



## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ПОДВОДНОЙ МОКРОЙ СВАРКИ НА ВЕРОЯТНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ ПОР В МЕТАЛЛЕ ШВА

С. Ю. МАКСИМОВ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Численным методом выполнена оценка характера влияния гидростатического давления, скорости перемещения фронта кристаллизации сварочной ванны и концентрации водорода в жидком металле при мокрой сварке под водой на значение критического радиуса газового зародыша. Полученные результаты позволяют установить закономерности влияния условий подводной сварки на склонность к образованию пор.

*Ключевые слова:* подводная сварка, поры, скорость кристаллизации, водород, давление, газовый зародыш

Пористость является одним из наиболее часто встречаемых дефектов швов, выполненных под водой. В ряде случаев это приводит к ограничению применения подводной сварки. Несмотря на важность указанной проблемы, вопросы порообразования и влияния факторов, присущих сварке непосредственно в воде, изучены недостаточно и остаются актуальными. Одним из шагов в этом направлении является математическая модель [1], позволяющая описывать физические процессы, которые происходят в приповерхностном слое перед фронтом кристаллизации (зоне, прилегающей к межфазной границе) в условиях сварки под водой, и дает возможность изучить закономерности эволюции образовавшихся здесь газовых пузырьков и определить основные параметры физических процессов, обуславливающих дальнейший рост или коллапс зародышей в сварочной ванне. При создании модели были приняты следующие допущения:

фронт кристаллизации — плоская поверхность с постоянной скоростью распространения;

перенос водорода осуществляется только диффузионным путем;

жидкость идеальная, несжимаемая и спокойная на бесконечности при отсутствии тепловой конвекции;

растворенные в жидкости примеси не влияют на физические параметры жидкой среды;

газовый пузырек однородный, сферический.

Проведенные с учетом принятых допущений численные исследования позволили сделать следующие выводы:

критические параметры газового пузырька, при которых скорость роста его размеров равна нулю, главным образом определяются внешним гидростатическим давлением  $P_a$ , скоростью фронта кристаллизации  $v_s$  и временем образования полости  $t_0$ . Критическое состояние является неустойчивым: незначительное возмущение в параметрах пузырька приводит к неминуемому росту или схлопыванию полости;

динамика роста пузырька определяется моментом его зарождения. Чем позже образовался пузырек, тем раньше поле концентрации в приповерхностном слое достигает большого размера, что в итоге увеличивает количество водорода, диффундирующего в полость пузырька, и способствует росту последнего;

динамические характеристики газового пузырька перед фронтом кристаллизации в значительной мере зависят от скорости движения плоского фронта практически во всем диапазоне возможных начальных радиусов газового пузырька. С увеличением скорости кристаллизации диффузионные процессы протекают быстрее, происходит смещение критических параметров газовых зародышей в область меньших размеров.

Исследования показали, что в диапазоне параметров, характеризующих процесс сварки под водой (глубина, скорость кристаллизации, концентрация водорода), существуют определенные значения радиусов газовых пузырьков, при которых скорость их роста равна нулю. В случае незначительного увеличения радиуса (при прочих неизменных параметрах) диффузионный баланс нарушается, и газовый пузырек начинает увеличиваться. В то же время незначительное уменьшение радиуса приводит к сжатию полости и последующему ее исчезновению. Критический радиус соответствует неустойчивому состоянию газового пузырька.

На основании полученных результатов можно оценить вероятность образования газовых пузырьков (полостей) в приповерхностном слое (рис. 1). Схема качественно отражает очевидную закономерность более вероятного образования зародышей

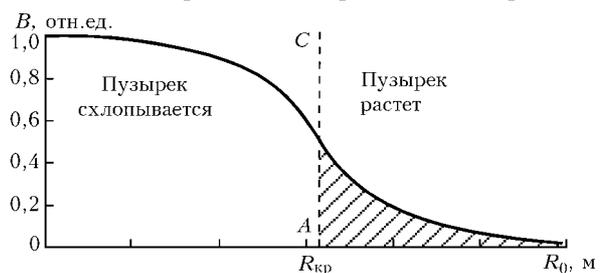


Рис. 1. Вероятность  $B$  образования газовой полости перед фронтом кристаллизации жидкого металла

