



ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ШВОВ ПРИ СВАРКЕ ТИГ С ОТКЛОНЕНИЯМИ ДУГИ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Р. Н. РЫЖОВ, канд. техн. наук, В. С. СЕМЕНЮК, А. А. ТИТОВ, инженеры
(НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Приведены результаты экспериментального исследования эффективности применения продольных и поперечных колебаний дуги, нереверсивных и реверсивных колебательно-вращательных движений дуги для управления процессами формирования и кристаллизации швов при сварке неплавящимся электродом. Характер полученных экспериментальных кривых позволил определить области оптимальных значений параметров отклонений дуги и сформулировать рекомендации по практическому применению.

Ключевые слова: сварка ТИГ, электромагнитные системы, управляющее магнитное поле, отклонения дуги, параметры формирования и кристаллизации швов

Применение в процессе сварки отклонений дуги является одним из способов внешних импульсных воздействий на процессы формирования и кристаллизации швов. Этот технологический прием реализуют как с помощью механических, так и электромагнитных устройств. Последние отличаются более простыми конструктивными схемами и улучшенными динамическими характеристиками перемещения дуги. От амплитуды, направления и частоты отклонений дуги существенно зависит качество формирования швов. Известны способы сварки, в которых для улучшения параметров формирования и кристаллизации швов используют продольные и поперечные колебания дуги, создаваемые двухполюсными электромагнитными системами (ЭМС) [1, 2]. При этом направления колебаний дуги в процессе сварки были неизменными и определялись ориентацией ЭМС относительно шва. Усовершенствование указанных технологических приемов возможно путем использования аппаратных средств, позволяющих создавать более широкий спектр характеристик отклонений дуги.

В настоящей работе управляющее магнитное поле (УМП) в зоне сварки создавали с помощью ЭМС, состоящей из шести электромагнитов, расположенных на одинаковом расстоянии от электрода под углом 60° один к другому [3]. С помощью специально разработанного микропроцессорного устройства управления электромагнитными воздействиями (УУЭМВ) [4] программировали полярность, длительность и периодичность импульсных последовательностей токов намагничивания каждой катушки ЭМС. При этом импульсные последовательности длительностью $t_{и.п} = 0,01 \dots 0,05$ с состояли из 1...5 однополярных синусоидальных импульсов продолжительностью 0,01 с.

Дугу отклоняли в заданном направлении радиальным УМП, которое генерировали как одним, так и двумя электромагнитами ЭМС, расположен-

ными друг против друга по обе стороны от электрода. При этом токи намагничивания были разных полярностей. Расстояние от торцов магнитопроводов до поверхности образцов составляло 5,5 мм, а плоскость, в которой расположена пара электромагнитов, была перпендикулярной направлению отклонения дуги. При экспериментальном определении параметров УМП в зоне сварки установлено, что при суперпозиции магнитных полей пары электромагнитов распределение в зоне горения дуги радиальной составляющей индукции B_y более равномерное, чем в случае использования одного электромагнита (рис. 1). К тому же, для создания в зоне сварки индукции УМП заданного значения необходимы меньшие токи намагничивания I_n , что улучшало тепловой режим работы ЭМС. При I_n до 3 А, проходящем через один электромагнит, B_y изменялась в пределах 0...5,5 мТл, а при генерировании УМП парой электромагнитов — в пределах 0...8,5 мТл. Дальнейшее увеличение токов намагничивания приводило к намагничиванию сердечников ЭМС и непропорциональному возрастанию B_y .

Известно, что отклонения дуги прямо пропорциональны амплитудному значению радиальной составляющей УМП в зоне сварки. В ходе эксперимента осуществляли фазное регулирование то-

