



ВНЕШНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ В ПРОЦЕССАХ ДУГОВОЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ (ОБЗОР)

Р. Н. РЫЖОВ, канд. техн. наук, В. Д. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Приведена классификация управляющих магнитных полей, применяемых при реализации электромагнитных воздействий. Систематизированы и обобщены опубликованные данные относительно эффективности применения различных электромагнитных воздействий в процессах дуговой сварки и наплавки. Установлена взаимосвязь спектра решаемых технологических задач с векторными, амплитудными и частотными характеристиками управляющих магнитных полей. Определены наиболее перспективные пути совершенствования данных технологий.

Ключевые слова: дуговая сварка и наплавка, электромагнитные воздействия, управляющие магнитные поля, кристаллизация, формирование и параметры качества швов

К настоящему времени опубликовано значительное количество работ, рассматривающих особенности применения различных внешних электромагнитных воздействий (ЭМВ) в процессах дуговой сварки и наплавки. В основном их используют в тех случаях, когда для обеспечения заданного уровня качества швов традиционных технических и технологических приемов недостаточно. Анализ публикаций показал, что спектр решаемых с помощью ЭМВ задач достаточно широк, однако при этом отсутствуют обобщающие сведения, позволяющие в каждом конкретном случае получить максимальную эффективность от применения данных воздействий. В настоящей работе предпринята попытка систематизации и обобщения данных о применении различных ЭМВ и определения на этой основе перспективных путей их совершенствования.

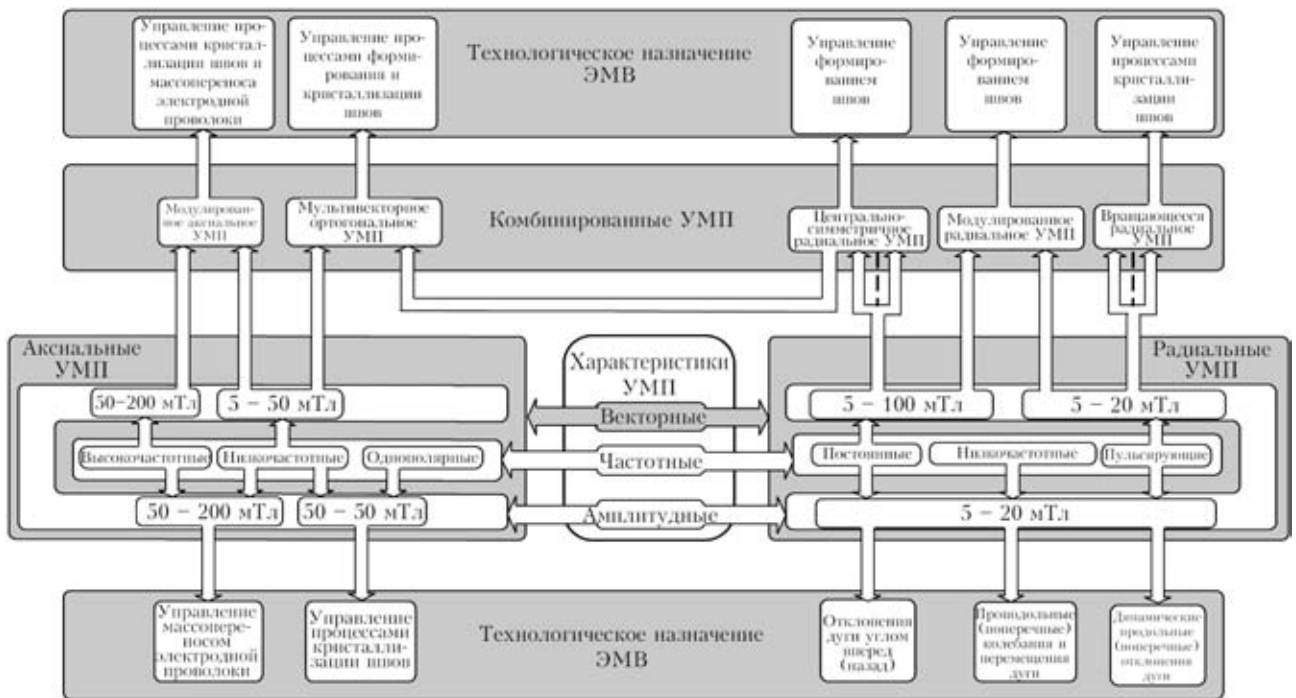
Анализ опубликованных работ в данном направлении позволил выделить основные признаки, которые качественно отличают применяемые ЭМВ. Основным из них является направление вектора управляющего магнитного поля (УМП) по отношению к объекту воздействия. По этому признаку УМП разделяют на аксиальные (продольные) и радиальные (поперечные). У первых вектор индукции параллелен, у вторых — перпендикулярен оси электрода. Дополнительными, не менее важными отличительными признаками указанных двух групп УМП, являются их частотные и амплитудные характеристики (рисунок).

При анализе аксиальных УМП установлено, что независимо от формы импульсов (синусоидальных или прямоугольных) условно их можно разделить на однополярные, низко- (1...25 Гц) и высокочастотные (от 200 Гц и выше). При этом низкочастотные в большей степени характеризуются

диапазоном индукций 5...50 мТл, а высокочастотные — 50...200 мТл. В группе радиальных УМП по частотным характеристикам выделяются пульсирующие, низкочастотные и постоянные. Для всех характерен диапазон индукций 5...20 мТл. УМП первой группы (с аксиальными векторными характеристиками) чаще применяют в случаях, когда объектом воздействия является сварочная ванна и массоперенос электродного металла, второй (радиальными) — дуга как источник нагрева.