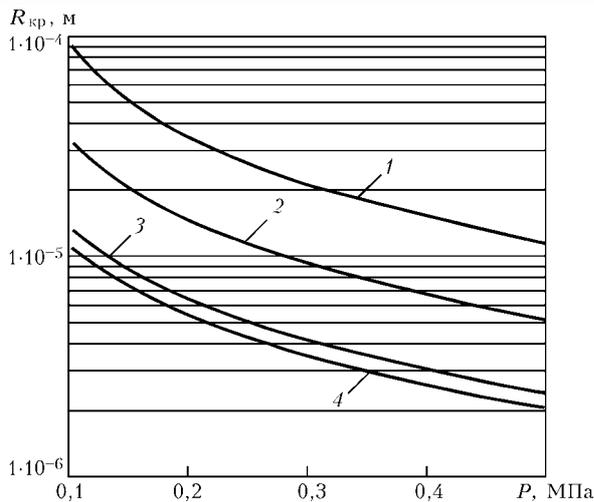


Рис. 2. Зависимость критического радиуса газового пузырька от внешнего давления при различных скоростях фронта кристаллизации: 1 –  $v_s = 0,0005$ ; 2 –  $0,001$ ; 3 –  $0,002$ ; 4 –  $0,005$  м/с

малого размера. Однако мелкие полости схлопываются, а большие, наоборот, растут. Существование критического радиуса (линия AC) определяет область (на рисунке она заштрихована), площадь которой пропорциональна вероятности появления полостей в процессе сварки. На основании численных исследований можно оценить характер влияния гидростатического давления, скорости перемещения фронта кристаллизации сварочной ванны и концентрации водорода в жидком металле на критический радиус газового зародыша. Это позволит сформулировать принципиальные подходы к выработке технологии сварки, согласно которой положение критического радиуса сместилось бы гораздо правее.

С помощью разработанной модели [1] исследовано влияние основных факторов, характеризующих специфику процесса мокрой сварки под водой, на критический радиус пузырька. При этом значения указанных факторов изменялись в диапазоне, характерном для условий подводной сварки.

На рис. 2 представлена зависимость критического радиуса пузырька от внешнего давления при различных скоростях перемещения фронта кристаллизации. С увеличением давления область критических параметров смещается в сторону меньших значений, т. е. склонность к образованию пор возрастает. Следует отметить, что увеличение скорости кристаллизации приводит к аналогичному результату.

Процесс сварки протекает определенное время, в течение которого приповерхностный слой обогащается водородом до максимального насыщения газом, что способствует смещению критических радиусов в сторону меньших значений (рис. 3). Отметим также следующую тенденцию: с течением времени каждая кривая критических параметров асимптотически приближается к некоторому положению, соответствующему моменту времени, при котором насыщение приповерхностного слоя уже завершилось. В соответствии с нашими расчетами максимальная концентрация водорода в жидком металле перед движущимся фронтом кристалли-

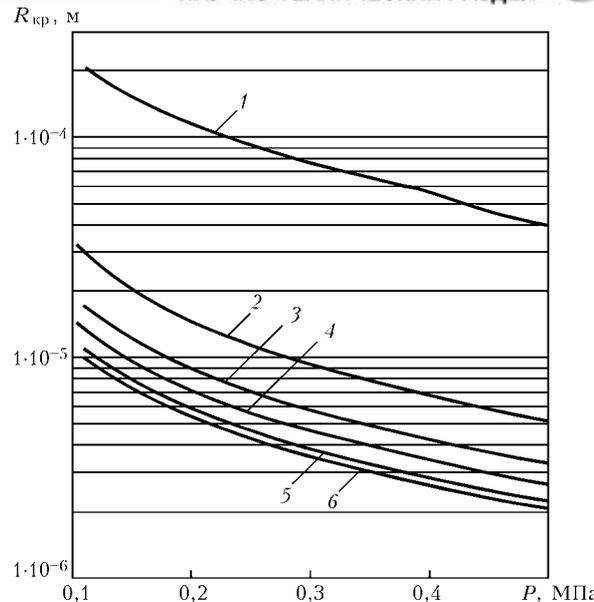


Рис. 3. Зависимость критического радиуса газового пузырька от внешнего давления при  $v_s = 0,001$  м/с для различных моментов времени образования зародышей: 1 –  $t_0 = 0$ ; 2 –  $0,1$ ; 3 –  $0,2$ ; 4 –  $0,3$ ; 5 –  $0,5$ ; 6 –  $1,0$  с

зации достигается в течение примерно 1 с после начала его перемещения.

