



МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДЕГАЗАЦИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА ПРИ ПОДВОДНОЙ СВАРКЕ

О. Ю. ГОРОБЕЦ, д-р физ.-мат. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»),
С. Ю. МАКСИМОВ, д-р техн. наук, **Е. А. ПРИЛИПКО**, инж.
 (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрен неконвективный механизм дегазации жидкого расплава в условиях внешнего электромагнитного воздействия при подводной сварке. Установлено, что образующаяся выталкивающая электромагнитная сила, действующая на газовые пузырьки и способствующая их удалению из расплава, в несколько раз больше силы Архимеда. По своему значению и влиянию на дегазацию сварочной ванны она сравнима с центробежной силой, создаваемой во вращающемся расплаве под действием внешнего электромагнитного поля.

Ключевые слова: подводная сварка, сварочная ванна, внешнее электромагнитное воздействие, неконвективный механизм дегазации

Одним из возможных путей повышения качества сварных соединений, полученных под водой, является применение внешнего электромагнитного воздействия на сварочную ванну. Этот подход достаточно хорошо зарекомендовал себя при сварке на воздухе [1]. Однако из-за специфических особенностей дуговой сварки в водной среде указанный процесс нуждается в адаптации к этим условиям. Для определения диапазона эффективных режимов внешнего электромагнитного воздействия разработана математическая модель, базирующаяся на уравнениях магнитной гидродинамики [2]. Она учитывает взаимодействие сил, которые образуются в жидкометаллической ванне в результате взаимодействия внешнего магнитного поля и собственного электрического тока сварочной дуги. Полученные экспериментальные данные [3, 4] показали, что при подводной сварке порошковой проволокой с напряженностью внешнего электромагнитного поля в установленном диапазоне содержание водорода в наплавленном металле снижается в 2,5 раза, а максимальный размер пор уменьшаются в 5...15 раз. Как следствие, прочностные свойства металла шва увеличиваются на 20, а его пластичность (относительное удлинение) — на 40 %.

Механизм дегазации жидкого расплава в условиях внешнего электромагнитного воздействия при подводной сварке описан в работе [2]. Для объяснения указанных явлений рассмотрены силы, которые действуют при сварке на движущиеся относительно расплава пузырьки газов в сварочной ванне, включая силу Архимеда, центробежную (в случае вращающегося расплава), а также силу Стокса. Определено, что во вращающемся расплаве с радиальным распределением плотности тока меха-

низм дегазации является чисто конвективным, и центробежная сила дает вклад в дегазацию такой же или больший, чем сила Архимеда [2].

В настоящей работе рассмотрен неконвективный механизм дегазации жидкого расплава в условиях внешнего электромагнитного воздействия при подводной сварке. В работах [5, 6] установлено, что если в жидкость поместить частичку с отличающейся по значению электропроводностью, то при наложении электрического и магнитного полей она будет перемещаться.

Для исследования возможности неконвективного механизма дегазации сварочной ванны во внешнем магнитном поле нами рассмотрено действие на сферический пузырек выталкивающей электромагнитной силы [6–8]:

$$F_B = \frac{3}{2} jBV \frac{\sigma_p - \sigma}{2\sigma_p + \sigma},$$

где j — плотность тока в расплаве, A/m^2 ; B — индукция внешнего магнитного поля, Тл; $V = 4\pi b_0^3/3$ — объем пузырька радиусом b_0 , m^3 ; σ_p , σ — удельная электропроводность соответственно пузырька и расплава, Om^{-1}/m .

Если удельная электропроводность пузырька намного меньше удельной электропроводности расплава, то абсолютная величина электромагнитной выталкивающей силы имеет вид

$$|F_B| = \frac{3}{2} jBV.$$

Ниже приведены значения физических параметров системы в системе единиц СИ, используемых для рассмотрения механизма дегазации расплава под воздействием выталкивающей электромагнитной силы:

Ток сварки $I_{св}$, А	150...200
Вектор напряженности внешнего магнитного поля \vec{H}_0 , А/м.....	796...1592