Характерно, что в публикациях последних лет чаще рассматриваются особенности использования комбинированных ЭМВ. В отличие от традиционных двухполюсных устройств при их реализации используют многополюсные электромагнитные системы (ЭМС), в состав которых входит n -е количество электромагнитов с автономными системами питания. В зависимости от сочетания полярностей токов намагничивания в их катушках в зоне сварки генерируются различные по отношению к объекту воздействия УМП. Так, при чередующихся полярностях токов намагничивания, одновременно проходящих через полюса ЭМС, в зоне сварки формируются центрально-симметричные радиальные УМП (рисунок). Последовательное подключение противоположных относительно оси электрода пар полюсов с различными полярностями токов намагничивания позволяет получать вращающиеся радиальные магнитные поля. Одновременное генерирование УМП разной частоты формирует модулированные аксиальные и радиальные магнитные поля. Мультивекторные ортогональные магнитные поля получают путем поочередного генерирования в зоне сварки аксиальных низкочастотных и радиальных центрально-симметричных УМП.

Анализ показал, что технологическое применение аксиальных, радиальных либо комбинированных УМП определяется выбором объекта воздействия. При этом дуга, сварочная ванна или капли металла на торце электрода могут быть са-



Классификация управляющих магнитных полей

мостоятельным объектом ЭМВ, либо, что наиболее характерно, объектами одновременного воздействия. В последнем случае эффективность ЭМВ определяется степенью проявления положительного действия факторов, ответственных за технологический результат в выбранном объекте воздействия, и наоборот, подавления их отрицательного проявления в остальных. Рассмотрим механизмы воздействия и технологические возможности наиболее распространенных способов сварки и наплавки с ЭМВ.

При генерировании в зоне сварки (наплавки) низкочастотных (10...30 Гц) аксиальных УМП в головной, более перегретой, части ванны формируются потоки расплава, перемещение которых в направлении ее хвостовой части происходит поочередно вдоль каждого из боковых фронтов кристаллизации с частотой изменения полярности магнитного поля. Происходящие при этом периодические изменения градиента температур вблизи межфазной поверхности фронта кристаллизации приводят к соответствующим изменениям ширины зоны концентрационного переохлаждения, чем авторы работ [1–3] объясняют достигаемый при данных ЭМВ эффект измельчения первичной структуры швов.

Существуют и другие точки зрения относительно механизма влияния данных ЭМВ на процессы кристаллизации. Так, в работах [4, 5] в дополнение к приведенному выше механизму высказано предположение о существовании эффекта механического отделения фрагментов сформированных кристаллитов с образованием дополнительных центров кристаллизации. Авторы работы

[6] измельчение структуры швов объясняют разветвлением выступающих частей твердой фазы в период импульсного роста. При сварке технически чистых металлов с малой шириной двухфазной зоны измельчение структуры связывают с изменениями условий образования вторичных границ [4]. Однако опубликованных данных, достаточных для подтверждения существования указанных эффектов, не обнаружено.

Эффективность влияния данных ЭМВ на процессы кристаллизации зависит от физико-химических свойств свариваемых материалов. Так, при сварке сплавов с широким температурным интервалом кристаллизации в случае оптимальных параметров УМП эффект измельчения структуры наблюдали во всем сечении швов [3, 7], а с узким — только вблизи их продольной оси. Это объясняется малой шириной двухфазной зоны и неразвитостью осей дендритов второго порядка [5]. Эффект измельчения структуры фиксировали и в околошовной зоне, что связано с повышением скорости охлаждения металла ЗТВ [7]. Схемы кристаллизации характеризуются большим изгибом кристаллитов по мере их прорастания от линии сплавления к центру швов. Это обеспечивает более благоприятную ориентацию стыка фронтов кристаллизации по отношению к растягивающим усилиям [8].

Измельчение структуры швов сопровождается увеличением суммарной протяженности и снижением степени ориентированности границ зерен и незначительным количеством межкристаллитных выделений [9, 10]. При этом отсутствие блочности и сглаженность рельефа элементов микрострук-



туры швов свидетельствует о незначительном уровне внутризернистой неоднородности. Этот эффект объясняется повышением и выравниванием мгновенных скоростей кристаллизации возле линии сплавления и оси швов [11]. Снижение химической микронеоднородности, равномерное распределение легирующих элементов во всем сечении швов в большей мере характерно для сварки легированных сталей и сплавов.

Положительными изменениями в процессах кристаллизации объясняется и замедление скорости общей коррозии швов, повышение их стойкости против межкристаллитной коррозии [12], улучшение механических свойств [13, 14]. Повышение пластических свойств швов и сокращение температурного интервала хрупкости, происходящее в результате повышения температуры его нижней границы [15], служит причиной улучшения сопротивляемости швов образованию горячих трещин при сварке изделий из алюминиевых [9, 3], магниевых [7], средне- и высоколегированных сталей и сплавов [16].

Периодические перемещения расплава из головной в хвостовую часть ванны способствуют увеличению площади ее поверхности, выравниванию температуры в ее периферийных и центральных областях, снижению перепада концентрации примесей и газов в расплаве, стабилизации плоского фронта кристаллизации [3]. Понижение перегрева жидкой фазы перед фронтом кристаллизации содействует уменьшению термодиффузионного потока водорода в направлении линии сплавления. Указанные факторы способствуют уменьшению растворимости газов в расплаве и создают благоприятные условия для отрыва и легкого всплытия на поверхность ванны пор. Благодаря применению ЭМВ зафиксировано снижение почти в 5 раз пористости швов при сварке TIG титановых и алюминиевых сплавов [13, 17] и в 2,5 раза при мокрой подводной сварке конструкционных сталей [18].

