



ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ДУГОВЫХ СПОСОБАХ СВАРКИ

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

Предложены зависимости, позволяющие оптимизировать параметры электромагнитного воздействия. Адекватность полученных зависимостей реальным условиям сварки подтверждена сравнительным анализом расчетных и экспериментальных данных. Проведен анализ влияния параметров режимов сварки и теплофизических свойств материалов на оптимальные режимы электромагнитных воздействий.

Ключевые слова: электромагнитное воздействие, управляющие магнитные поля, геометрические характеристики сварочной ванны, теплофизические свойства материалов

Контролируемое управление вынужденными перемещениями потоков расплава ванны при сварке с электромагнитными воздействиями (ЭМВ) позволяет значительно улучшить механические свойства швов, повысить их коррозионную стойкость и стойкость против образования горячих и холодных трещин, снизить уровень пористости. Анализ данных различных авторов указывает на то, что независимо от способов и условий сварки существует определенный диапазон параметров ЭМВ, при котором достигается максимальное повышение технологических и физико-химических свойств сварных соединений. Следовательно, в этом диапазоне проявляются закономерности, определяющие условие оптимальности ЭМВ.

Цель данной работы — установление физически обоснованного критерия оптимальности ЭМВ и разработка с его использованием инженерной методики выбора параметров ЭМВ с учетом закономерностей, определяющих эффективность его применения.

Под действием управляющего магнитного поля (УМП) в сварочной ванне (рис. 1) формируются потоки, перемещение которых из головной в хвостовую часть происходит поочередно вдоль каждого из боковых фронтов кристаллизации с частотой, соответствующей интервалу реверсирования УМП. При этом фронт кристаллизации, относительно которого происходит перемещение перегретого расплава из головной части сварочной ванны, оплавляется, а противоположный кристаллизуется с максимальными скоростями (на поверхности ванны соответственно затемненная и заштрихованная области). Остаток и оплавление одного бокового фронта затвердевания и, наоборот, ускоренное перемещение противоположного контролируются градиентами температуры перед фронтами с периодичностью, соответствующей частоте изменения направлений перемещения потоков в ванне при реверсировании магнитного поля. В работе [1] сделан вывод о том, что необходимым и достаточным условием контролируемой периодичности роста

кристаллитов по всей межфазной поверхности, а следовательно, и формирования мелкозернистой структуры с минимальной химической неоднородностью является периодическое достижение тепловым фронтом потока расплавленного металла наиболее удаленной от дуги зоны кристаллизующейся части ванны. Условие оптимальности ЭМВ представлено равенством $S_{\text{пот}} = L_{\text{кр}}$, где $S_{\text{пот}}$ — путь, проходимый потоком при его реверсивном движении; $L_{\text{кр}}$ — длина боковой кромки кристаллизующейся части ванны.

По мере развития работ в этом направлении получены данные, уточняющие взаимосвязь между скоростями кристаллизации и градиентами температуры у межфазной поверхности. Показано [2], что в полном периоде кристаллизации существует максимум повышения фактических скоростей затвердевания, приходящийся на определяемую градиентом степень переохлаждения в условиях, при которых время существования перегретого расплава в глубине хвостовой части ванны минимально. Следовательно, только путь перемещения потока вблизи фронта кристаллизации на длину $L_{\text{кр}}$, оставаясь необходимым, не является достаточным условием оптимальности. Экстремальные зависи-

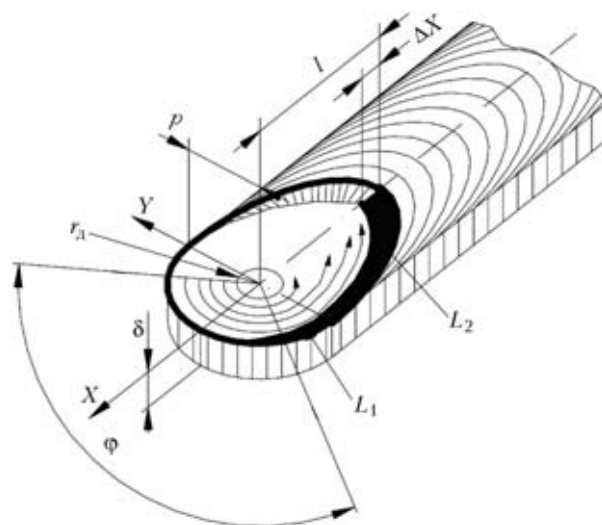


Рис. 1. Схема сварочной ванны при сварке с ЭМВ (обозначения см. в тексте)



