применение прокладок, камер и т. п. [3].

Магнитное удержание жидкого металла сварочной ванны является частным случаем применения электромагнитных полей для управления весом проводящих тел. Оно осуществляется путем создания в расплаве ванны под действием внешних высокочастотных либо постоянных поперечных магнитных полей сил, компенсирующих гравитационные.

В первом случае магнитное поле создается одним или несколькими индукторами, располагаемыми под швом или по обе стороны от него [4]. В результате взаимодействия высокочастотного внешнего магнитного поля с полем наведенных им вихревых токов в расплаве, частицы жидкой сварочной ванны находятся во взвешенном состоянии. Поэтому случайные колебания давления дуги, потока защитного газа вызывают перемещение всего объема ванны. Эти колебания мало сказываются на формировании верхней поверхности шва, хорошо прогретой дугой, тогда как на нижней поверхности, кристаллизующейся быстрее, образуются неровности. При реализации приведенного способа имеются определенные трудности, обусловленные фазовым сдвигом между вихревыми токами и наведенной в изделии ЭДС, а также необходимостью применять многосекционные индукторы, что усложняет конструкцию устройств для удержания ванны индукционным методом.

Другая группа способов магнитного удержания сварочной ванны основана на принципе компенсации гравитационных сил в ванне пондемоторными, возникающими при взаимодействии внешнего поперечного магнитного поля с радиальной составляющей тока сварочной ванны. Питание обмотки электромагнита производят постоянным или переменным током промышленной частоты непосредственно от дуги или от внешнего источника [1, 3, 5].

Применение поперечных магнитных полей для удержания сварочной ванны осложняется побочными эффектами, связанными с неравномерным растеканием тока по ванне и возмущающим действием поля на дугу. Это приводит к ухудшению формирования шва, снижению проплавливающей способности дуги и вынуждает применять более сложные устройства, что затрудняет маневренность сварочного инструмента и ограничивает возможность метода в целом [3]. Однако, несмотря на определенные трудности при разработке достаточно компактных устройств, для получения внешних поперечных магнитных полей, их использование позволяет существенно изменять условия формирования швов, предупреждать провисание жидкой части ванны и повышать производительность сварки.

### Формирование целей статьи

**Цель** настоящей работы является выяснение возможности формирования шва при сварке на весу поперечным магнитным полем, которое генерируют, пропуская часть сварочного тока по прямолинейному проводнику, расположенному в плоскости свариваемого стыка, над хвостовой частью сварочной ванны, перпендикулярно электроду.

### Основной материал

Исследование возможности формирования шва при сварке на весу поперечным магнитным полем было проведено при автоматической сварке стыковых швов с полным проплавлением кромок образцов из стали 12X18H10T толщиной 3 мм. Сварку выполняли на постоянном токе прямой полярности в нижнем положении вольфрамовым электродом марки ЭВЛ (ГОСТ 23949-80) диаметром 4 мм в аргоне высшего сорта (ГОСТ 10157-79) на автомате АДСВ-2М. Выбор самого материала и его толщины был обусловлен возможностью сравнения полученных результатов с имеющимися данными по сварке стали типа 18-8 в квадрупольном магнитном поле [1]. Величину сварочного тока устанавливали из условия одинаковой ширины проплавления с обратной стороны шва. Расход защитного газа во всех опытах оставался постоянными и был равен 11 л/мин. Свариваемые образцы были подвергнуты специальной обработке по их очистке. Газоподводящую аппаратуру, шланги и сварочную горелку тщательно промывали спиртом перед началом сварочных работ и регулярно очищали и промывали в процессе работы.

