

СПОСОБЫ СОЗДАНИЯ ВНЕШНИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ

И. В. ПРОТОВОКИЛОВ¹, В. Б. ПОРОХОНЬКО¹, А. Т. НАЗАРЧУК¹, Ю. П. ИВОЧКИН², Д. А. ВИНОГРАДОВ²

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Объединенный институт высоких температур РАН. 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, строен. 2.
E-mail: vortex@iht.mpei.ac.ru

Эффективность использования электромагнитных воздействий для управления формированием соединения при электрошлаковой сварке во многом определяется схемой введения внешних магнитных полей в зону сварки и конструктивными особенностями соответствующих устройств. Цель настоящей работы заключалась в анализе способов создания внешних магнитных полей при электрошлаковой сварке стыковых соединений и оценке их воздействия на расплав сварочной ванны. Рассмотрены основные способы создания в сварочном зазоре продольных и поперечных магнитных полей, приведены принципиальные схемы соответствующих электромагнитных устройств. Показано, что направление и интенсивность электромагнитной силы, действующей на расплав сварочной ванны, прежде всего определяется пространственной ориентацией внешнего магнитного поля по отношению к свариваемому объекту, значением магнитной индукции поля и его частотными характеристиками. Рациональность использования той или иной схемы введения магнитного поля в зазор зависит от параметров сварного соединения и ее необходимо рассматривать отдельно в каждом конкретном случае. Отмечена целесообразность использования магнитных полей, обеспечивающих постоянную (циклическую) перестройку гидродинамической структуры течений в сварочной ванне или создающих вибрацию расплава. В этом направлении перспективно использование импульсных магнитных полей, созданных разрядами конденсаторных батарей на обмотки электромагнита. Показана актуальность разработки новых схем и устройств для создания магнитных полей и источников их питания. Библиогр. 15, рис. 9.

Ключевые слова: электрошлаковая сварка, сварочная ванна, магнитное поле, гидродинамика, электромагнитное воздействие, устройства ввода магнитных полей, магнитная индукция, электромагнитная сила

Электрошлаковая сварка (ЭШС) является одним из наиболее эффективных способов соединения толстостенных изделий и конструкций из различных металлов и сплавов [1–3]. Объемы использования и рациональные области применения ЭШС могли бы быть более значительными, если бы у соединений, выполненных электрошлаковой технологией, не были относительно низкие механические свойства, которые обусловлены грубой, крупнозернистой структурой металла шва и неблагоприятным влиянием термического цикла сварки на металл околосшовной зоны.

Эффективно улучшить эксплуатационные свойства соединений, выполненных ЭШС, можно путем управления гидродинамикой сварочной ванны с помощью внешних магнитных полей. Во многих работах отмечается положительное влияние электромагнитных воздействий на производительность процесса сварки, измельчение структуры металла шва, механические свойства сварных соединений [4–12]. Однако широкое практическое использование полученных результатов в значительной степени ограничивается сложностью достижения в зоне сварки внешних магнитных полей требуемой индукции и громоздкостью соответствующих устройств.

Цель настоящей работы заключалась в анализе способов и конструктивных схем введения внешних магнитных полей в зону сварки при ЭШС стыковых соединений, оценке их влияния на расплав сварочной ванны с учетом возможностей интенсификации электромагнитного воздействия.

Физический механизм электромагнитного воздействия при ЭШС заключается во взаимодействии внешнего магнитного поля со сварочным током, протекающим в расплавах шлаковой и металлической ванн [4]. Вследствие такого взаимодействия в сварочной ванне формируется объемная электромагнитная сила \vec{f}_e , приводящая к силовому воздействию на расплав. Значение и направление действия указанной силы определяются векторным произведением плотности тока в расплаве \vec{j} и индукции внешнего магнитного поля \vec{B} : $\vec{f}_e = \vec{j} \times \vec{B}$. Изменять в широких пределах значение и направление тока сварки без ухудшения стабильности электрошлакового процесса и качества формирования сварного соединения достаточно сложно. Поэтому эффективность использования электромагнитного воздействия прежде всего определяется параметрами внешнего магнитного поля:

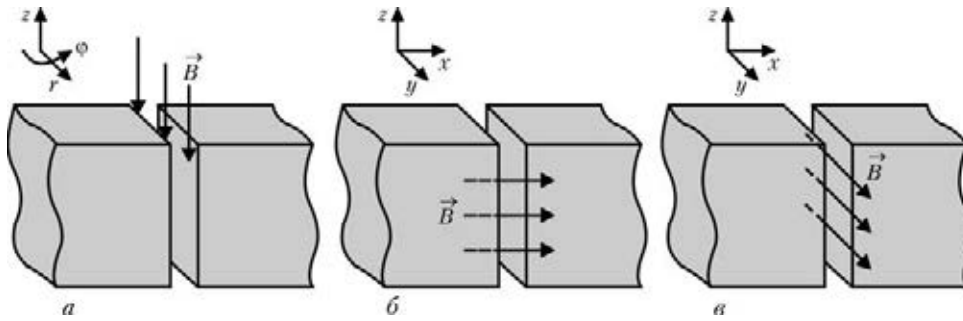


Рис. 1. Варианты введения внешних магнитных полей в зону сварки при ЭШС: *a* — продольное магнитное поле; *б, в* — поперечные магнитные поля

его пространственной ориентацией по отношению к свариваемому объекту, амплитудными и частотными характеристиками.

Следует также отметить, что эффективность введения магнитных полей в зону сварки в значительной степени определяется магнитными свойствами свариваемых изделий. В большинстве случаев более благоприятные условия создаются при сварке немагнитных материалов (титан, алюминий и др.), так как тогда эффект шунтирования магнитного поля в сварочном зазоре окружающими его ферромагнитными массами минимален. Исключения составляют случаи, когда свариваемые детали или элементы оснастки одновременно выполняют функции магнитопровода.

В зависимости от направления вектора индукции магнитного поля, используемые в процессах сварки, разделяют на продольные (вдоль оси электрода) и поперечные (перпендикулярно оси электрода) [4, 5, 13,14] (рис. 1). В свою очередь силовые линии последних могут быть сориентированы перпендикулярно (рис. 1, б) или параллельно (рис. 1, в) свариваемым кромкам.

В условиях ЭШС продольное магнитное поле можно создать соленоидом, расположенным в сва-

рочном зазоре в районе сухого вылета электрода [4, 6, 9] (рис. 2, а). Строго говоря, в данном случае продольное магнитное поле реализуется лишь в средней части соленоида. В сварочную ванну проникает магнитное поле, имеющее, помимо осевой составляющей, еще и радиальную. Таким образом, в цилиндрических координатах (z, r, φ) ток сварки будет иметь составляющие $(j_r, j_z, 0)$, внешнее магнитное поле $(B_z, B_r, 0)$, а электромагнитная сила $\vec{f}_e^z = \vec{j} \times \vec{B} = (0, 0, j_z B_r - j_r B_z)$. Отсюда видно, что вызванная внешним магнитным полем электромагнитная сила будет приводить к движению расплава в горизонтальных плоскостях.

Рассмотренная схема, обеспечивающая локальный ввод магнитного поля в зону плавления электродной проволоки, где плотность тока максимальна, позволяет воздействовать на тепломассоперенос в данной области и управлять формированием и отрывом капель электродного металла. Однако в металлическую ванну проникает лишь незначительное поле рассеяния, что не позволяет воздействовать на структуру металла шва. Кроме того, данная схема создания магнитного поля в зоне сварки в большинстве случаев нетехнологична и сложна при практической реализации, так как размеры магнитной системы ограничены значением сварочного зазора (25...35 мм). Более перспективной представляется схема, когда в зону сварки вводится магнитопровод, а катушка размещена за его пределами (рис. 2, б).

