



# ПРИМЕНЕНИЕ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ШВОВ ПРИ ПОДВОДНОЙ МОКРОЙ СВАРКЕ

Р. Н. РЫЖОВ, канд. техн. наук, В. А. КОЖУХАРЬ, студент (НТУУ «Киевский политехнический институт»), С. Ю. МАКСИМОВ, канд. техн. наук, Е. А. ПРИЛИПКО, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

На основе анализа экспериментальных зависимостей механических свойств сварных швов от индукции управляющего магнитного поля осуществлена оптимизация режима внешних электромагнитных воздействий для условий мокрой подводной сварки.

**Ключевые слова:** подводная сварка, внешнее электромагнитное воздействие, механические свойства металла швов

К конструкциям, свариваемым под водой, предъявляются повышенные требования в части показателей прочностных характеристик швов. Это связано как со спецификой их эксплуатации, так и с техническими трудностями и дороговизной ремонтных сварочных работ.

Процесс подводной сварки характеризуется значительно большими, чем на воздухе, скоростями охлаждения металла сварного соединения [1], что приводит к увеличению уровня внутренних напряжений. В сочетании с повышенным насыщением металла водородом это вызывает ухудшение прочностных характеристик металла швов и повышение опасности образования холодных трещин.

Устранение указанных негативных эффектов возможно путем применения технологических приемов, позволяющих воздействовать в процессе сварки на кристаллизацию швов. С учетом специфики мокрой подводной сварки наиболее часто используются металлургические меры воздействия, заключающиеся в корректировке состава шихты порошковых проволок.

Как следует из работы [2], при сварке на воздухе для эффективного управления процессами кристаллизации металла швов используют внешние электромагнитные воздействия (ЭМВ), при которых в объеме ванны в результате взаимодействия электрического поля сварочного тока с аксиальной составляющей управляющего магнитного поля создаются объемные ponderomotive силы, позволяющие управлять гидродинамикой расплава. При этом в области фронта кристаллизации происходят периодические изменения температуры, положи-

тельно влияющие на формирование первичной структуры, вследствие чего значительно улучшаются механические свойства металла швов [3]. Проведенные ранее исследования показали, что применение ЭМВ при мокрой подводной сварке позволяет в 2,5 раза снизить количество растворенного в металле швов водорода [4].

Цель данной работы — количественная оценка влияния параметров режимов ЭМВ на структуру и механические свойства металла сварных швов.

Эксперименты проводили на глубинах до 1 м. Многопроходную сварку образцов из стали 17Г1С толщиной 20 мм с V-образной разделкой кромок осуществляли порошковой проволокой ППС-АН2 на следующем режиме:  $I_{св} = 180$  А (обратная полярность),  $U_d = 36$  В,  $v_{св} = 9$  м/ч. Аксиальное управляющее магнитное поле (УМП) в зоне сварки генерировали с помощью цилиндрического электромагнита, размещенного коаксиально муфштуку. Индукцию в УМП регулировали с помощью блока управления Ф91 [5]. Механические свойства металла швов определяли путем растяжения в испытательной машине образцов типа МИ12. При этом фиксировали временное сопротивление  $\sigma_b$ , предел текучести  $\sigma_T$ , относительные удлинение  $\delta$  и сужение  $\psi$  участка разрушения.

В условиях экспериментов незначительное улучшение прочностных свойств металла швов при увеличении индукции УМП до 10 мТл (рис. 1) связано с тем, что на данных режимах ЭМВ потоки расплава, сформированные в головной части ванны, не успевают переместиться на достаточное расстояние вдоль хвостовой части ванны. При этом в примыкающих к продольной оси центральных областях шва, из которых изготовляли образцы, процессы кристаллизации незначительно отличаются от исходных условий. При  $B = 15$  мТл зафиксировано увеличение  $\sigma_b$  на 8,5 и  $\sigma_T$  на 10 %.

Дальнейшее увеличение индукции приводило к ухудшению исследуемых характеристик. Это связано как с избыточной гидродинамикой расплава ванны, так и с ухудшением процессов переноса электродного металла, что негативно сказывается на формировании шва и стабильности процесса сварки в целом.