Принципиальная схема устройства для сварки с формирования шва поперечным магнитным полем<sup>1</sup> приведена на рис. 1. Устройство содержит токоподводящую втулку 1, расположенную соосно со сварочным электродом 2, прямолинейный проводник 3, через который пропускают часть сварочного тока в направлении тока протекающего в хвостовой части сварочной ванны 5 и источник питания ИП сварочной дуги 4, который подключается к свариваемому изделию 6 и вольфрамовому электроду 1 через сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ . При зажигании дуги 4 на свариваемом изделии 6 ток  $I_p$ , который является частью сварочного тока  $I_{св}$  и определяется соотношением сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ , протекая по прямолинейному проводнику 3, создает магнитное поле взаимодействующее со сварочным током  $I_{св}$ , протекающим через жидкий металл хвостовой части сварочной ванны 5, что должно приводить к возникновению в ней электромагнитных сил, направленных вверх (в сторону прямолинейного проводника 3) и, как следствие, к снижению величины ее провисания. Когда  $R_1 \rightarrow \infty$  и по проводнику 3 протекает весь сварочный ток, электромагнитные силы достигают своего максимума и высота провисания металла в корне шва  $h$  должна становиться минимальным.

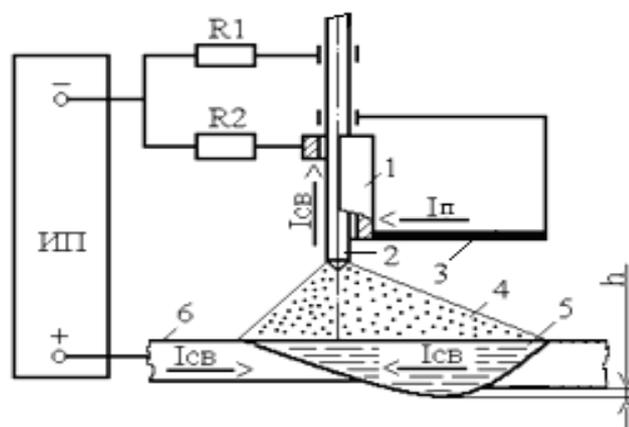
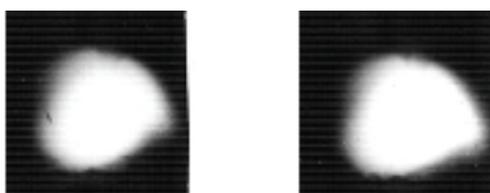


Рис. 1. Схема устройства для формирования шва поперечным магнитным полем

Формирования шва при сварке на весу поперечным магнитным полем, которое генерируют, пропуская часть сварочного тока по прямолинейному проводнику, расположенному в плоскости свариваемого стыка, над хвостовой частью сварочной ванны, перпендикулярно электроду, не осложнялось побочными эффектами, связанными с возмущающим действием поля на дугу (рис. 2).

<sup>1</sup> Патент Украины № 81392



а) б)

Рис.2. Фрагменты скоростной киносъемки дугового промежутка:  $V_{св} = 12$  м/ч ;  $I_{св} = 190$  А;  $U_{д} = 11$  В ; а) -  $I_{п} = 0$ ; б) -  $I_{п} = I_{св}$

Сварка неплавящимся электродом в защитном газе позволяла визуально наблюдать процессы в дуге и сварочной ванне, проектировать их с увеличением на экран, а также кинографировать в отраженном свете [6]. Анализ магнитного поля, созданного в зоне сварки, осуществлялся измерением индукции магнитного поля прибором ИМИ-3 с датчиком Холла, измерением магнитных потоков микровольтампервеберметром Ф-18 и снятием спектров магнитного поля с помощью стальных опилок. Измерения высоты провисания металла в корне шва проводили с помощью инструментального микроскопа при 12-кратном увеличении с точностью до 0,1 мм.

Распределение тока по пластине в зоне сварки проводили путём регистрации интенсивности его магнитного поля по методике приведенной в работе [7]. Эксперименты проводились при сварке пластин из стали 12Х18Н10Т толщиной 3 мм на установке состоящей из следующих основных элементов: источник питания сварочной дуги переменного тока типа ТИР-300Д, магнитная головка, усилитель мощности, осциллограф. Магнитную головку устанавливали на торце вала электродвигателя с обратной стороны шва таким образом, чтобы при её вращении один конец рабочего зазора головки совпадал с осью электрода, а другой описывал окружность в плоскости свариваемой пластины. При таком положении рабочего зазора через магнитопровод головки замыкался магнитный поток, соответствующий величине тока протекающего в зоне сварки, определяемый углом  $\phi$  поворота вала электродвигателя. Выходной сигнал магнитной головки поступал на вход усилителя мощности, а затем записывался с помощью осциллографа. Токосвод к свариваемой пластине осуществлялся с помощью медных полос расположенных по всей длине ее наибольших сторон. Характер распределения тока изучали при

квазиустановившемся процессе сварки, выполняемой вдоль токоподводящих полос по оси пластины.