Полученные зависимости критических размеров газовых пузырьков от скорости передвижения фронта кристаллизации (рис. 4) позволяют оценить значение критического радиуса при изменении внешнего статического давления. С его увеличением в области значений, при которых еще справедлив закон Сиверта для растворимости газа в металле, кривые критических радиусов смещаются в область малых значений (рис. 4, а). Причем для каждой скорости кристаллизации имеется соответствующее значение критического радиуса. Картина нарушается при больших значениях давления (свыше 1 МПа), когда наступает стабилизация растворимости водорода в жидкой фазе. С уменьшением скорости кристаллизации наклон кривых равновесия стремится к нулю (рис. 4, б), и при некоторых ее значениях критические точки вовсе отсутствуют.

Зависимость критического радиуса полости от скорости фронта кристаллизации для различных моментов времени, но при неизменном внешнем давлении представлена на рис. 5. Здесь следует обратить внимание на то, что при малых скоростях значение критического радиуса практически не зависит от момента образования зародыша. Отсюда следует вывод о том, что низкие скорости кристаллизации являются менее благоприятными для широкого диапазона размеров зародышей, а значит, и количество пор в металле шва должно снизиться.

Для любого набора исходных параметров существует вполне определенное критическое значение размеров газового пузырька, образованного перед фронтом кристаллизации. С течением времени  $R_{кр}$  стабилизируется и для данных условий сварки ( $P_a, v_s$ ) остается неизменным.

На рис. 6 полученные результаты исследований представлены в виде зависимостей критического

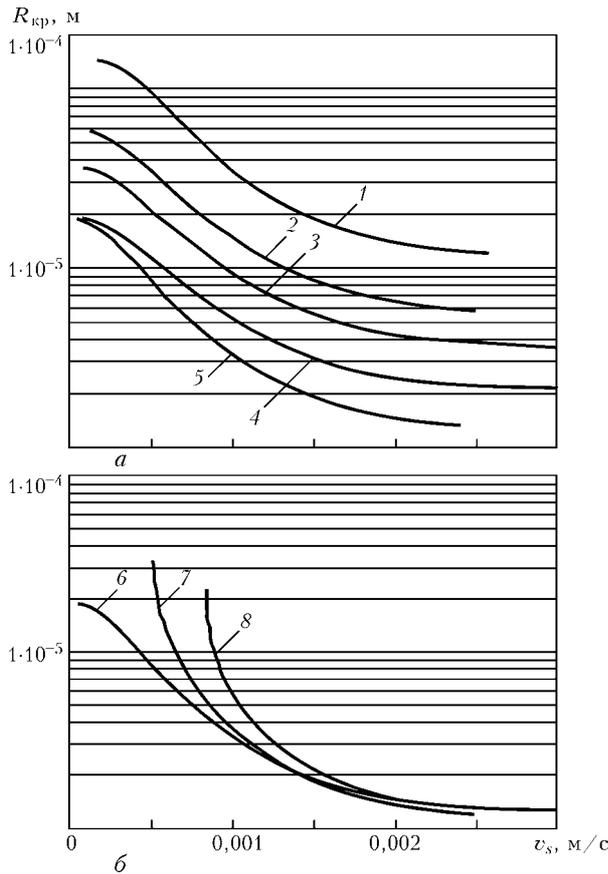


Рис. 4. Зависимость критического радиуса газового пузырька от скорости фронта кристаллизации при малых (а) и больших (б) значениях гидростатического давления: 1 —  $P_a = 0,1$ ; 2 — 0,2; 3 — 0,3; 4 — 0,5; 5, 6 — 1,0; 7 — 1,5; 8 — 2,0 МПа