Вектор индукции внешнего магнитного поля B_0 , мТл	10...20
Температура расплава $T_{рас}$, °С	(2...3)·10 ³
Диаметр ванны $d_{ванн}$, м	5·10 ⁻³
Динамическая вязкость расплава η , Па·с	3,3·10 ⁻³
Плотность расплава ρ , кг/м ³	7000
Кинематическая вязкость расплава $\nu = \eta/\rho$, м ² /с	0,47·10 ⁻⁶
Оценочная плотность тока в ванне $ j = I/d^2$, А/м ²	(6...8)·10 ⁶
Удельная электропроводимость расплава σ , Ом ⁻¹ ·м, при $T = 2500$ °С	3,5·10 ⁶
Глубина ванны l , м	0,0025
Радиус пузырьков (пор) в режиме влияния внешнего магнитного поля b , м	4·10 ⁻⁶
Радиус пузырьков (пор) без влияния внешнего магнитного поля b_0 , м	12·10 ⁻⁶
Скорость сварки $v_{св}$, м/с	0,13
Поверхностное натяжение расплавленного железа, σ_0 , мДж/м ²	1,76·10 ³

Предыдущую формулу удобнее записать в виде

$$F_v = 2\pi j B b_0^3$$

Оценим скорость отвода пузырьков v_b (т. е. скорость дегазации расплава) под действием выталкивающей электромагнитной силы и сравним ее с расчетными скоростями дегазации под действием силы Архимеда и центробежной (во вращающемся расплаве) из работы [2]. Для этого приравняем сначала выталкивающую электромагнитную силу к силе Стокса, которая тормозит отвод пузырьков:

$$2\pi j B b_0^3 = 6\pi \eta b_0 v_b$$

откуда

$$v_b = \frac{j B b_0^3}{3\eta}$$

Таким образом, для неконвективного механизма дегазации сварного шва справедливы выводы, сделанные в работе [2] применительно к конвективному механизму: скорость отвода пузырьков пропорциональна квадрату их диаметра.

Отношение выталкивающей электромагнитной силы F_v к силе Архимеда F_A , действующей на пузырек, можно выразить как

$$\frac{F_v}{F_A} = \frac{3jB}{2\rho g} \approx 2,5.$$

В результате выталкивающая электромагнитная сила приблизительно в 2,5 раза больше силы Архимеда. Согласно результатам работы [2] центробежная сила в движущемся расплаве почти в 2 раза больше, чем сила Архимеда, т. е. выталкивающая электромагнитная сила имеет такой же порядок значений и сравнимое влияние на дегазацию расплава, что и центробежная сила. Поэтому при анализе количества пузырьков в расплаве, их пространственного распределения и времени отвода (всплывания) необходимо учитывать совместное воздействие выталкивающей электромагнитной и центробежной сил. Особенно важен

неконвективный механизм дегазации, основанный на действии на пузырьки выталкивающей электромагнитной силы, при приложении внешнего магнитного поля не вдоль нормали к поверхности ванны, а вдоль указанной поверхности, когда круговое вращение расплава отсутствует.

Существует также нижнее критическое значение магнитного поля, при достижении которого его воздействие на процесс дегазации отсутствует. Это критическое поле

$$B_{min} = \frac{2\rho g}{3j} \approx 8 \text{ [мТл]}$$

соответствует превышению скорости отвода пузырьков под действием выталкивающей электромагнитной силы над скоростью всплывания пузырьков под действием силы Архимеда. Примерно такое же значение критического поля (около 6 мТл) получено и для условия превышения скорости отвода пузырьков под действием центробежной силы над скоростью всплывания пузырьков под действием силы Архимеда в работе [2]. Можно также оценить нижнее значение внешнего магнитного поля исходя из предположения, что оно должно быть больше вихревого магнитного поля, создаваемого током индуктора:

$$H_i = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} \approx 6 \text{ [мТл]},$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Все три оценки, выполненные для нижней границы диапазона прикладываемого магнитного поля в целях улучшения качества сварного шва на основе разных физических критериев, дают практически одно и то же значение напряженности магнитного поля — около 6...8 мТл.

Из изложенного выше можно заключить, что выталкивающая электромагнитная сила в несколько раз больше силы Архимеда и обеспечивает неконвективный механизм дегазации сварного шва при приложении внешнего магнитного поля в плоскости сварочной ванны с радиальным распределением плотности тока, когда отсутствует конвективное вращение ванны.

Если внешнее магнитное поле ортогонально поверхности ванны с радиальным распределением плотности тока, расплав вращается как целое вокруг направления внешнего магнитного поля, и тогда неконвективный механизм дегазации расплава под действием выталкивающей электромагнитной силы имеет тот же порядок значений, что и конвективный механизм дегазации под действием центробежной силы [2].

1. Рижов Р. М., Кузнецов В. Д. Магнітне керування якістю зварних з'єднань. — К.: Екотехнологія, 2010. — 287 с.