Применение ЭМВ позволяет значительно повысить пластичность металла сварных швов. При увеличении индукции

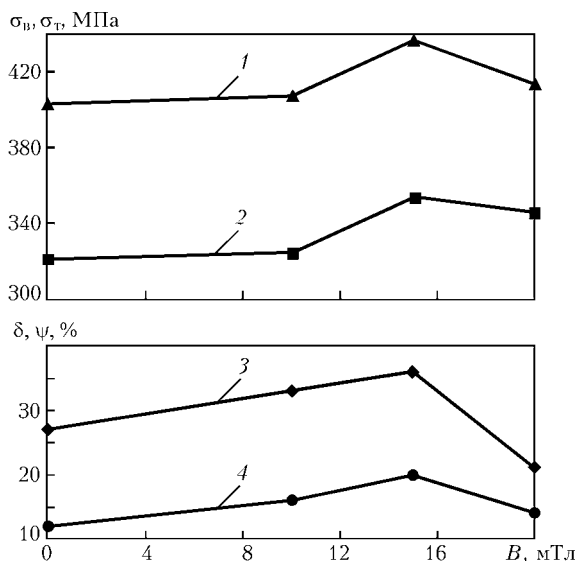


Рис. 1. Влияние индукции УМП на механические свойства швов: 1 —  $\sigma_b$ ; 2 —  $\sigma_T$ ; 3 —  $\psi$ ; 4 —  $\delta$

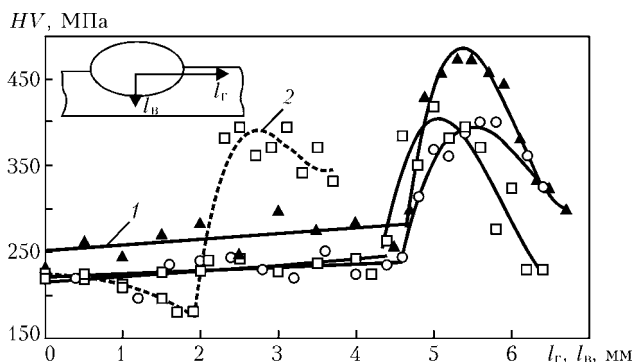


Рис. 2. Распределение твердости в поперечном сечении швов в горизонтальном  $l_r$  (1) и вертикальном  $l_b$  (2) направлениях:  $\Delta$  — сварка по штатной технологии;  $\square$ ,  $\circ$  — сварка с ЭМВ соответственно при  $B = 10$  и  $15$  мТл



Рис. 3. Микроструктуры металла сварных швов: *a* — штатная технология; *b* — с ЭМВ при  $B = 10$  мТл,  $\times 200$

УМП до 15 мТл зафиксировано монотонное увеличение  $\delta$  (на 66 %) и  $\psi$  (на 33 %). Достижение зависимостями, приведенными на рис. 1, экстремальных значений при одинаковых индукциях УМП свидетельствует о том, что изменения прочностных и пластичных свойств швов имеют одинаковую основу и связаны с соответствующими изменениями процессов кристаллизации. При этом в диапазоне  $B = 0...15$  мТл равномерное возрастание и последующее резкое снижение пластичности может объясняться взаимосвязью данной механической характеристики с насыщенностью швов водородом и кислородом [4].

Изменение пластичности металла в горизонтальном и вертикальном от продольной оси наплавленных валиков направлении оценивали по уровню микротвердости по Виккерсу  $HV$  при нагрузке 0,981 Н. Установлено, что в области продольной оси (на рис. 2  $l = 0$  мм) применение ЭМВ с  $B = 10...15$  мТл позволяет снизить  $HV$  на 13 %. Во всех исследованных образцах при удалении от продольной оси в сторону линии сплавления в горизонтальной плоскости зафиксировано незначительное увеличение  $HV$ , а в вертикальной в направлении корня шва — экспоненциальное уменьшение  $HV$ .

Такие изменения твердости металла литой зоны объясняются тем, что в условиях эксперимента корневая область швов охлаждалась с меньшей, а боковые поверхностные области — с большей скоростью. При этом известно, что в процессе кристаллизации повышение скорости охлаждения способствует образованию менее пластичных структур.