Поперечное магнитное поле, силовые линии которого направлены перпендикулярно свариваемым кромкам (рис. 1, б), можно реализовать с помощью обмоток, охватывающих свариваемые изделия и одновременно выполняющих функции магнитопровода (рис. 3). В декартовой системе координат (x, y, z) (рис. 1, б) электромагнитная сила будет иметь составляющие $\vec{f}_e^z = (0, j_z B_x - j_y B_x)$. Поскольку составляющая тока сварки j_z значительно превосходит составляющую j_y , то можно считать, что основной эффект от воздействия указанного магнитного поля заключается в формировании в расплаве электромагнитных сил, ориентированных вдоль свариваемых кромок (вдоль оси y , рис. 1, б). Если внешнее

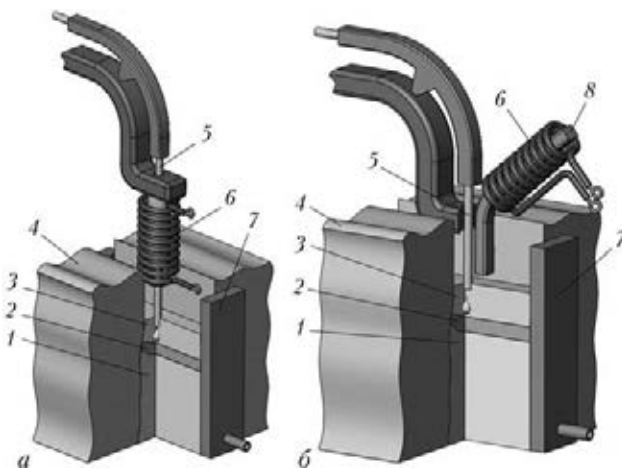


Рис. 2. Схемы введения продольного магнитного поля посредством соленоида, расположенного в зоне сварки (*a*), и стержневого магнитопровода (*б*): 1 — сварной шов; 2 — металлическая ванна; 3 — шлаковая ванна; 4 — свариваемый образец; 5 — проволока; 6 — электромагнитная система; 7 — водоохлаждаемая формирующая планка; 8 — магнитопровод

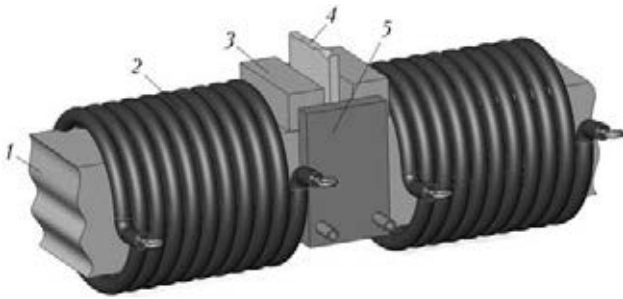


Рис. 3. Схема введения поперечного магнитного поля с помощью катушек, смонтированных на свариваемых изделиях: 1 — свариваемый образец; 2 — электромагнитная система; 3 — выводные планки; 4 — электрод; 5 — водоохлаждаемая формирующая планка

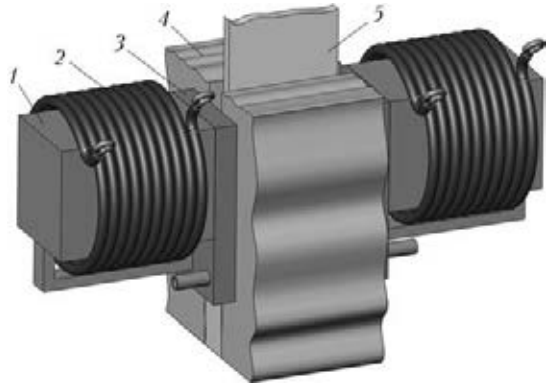


Рис. 4. Схема введения поперечного магнитного поля с помощью электромагнитов со стержневым магнитопроводом: 1 — стержневой магнитопровод; 2 — катушка; 3 — водоохлаждаемая формирующая планка; 4 — свариваемый образец; 5 — электрод

магнитное поле постоянное, а ток сварки переменный, то в ванне создается возвратно-поступательное движение (вибрация) расплава вдоль свариваемых кромок с частотой тока сварки (50 Гц). Указанный эффект может позитивно влиять на теплоперенос в сварочной ванне и измельчение структуры металла шва.