Результаты проведенных экспериментов показали возможность формирования шва при сварке на весу поперечным магнитным полем, которое генерируют, пропуская часть сварочного тока по прямолинейному проводнику, расположенному в плоскости свариваемого стыка, над хвостовой частью сварочной ванны, перпендикулярно электроду. Из экспериментальных данных, представленных на рис. 3, видно, что с увеличением тока  $I_p$  высота провисания металла в корне шва монотонно уменьшается. Так, при увеличении тока  $I_p$  от 0 до  $I_{св}$ , провисания металла в корне шва, в зависимости от скорости сварки, уменьшается следующим образом: при  $V_{св} = 48$  м/ч с 2,4 до 0,4 мм, при  $V_{св} = 36$  м/ч с 2,0 до 0,3 мм, при  $V_{св} = 24$  м/ч с 1,7 до 0,1 мм, при  $V_{св} = 12$  м/ч с 1,3 до - 0,3 мм. (рис.4). Повышение же скорости сварки, наоборот, способствует увеличению высоты провисания металла в корне шва. Так, при повышении скорости сварки от 12 до 48 м/ч, высота провисания металла в корне шва, в зависимости от тока  $I_p$ , увеличивается следующим образом: при  $I_p = 0$  от 1,3 до 2,4 мм, при  $I_p = 0,2I_{св}$  от 0,7 до 1,7 мм, при  $I_p = 0,4I_{св}$  от 0,2 до 1,1 мм, при  $I_p = 0,6I_{св}$  от 0 до 0,7 мм, при  $I_p = 0,8I_{св}$  от - 0,2 до 0,5 мм, при  $I_p = I_{св}$  от - 0,3 до 0,4 мм.

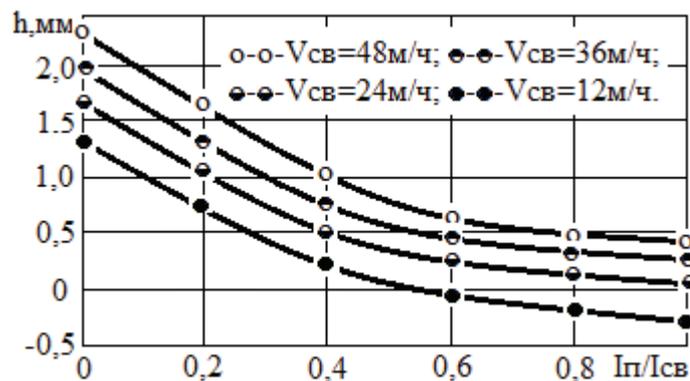


Рис.3. Влияние параметров режима сварки на высоту провисания металла в корне шва



Рис. 4. Макроструктура сварного шва:  $I_{св} = 190$  А ;  $U_d = 11$  В ;  $V_{св} = 12$  м/ч;  $I_p = I_{св}$

Увеличение высоты провисания металла в корне шва с повышением скорости сварки обычно связывают [1] с увеличением силы давления дуги, веса жидкого металла и снижением сил поверхностного натяжения. При сварке с формированием шва поперечным магнитным полем существенным является и то, что повышение скорости сварки приводит к перераспределению тока в зоне сварки.

Зависимости распределения тока по пластине в зоне сварки, характеризуемые отношением  $A(\varphi)/\|A(\varphi)\|$ , где  $A(\varphi)$  – амплитуда наведенной э.д.с. на обмотке магнитной головки при её повороте на угол  $\varphi$ ;  $\|A(\varphi)\| = \max|A(\varphi)|$ ,  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ , от скорости сварки приведены на рис. 5. Как следует из приведенных зависимостей, по мере повышения скорости сварки, неравномерность распределения тока по пластине в зоне сварки увеличивается. Так увеличение скорости сварки с 12 до 48 м/ч приводит к снижению величины  $A(180^\circ)/\|A(\varphi)\|$  от 0,8 до 0,58, что может существенно снизить направленные

вверх объёмные электромагнитные силы и, как следствие, увеличить высоту провисания металла в корне шва.

