

УДК 621.791

Научные основы формирования структуры и свойств сварных соединений в зависимости от способа введения тепла в сварочную ванну при дуговой сварке

Шолохов Михаил Александрович

shmihael@yandex.ru

SPIN-код: 4407-8728

УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

ИФМ им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Рассмотрено научное направление развития применения способов сварки с распределенным введением тепла в сварочную ванну. Показано, что такие способы сварки являются высокоперспективными для развития сварочной отрасли, так как за счет относительной простоты позволяют решить ряд задач сварочного производства: повысить производительность; управлять скоростью охлаждения в широких пределах, обеспечивая необходимые свойства сварного соединения; управлять формой шва; обеспечивать легирование.

Ключевые слова: многодуговая сварка, многоэлектродная сварка, сварочная ванна, форма тепловложения

Введение. На сегодняшний день актуальным вопросом в сварочном производстве остается повышение качества и производительности сварки. Одним из главных направлений в решении этой задачи является использование как одного, так и нескольких источников нагрева, образующих общую или раздельные сварочные ванны (двух- и многодуговая сварка, комбинированная дуговая сварка неплавящимся и плавящимся электродом, гибридная дуговая сварка плавящимся электродом и плазмой, гибридная лазерная и дуговая сварка, дуговая сварка со сложными траекториями колебаний, импульсные технологии и др.) [1]. Такие способы сварки позволяют в широких пределах регулировать скорости охлаждения, а значит структуру ЗТВ и геометрию сварочного шва. Наибольшее распространение в промышленности благодаря, относительно простой реализации, а также большому количеству проведенных и проводимых исследований, получили многодуговая и многоэлектродная сварка.

Методы и материалы; результаты. Развитие технологии дуговой сварки, связанное с формированием свойств сварных соединений посредством управления тепловложением, ведется по следующим направлениям: многоэлектродные процессы сварки и наплавки; многодуговые процессы сварки и наплавки; импульсные технологии специальных режимов сварки; траекторные функции перемещения сварочной дуги; разработка сварочных материалов.

Первые работы по применению многодуговых и многоэлектродных способов сварки у нас в стране были произведены под руководством Е.О.Патона в конце 40-х годов, в тоже время на Урале под руководством профессора

Г.П. Михайлова развивался способ сварки трехфазной дугой. Эти способы на тот момент решали единственную задачу — повышение производительности. Эффективность введения распределенного тепла в сварочную ванну за счет применения двухдуговой сварки проявилась при сварке среднелегированных высокопрочных сталей, когда удалось значительно снизить величину закалочных структур в ЗТВ, тем самым радикально снизить появление холодных трещин. Эти работы выполнялись в Свердловске уже в 1970–1980-е гг. Была сделана попытка и получен положительный результат не только повышения производительности, но и за счет регулирования скорости охлаждения обеспечение необходимого СТЦ. Анализ результатов этих работ позволил сделать обобщения и поставить цели дальнейших исследований в данном направлении, а именно за счет управляемой формы тепловложения обеспечить заданный СТЦ для широкого спектра материалов.

За последние 15 лет был выполнен большой объем экспериментальных и теоретических исследований в области обеспечения требуемых свойств сварных соединений за счет управляемого ввода тепла в сварочную ванну. Созданы и верифицированы физико-математические модели различных процессов сварки с распределенным введением тепла, которые позволили определить области эффективного применения таких процессов, а также сформулировать технические требования к оборудованию и сварочным материалам. Адекватность разработанных моделей обеспечил ряд учтенных особенностей при дуговой сварке: зависимость скорости подачи проволоки с учетом нагрева вылета электрода, распределение тепловой мощности катодного пятна, учет мощности излучения при сварке в разделке, распределение тепловой мощности капель электродного металла по криволинейной поверхности сварочной ванны и ряд других. Было спроектировано и сейчас серийно выпускается оборудование для таких способов сварки, ранее не выпускавшееся в России [2–5].

Внедрение результатов исследований в промышленное производство показало значительную экономическую эффективность внедрения таких процессов. Например, внедрение на предприятие ЗАО «Курганстальмост» двухэлектродной сварки угловых швов под флюсом позволил повысить производительность в 1,8 раза, за счет уменьшения количества проходов и получить экономический эффект около 2 млрд рублей за 3 года, а длина сварных швов изготовленных по этой технологии составила около 7 тыс. км. Внедрение способа дуговой сварки с управляемой траекторией перемещения сварочной дуги позволил автоматизировать процесс сварки в различных пространственных положениях и эффективно применялся на объектах ПАО «Транснефть» при строительстве резервуаров для хранения нефтепродуктов. Применение многодуговых процессов при наплавке плавящимся электродом с дополнительной присадочной проволокой позволяет в широких пределах регулировать соотношение между количеством наплавленного металла и проплавлением основного металла $1 \leq \frac{S_{\text{напл}}}{S_{\text{пропл}}} \leq 9$.

Новым направлением является разработка сварочных материалов для сварки дуплексных (аустенитно-ферритных) сталей, требующих управляемое

тепловложение. Для получения сварного соединения, прочного и стойкого к коррозии (т. е. предотвращение появления по линии сплавления соединения Cr_2N при высоких скоростях охлаждения и сигма-фазы, снижающей прочность при низких скоростях охлаждения) является обеспечение заданной скорости охлаждения в достаточно узком диапазоне. Этот результат достигается путем регулирования тепловложения.

Заключение. На основе развития теории формирования металла сварных швов решена задача по определению количественного значения величины теплового потока в сварочную ванну от источников нагрева разного вида при любых конфигурациях разделки кромок свариваемых деталей.

Разработаны методы управления формой и величиной тепловложения в сварочную ванну и свариваемые детали от источников нагрева разного вида как инструмента управления скоростями нагрева и охлаждения, а также времени пребывания в интервале полиморфных превращений металла сварного шва и зоны термического влияния.

Формирование термического цикла сварки с заданными параметрами позволяет обеспечить строго определенные структуры и свойства металла шва и зоны термического влияния, в том числе для трудносвариваемых сталей. Построение заданного термического цикла сварки обеспечивает получение швов с требуемой геометрией формы проплавления и формирования металла шва, а увеличение производительности обеспечивается за счет рационального управления величиной теплового потока в сварочную ванну от источников нагрева разного вида.

Список источников

- [1] Лашенко Г.И. Технологические возможности одно-, двух- и трехдуговой сварки. *Сварщик в России*, 2011, № 3, с. 16–21.
- [2] Филиппов О.И., Шолохов М.А., Ерофеев В.А., Полосков С.И. Компьютерный инженерный анализ двухсторонней многодуговой сварки вертикальных стыков резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов. *Известия Волгоградского государственного технического университета*, 2020, № 10 (245), с. 60–66.
- [3] Шолохов М.А., Бузорина Д.С., Мельников А.Ю., Мосин А.А. Применение двухэлектродной сварки под флюсом при изготовлении мостовых конструкций. *Сварка и диагностика*, 2022, № 1, с. 49–52.
- [4] Полосков С.С., Ерофеев В.А., Шолохов М.А., Мельников А.Ю. Исследование технологических возможностей процесса двухдуговой наплавки плавящимся электродом с дополнительной токоведущей присадочной проволокой. *Сварка и диагностика*, 2022, № 2, с. 43–47.
- [5] Полосков С.С., Шолохов М.А., Коновалов А.В., Мельников А.Ю. Сравнительный анализ изменений в структуре металла и распределении легирующих элементов при одно- и двухдуговой наплавке в газовой смеси. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2025, т. 23, № 5, с. 207–215.