Спецификой поведения дуги в аксиальном УМП является ее вращение вокруг вертикальной оси с принятием формы, близкой к конусной. Это способствует стабилизации ее пространственного положения и позволяет регулировать ее силовое воздействие на расплав ванны практически без изменения мощности [19]. В процессе наблюдений за горением дуги было сделано предположение, что активное пятно на изделии состоит из отдельных более или менее равномерно расположенных катодных пятен. Это содействует интенсификации процесса катодного распыления оксидных пленок и снижению общего содержания оксидных включений в шве, что особенно важно при сварке алюминиевых сплавов.

Положительное влияние аксиального УМП на дугу как источник нагрева успешно используют

для улучшения процесса формирования швов. ЭМВ на их основе применяют для обеспечения одновременного плавления обеих кромок соединений и стабилизации пространственного положения дуги при сварке TIG на форсированных режимах и сварке под флюсом корневых швов трубных соединений [20]. С их помощью достигали уменьшения количества проходов без образования подрезов при сварке TIG погруженной дугой.

Применение относительно больших индукций аксиального УМП (50...200 мТл) приводит к увеличению глубины проплавления швов, что объясняют уменьшением циклотронного радиуса дуги [21, 22]. Однако при управлении гидродинамикой ванны с помощью ЭМВ повышению индукции должно сопутствовать увеличение частоты УМП. Учитывая инерционность данных воздействий, указанный диапазон индукций магнитного поля не может обеспечить интенсивные перемещения расплава ванны и, как следствие, управление процессами кристаллизации швов. Такие ЭМВ в основном применяют для улучшения процессов формирования швов и массопереноса электродного металла.

Нереверсивные перемещения расплава ванны достигаются генерированием в зоне сварки однополярных аксиальных УМП. Возникающие при этом центробежные силы приводят к выплескиванию расплава с одной и образованию подреза с другой стороны швов. Измельчение первичной структуры металла швов наблюдается с одной относительно продольной оси стороны швов. При этом вследствие асимметрии теплового поля фиксировали смещение линии срачивания кристаллитов [9]. Поэтому при сварке в нижнем положении ЭМВ на основе таких УМП неэффективны, однако их успешно применяют при сварке горизонтальных швов на вертикальной плоскости [23].

При сварке MIG/MAG с использованием аксиальных УМП центробежные силы, действующие в объеме капель, вращающихся с большими скоростями на торце электрода, изменяют их форму со сферической на эллиптическую [8, 24, 25]. При этом происходит уменьшение толщины жидкой теплоизолирующей прослойки на торце электрода, в результате чего увеличивается на 25...30 % скорость расплавления электродной проволоки при практически неизменной тепловой мощности дуги [24]. Однако при индукциях УМП, превышающих пороговый уровень (12...15 мТл), частота отрыва капель с торца электрода уменьшается в 2...3 раза, стабильный мелкокапельный перенос электродного металла заменяется крупнокапельным. Возрастание центробежных сил в объеме капель приводит к повышенному разбрызгиванию и нарушению стабильности процесса сварки [8].

Данные обстоятельства обуславливают целесообразность применения аксиальных УМП при сварке MIG/MAG для создания соединений малых толщин, когда ЭМВ на их основе улучшают процессы кристаллизации и формирования швов и не повышают уровень разбрызгивания. Следует отметить, что большинство опубликованных работ, посвященных применению ЭМВ при сварке плавящимся электродом, ориентированы на процесс сварки под флюсом [12, 19, 26, 27]. Их авторы фиксировали эффект повышения коэффициента перехода в шов легирующих элементов, что объясняется улучшением взаимодействия электродного металла со стенками шлакового пузыря.

ЭМВ с использованием высокочастотных аксиальных УМП основаны на индуцировании либо в объеме ванны, либо в каплях электродной проволоки вихревых токов. При их взаимодействии с радиальной составляющей УМП создается объемная аксиальная сила, действующая в направлении от электромагнита. Ее значение пропорционально произведению $M(\partial M/\partial Z)$, где M — взаимная индуктивность объекта управления и электромагнита в вертикальном направлении. Такие ЭМВ используют как для управления массопереносом электродной проволоки при дуговой пайке [28, 29], так и для увеличения плотности тока в хвостовой части ванны для повышения эффективности управления формированием швов при сварке на весу. При их реализации практически не изменяется температура поверхности капель и изделия, что исключает их перегрев, происходящий, например, при импульсной дуговой сварке [29]. Особенно важным это может быть при сварке высоколегированных сталей и сплавов, когда имеет место выгорание легкоплавких элементов электродной проволоки. Кроме того, при сварке практически исключаются затраты на разбрызгивание и обеспечивается точность дозировки в процессе нанесения покрытия при наплавке. При этом существует возможность управления не только процессом отрыва капель с торца электрода, но и формированием траектории их перемещения в заданном направлении. Этот эффект используют для улучшения процессов формирования потолочных швов.

Общий недостаток ЭМВ с использованием аксиальных высокочастотных УМП и низкочастотных с повышенной индукцией — трудность их практической реализации. Максимальный эффект от их применения достигается при больших токах намагничивания через катушки электромагнитов. Это обуславливает необходимость их принудительного охлаждения и изготовления из намоточных материалов со значительными поперечными сечениями, что ухудшает массогабаритные показатели специализированных горелок и их манипуляционные возможности. Заметим, что при ис-

пользовании высокочастотных УМП эффективные ЭМВ возможны только при низкой индуктивности катушек электромагнитов, что требует оптимизации их конструктивных параметров в зависимости от конкретных условий сварки.

При ЭМВ с использованием некомпбинированных радиальных УМП (см. рисунок) гидродинамикой расплава ванны управляют путем отклонений колебаний или перемещений дуги с частотой магнитного поля в направлении, нормальном его силовым линиям, на расстояние, пропорциональное амплитудному значению его индукции [30, 31]. При таких манипуляциях дугой, деформирующей поверхность ванны с силой, прямо пропорциональной квадрату сварочного тока, формируются потоки расплава в направлении, перпендикулярном магнитному потоку УМП.