мости фактических скоростей затвердевания от параметров ЭМВ проявляются в условиях, когда время перемещения потока, ограниченное расстоянием $L_{кр}$, согласуется со временем прорастания фронтом кристаллизации неравновесной переохлажденной зоны. Указанные закономерности, предопределяющие формирование мелкокристаллических структур при сварке с ЭМВ, позволяют сформулировать физически обоснованный критерий оптимальности в виде равенства

$$\tau_k = \tau_{II}, \quad (1)$$

где τ_k — время прорастания фронтом кристаллизации переохлажденной неравновесной зоны с максимальными скоростями; τ_{II} — время перемещения потока на длину $L_{кр}$.

Составляющие равенства (1) могут быть определены с использованием существующих представлений о закономерностях проявления особенностей кристаллизации и вынужденных перемещениях потока расплава ванны при сварке с ЭМВ.

Для эффективного измельчения первичной структуры за время интервала реверсирования фронт кристаллизации должен продвигаться на расстояние, равное ширине двухфазной области ΔX (рис. 1). С учетом этого время прорастания фронтом кристаллизации этой зоны может быть представлено зависимостью

$$\tau_k = \frac{\Delta X}{v_{св} \cos \alpha}, \quad (2)$$

где $v_{св}$ — скорость сварки; $v_{св} \cos \alpha$ — средняя скорость кристаллизации рассматриваемого участка.

При определении τ_{II} исходили из того, что при сварке с ЭМВ потоки расплава формируются в головной части ванны с поперечным сечением $\Delta S = (p - r_d)\delta$, где p — полуширина головной части ванны; r_d — радиус отклонения дуги поперечной составляющей УМП; δ — толщина свариваемого соединения (рис. 1). Для того, чтобы поток достиг удаленной на расстояние $L_{II} = L_1 + L_2$ точки фронта кристаллизации и при этом с учетом сложности гидродинамики ванны в ней гарантированно произошло заданное изменение градиента температур, через сечение ΔS необходимо переместить объем расплава

$$V_3 = \Delta S L_{II} = (p - r_d)\delta L_{II}. \quad (3)$$

Строгое расчетное определение объема расплава, проходящего за время τ_{II} через сечение ΔS , осложнено наличием поля скоростей его элементарных объемов, параметры которого зависят от распределений в зоне сварки аксиальной составляющей индукции УМП B_z и горизонтальной составляющей плотности тока в сварочной ванне. Проведенная предварительная обработка экспериментальных данных показала, что данный параметр можно достаточно точно оценивать с помощью размерного комплекса, полученного на основе формулы Пуазейля:

$$\frac{V_3}{\tau_{II}} = 0,012 \frac{\delta(p - r_d)^2 B_z I_{св}}{L_{II} \eta}, \quad (4)$$

где $I_{св}$ — сварочный ток; η — динамическая вязкость расплава.

С учетом (3) и того, что при ЭМВ с использованием реверсивных аксиальных магнитных полей $\tau_{II} = t_p$ между двумя последовательными сменами полярности тока намагничивания, пропускаемого через электромагнит устройства генерирования в зоне сварки УМП, зависимость (4) можно преобразовать следующим образом:

$$B_z t_p = A = 83,3 \frac{L_{II}^2 \eta}{(p - r_d) I_{св}}, \quad (5)$$

где $A = B_z t_p$ — обобщенный параметр ЭМВ.