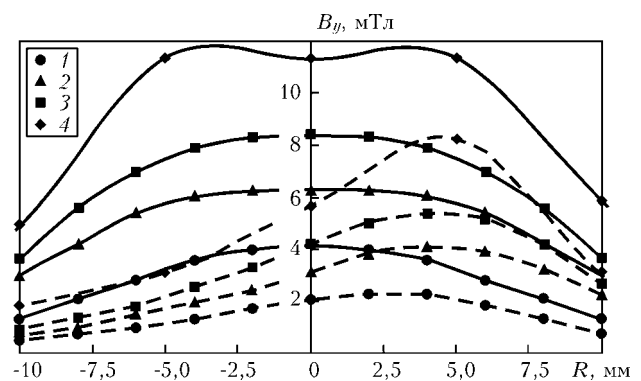


Рис. 1. Распределение радиальной составляющей индукции B_y в зоне сварки при генерировании УМП одним электромагнитом (штриховые кривые) и парой электромагнитов (сплошные): 1–4 — соответственно $I_n = 1, 2, 3, 7$ А; R — расстояние от продольной оси ЭМС

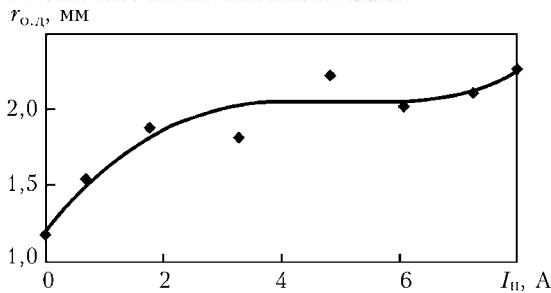


Рис. 2. Зависимость радиуса отклонений дуги $r_{o,d}$ от тока намагничивания I_n катушек ЭМС

ка через катушки электромагнитов путем изменения углов отпирания тиристоров блока коммутации УУЭМВ. При этом из-за низкой индуктивности катушек ЭМС импульсы УМП имели практически вертикальный передний фронт. При такой форме импульсов в начале циклов отклонения скорости перемещения дуги была чрезмерно высокой, что ухудшало стабильность ее горения. К тому же, с возрастанием угла отпирания тиристоров увеличивалась продолжительность горения дуги в естественных условиях, что снижало эффективность исследуемых воздействий. Поэтому при проведении основной части экспериментов значения индукции УМП, а следовательно, и отклонений дуги регулировали изменением напряжения в первичной обмотке силового трансформатора УУЭМВ.

Экспериментальное определение зависимости отклонений дуги от тока намагничивания, проходящего через катушки ЭМС, осуществляли путем фиксации на медной полированной пластине радиуса отклонений дуги $r_{o,d}$. При этом ток дуги составлял $I_d = 100$ А, а ее длина — $l_d = 2$ мм. Для осуществления колебательно-вращательного движения дуги последовательно через каждую катушку ЭМС пропускали по одному импульсу тока намагничивания. Стабильные результаты получали при горении дуги в течение 0,12 с, что соответствовало двум ее полным оборотам. Установлено, что при генерировании УМП одним электромагнитом с возрастанием I_n от 0 до 8 А значения $r_{o,d}$ экспоненциально увеличивались с 1,2 до 2,3 мм, т. е. практически в два раза (рис. 2). При $I_n = 3...8$ А незначительный рост $r_{o,d}$ можно объяснить несущественным увеличением радиальной составляющей УМП вследствие замагничивания сердечников ЭМС. При генерировании УМП парой

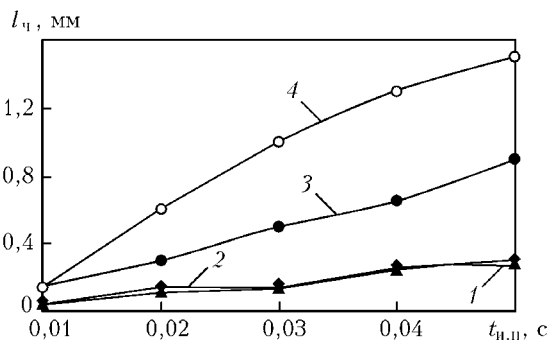


Рис. 3. Влияние параметров отклонений дуги на чешуйчатость поверхности швов: 1, 2 — соответственно продольные и поперечные колебания дуги; 3, 4 — соответственно неререверсивные и реверсивные колебательно-вращательные движения дуги

электромагнитов с током намагничивания противоположных полярностей характер зависимости $r_{o,d}(I_n)$ не изменялся, но дуга отклонялась на 40 % больше, чем в случае использования одного электромагнита.