При отклонении дуги постоянным УМП в направлении фронта кристаллизации наблюдается увеличение, а в направлении фронта плавления — уменьшение глубины боковых подрезов [32]. Отклонение дуги «углом вперед» приводит к увеличению радиуса фронта плавления ванны, что способствует уменьшению скорости перемещения центральной струи расплава в направлении ее хвостовой части, чем и объясняется указанный выше эффект. При этом горизонтальная составляющая давления дуги удерживает расплав у переднего фронта ванны, что способствует увеличению толщины жидкой прослойки под дугой, а это, в свою очередь, повышает способность ванны поглощать случайные отклонения давления дуги и теплового потока. В результате резко снижается количество прожогов [33], факел дуги, отклоненной к холодному металлу перед фронтом плавления, защищает поверхность соединения от загрязнений и оксидов [32, 33].

Более эффективными являются ЭМВ, основанные на применении знакопеременных радиальных УМП для продольных и поперечных колебаний дуги. В первом случае периодические изменения скорости потока расплава в направлении фронта кристаллизации позволяют устранять дендритную и образовывать равноосную структуру швов [30]. Однако указанные положительные изменения происходят не во всем сечении швов, а лишь в их центральных областях, что свидетельствует об ограниченности технологических возможностей таких ЭМВ.

Поперечные колебания дуги (до 9...12 мм) способствуют стабилизации процесса ее горения, устранению наплывов на усилении швов, обеспечивают более равномерное формирование его обратного валика [30, 34]. При этом увеличивается в 1,5...2,5 раза коэффициент формы швов при соответствующем возрастании на 20...25 % его ширины и уменьшении на 10...50 % глубины проплавления [35]. Данный эффект усиливается при



увеличении частоты колебаний, что объясняется уменьшением давления дуги на расплав сварочной ванны. Такие изменения параметров формирования швов способствуют измельчению зерна вблизи зоны сплавления и уменьшению усадочной и газовой пористости, что повышает механические свойства сварных соединений. Характерное уменьшение степени разбавления присадочного металла основным, сопровождающееся снижением почти в 2 раза твердости швов, и улучшенное заполнение разделки обуславливают целесообразность применения таких ЭМВ при многопроходной сварке и сварке двухслойных сталей. Кроме того, при наплавке обеспечение одинаковой глубины проплавления позволяет увеличивать на 100...300 А значение тока, чем достигается повышение как скорости плавления электродной проволоки, так и производительности данного процесса.

При широкослойной наплавке ЭМВ с радиальными УМП применяют для возвратно-поступательных перемещений дуги по торцу электродной ленты. Это позволяет стабилизировать дуговой процесс, уменьшить время существования капель на торце электрода и их средний диаметр. При этом дуга не блуждает, а перемещается, оплавляя электродную ленту по всей ширине, что способствует улучшению процесса формирования наплавленного слоя и снижению деформирования изделия [36, 37].

Отдельно следует выделить ЭМВ, основанные на использовании комбинированных УМП (см. рисунок). Их суть заключается в одновременном или поочередном генерировании в зоне сварки магнитных полей с разными характеристиками. Так, комбинированные постоянные и знакопеременные поперечные УМП применяют для управления формированием швов при сварке на повышенных скоростях тонкостенных кабельных оболочек [32]. При этом постоянным УМП отклоняют дугу к фронту плавления, чем достигают уменьшения глубины подрезов, а знакопеременным осуществляют продольные колебания дуги для периодического «сбрасывания» избыточного объема расплава с фронта плавления к фронту кристаллизации, что способствует повышению стабильности процесса формирования швов.

При суперпозиции в зоне сварки с помощью квадрупольной электромагнитной системы радиальных УМП достигали такого результирующего распределения индукции, при котором она была равна нулю на продольной оси дуги и приобретала максимальные значения в области фронтов плавления и кристаллизации сварочной ванны [38–40]. При определенных амплитудных и векторных характеристиках УМП такие ЭМВ позволяли без снижения стабильности горения дуги достигать

компенсации гравитационных сил, ухудшающих процесс формирования швов при сварке на весу.

Основными критериями оценки эффективности процессов дуговой сварки и наплавки с ЭМВ являются уровень комплексного улучшения показателей качества швов, их универсальность (возможность быть примененными в разных видах, способах и условиях сварки) и возможность быть реализованными с помощью устройств, характеристики которых соответствуют уровню развития современных сварочных технологий и оборудования.

Максимальная эффективность ЭМВ достигается при соответствии параметров УМП заданным условиям сварки или наплавки. Опубликованные работы по оптимизации ЭМВ носят фрагментарный характер и выполнены на основании эмпирических зависимостей, ограничивающих область их применения исследованными условиями сварки [15, 41]. Для прогнозирования оптимальных параметров УМП с учетом специфики теплофизических свойств свариваемых материалов и режимов сварки необходима формулировка научно обоснованных критериев оптимизации и создание на этой основе детерминированных математических моделей. На сегодня такие работы успешно осуществлены только для ЭМВ, основанных на использовании низкочастотных аксиальных УМП [12, 43]. Однако оптимизация параметров УМП не расширяет технологические возможности ЭМВ. Исходя из этого, перспективным направлением работ является усовершенствование существующих и разработка новых технологий сварки и наплавки на основе использования УМП с параметрами, которые еще не применялись или применялись ограниченно. Для определения того, какими должны быть эти параметры, проанализируем факторы, ограничивающие технологические возможности известных способов сварки и наплавки с ЭМВ.