В общем случае

$$A = \int_0^{t_p} |B(t)| dt. \quad (6)$$

Значение L_{II} определяли с учетом следующих допущений: во время сварки процесс плавления и кристаллизации осуществляется в плоскости; форма фронта плавления описывается уравнением окружности, а фронта кристаллизации — уравнением эллипса (рис. 1). Тогда

$$L_{II} = L_1 + L_2 = \pi p(1 - \varphi/180)/2 + \pi(1,5(p + l) - \sqrt{pl})/4,$$

где p и l — соответственно полуширина и длина кристаллизующейся части ванны; φ — центральный угол головной части ванны, ограничивающий объем расплава, в котором растекается основная часть $I_{св}$ (в диапазоне $B_z = 12...25$ мТл, $\varphi = 64 + 7,03(B_z - 12)$ [3]).

Геометрические параметры ванны определяли по рекомендуемым в работе [4] зависимостям:

$$p = (q\sqrt{2}/(\pi e)) / (n2v_{св} c\gamma \delta T_{пл}), \quad (7)$$

$$l = (q^2(e - 1)) / (m4\pi\lambda c\gamma v_{св} e\delta^2 T_{пл}^2), \quad (8)$$

где q — мощность источника тепла; λ , $c\gamma$ и $T_{пл}$ — соответственно коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и температура плавления свариваемого материала; n , m — коэффициенты, введенные автором работы [4] для учета различий между расчетными и реальными размерами ванны (с их помощью также учитывали изменения геометрии ванны, вызванные размыванием кромок горячими потоками расплава).

В зависимости (2) $\Delta X = l_S - l_L$. Длины l_S и l_L рассчитывали с помощью зависимости (8), подставляя в нее вместо $T_{пл}$ соответственно температуры солидуса T_S и ликвидуса T_L свариваемых материалов.

Вид зависимости (5) объективно отражает физические процессы, характерные для сварки с ЭМВ. Так, увеличению геометрических параметров ванны и вязкости расплава должно соответствовать

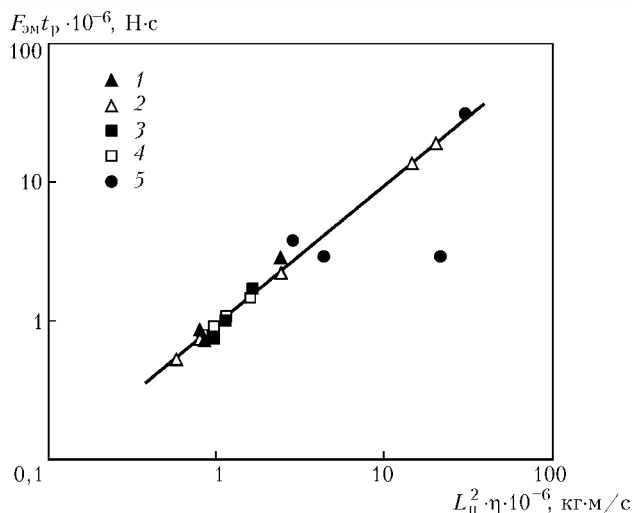


Рис. 2. Зависимость импульса электромагнитной силы от квадрата расстояния, проходимо­го потоком с вязкостью η за период ЭМВ: 1, 2 — соответственно экспериментальные и расчетные значения для нержавеющей сталей; 3, 4 — то же для алюминиевых сплавов; 5 — экспериментальные значения для технического титана и его сплавов

возрастание параметров ЭМВ. С увеличением радиуса отклонения дуги радиальной составляющей УМП уменьшается скорость заполнения расплавом объема V_3 , что также требует корректировки в сторону увеличения параметров ЭМВ. В большей мере эта закономерность наблюдается при реализации технологий сварки неплавящимся электродом на переменном токе или обратной полярности, широко применяемых при сварке алюминия и сплавов на его основе, когда отклонению дуги способствует округлая форма конца неплавящегося электрода. С расширением температурного интервала $T_L - T_S$, что характерно для сплавов со сложными системами легирования, увеличивается ширина зоны концентрационного переохлаждения, что позволяет несколько уменьшить интенсивность ЭМВ. Следует отметить, что расчет по зависимости (5) оптимальных параметров ЭМВ для материалов с узким температурным интервалом $T_L - T_S$ приводит к чрезвычайно высоким значениям параметра A , применение которых может нарушать стабильность процесса сварки.