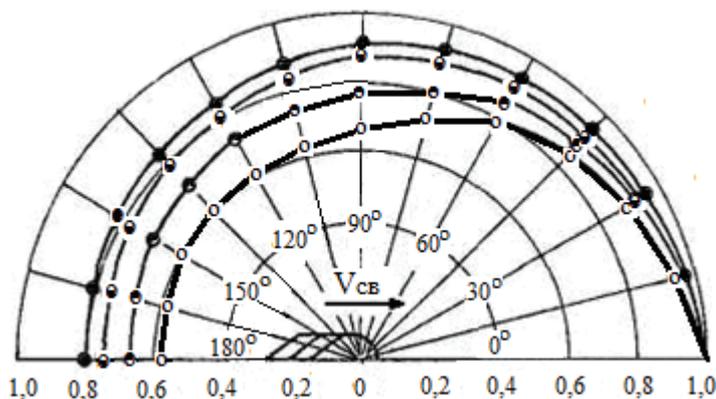


Рис.5. Влияние скорости сварки на распределение тока по пластине в зоне сварки:

● - ● -  $V_{св} = 12$  м/ч; ◐ - ◐ -  $V_{св} = 24$  м/ч; ◑ - ◑ -  $V_{св} = 36$  м/ч; ◒ - ◒ -  $V_{св} = 48$  м/ч

Перераспределение тока по пластине в зоне сварки с повышением скорости сварки, очевидно, связано с изменением температурных полей в свариваемом металле. Уже в ранних исследованиях расплавленных металлов было показано, что тип проводимости в жидких металлах не отличается от типа проводимости в твердом состоянии и обусловлен наличием коллективизированных электронов. Однако у большинства металлов переход из твердого состояния в жидкое сопровождается скачкообразным повышением удельного сопротивления в полтора – три раза [1]. Это явление позволяет говорить о том, что распределение тока по пластине в зоне сварки в значительной степени определяется геометрией сварочной ванны.

Пользуясь расчетами тепловых процессов при сварке [8], оценим степень вытянутости ванны в зависимости от скорости сварки, при  $q/V_{св} = \text{const}$ . Для этого воспользуемся уравнением предельного состояния процесса распространения тепла при нагреве пластин мощным быстро движущимся источником, в соответствии с которым, температура точек, расположенных на оси шва, выразится соотношением

$$T(0, t) = \frac{q}{V_{св} \delta \sqrt{4\pi\lambda c \gamma t}}, \quad (1)$$

где  $q$  – эффективная тепловая мощность дуги;

$\delta$  – толщина пластины;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности;

$c$  – удельная теплоёмкость;

$\gamma$  – плотность.

Полагая  $T(0, t) = T_{пл}$ , из выражения (1) можно определить длительность пребывания металла в жидком состоянии

$$t_{в} = \frac{q^2}{4\pi\lambda c T_{пл}^2 V_{св}^2 \delta^2}, \quad (2)$$

Тогда длина сварочной ванны  $L_{в} = V_{св} \cdot t_{в}$  выразится следующим образом

$$L_{в} = \frac{q^2}{4\pi\lambda c T_{пл}^2 V_{св} \delta^2}, \quad (3)$$

Ширину сварочной ванны  $B$ , согласно [8], можно выразить следующим образом

$$B = \frac{0,484q}{c\gamma T_{пл} V_{св} \delta} \quad (4)$$

Согласно выражениям (3), (4) и  $q/V_{св} = \text{const}$ , степень вытянутости ванны, определяемая отношением её длины  $L_{в}$  к ширине  $B$ , выразится соотношением

$$\frac{L\delta}{B} = \frac{1}{1,94\pi\lambda T_{пл}} \frac{qn}{\delta} VCB \quad (5)$$

Из соотношения (5) следует, что степень вытянутости ванны при заданной толщине металла  $\delta$  и  $q/v_{св} = \text{const}$  пропорциональна скорости сварки.