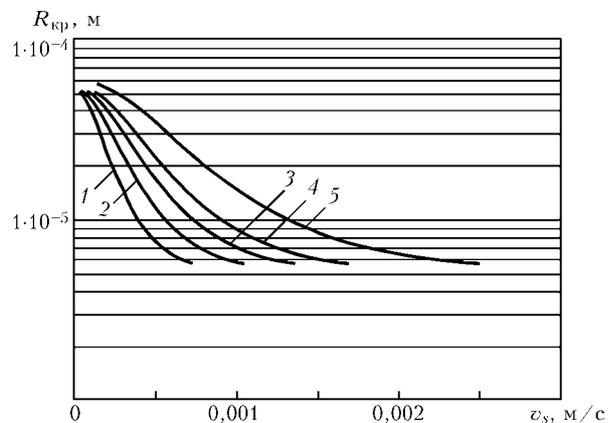


Рис. 5. Зависимость критического радиуса газового пузырька от скорости фронта кристаллизации для различных моментов времени образования зародыша при  $P_a = 0,2$  МПа: 1 —  $t_0 = 1,0$ ; 2 — 0,5; 3 — 0,3; 4 — 0,2; 5 — 0,1 с

радиуса газового пузырька от скорости кристаллизации, гидростатического давления и концентрации водорода в расплавленном металле в диапазоне значений, характерных для сварки под водой.

В случае содержания в расплавленной сварочной ванне  $20 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  водорода (рис. 6, а) при скорости кристаллизации выше  $7 \text{ м/ч}$  ( $2 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ ) возможно зарождение пузырьков радиусом  $10 \dots 15 \text{ мкм}$ . При замедлении процесса кристаллизации или повышении давления вероятность образования пор уменьшается, поскольку увеличи-

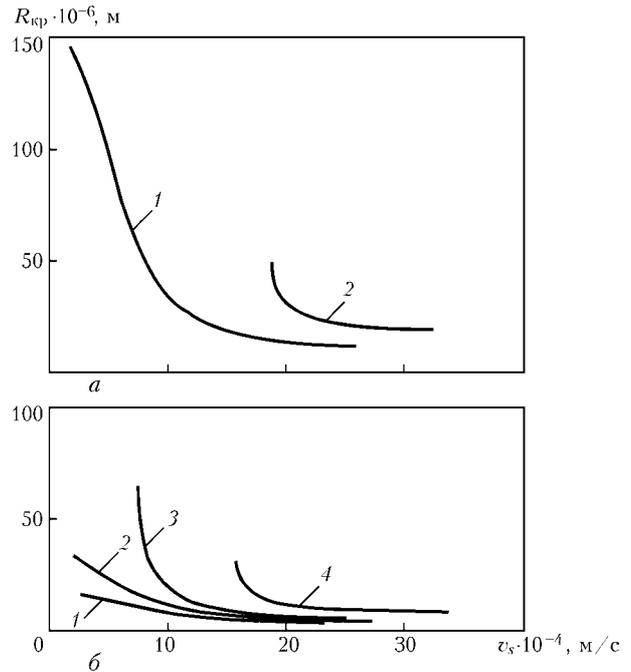


Рис. 6. Влияние давления на критический радиус газового пузырька при концентрациях водорода  $20$  (а) и  $30$  (б)  $\text{см}^3/100 \text{ г}$ : 1 —  $P_a = 0,1$ ; 2 — 0,2; 3 — 0,3; 4 — 0,5 МПа

вается критический радиус. Повышение в 1,5 раза концентрации водорода (рис. 6, б) приводит к уменьшению критических радиусов пузырьков примерно в 2 раза, эффект влияния давления снижается.

В зависимости от скорости кристаллизации существует определенный уровень давления, при котором вероятность образования пор резко снижается. Такому состоянию соответствует отрезок кривой, где угол наклона касательной к оси абсцисс приближается к  $90^\circ$ . Указанное давление повышается с увеличением содержания водорода. Наибольший эффект воздействия рассматриваемых факторов обнаружен в диапазоне малых скоростей кристаллизации, а при скорости свыше  $7 \text{ м/ч}$  их влияние практически нивелируется.