Адекватность разработанной расчетной схемы реальным условиям сварки проверяли путем сравнения расчетных и экспериментальных оптимальных значений параметров УМП для нержавеющей сталей и сплавов [5–10], алюминиевых [11–14] и титановых [15–19] сплавов. Учитывая, что авторы указанных публикаций реализовывали как непрерывные, так и пульсирующие с различной скважностью УМП, значения обобщенного параметра ЭМВ определяли с помощью зависимости (6). Проведенные с использованием зависимости (5) расчеты импульса электромагнитной силы показали, что для рассматриваемых условий сварки нержавеющей сталей и алюминиевых сплавов погрешность в расчетах не превышает 10... 15% (рис. 2). С учетом принятых допущений такие результаты можно считать удовлетворительными.

Проверка показала значительные отличия расчетных и экспериментальных параметров режимов

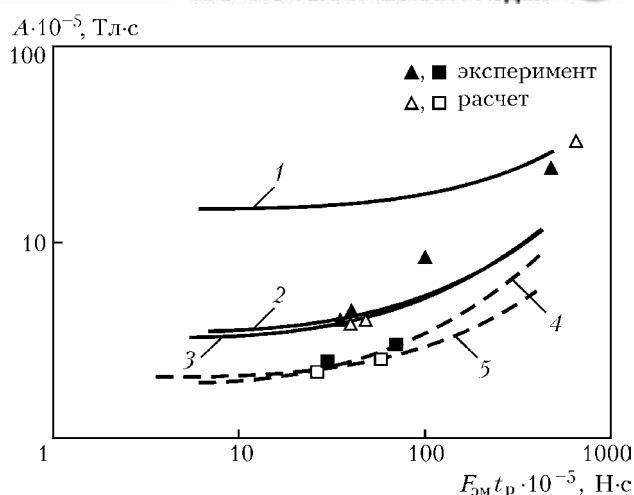


Рис. 3. Зависимость параметра A от импульса электромагнитной силы: 1–3 — режимы сварки нержавеющей сталей с q/v соответственно 378, 524 и 820 кДж/м; 4, 5 — то же для алюминиевых сплавов с q/v соответственно 310 и 650 кДж/м

ЭМВ при сварке технического титана и сплавов на его основе. В данном случае чрезмерно высокие расчетные значения параметра A обусловлены узким температурным интервалом $T_L - T_S$ и тем, что из-за низкой теплопроводности сварочная ванна имеет большую длину L_{II} . Поскольку экспериментальные режимы ЭМВ, по мнению авторов [15–19], были оптимальными и позволили успешно решить задачи дегазации ванны и повышения коррозионной стойкости металла швов, то в дальнейшем их использовали при анализе факторов, влияющих на параметры ЭМВ.

В результате обработки расчетных и экспериментальных данных установлено, что при сварке образцов одинаковой толщины, изготовленных из материалов одного класса, не всегда большим энерговыделением в шов соответствуют большие оптимальные значения параметров ЭМВ (рис. 3). Такое несоответствие происходит из-за различной степени форсированности применяемых режимов сварки. При неизменном значении погонной энергии q/v в случае повышения $I_{св}$ происходит возрастание длины кристаллизующейся части ванны. Происходящее одновременно с этим повышение импульса электромагнитной силы не позволяет достигать максимальной эффективности воздействия, что требует соответствующего увеличения обобщенного параметра ЭМВ. Именно из-за этого при меньшем в 1,5 раза значении q/v , но практически в 3 раза более форсированном режиме сварки, требуется в 2,75 раза большее оптимальное значение A (рис. 3).