Если ток сварки и магнитное поле переменные (или оба постоянные), то наличие x и z составляющих электромагнитной силы приведет к сложной объемной картине течений расплава [4]. При этом z компонента электромагнитной силы имеет разное направление в двух частях ванны, что приведет к перекоосу свободной поверхности шлаковой ванны. Последний эффект является негативным с точки зрения формирования сварного соединения, так как нарушает симметрию процесса.

Преимущество приведенной схемы создания магнитного поля заключается в достаточности минимального зазора между магнитами, равного сварочному, благодаря чему в зоне сварки удастся создать равномерное магнитное поле с высокими значениями индукции (до 0,4 Тл). Такие мощные магнитные поля позволяют воздействовать на макроструктуру металла шва, измельчая и гомогенизируя ее. Однако очевидно, что данную схему

воздействия сложно реализовать при сварке крупногабаритных изделий и изделий сложной конфигурации, поэтому она может найти применение лишь при сварке компактных конструкций.

Наиболее технологичной и чаще всего применяемой при ЭШС (встречаемой в литературе) является схема введения внешнего поперечного магнитного поля с помощью электромагнитов, расположенных у боковых формирующих устройств [4, 5, 8, 12]. При сварке протяжных стыков предусматривается их перемещение вдоль кромок со скоростью сварки. Сердечники электромагнитов могут быть как стержневой, так и П-образной формы.

Достаточно компактны электромагниты с односердечниковыми сердечниками (рис. 4) [5]. Такие устройства создают преимущественно поле, силовые линии которого перпендикулярны свариваемым кромкам. В данном случае в декартовой системе координат (x, y, z) электромагнитная сила будет иметь составляющие $\vec{f}_e = (-j_z B_y, 0, j_x B_y)$ (см. рис. 1, в), т. е. с учетом того, что $j_z > j_x$, основная компонента электромагнитной силы будет на-

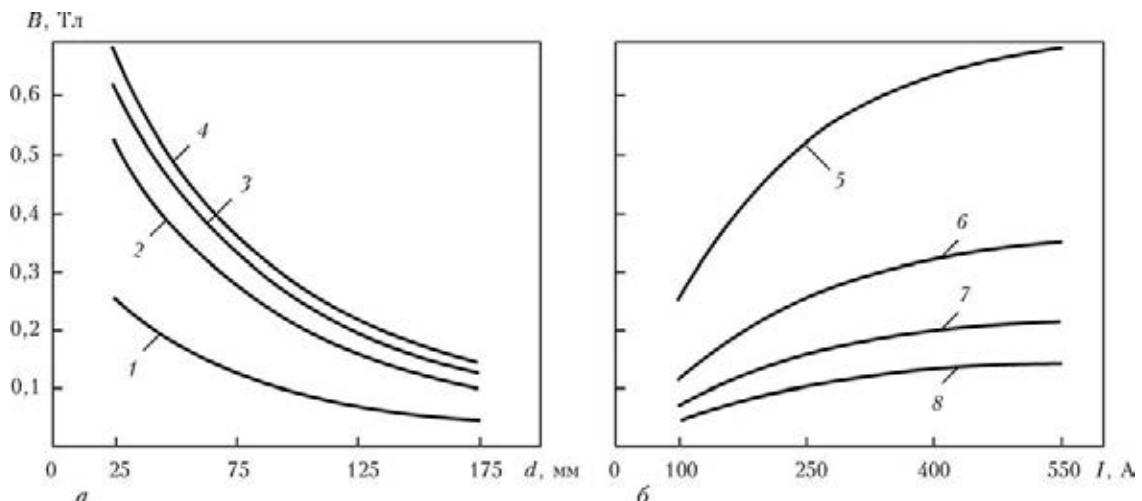


Рис. 5. Зависимости магнитной индукции от зазора d между магнитопроводами (а) и электрического тока I в обмотках электромагнита (б): 1 — $I = 100$ А; 2 — 250; 3 — 400; 4 — 550; 5 — $d = 25$ мм; 6 — 75; 7 — 125; 8 — 175