При реализации ЭМВ, основанных на использовании аксиальных низкочастотных УМП, наличие даже незначительной поперечной составляющей магнитного поля в зоне горения дуги и плавления электродной проволоки приводит к возникновению негативных побочных эффектов. Под ее воздействием дуга как источник нагрева рассредоточивается, что приводит к уменьшению на 20...30 % глубины проплавления, что в большинстве случаев недопустимо [2, 13, 22]. При сварке плавящимся электродом ее взаимодействие со сварочным током в объеме капель приводит к отклонению их траектории перемещения, что может быть причиной повышенного уровня разбрызгивания металла электродной проволоки [8].

Полностью исключить влияние УМП на дугу и процесс переноса электродной проволоки практически невозможно, его можно только умень-

шить. Отсутствие поперечной составляющей индукции УМП на продольной оси достигается применением цилиндрических электромагнитов, расположенных на корпусе горелок коаксиально электроду [44]. Однако неточности при изготовлении составляющих горелок и электромагнитов, отклонения от вертикального положения как дуги, так и деформированной электродной проволоки, значительно ослабляют эффективность таких мер. Уменьшения индукции в дуговом промежутке можно достичь путем расположения электромагнита с обратной стороны шва. Однако, как и в предыдущем случае, это не исключает возможности возникновения указанных отрицательных эффектов. К тому же, последнее решение не всегда является технологичным из-за необходимости как доступа к обратной стороне швов по всей их длине, так и совместного перемещения горелки и электромагнита. В условиях, когда невозможно ограничить воздействие УМП только расплавом ванны, работы по повышению эффективности рассматриваемых ЭМВ целесообразно вести в таких направлениях: определение положительных моментов в существовании УМП в области торца электрода — поверхность ванны и использование их в технологиях сварки и наплавки с ЭМВ; определение мер, позволяющих минимизировать или компенсировать характерные негативные эффекты.

Так, при осуществлении наплавочных работ, желательнее уменьшать глубину и площадь проплавления основного металла. В данном случае рассредоточение дуги как источника нагрева при ЭМВ успешно используют для уменьшения практически в 2 раза глубины проплавления [27, 45]. При сварке плавящимся электродом уменьшение глубины проплавления используют для увеличения сварочного тока, чем достигают повышение скорости плавления электродной проволоки и соответственно производительности процесса сварки.

Компенсации уменьшения глубины проплавления при сварке с ЭМВ достигают путем создания условий, при которых продолжительность горения дуги в обычном состоянии превышает время ее существования в конусной форме. Для этого в зоне сварки генерируют пульсирующие УМП, создаваемые путем пропускания через обмотку электромагнита дискретных импульсов тока повышенной скважности [26].

Следует отметить, что данный метод позволяет снизить, но никак не исключить эффект уменьшения глубины проплавления. При этом для сохранения интенсивности ЭМВ увеличению скважности должно соответствовать увеличение параметров УМП. Однако при неизменной индукции пропорциональное увеличение продолжительности интервалов реверсирования приводит к ухудшению параметров формирования швов (на их по-

верхностях образуются грубые наплывы, линии сплавления имеют нестабильную форму) [2, 22]. В то же время при неизменном интервале реверсирования для генерирования больших индукций УМП необходимо увеличивать массогабаритные характеристики электромагнитов. К тому же при увеличении скважности импульсов УМП уменьшается степень жесткости режима ЭМВ, что, в свою очередь, несколько снижает эффективность влияния на процессы кристаллизации. Указанные недостатки свидетельствуют о низкой эффективности данного способа. Несмотря на это, его успешно применяли в процессе создания заполняющих швов при многопроходной сварке [12].

Положительные результаты относительно применения высокочастотных УМП для управления процессом массопереноса электродной проволоки достигнуты при дуговой дозированной пайке и микронаплавке материалов с высокой электропроводностью [28, 29]. Для успешного применения таких ЭМВ при сварке конструкционных сталей, в том числе высоколегированных, необходимо проведение комплекса исследований, направленных на определение оптимальных диапазонов параметров высокочастотных УМП. Вместе с тем остаются неопределенными механизм и уровень положительного влияния высокочастотных УМП на показатели качества сварных швов. Известно, что ультразвуковые колебания сварочной ванны положительно влияют на процессы кристаллизации швов. Однако в отличие от этого вида внешних импульсных воздействий ЭМВ реализуются без физического контакта с расплавом сварочной ванны, что является существенным преимуществом. Поэтому задача определения возможности достижения аналогичных эффектов и при использовании высокочастотных УМП является актуальной.

Резерв повышения эффективности ЭМВ, основанных на колебаниях и отклонениях дуги поперечным УМП, состоит в обеспечении положительных изменений процессов кристаллизации во всем сечении швов. Этого достигают путем периодических изменений в процессе сварки направлений данных импульсных воздействий, а именно — реализацией колебательно-вращательного перемещения дуги [31]. При этом регулированием длительности периодов ее колебаний в заданном направлении возможно управление процессами формирования швов, сопровождающееся как изменениями их ширины, так и глубины проплавления. Это является признаком достижения определенного уровня технологической гибкости данных ЭМВ. Реализация такого процесса возможна только при использовании многополюсных электромагнитных систем.

При реализации известных технологий широкополосной наплавки с ЭМВ, основанных на ис-



пользовании двухполюсных электромагнитных систем [35], существует неравномерность распределения индукции УМП в дуговом промежутке и по ширине рабочей зоны. Это приводит как к разности скоростей перемещения анодной и катодной областей дуги, в результате чего существенно снижается стабильность процесса ее горения, так и к образованию формы зоны проплавления в виде дуги. Совершенствование данных ЭМВ заключается в устранении указанных негативных эффектов. Достичь этого можно генерированием импульсов УМП сложной формы; регулированием распределения индукции по ширине рабочей зоны, или изменением характера движения дуги с непрерывного на пошаговый с регулируемыми длительностями периодов останова дуги. Следует отметить, что первый путь чрезмерно сложен, а два других наиболее целесообразно реализовывать с помощью многополюсных электромагнитных систем.