Для определения зависимости параметров формирования и кристаллизации швов от параметров отклонения дуги УМП проплавливали образцы из стали 12Х18Н10Т толщиной 6 мм без присадочной проволоки на следующем режиме: $I_{св} = 100$ А; $U_d = 10$ В; $v_{св} = 10$ м/ч. Эксперименты проводили при $I_n = 3$ А и $t_{n,п} = 0,01...0,05$ с. Продольные и поперечные колебания дуги осуществляли путем изменения через интервалы времени $t_{n,п}$ на противоположную полярность тока намагничивания, проходящего через пару полюсов ЭМС, расположенных в плоскости, перпендикулярной направлениям отклонений дуги. Колебательно-вращательное движение дуги создавали последовательным включением в направлении ее вращения на время $t_{n,п}$ одного либо пары противоположных электромагнитов с токами намагничивания разных полярностей. Реверсирование направления вращения дуги осуществляли через интервалы времени $t_{p,d} = 6t_{n,п}$ путем изменения на противоположное последовательности включения электромагнитов ЭМС. При этом в начале цикла реверсирования дуга была отклонена в направлении продольной оси шва в сторону головной части ванны.

Установлено, что в отличие от сварки в обычных условиях при всех исследуемых видах перемещения дуги на поверхности швов образуются периодические чешуйчатые наплывы. Это свидетельствует о протекании в сварочной ванне интенсивных гидродинамических процессов. Во всех случаях при увеличении $t_{n,п}$ фиксировали практически линейное возрастание расстояния l_q между вершинами соседних чешуек (рис. 3). При этом в случае продольных и поперечных колебаний дуги

$$l_q = v_{св} 2t_{n,п} \text{ (м)}.$$

При неререверсивном колебательно-вращательном движении дуги

$$l_q = v_{св} 6t_{n,п} \text{ (м)}.$$

Реверсирование направления вращения дуги приводит к увеличению l_q в 2 раза. Это можно объяснить изменением временного интервала формирования потоков расплава, направленных в сторону фронта кристаллизации, который увеличивается из-за необходимости торможения потоков, образовавшихся в предыдущем цикле.

Экспериментально определено, что применение всех исследуемых видов отклонений дуги с $t_{n,п} = 0,01$ с не приводит к существенным изменениям геометрических характеристик швов (рис. 4). В случае колебательно-вращательных движений дуги с увеличением $t_{n,п}$ до 0,05 с глубина проплавления экспоненциально уменьшалась на 17 % при соответствующем возрастании ширины швов. Такой эффект объясняется уменьшением времени, в течение которого дуга прогревала металл в одном и том же месте. Реверсирование направления вра-

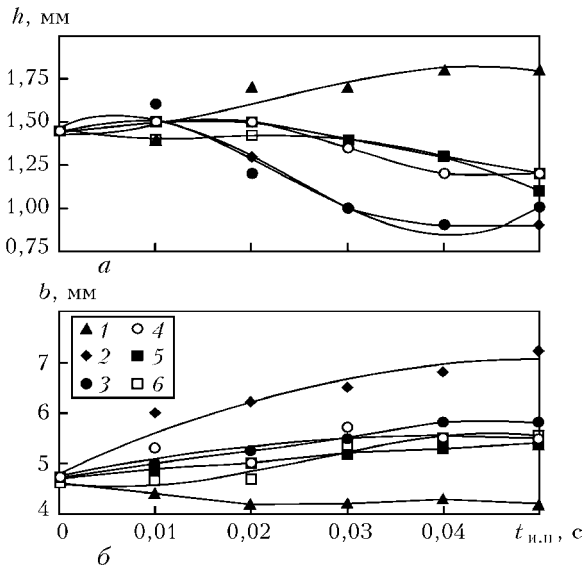


Рис. 4. Влияние параметров отклонений дуги на геометрические характеристики швов — глубину проплавления h (а) и их ширину b (б): 1, 2 — соответственно продольные и поперечные колебания дуги; 3, 4 — соответственно нереверсивные и реверсивные колебательно-вращательные движения дуги при генерировании УМП одним электромагнитом; 5, 6 — то же при генерировании УМП парой электромагнитов