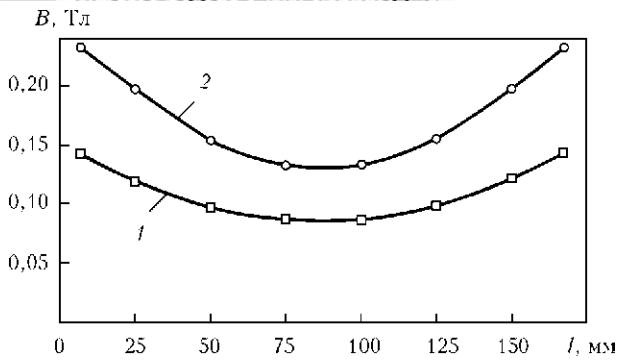


Рис. 6. Распределение магнитной индукции в сварочном зазоре (l — расстояние от свариваемой кромки): 1 — $I = 200$ А; 2 — 400

правлена поперек свариваемых кромок (вдоль оси x , см. рис. 1, в). При использовании постоянного магнитного поля (ток сварки переменный) это приведет к вибрации расплава сварочной ванны поперек свариваемых кромок. Такие возвратно-поступательные движения расплава в двухфазной области могут способствовать дроблению растущих кристаллитов и измельчению структуры металла шва. Поперечная вибрация в сварочном зазоре также увеличивает проплавление свариваемых кромок, что позволяет снижать погонную энергию сварки [4, 10].

Недостатком данного способа введения магнитного поля является его рассеивание вследствие значительного зазора между полюсами электромагнита, которое определяется толщиной свариваемых изделий и водоохлаждаемых формирующих

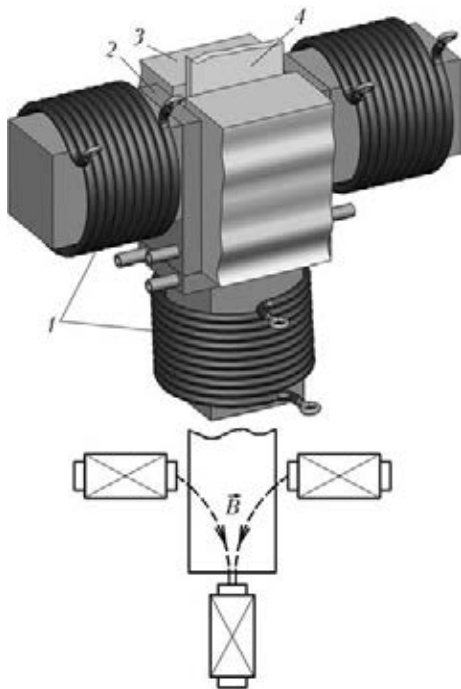


Рис. 7. Схема введения комбинированного магнитного поля с помощью электромагнитов со стержневым магнитопроводом: 1 — электромагниты; 2 — водоохлаждаемая формирующая планка; 3 — свариваемый образец; 4 — электрод

планок (ползунов). С увеличением толщины изделий рассеивание возрастает и эффективность электромагнитного воздействия снижается.

Результаты экспериментальных измерений индукции магнитного поля по оси сварки, созданного электромагнитами с сечением стального магнитопровода 70 см^2 и общим количеством витков 160, приведенные на рис. 5, 6, показывают значительное снижение индукции магнитного поля при увеличении зазора между магнитопроводами (толщины свариваемых изделий) (рис. 5, а), а также относительную неравномерность распределения магнитной индукции в сварочном зазоре (рис. 6).

С помощью стержневых электромагнитов можно создать комбинированную схему воздействия магнитным полем на сварочную ванну. Суть схемы заключается в использовании дополнительного стержневого электромагнита, расположенного в нижней части сварного стыка (рис. 7). При заданном подключении катушек на сварочную ванну будет действовать комбинированное магнитное поле, имеющее поперечную и продольную составляющие. Используя коммутацию подключения обмоток, можно поочередно воздействовать продольным и поперечным полями. Указанная схема расширяет возможности управления гидродинамикой сварочной ванны. Однако очевидно, что она неприемлема при выполнении протяженных швов.

Использование электромагнитов с П-образным сердечником также дает возможность введения в зону сварки поперечного и продольного магнитных полей (рис. 8).