Таким образом, применение некомбинированных УМП одновременно с улучшением одной группы показателей качества швов может приводить к некоторому ухудшению других. Технологические ограничения всех наиболее распространенных способов сварки с ЭМВ обусловлены присутствием для каждого из них отрицательными побочными эффектами, существование которых связано с разным влиянием УМП на дугу и расплав сварочной ванны. Частичным их компенсированием или минимизацией невозможно достичь существенного повышения эффективности технологий сварки и наплавки с ЭМВ.

Наиболее существенное повышение эффективности ЭМВ достигается при использовании комбинированных УМП. Рассмотренные выше технологии сварки на этой основе направлены на улучшение параметров формирования швов и не решают вопросов комплексного улучшения качества сварных соединений. Однако даже при таких ограничениях их технологические возможности не являются исчерпанными.

Так, при сварке неплавящимся электродом комбинированием радиальных УМП с помощью квадрупольной или других электромагнитных систем можно достичь не только компенсации гравитационных сил на расплав ванны. Изменение направления магнитного потока на противоположное приводит к перемещениям расплава в сторону дна ванны. При этом в результате уменьшения толщины жидкой прослойки под дугой достигают увеличения глубины проплавления швов [46].

Следует отметить, что суперпозиция аксиальных реверсивных с постоянными или знакопеременными поперечными УМП может приводить к ухудшению стабильности горения дуги и параметров формирования швов. В данных условиях перспективным является комбинирование путем

поочередного, т.е. разделенного во времени генерирования в зоне сварки УМП с разными векторными характеристиками. Так, при поочередном генерировании в зоне сварки реверсивного аксиального и поперечного УМП создают разделенные во времени потоки расплава как в горизонтальной плоскости вдоль боковых поверхностей, так и в вертикальной вдоль верхней или нижней поверхностей ванны [47, 48].

При таких ЭМВ, эффективно влияющих на процессы кристаллизации, возможно управление также глубиной проплавления швов путем увеличения или уменьшения толщины жидкой прослойки под дугой. Направление изменения этих параметров в сторону увеличения или уменьшения зависит от полярности поперечного УМП. Учитывая, что при использовании аксиальных УМП возможна регулировка ширины швов, применение таких ЭМВ позволит наиболее эффективно управлять процессами их формирования. Кроме того, при достаточной продолжительности действия поперечных УМП потоки расплава, двигаясь в вертикальной плоскости из центральной области ванны в сторону ее хвостовой части, достигают фронта кристаллизации, периодически создавая там значительные градиенты температуры, что положительно влияет на процессы кристаллизации швов. Следовательно, при верном выборе параметров комбинированных ЭМВ периодическое действие поперечных УМП не будет ухудшать степень позитивного влияния аксиальных УМП на процессы кристаллизации швов. Такой способ комбинирования УМП использован для усовершенствования рассмотренных выше ЭМВ на основе применения пульсирующих аксиальных УМП [26]. В данном случае поперечное магнитное поле генерировали не после окончания интервалов действия аксиального, а после каждого их импульса на протяжении времени, когда дуга горит в обычных условиях. Это позволило сократить продолжительность интервалов реверсирования путем уменьшения скважности импульсов. При этом ЭМВ стали более интенсивными и универсальными [48].

Для достижения комплексного улучшения показателей качества швов эффективным также является поочередное комбинирование аксиального реверсивного и радиального УМП, вызывающего продольные и поперечные колебания или отклонения дуги [48]. Механизм расширения технологических возможностей в данном случае аналогичен приведенному выше способу. При этом всесторонне следует выяснить вопрос: комбинирование каких УМП является более результативным.

Максимального повышения эффективности ЭМВ при сварке MIG/MAG можно достичь при комбинировании аксиальных реверсивного низкого и высокочастотного или пульсирующего УМП.

При этом возможно одновременное управление процессами кристаллизации и переноса металла электродной проволоки. В данном случае индуцированные в хвостовой части ванны вихревые токи будут содействовать улучшению динамических характеристик перемещений потоков расплава вдоль боковых фронтов кристаллизации. При этом следует ожидать повышения эффективности влияния ЭМВ на процессы кристаллизации. Наличие же незначительной поперечной составляющей индукции УМП в области плавления электродной проволоки будет не ухудшать процесс ее переноса, а увеличивать силу отрыва капель. Это содействует росту частоты их отрыва и, как следствие, повышению интенсивности плавления электродной проволоки.

Выводы

1. Максимальная эффективность ЭМВ в каждом конкретном случае достигается правильным выбором параметров управляющих магнитных полей. При этом аксиальные УМП чаще применяют для управления кристаллизацией, а радиальные — процессами формирования швов.

2. Возникновение негативных побочных эффектов при сварке и наплавке с применением традиционных ЭМВ связано с различным воздействием внешнего магнитного поля на дугу как источник нагрева и капли на торце электродной проволоки с одной стороны, и расплав ванны с другой. Их устранение достигается путем оптимизации параметров УМП.

3. Наиболее перспективным направлением повышения эффективности ЭМВ, обеспечивающим комплексное улучшение процессов формирования и кристаллизации швов, является применение комбинированных УМП. Необходимо проведение дальнейших исследований для всестороннего выяснения степени влияния таких ЭМВ на показатели качества швов при сварке различных классов материалов.