Оптимальные параметры ЭМВ существенно зависят от теплофизических свойств свариваемых материалов. Так, алюминиевые сплавы обладают большей теплопроводностью, но значительно меньшей удельной массой и температурой плавления, чем нержавеющие стали. Поэтому оптимальные параметры ЭМВ при сварке алюминиевых сплавов более чем в 2 раза ниже, чем для нержавеющей сталей (рис. 3, 4). У титановых сплавов при большей удельной массе и температуре плавления теплопроводность в 4,5 раза меньше, чем у алюми-

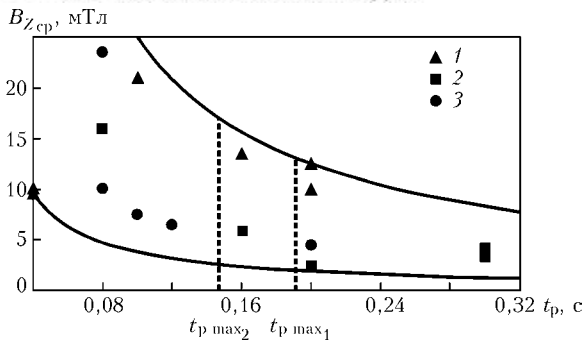


Рис. 4. Выбор оптимального режима ЭМВ: 1–3 — экспериментальные режимы ЭМВ соответственно для нержавеющей, алюминиевых и титановых сплавов; кривые, ограничивают область оптимальных значений индукции УМП при заданной длительности t_p ; $t_{p \max 1}$, $t_{p \max 2}$ — максимальные длительности t_p для нержавеющей и алюминиевых сплавов

ниевых. Такие различия теплофизических свойств при одинаковой толщине соединений требуют при сварке титана больших значений параметра A , чем при сварке алюминиевых сплавов, что не согласуется с публикуемыми экспериментальными данными. Такое несоответствие объясняется тем, что во всех рассматриваемых случаях при сварке алюминиевых сплавов применяли более форсированные режимы.

После определения с помощью зависимости (5) оптимального значения параметра A следует рассчитать значение $B_z = A/t_p$. Учитывая, что известные устройства управления ЭМВ синхронизированы с частотой питающей сети, изменяя t_p с шагом 0,01 с, строят зависимость $B_z(t_p)$, которая имеет экспоненциальную форму, аналогичную кривым, ограничивающим область их значений, наиболее часто применяемым на практике (рис. 4). При жестких режимах ЭМВ, характеризующихся увеличенными значениями B_z и кратковременными t_p , на поверхности швов образуется чешуйчатость как результат периодического набрасывания расплава на фронт кристаллизации. Поэтому такие режимы не применяют при многопроходной сварке на этапе выполнения верхних валиков. Однако при слишком мягких режимах ЭМВ длительное перемещение расплава вдоль боковой поверхности ванны может вызывать ее значительное подплавление, следствием чего может быть нестабильность формы линии сплавления.

Выбор параметров ЭМВ необходимо осуществлять с учетом способа сварки. Так, при сварке плавящимся электродом повышение B_z выше критических значений вызывает повышенное разбрызгивание. Режимы ЭМВ при сварке алюминиевых сплавов на переменном токе характеризуются более длительными t_p и меньшими B_z , что связано со стабильностью процесса горения дуги. Для обеспечения хороших манипуляционных возможностей инструмента и обзора зоны сварки при ручных способах, электромагнит генерирования УМП, расположенный на корпусе горелки, должен иметь минимальные намоточные параметры и массу, что не позволяет создавать широкий диапазон значений B_z . В этом случае требуемое значение параметра A достигают путем увеличения длительности t_p .

В случае, когда ЭМВ осуществляют с использованием пульсирующих УМП, характеризующихся наличием между импульсами УМП пауз различной длительности, наиболее часто $B_z = 5 \dots 25$ мТл при $t_p = 0,08 \dots 0,2$ с (рис. 4). При этом с повышением скважности импульсов УМП снижается среднее значение B_z , что требует пропорционального увеличения параметров ЭМВ. Более интенсивное воздействие достигается в случае, когда за время t_p между импульсами УМП отсутствуют паузы. Это позволяет сократить диапазон B_z до $5 \dots 15$ мТл, а t_p — до $0,04 \dots 0,08$ с. Отмеченные выше отличия диапазонов значений параметра A между нержавеющей стали и сплавами алюминия и титана на практике происходят из-за соответствующих отличий индукции УМП при одинаковом диапазоне длительностей интервалов реверсирования. Как было отмечено выше, режим ЭМВ будет оптимальным при выполнении равенства (1). При этом, если $\tau_k > t_p$, оставшуюся часть L_{II} расплав может пройти по инерции. В противном случае достижение максимального эффекта от применения ЭМВ невозможно. Данное обстоятельство ограничивает максимальные значения t_p , показанные на рис. 4 вертикальными прямыми.