При ориентации электромагнитов вдоль оси сварки и встречном подключении обмоток в зазоре формируется магнитное поле, имеющее преимущественно осевую составляющую (рис. 8, б). При согласованном подключении обмоток можно создать поперечное поле, силовые линии которого имеют противоположное направление в разных зонах по высоте зазора (рис. 8, в). Это дает возможность при соответствующем расположении магнитов относительно сварочной ванны воздействовать на расплавы шлаковой и металлической ванн противоположно направленными полями и создавать, к примеру, их вибрацию в противофазе. Указанный эффект может быть полезен для активизации процессов теплопереноса в ванне и взаимодействия шлак-металл.

При расположении электромагнитов перпендикулярно оси в зоне сварки можно создать магнитное поле, силовые линии которого направлены от кромки к кромке (рис. 8, д).

Ограниченность доступа к свариваемым деталям в ряде случаев затрудняет использование рассмотренных выше устройств. К их недостаткам также следует отнести неравномерность магнитного поля в сварочном зазоре и необходимость перемещения магнитов в процессе сварки вдоль кромок.

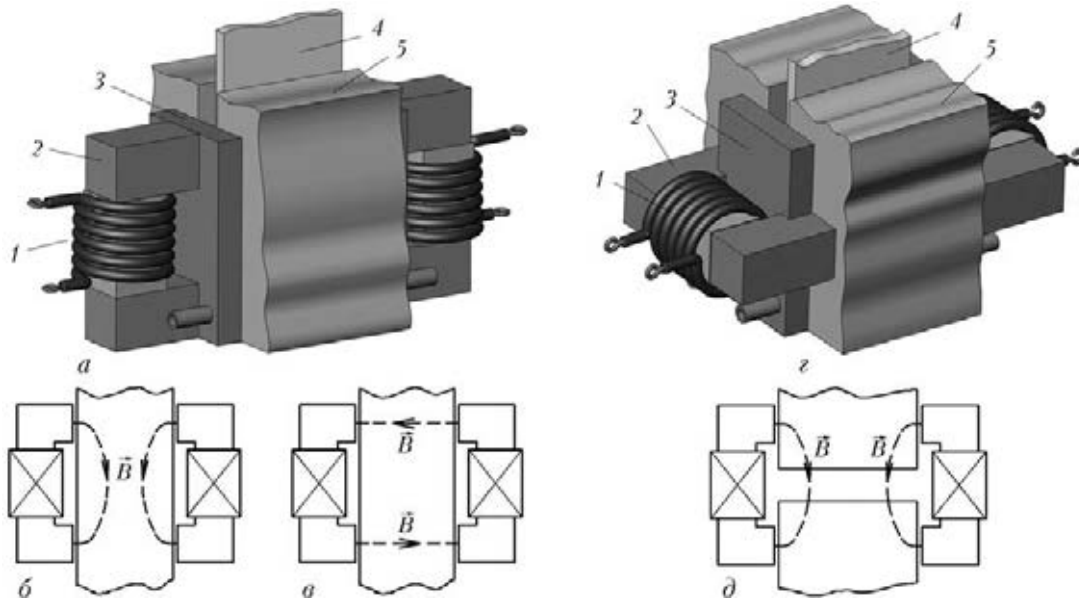


Рис. 8. Схема введения поперечного магнитного поля с помощью электромагнитов с П-образным сердечником, ориентированным вдоль (а-в) и перпендикулярно (с, д) оси сварки: 1 — катушка; 2 — П-образный сердечник; 3 — водоохлаждаемая формирующая планка; 4 — электрод; 5 — свариваемый образец

Указанных недостатков лишено устройство для введения поперечного магнитного поля, представленное на рис. 9 [4]. Магнитопровод этого устройства одновременно выполняет функции опорных стенок для формирующих шов планок. Расположение катушек магнита под сварочным столом во многом облегчает работу оператора. Устройство позволяет создавать магнитное поле вдоль всей протяженности шва. Магнитную индукцию в зазоре рассчитывают по формуле $\bar{B} = k\mu_0 In / (l_{Fe} / \mu_{Fe} + d)$, где k — коэффициент, учитывающий рассеивание поля в зазоре (0,75); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$; I — сила тока в обмотках; n — количество витков; l_{Fe} — длина магнитопровода; μ_{Fe} — магнитная проницаемость материала магнитопровода; d — зазор между полюсами.