Увеличение степени вытянутости ванны с повышением скорости сварки, очевидно, должно приводить к тому, что перед дугой, где изотермы сгущаются, концентрация тока увеличивается, а позади дуги, в силу обратного явления, уменьшается, что приводит к снижению электромагнитных сил, удерживающих жидкий металл сварочной ванны и, как следствие, к увеличению высоты провисания металла в корне шва.

### Выводы

1. Использование поперечного магнитного поля, которое генерируют, пропуская часть сварочного тока по прямолинейному проводнику, расположенному в плоскости свариваемого стыка, над хвостовой частью сварочной ванны, перпендикулярно электроду, обеспечивает удержание сварочной ванны и уменьшение высоты провисания металла в корне шва.

2. Эффективность удержания сварочной ванны поперечным магнитным полем с повышением скорости сварки уменьшается, что может быть связано со снижением концентрации тока в хвостовой части сварочной ванны

### Список использованной литературы:

1. Акулов А. И. Удержание жидкого металла сварочной ванны поперечным магнитным полем / Акулов А. И., Рыбачук А. М. //Сварочное производство. – 1972. – № 2. – С. 3–4.
2. Ищенко Ю. С. Методика оценки статического равновесия жидкой ванны при Y-образной разделки кромок / Ищенко Ю. С., Букаров В. А. //Сварочное производство. – 1978. – № 10. – С. 9–13.
3. Черныш В.П. Сварка с электромагнитным перемешиванием/ В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брисман, Г. М. Шеленков – К.: Техніка, 1983. – 127 с.
4. Зворонко Я. П. Дуговая сварка с электромагнитным удержанием сварочной ванны / Зворонко Я. П., Катлер С. М. //Сварочное производство. – 1982. – № 5. – С. 3–4.
5. Чернышов Г. Г. Математическая модель аргонодуговой сварки в квадрупольном магнитном поле / Чернышов Г. Г., Григоренко В. В., Киселёв О. Н., Судник В. А //Сварочное производство. – 1989. – № 8. – С. 31–33.
6. Ильенко Н. А., Исследование процессов сварки при помощи фотокинографирования в отражённом потоке света / Ильенко Н. А., Сидоренко В. Ф., Кусков Б. Ф. //Сварочное производство. – 1978. – № 6. – С. 50–51.
7. Ситников Б. В., Береснева Е. В. О распределении тока в зоне дуговой сварки//Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 3/1 (27). – С. 61–64.

### References:

1. Akulov A. I. Retention of molten metal weld pool of a transverse magnetic field / Akulov, A. I., Rybachuk A. M. //Welding production.– 1972. – No. 2. – P. 3–4.
2. Ishchenko Yu. s. Method of evaluation of static equilibrium of the molten pool with the Y - shaped cutting edges / Ishchenko Yu. s., Bocharov V. A. //Welding production. – 1978. – No. 10. – P. 9–13.
3. Chernysh, V. P. welding with electromagnetic stirring/ V. P. Chernysh, V. D. Kuznetsov, A. N. Briskman, G. M. Shelenkov – K.: Machinery, 1983.– 127 p.
4. Zvoronko J. P. Arc welding with electromagnetic hold the weld pool / Zvoronko J. P., Cutler, S. M. //Welding production.- 1982. - No. 5. – S. 3– 4.
5. Blackburn G. a Mathematical model of TIG welding in the quadrupole magnetic field / Chernyshov G. G., Grigorenko V. V., Kiselev O. N., Sudnik V. A. //Welding production. – 1989. – No. 8. – P. 31–33.
6. Ilyenko N. And., A study of welding processes using photogeneration in the reflected light flux / Ilyenko N. And., Sidorenko V. F., Pieces B. F. //Welding production. – 1978. – No. 6. – P. 50–51.
7. Sitnikov B. V. On the distribution of current in the zone of arc welding / Sitnikov B. V., Beresnev V. E. //East European journal of advanced technologies. – 2007. – № 3/1 (27). – P. 61–64.

Поступила в редакцию 23.05 2015 г.