Таким образом, разработанная расчетная схема, основанная на одновременном учете влияния на гидродинамику расплава геометрических характеристик ванны и теплофизических свойств свариваемых материалов, позволяет оптимизировать параметры электромагнитного воздействия при сварке материалов с широким температурным интервалом $T_L - T_S$ с точностью, достаточной для практического использования.

1. Пахаренко В. А. Расчет оптимальных параметров магнитного поля при аргодуговой сварке с перемешиванием ванны // Автомат. сварка. — 1982. — № 7. — С. 39–41.
2. Короб Н. Г., Кузнецов В. Д., Черныш В. П. Оценка воздействия управляющего магнитного поля на кристаллизацию при дуговой сварке // Там же. — 1990. — № 2. — С. 33–36.
3. Черныш В. П. Расчет параметров движения металла сварочной ванны при электромагнитном перемешивании // Там же. — 1977. — № 10. — С. 12–16.
4. Прохоров Н. Н. Физические процессы в металлах при сварке. — М.: Металлургия, 1968. — Т. 1. — 698 с.
5. Рыжов Р. Н., Скачков И. О., Черныш В. П. Повышение сопротивляемости сварных швов образованию горячих трещин при ручной дуговой сварке неплавящимся электродом // Автомат. сварка. — 1997. — № 4. — С. 25–29.
6. Черныш В. П., Кузнецов В. Д. Сопротивляемость горячим трещинам швов, кристаллизующихся в условиях перемешивания // Свароч. пр-во. — 1971. — № 6. — С. 41–42.
7. Черныш В. П., Поповский В. Ю. Особенности движения металла сварочной ванны при электромагнитном перемешивании // Автомат. сварка. — 1977. — № 4. — С. 4–6.
8. Черныш В. П., Кузнецов В. Д., Турык Э. Влияние электромагнитного перемешивания сварочной ванны на температурный интервал хрупкости металла шва // Там же. — 1977. — № 9. — С. 14–17.
9. Пахаренко В. А. Кинетика кристаллизации и формирование свойств сварных швов при сварке с электромагнитным перемешиванием: Дис. ... канд. техн. наук. — Киев: КПИ, 1979. — 177 с.
10. 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.
11. Структура и свойства металла швов на сплаве АМг6 при сварке с электромагнитным перемешиванием / В. П. Чер-



- ныш, В. В. Сыроватка, А. Ф. Гриценко, Б. П. Ржанов // Там же. — 1972. — № 11. — С. 16–19.
12. Новиков О. М., Крюковский В. Н., Жандарев А. П. Влияние электромагнитного перемешивания сварочной ванны на процессы дегазации и разрушения окисных плен в сварных швах сплава АМг6 // Свароч. пр-во. — 1975. — № 11. — С. 14–15.
 13. Влияние управляющего магнитного поля на структуру и герметичность сварных швов сплава АМг6 / Ю. И. Ситявин, Г. Л. Зубриенко, А. Е. Эйфельштейн и др. // Там же. — 1978. — № 9. — С. 33–35.
 14. 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.
 15. Влияние электромагнитного перемешивания на структуру и свойства сплава ВТ6С / В. Д. Кузнецов, И. В. Малинкин, В. П. Черныш и др. // Свароч. пр-во. — 1972. — № 5. — С. 8–9.
 16. Влияние электромагнитного перемешивания на свойства сварных соединений тонколистового титана / Г. М. Шеленков, В. Э. Трояновский, А. Н. Брискман и др. // Там же. — 1974. — № 12. — С. 21–22.
 17. Влияние электромагнитного перемешивания сварочной ванны на свойства соединений сплава ВТ1-0 / В. Е. Блащук, С. М. Гуревич, Л. М. Оноприенко и др. // Автомат. сварка. — 1976. — № 8. — С. 40–43.
 18. 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.
 19. Абралов М. А., Абдурахманов Р. У., Йулдашев А. Т. Влияние электромагнитного воздействия на процесс первичной кристаллизации титана // Там же. — 1978. — № 5. — С. 1–3.