2. Горобец О. Ю., Максимов С. Ю., Прилипко Е. А. Анализ гидродинамических процессов при сварке под водой с электромагнитным воздействием // Сб. тр. Четвертой междунац. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (27–30 мая 2008 г., пос. Кацивели, Крым): Киев, 2008. — С. 9–12.
3. Рыжов Р. Н., Максимов С. Ю., Прилипко Е. А. Влияние внешних электромагнитных воздействий на пористость швов при подводной мокрой сварке // Вест. НТУУ «КПИ». — 2006. — № 48. — С. 226–229.
4. Применение внешних электромагнитных воздействий для улучшения механических свойств швов при подводной мокрой сварке / Р. Н. Рыжов, В. А. Кожухарь, С. Ю. Максимов, Е. А. Прилипко // Автомат. сварка. — 2004. — № 11. — С. 53–54.
5. Kolin A. An electromagnetokinetic phenomenon involving migration of neutral particles // Science. — 1953. — 117. — P. 134–137.
6. Leenov D., Kolin A. Theory of electromagnetophoresis. Magnetohydrodynamic forces experienced by spherical and symmetrically oriented cylindrical particles // Chemical Physics. — 1954. — № 22. — P. 683–688.
7. Andres U. Ts. Measurements of the ejecting electromagnetic force in a conducting liquid // Izmeritel'naya Tekhnika. — 1963. — № 5. — P. 29–31.
8. Warczok A., Riverous G. Effect of electric and magnetic fields on metallic inclusions in a liquid slag // Proc. TMS annual meeting (March 2–6, 2003, San Diego). — San Diego, 2003. — P. 224–229.

A non-convective mechanism of liquid melt degassing under the conditions of external electromagnetic impact in underwater welding is considered. It is established that the generated buoyancy electromagnetic force acting on gas bubbles and promoting their removal from the melt, is several times larger than the Archimedean force. By its magnitude and influence on weld pool degassing, it is comparable with the centrifugal force generated in the melt rotating under the impact of an external electromagnetic field

Поступила в редакцию 16.11.2011

СОЗДАНИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ СОЕДИНЕНИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ И ТИТАНА, РАЗРАБОТКА ПРИПОВЕВ И ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ

Научно-исследовательская работа по указанной теме была завершена в 2011 г. в Институте электросварки им.Е.О.Патона (руководитель темы — чл.-кор. НАН Украины В.Ф.Хорунов).

Проведены систематические исследования сплавов системы Ti–Zr–Fe (Mn) в широком интервале концентраций, изучена их структура и интервалы плавления. Построены объемные поверхности ликвидуса данных систем, а также метастабильный политермический разрез Ti₆₀Mn₄₀–Zr_{67,5}Mn_{32,5}, образующийся при скоростях охлаждения более 0,1 К/с. На основе проведенных исследований установлены области существования эвтектических сплавов с низкой температурой солидуса и ликвидуса. Выбраны оптимальные составы эвтектических припоев с приемлемой температурой плавления для их использования в качестве припоев для пайки алюминидов титана. Показано, что применение адгезионно-активных припоев на базе систем Ti–Zr–Fe и Ti–Zr–Mn для пайки алюминидов титана, обеспечивает формирование двухфазной структуры паяных швов (TiAl и Ti₃Al), близкой к структуре основного материала, кратковременную прочность (651...693 МПа) при комнатной (284...316 МПа) и при повышенной (700 °С) температуре, близкую к прочности основного материала. Основным показателем жаропрочности является длительная прочность, которая при температуре 700 °С и напряжении 200 МПа составляет соответственно 483 и 500 ч без нарушения структурной целостности образцов.

Проведенные комплексные исследования паяных соединений перспективных материалов на основе алюминидов титана позволяют расширить область их применения во многих отраслях промышленности при изготовлении ряда деталей горячего тракта газотурбинных двигателей высокотемпературного назначения, включая авиационную и энергетическую промышленность, где необходимо обеспечить высокую жаропрочность создаваемым конструкциям и отдельным узлам.

Проведенные исследования по растеканию припоев различных систем по алюминидам никеля и изучение формирования структуры паяных соединений алюминидов никеля при использовании литых припоев с кристаллической структурой, а также припоев в виде многослойных микрокристаллических фольг Ni/Al, полученных методом электронно-лучевого осаждения, показали перспективность данного направления и возможность получения плотных однородных паяных швов без проведения специальной термической обработки соединений.