В значительно большей степени данный эффект проявляется в металле зоны термического влияния (ЗТВ), протяженность которой в условиях экспериментов составляла около 2 мм (рис. 2). В металле данной области при сварке по штатной

технологии  $HV$  практически в 2 раза больше, чем в металле шва. Установлено, что применение ЭМВ практически не влияет на ширину ЗТВ. Однако при  $B = 10$  мТл зафиксировано снижение  $HV$  на 15 %. Дальнейшее повышение индукции УМП не приводило к изменению  $HV$ . Одинаковый уровень твердости в областях ЗТВ, примыкающих как к боковым поверхностям, так и к корневой части швов, может свидетельствовать о незначительных отличиях скоростей охлаждения данных участков.

Оценку влияния ЭМВ на процессы кристаллизации осуществляли путем анализа микроструктур шлифов, изготовленных из исследуемых образцов. Установлено, что микроструктура металла швов, выполненных по штатной технологии, состоит преимущественно из перлита с очень тонкими ферритными прослойками по границам кристаллов (рис. 3, *a*). В образцах, полученных с применением ЭМВ, зафиксировано значительное уменьшение размеров кристаллов, особенно при  $B = 10$  мТл.

Наряду с увеличением толщины ферритных прослоек обнаружены участки структурно свободного феррита, что может быть следствием повышения диффузионной подвижности углерода из-за уменьшения количества несовершенств кристаллической решетки (рис. 3, *b*).

Таким образом, для достижения максимального улучшения механических свойств металла швов при подводной мокрой сварке с ЭМВ индукция УМП должна быть в диапазоне  $B = 10...15$  мТл.

Близкие геометрические параметры и химические составы металла свариваемых образцов, используемых при проведении данных исследований и приведенных в работе [3], позволяют осуществить сравнительную оценку полученных результатов. В обоих случаях зависимости  $\sigma_b$  и  $\sigma_t$  описываются кривыми с экстремумом, что позволяет оптимизировать режим ЭМВ. Однако в случае мокрой подводной сварки максимального улучшения механических свойств достигают при меньших (на 25 %) индукциях УМП, что объясняется меньшим объемом расплава сварочной ванны.

При сварке на воздухе даже при малых значениях индукции зафиксировано увеличение  $\sigma_b$  и  $\sigma_t$ , что не обнаружено при проведении данных исследований. Указанное обстоятельство можно объяснить как различиями в методиках механических испытаний, так и большей вязкостью расплава при подводной сварке, что существенно ухудшает гидродинамику ванны при малых значениях индукции УМП.

Таким образом, применение ЭМВ при мокрой подводной сварке с оптимальными значениями индукции (10...15 мТл) УМП позволяет путем управления процессами кристаллизации повышать прочность (на 10 %) и пластичность (более чем на 60 %) металла сварных швов, что свидетельствует об улучшении качества сварных соединений.

1. Мельник Ю. П., Савич И. М., Глухова Е. В. Особенности термического цикла сварки низкоуглеродистой стали под водой // Автомат. сварка. — 1976. — № 1. — С. 17–21.
2. Сварка с электромагнитным перемешиванием / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брисман, Г. М. Шеленков. — Киев: Техніка, 1983. — 127 с.
3. Газен Ю. Г., Мартынюк Т. А. Влияние параметров продольного магнитного поля на структуру и механические свойства сварных соединений газонефтепроводов // Автомат. сварка. — 1978. — № 9. — С. 37–38.
4. Влияние внешнего электромагнитного воздействия на содержание водорода в металле швов при мокрой подводной сварке / С. Ю. Максимов, Е. А. Прилишко, Р. Н. Рыжов, В. А. Кожухарь // Там же. — 2003. — № 6. — С. 55–56.
5. Короб Н. Г., Скачков И. О., Матвиш В. И. Система управления электромагнитными воздействиями при сварке // Там же. — 1993. — № 11. — С. 52–53.

The modes of the external electromagnetic impact for the conditions of wet underwater welding were optimized, proceeding from analysis of experimental dependencies of the mechanical properties of the welds on induction of the controlling magnetic field.

Поступила в редакцию 14.05.2004