щения дуги не приводит к существенным изменениям параметров формирования шва. При поперечных колебаниях дуга чаще находится у боковых кромок ванны, чем объясняется увеличение ширины швов на 56 %. Однако при этом интенсифицируется отвод тепла через боковые поверхности ванны в основной металл, что сопровождается уменьшением глубины проплавления на 38 %. Особенностью гидродинамики при продольных колебаниях дуги является оттеснение расплава из центральной области в головную и хвостовую части ванны, вследствие чего уменьшается толщина жидкой прослойки под дугой и процесс плавления основного металла происходит более интенсивно. Этим объясняется увеличение глубины проплавления на 24 % при уменьшении ширины швов на 9 %. Следует отметить, что во всех случаях более существенные изменения параметров формирования швов наблюдали при $t_{н.п}$ до 0,04 с.

С помощью отклонения дуги магнитным полем можно эффективно управлять процессами кристаллизации швов (рис. 5). По сравнению с первичной структурой металла швов, полученных при сварке в обычных условиях (рис. 5, д), наибольшее измельчение структуры зафиксировано при продольных колебаниях дуги по всему сечению швов и поперечных колебаниях в центральной части швов (рис. 5, а, б). Этот эффект объясняется тем, что указанные воздействия характеризуются наибольшей частотой перемещения дуги в направлении фронта кристаллизации. Однако при таких воздействиях схемы кристаллизации существенно отличаются. В случае продольных колебаний дуги кристаллиты имеют прямую форму и направлены практически перпендикулярно линии сплавления. При поперечных колебаниях дуги зона проплавления состоит из центральной области, в которой направление роста кристаллитов совпадает с про-

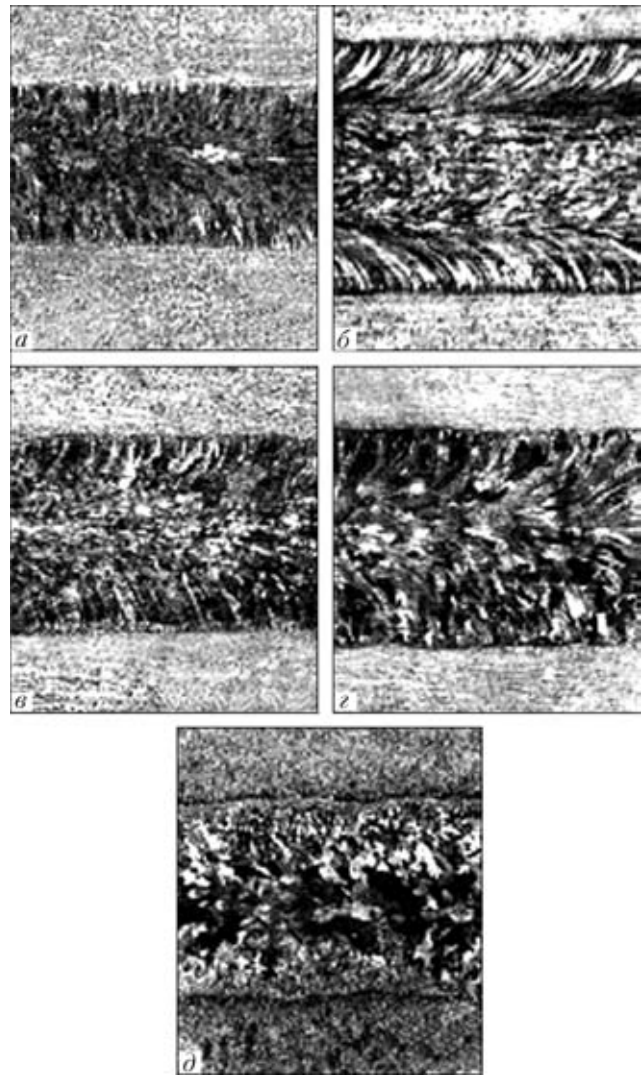


Рис. 5. Первичная структура ($\times 4$) металла швов, полученных при различных видах отклонений дуги: а, б — соответственно продольные и поперечные колебания дуги; г, з — соответственно нереверсивные и реверсивные колебательно-вращательные движения дуги; д — без электромагнитных воздействий

дольной осью шва и областей, примыкающих к линии сплавления, сформированных из более крупных кристаллитов дугообразной формы. С увеличением $t_{н.п}$ ширина центральной зоны уменьшается и при $t_{н.п} = 0,05$ с первичная структура формируется только из дугообразных кристаллитов. Зафиксированные при поперечных колебаниях дуги схемы кристаллизации швов свидетельствуют о том, что в процессе сварки имели место поперечные перемещения головной части ванны.