Приведенные выводы хорошо согласуются с результатами исследования характера пористости при мокрой сварке [2]. Изучение изломов образцов, сваренных рутитовыми и ильменитовыми электродами, показало наличие микропор диаметром  $10 \dots 50 \text{ мкм}$  и отсутствие макропор. При снижении содержания водорода дополнительно обнаружено много макропор диаметром более  $0,5 \text{ мм}$ .

Увеличение скорости передвижения фронта кристаллизации приводит к смещению критических параметров газовых зародышей в область меньших размеров, т. е. при малых скоростях сварки диапазон размеров зародышей, которые с течением времени растут и при кристаллизации сварного шва приводят к образованию пор, уменьшается.

Однако во всех случаях с течением времени до зарождения пузырька диапазон размеров полостей, эволюция которых завершается образованием пор, увеличивается. Критические радиусы пузырьков асимптотически стремятся к значениям, соответствующим моменту времени, при котором



стабилизируется концентрация водорода в жидком металле в области, близкой к фронту кристаллизации.

Учет экспериментальной зависимости растворимости водорода в жидком металле с увеличением внешнего давления приводит к сложной зависимости критического радиуса от давления, при котором происходит сварка. На малых глубинах увеличение давления способствует смещению критического радиуса в область малых размеров газовых зародышей. При больших глубинах, для которых характерно повышение растворимости газа в металле, зафиксирована обратная тенденция: возрастание давления вызывает увеличение критического радиуса, дальнейшая эволюция которого приводит к образованию пор.

Поскольку в реальных условиях можно регулировать только два параметра (скорость кристаллизации и концентрацию водорода), то снижение пористости возможно лишь путем уменьшения их

значений. Одним из действенных путей реализации такого подхода может служить перемешивание расплавленного металла сварочной ванны. При этом воздействие оказывается на оба указанных фактора одновременно. С одной стороны, перемешивание способствует дегазации сварочной ванны, а с другой, — выравниванию температуры расплавленного металла по всему объему, тем самым вызывая понижение скорости кристаллизации. На практике при выполнении сварки под водой для этого можно использовать внешнее электромагнитное воздействие или применение поперечных колебаний конца электрода или сварочной горелки.

1. Максимов С. Ю., Гуржий А. А. Моделирование условий зарождения пор в металле шва при мокрой подводной сварке // Автомат. сварка. — 2004. — № 7. — С. 8–13.
2. Shiming L., Guorong W., Yonglun S., Zhifeng L. A study of microporosities in underwater wet welding. — S. l., [1987]. — 6 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. CREAU 96–87).

A numerical method was used for evaluation of the influence of hydrostatic pressure, velocity of solidification front of weld pool motion and hydrogen concentration in molten metal in wet underwater welding on the value of critical radius of gas nuclei. Obtained results enable establishing the regularities of influence of underwater welding conditions on susceptibility to pore formation.

Поступила в редакцию 13.07.2004

# ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ-2005

МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА ОБОРУДОВАНИЯ  
электротермия, сварка, резка, высокочастотные технологии  
24–27 мая 2005 Санкт-Петербург

Среди разделов выставки

- ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД В ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ
  - ✓ плазменные системы для сварки и резки металлов
  - ✓ высокочастотные плазменные установки
  - ✓ установки коронного и тлеющего разряда
  - ✓ лучевые технологии и лазеры
- ЭЛЕКТРОСВАРОЧНЫЕ СИСТЕМЫ
  - ✓ технологии и оборудование для сварки в среде защитных газов
  - ✓ технологии и оборудование для сварки металлов давлением
  - ✓ технологии и оборудование для специализированных способов сварки и обработки материалов
- ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ
  - ✓ производство и применение металлических порошков при сварке, наплавке, напылении
- СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
  - ✓ Технологии и оборудование для сварки и термической резки металлов
  - ✓ Оборудование для обработки поверхности
  - ✓ Сварочные материалы и принадлежности
  - ✓ Автоматические системы управления
  - ✓ Роботы
  - ✓ Приборы, измерения, испытания, техническая диагностика, обработка данных
  - ✓ Неразрушающий контроль
  - ✓ Материалы и комплектующие изделия для производства электросварочного Оборудования

ЛЕНЭКСПО

Тел.: (812) 321 2631, 321 27 22  
Факс: 321 27 22, 321 26 31  
E-mail: averkina@mail.lenexpo.ru