1. A new approach for fluid flow model in gas tungsten arc weld pool using longitudinal electromagnetic control / J. Luo, Q. Luo, Y. H. Lin, J. Xue // *Welding J.* — 2003. — № 8. — P. 202–206.
2. Особенности формирования швов при дуговой сварке титана с электромагнитным перемешиванием / Г. М. Шеленков, В. П. Черныш, С. М. Гуревич и др. // *Свароч. пр-во.* — 1977. — № 3. — С. 24–25.
3. Абралов М. А., Абдурахманов Р. У., Йулдашев А. Т. Влияние электромагнитного воздействия на свойства и структуру сварных соединений сплава 01420 // *Автомат. сварка.* — 1977. — № 5. — С. 21–24.
4. Абралов М. А., Абдурахманов Р. У. Некоторые особенности формирования вторичных границ в сварных швах при электромагнитном воздействии // Там же. — 1980. — № 2. — С. 12–14.
5. Абралов М. А., Абдурахманов Р. У. О механизме измельчения первичной структуры металла сварного шва при электромагнитном воздействии // Там же. — 1982. — № 2. — С. 18–21.

6. Якушин Б. Ф., Мисюрлов А. И. Повышение технологической прочности швов при сварке среднелегированной стали с электромагнитным воздействием // *Свароч. пр-во.* — 1979. — № 12. — С. 7–9.
7. Влияние внешнего магнитного поля на кристаллизацию и технологическую прочность при аргодуговой сварке магниевых сплавов / А. М. Болдырев, Э. Б. Дорофеев, Е. Г. Антонов и др. // Там же. — 1974. — № 9. — С. 14–16.
8. Сварка плавящимся электродом в защитных газах с электромагнитным перемешиванием / В. П. Игумнов, С. Н. Мальцев, Ю. Д. Коньков и др. // *Автомат. сварка.* — 1983. — № 3. — С. 41–42, 59.
9. Структура и свойства металла шва при сварке в продольном магнитном переменном поле низкой частоты / Е. В. Бардокин, В. И. Ливенец, В. А. Окишор и др. // *Свароч. пр-во.* — 1975. — № 11. — С. 12–14.
10. Влияние внешних электромагнитных воздействий на микроструктуру и химический состав швов при подводной мокрой сварке / Р. Н. Рыжов, В. А. Кожухарь, С. Ю. Максимов, Е. А. Прилипко // *Автомат. сварка.* — 2005. — № 10. — С. 41–42.
11. Черныш В. П., Пахаренко В. А., Кузнецов В. Д. Влияние режима электромагнитного перемешивания на химическую микрооднородность швов // Там же. — 1980. — № 1. — С. 76–77.
12. Автоматическая сварка изделий из стали X17H13M3T большой толщины с электромагнитным перемешиванием сварочной ванны / А. Н. Брискман, В. С. Гладышко, В. Д. Кузнецов и др. // *Хим. и нефт. машиностроение.* — 1973. — № 9. — С. 25–26.
13. Чаюн А. Г., Сыроватка В. В., Матяш В. И. Дуговая сварка алюминиевого сплава 01420 с применением электромагнитного перемешивания // *Автомат. сварка.* — 1981. — № 6. — С. 19–21.
14. Применение внешних электромагнитных воздействий для улучшения механических свойств при подводной мокрой сварке / Р. Н. Рыжов, В. А. Кожухарь, С. Ю. Максимов, Е. А. Прилипко // Там же. — 2004. — № 11. — С. 53–54.
15. Рыжов Р. Н., Скачков И. О., Черныш В. П. Повышение сопротивляемости сварных швов образованию горячих трещин при ручной дуговой сварке неплавящимся электродом // Там же. — 1997. — № 4. — С. 25–29.
16. Czernysz W., Ryzhov R., Tyrec E. Influence of electromagnetic effect in welding on the increase in resistance to hot cracking // *Welding International.* — 2004. — 18. — P. 257–262.
17. Влияние внешнего магнитного поля на плотность металла шва при сварке сплава OT4-1 / А. М. Болдырев, В. А. Биржев, Р. В. Муравьев и др. // *Сварка и контроль-2001: Тез. докл.* — Воронеж: ВГАСУ, 2001. — С. 164–169.
18. Влияние внешнего электромагнитного воздействия на содержание водорода в металле швов при мокрой подводной сварке / С. Ю. Максимов, Е. А. Прилипко, Р. Н. Рыжов, В. А. Кожухарь // *Автомат. сварка.* — 2003. — № 6. — С. 55–56.
19. Завьялов В. Е., Звороно Я. П., Петраков А. Б. Использование продольного магнитного поля при наплавке под флюсом // *Свароч. пр-во.* — 1990. — № 2. — С. 3–5.
20. Черныш В. П., Матяш В. И. Предупреждение нарушений формирования швов при повышенной скорости сварки и переменном зазоре между кромками // *Автомат. сварка.* — 1990. — № 9. — С. 9–11.
21. Болдырев А. М., Биржев В. А., Померанцев А. С. О возможности управления процессами при дуговой сварке и наплавке в аксиальном магнитном поле // *Сварка и контроль-2004: Тез. докл.* — Пермь, ПГТУ, 2004. — Т. 2. — С. 273–278.
22. Шаферовский В. А. Влияние аксиального магнитного поля на проплавляющую способность дуги при сварке толстолистовой стали с программированием режима // *Автомат. сварка.* — 1996. — № 8. — С. 20–24.
23. Basic concept and viability of electromagnetically controlled molten pool welding process / Y. Manabe, S. Zenitani, Y. Hiromoto et al. — (*Intern. Inst. of Welding; Doc. XI, XII.*)