Dependencies are given which allow optimizing the parameters of electromagnetic action. Adequacy of the derived dependencies to the actual welding conditions is confirmed by comparative analysis of the calculated and experimental data. Analysis is performed of the influence of both the welding parameters and thermophysical properties of materials on the optimum range of the mode of electromagnetic action.

Поступила в редакцию 14.05.2005

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Для улучшения качества лазерной сварки конструкционных сталей в ИЭС им. Е. О. Патона разработаны новые технологии с использованием дополнительных технологических приемов: лазерная сварка по слою флюса, лазерная сварка с присадочной проволокой и гибридная лазерная + МАГ сварка. Разработанные технологии позволяют выполнять сварку в различных пространственных положениях.

Толщина свариваемых конструкционных сталей — 0,8...10 мм за один проход; до 20 мм — за четыре прохода; диапазон мощностей лазерного излучения — 1,5...4 кВт; скорость сварки — 60...600 м/ч; гибридной — 40...450 м/ч на режимах дуговой сварки $I = 90...200$ А, $U = 22...26$ В.

Металлографические исследования и механические испытания показали улучшенное качество швов по сравнению с обычной лазерной сваркой в защитных газах (рис. 1).

Разработана необходимая технологическая оснастка (рис. 2).

По сравнению с другими способами сварки производительность разработанных технологий значительно выше (скорость сварки стали толщиной 1 мм — до 600 м/ч). Процесс имеет высокую термическую локальность, что обеспечивает меньшую ЗТВ. Характер проплавления — кинжальный, коэффициент формы шва — менее 1, отсутствуют термодетонации свариваемых изделий, не требуется финишная механическая обработка. В связи с малым (1...3 мм) размером сварочной ванны выброс вредных аэрозолей во много раз меньше, чем при дуговых (плазменных) способах сварки, что делает технологию экологически безопасной и улучшает условия труда.

Новая технология предназначена для сварки объемных стовых панелей, труб (в том числе поворотных и неповоротных стыков), разнотолщинных заготовок, высокоскоростной сварки тонких сталей в судостроении, автомобилестроении и других отраслях промышленности.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
 Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
 отд. № 77
 Тел. (38044) 271 52 28, 271 50 83; факс: (38044) 227 15 66
 E-mail: shelyagin@paton.kiev.ua

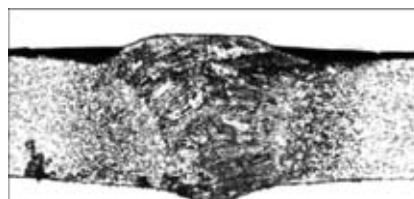


Рис. 1. Макроструктура соединения вырубленных на гильотинных ножницах листов из стали 08кп толщиной 1 мм, выполненного лазерной сваркой с приса-

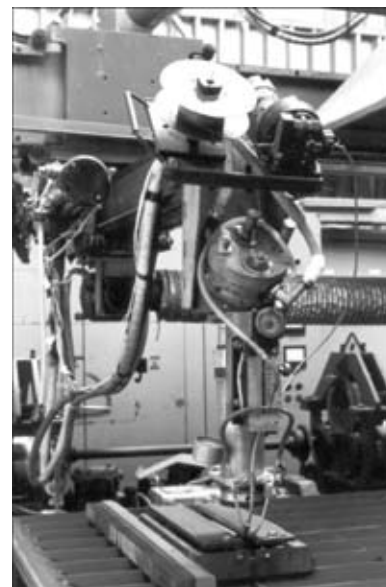


Рис. 2. Общий вид фрагмента двухкоординатного манипулятора со сварочной головкой и механизмом подачи присадочной проволоки