При сравнении швов, полученных при сварке с нереверсивными и реверсивными колебательно-вращательными движениями дуги, установлено, что в первом случае достигается более существенное измельчение структуры металла швов (рис. 5, в, з). Данный эффект можно объяснить, как и в случае образования чешуйчатости на поверхности металла швов, более стационарными гидродинамическими процессами, протекающими в ванне. При этом степень измельчения структуры практически такая же, как и у швов, полученных при продольных колебаниях дуги. Однако угол сра-



щивания кристаллитов меньше, а сами кристаллиты имеют не прямую, а дугообразную форму, что способствует повышению пластичности металла швов. В отличие от сварки в неререверсивном аксиальном УМП [5] применение неререверсивного колебательно-вращательного движения дуги не приводит к существенному смещению от продольной оси линии сращивания боковых фронтов кристаллизации. По-видимому, в данном случае в гидродинамике ванны преобладают не вращательные движения потоков расплава, вызывающие асимметрию распределения температуры на боковом фронте кристаллизации, а симметричные — в направлениях от оси электрода к кромкам ванны.

Установлено, что увеличение $t_{и.п}$ при всех исследуемых видах перемещения дуги приводит к уменьшению степени измельчения структуры металла швов. Однако ее характеристики остаются значительно лучшими в сравнении со швами, полученными при сварке в обычных условиях. В отличие от процесса формирования швов для процесса кристаллизации более эффективно отклонение дуги не одним, а парой электромагнитов ЭМС. Это обстоятельство следует учитывать при программировании режимов работы УУЭМВ.

Выводы

1. Применение при сварке неплавящимся электродом многополюсной электромагнитной системы с УУЭМВ позволяет с помощью соответствующих изменений направления, значения и длительности отклонений дуги реализовывать различные виды пространственного управления отклонениями дуги,

что является эффективным способом воздействия на процессы формирования и кристаллизации швов.

2. Максимальные изменения параметров формирования швов при сварке с отклонениями дуги магнитным полем достигаются при $t_{и.п} = 0,03... 0,05$ с, что достаточно для формирования потоков расплава в направлении от центра ванны. При этом для увеличения глубины проплавления и ширины швов наиболее эффективно применение соответственно продольных и поперечных колебаний дуги.

3. Наиболее благоприятные изменения в первичных структурах металла швов наблюдаются при колебательно-вращательном движении дуги на режимах, характеризующихся максимальной частотой перемещения расплава ванны в направлении фронта кристаллизации.

1. *Измельчение* структуры металла шва при сварке дугой, колеблющейся в поперечном магнитном поле / А. М. Болдырев, Ю. С. Ткаченко, Н. П. Толоконников и др. // Автомат. сварка. — 1975. — № 7. — С. 70–71.
2. *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.
3. *Пат. 42252А Украина, В 23 К 9/08.* Пальник для зварювання з зовнішніми електромагнітними діями / Р. М. Рижов, О. В. Малишев. — Оpubл. 15.10.2001.
4. *Пат. 50430 Украина, В 23 К 9/08.* Спосіб зварювання неплавким електродом з використанням зовнішніх комбінованих керуючих магнітних полів і пристрій для його реалізації / А. А. Тітов, О. В. Малишев, Р. М. Рижов. — Оpubл. 15.10.2002.
5. *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.

Results of experimental study of the efficiency of using longitudinal and transverse oscillations of the arc, as well as non-reversing and reversing oscillation-rotation movements of the arc to control the processes of formation and solidification of welds in tungsten-electrode welding are presented. The character of experimental curves allowed determination of the regions of optimal values of the arc deviation parameters and formulation of recommendations for their practical application.

Поступила в редакцию 07.04.2003,
в окончательном варианте 13.06.2003