24. Болдырев А. М., Биржев В. А., Черных А. В. Особенности плавления электродного металла при сварке во внешнем продольном магнитном поле // Свароч. пр-во. — 1991. — № 5. — С. 28–30.
25. Болдырев А. М., Биржев В. А., Черных А. В. Плавление электродной проволоки при сварке в аксиальном переменном магнитном поле промышленной частоты 50 Гц // Сварка и контроль-2001: Тез. докл. — Воронеж: ВГАСУ, 2001. — С. 118–121.
26. Сохранение глубины провара в условиях электромагнитного перемешивания сварочной ванны / И.В. Малинкин, В. Ю. Поповский, В. В. Сыроватка, В. П. Черныш // Автомат. сварка. — 1971. — № 8. — С. 46–48.
27. Болдырев А. М., Биржев В. А., Черных А. В. Управление глубиной проплавления при дуговой сварке и наплавке с помощью продольного переменного магнитного поля // Свароч. пр-во. — 1993. — № 6. — С. 30–31.
28. Тарасов Н. М., Капустин С. С. Применение высокочастотного электромагнитного поля для дозированного переноса капель электродного металла // Автомат. сварка. — 1982. — № 8. — С. 10–12.
29. Тарасов Н. М. Энергетический расчет процесса отрыва капли электродного металла при воздействии импульса внешнего магнитного поля // Там же. — 1984. — № 6. — С. 21–25.
30. Аргонодуговая сварка нержавеющей труб с использованием магнитных полей / В. Е. Завьялов, В. Я. Иванцов, В. Я. Скорняков и др. // Свароч. пр-во. — 1979. — № 12. — С. 19–20.
31. Рыжов Р. Н., Семенов В. С., Титов А. А. Особенности формирования и кристаллизации швов при TIG-сварке с отклонениями дуги магнитным полем // Автомат. сварка. — 2004. — № 4. — С. 17–20.
32. Дуговая сварка кабельных оболочек в поперечном магнитном поле / И. М. Ковалев, А. С. Рыбаков, А. С. Исаков и др. // Свароч. пр-во. — 1977. — № 11. — С. 37–38.
33. Ковалев И. М., Кричевский Е. М., Львов В. Н. Аргонодуговая сварка труб из стали 1X18N10T неплавящимся электродом с формированием шва в поперечном магнитном поле // Там же. — 1975. — № 5. — С. 15–17.
34. Kang Y. H., Na S. A. Characteristics of welding and arc signal in narrow groove gas metal arc welding using electromagnetic arc oscillation // Welding J. — 2003. — № 3. — P. 93–99.
35. Размышляев А. Д., Маевский В. Р. Влияние управляющих магнитных полей на геометрические размеры шва при дуговой сварке под флюсом // Свароч. пр-во. — 1996. — № 2. — С. 17–19.
36. Корниенко А. Н. Магнитное управление процессом наплавки ленточным электродом под флюсом // Там же. — 1964. — № 4. — С. 12–14.
37. Eihhorn F., Dilthey U., Huwer W. Unterpulver — Auftragschweißen mit 60...90 und 120 mm breiten Gr-Nn-Stahlbandelektroden // Industrie — Anzeiger. — 1972. — № 98. — S. 2369–2372.
38. Акулов А. И., Рыбачук А. М., Чернышев Г. Г. Особенности формирования швов при сварке в поперечном магнитном поле // Свароч. пр-во. — 1979. — № 7. — С. 11–14.
39. Рыбачук А. М., Чернышев Г. Г. Влияние величины заглобления электрода на форму шва при сварке в четырехполосном магнитном поле // Там же. — 1982. — № 2. — С. 25–26.
40. Бродягина И. В., Чернышов Г. Г. Дуговая сварка алюминиевых сплавов с использованием магнитных полей // Там же. — 1998. — № 9. — С. 48–51.
41. Пахаренко В. А. Расчет оптимальных параметров магнитного поля при аргонодуговой сварке с перемешиванием ванны // Автомат. сварка. — 1982. — № 7. — С. 39–41.
42. Рыжов Р. Н., Кузнецов В. Д. Выбор оптимальных параметров внешнего электромагнитного воздействия при дуговых способах сварки // Там же. — 2005. — № 6. — С. 27–31.
43. Рыжов Р. Н., Кузнецов В. Д., Прилипко Е. А. Методика расчета параметров управляющего электромагнитного воздействия при дуговой сварке конструкционных сталей // Вестн. НТУУ «КПИ». — 2005. — № 45. — С. 166–167.
44. Черныш В. П., Кухарь С. Н. Оборудование для сварки с электромагнитным перемешиванием. — Киев: Вища шк., 1984. — 56 с.
45. Размышляев А. Д. Влияние магнитного поля на размеры зоны проплавления при наплавке под флюсом // Автомат. сварка. — 1996. — № 8. — С. 25–27, 30.
46. Рыжов Р. Н., Кузнецов В. Д., Малышев А. В. Применение шестиполосной электромагнитной системы для управления параметрами формирования швов при сварке неплавящимся электродом // Там же. — 2004. — № 2. — С. 45–49.
47. Рыжов Р. Н. Применение комбинированных электромагнитных воздействий для улучшения качества швов при сварке неплавящимся электродом // Там же. — 2005. — № 7. — С. 159–161.
48. Рижов Р. М. Принципи об'ємного керування гідродинамікою розчину зварювальної ванни // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2005. — № 4. — С. 83–87.

Classification of control magnetic fields used for implementation of electromagnetic effects is given. Published data on the efficiency of application of different electromagnetic effects in arc welding and surfacing processes are systematised and generalised. It is established that the spectrum of addressed technological problems is related to vector, amplitude and frequency characteristics of the control magnetic fields. The most promising ways of improving these technologies are identified.

Поступила в редакцию 23.03.2006