Помимо пространственной ориентации магнитного поля, эффективность электромагнитного воздействия определяется его частотными и амплитудными характеристиками.

Имеющиеся в литературе сведения указывают на достаточно широкий диапазон индукции применяемых при ЭШС магнитных полей 0,01...0,2 Тл [4–12]. Вероятно, что для управления микроструктурой металла достаточно относительно небольших значений индукции 0,01...0,05 Тл. Однако опыт авторов в использовании управляющих магнитных полей в электрошлаковых процессах показывает, что для воздействия на кристаллизацию металла и его макроструктуру, управления параметрами сварочной ванны и проплавлением основного металла необходимо использование более мощных магнитных полей 0,1...0,2 Тл.

Следует также отметить, что схемы воздействия, создающие устойчивые электровихревые течения в

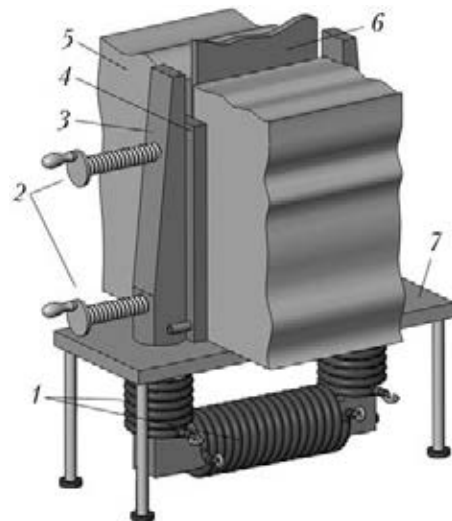


Рис. 9. Устройство для электрошлаковой сварки во внешнем магнитном поле: 1 — катушки; 2 — прижимы; 3 — магнитопровод; 4 — водоохлаждаемая формирующая планка; 5 — свариваемый образец; 6 — электрод; 7 — опора

ванне, могут негативно влиять на химическую однородность и свойства наплавленного металла. Более эффективно использование полей, обеспечивающих постоянную (циклическую) перестройку гидродинамической структуры течений или создающих вибрацию расплава ванны. В этом направлении перспективно использование импульсных магнитных полей, созданных разрядами конденсаторных батарей на обмотки электромагнита [15]. Такая схема воздействия за счет высоких пиковых токов в обмотках (до 10 кА) позволяет создавать в зоне сварки мощные магнитные поля при снижении массогабаритных характеристик соответствующих устройств.

**Заключение**

Каждая из рассмотренных в статье схем создания магнитных полей для воздействия на процесс ЭШС имеет свои преимущества и недостатки, и целесообразность использования той или иной схемы необходимо рассматривать отдельно в каждом конкретном случае. При выполнении протяженных швов рационально применять подвижные электромагнитные устройства, перемещающиеся вдоль шва вместе с формирующими ползунами. При сварке компактных сечений могут быть использованы стационарные электромагниты.

Ввиду сложности создания при ЭШС в зоне сварки продольного магнитного поля достаточной индукции (0,1...0,2 Тл) его применение для воздействия на кристаллизацию металла шва менее эффективно, чем использование поперечных магнитных полей. При этом наиболее перспективным представляется использование импульсных полей, обеспечивающих постоянную (циклическую) перестройку структуры течений расплава ванны или создающих его вибрацию, при снижении массогабаритных характеристик соответствующих устройств.

Дальнейшие исследования в области электромагнитного управления процессом ЭШС необходимо вести комплексно путем разработки рациональных схем создания магнитных полей в сварочном зазоре с учетом конструктивных особенностей электромагнитных устройств для их создания и разработки источников их питания.

Работы выполняются при поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины (проект № Ф53.7/027) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект Укр_ф_а № 13-08-90444).

1. *Электрошлаковая сварка и наплавка* / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1980. — 511 с.

2. *Yushchenko K. A., Lychko I. I., Sushchuk-Slyusarenko I. I. Effective techniques of electroslag welding and prospects for their application in welding production.* — 1998. — 108 p. — (Welding and surfacing reviews; vol. 12, part 2).
3. *Электрошлаковая сварка (перспективы развития)* / Б. Е. Патон, Д. А. Дудко, А. М. Пальти и др. // *Автомат. сварка.* — 1999. — № 9. — С. 4–6.
4. *Компан Я. Ю., Щербинин Э. В.* Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами. — М.: Машиностроение, 1989. — 272 с.
5. *Кузнецов В. Д., Козаков Н. К., Шальда Л. М.* Магнитное управление электрошлаковым процессом. — Киев: Вища шк., 1987. — 64 с.
6. *Дудко Д. А., Рублевский И. Н.* Электромагнитное перемешивание шлаковой и металлической ванн при электрошлаковом процессе // *Автомат. сварка.* — 1960. — № 9. — С. 12–16.
7. *Трочун И. П., Черныш В. П.* Магнитное управление кристаллизацией при ЭШП // *Свароч. пр-во.* — 1965. — № 11. — С. 3–5.
8. *Протоковиллов И. В., Порохонько В. Б.* Управление формированием сварных соединений при ЭШС (Обзор) // *Автомат. сварка.* — 2012. — № 10. — С. 54–60.
9. *Компан Я. Ю., Петров А. Н., Шарамкин В. И.* Некоторые особенности электрошлаковой сварки в продольно-радиальном магнитном поле // *Там же.* — 1978. — № 9. — С. 39–43.
10. *Порохонько В. Б., Протоковиллов И. В., Петров Д. А.* Особенности электрошлаковой сварки титана с использованием электромагнитных методов воздействия // *Вісн. НУК імені Адмірала Макарова.* — 2012. — № 5. — С. 170–176. Электронный ресурс — <http://ev.nuos.edu.ua/ua/>
11. *Волков Г. Г.* Электрошлаковая сварка с применением переменного электромагнитного поля // *Монтаж и специальные работы в стр-ве.* — 1975. — № 8. — С. 14–15.
12. *Козаков Н. К., Кузнецов В. Д., Кораб Н. Г.* Выбор способа ввода магнитного поля при электрошлаковой сварке // *Вест. Киев. политехн. ин-та. Сер. Машиностроение.* — 1981. — Вып. 18. — С. 76–78.
13. *Рыжов Р. Н., Кузнецов В. Д.* Внешние электромагнитные воздействия в процессах дуговой сварки и наплавки (Обзор) // *Автомат. сварка.* — 2006. — № 10. — С. 36–44.
14. *Размышляев А. Д., Миронова М. В., Ярмонов С. В.* Устройства ввода поперечного магнитного поля для процессов дуговой сварки и наплавки (Обзор) // *Там же.* — 2013. — № 1. — С. 40–44.
15. *Возможности использования импульсных электромагнитных воздействий в электрошлаковых процессах* / Я. Ю. Компан, А. Т. Назарчук, И. В. Протоковиллов, Д. А. Петров // *Современ. электрометаллургия.* — 2012. — № 2. — С. 8–13.

Поступила в редакцию 15.08.2013

6-й Международный промышленный форум

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ —
ПРОРЫВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ И МАШИНОСТРОЕНИИ**

15–18 апреля 2014

г. Челябинск, Россия

В рамках форума пройдут специализированные выставки: XVII «Металлургия. Метмаш», XVIII «Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Инструмент», «Промэнерго. Энергосбережение и энергоэффективность», XIV «Экология. Промышленная безопасность».

Организаторы:

- Правительство Челябинской области
- Центр Международной Торговли Челябинск Ч ОАО «Челябгипромез»

Официальная поддержка:

- Министерство промышленности и торговли РФ

Информационные партнеры Форума:

- Научно-технический и производственный журнал «Сталь»
- Научно-технический и производственный журнал «Металлург»

<http://www.promforum74.ru/about/>