

## ВЛИЯНИЕ КИСЛОРОДА НА ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ ВЫЗЫВАЕМЫХ АЗОТОМ ПОР ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ\*

В. А. ПИСАРЕВ, С. Н. ЖИЗНЯКОВ

Беларусский нац. техн. ун-т. Республика Беларусь, 220013, г. Минск, просп. Независимости, 65.

E-mail: niil\_svarka@bntu.by

Одним из наиболее распространенных дефектов сварных соединений, выполняемых дуговой сваркой плавящимся электродом, особенно на открытых площадках, является пористость азотного происхождения. Считается, что для получения бездефектных швов при сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей содержание азота в них не должно превышать 0,01...0,03 %. Вместе с тем на практике имеют место факты получения плотных швов при содержании азота до 0,18 %. Это свидетельствует о том, что кроме концентрации азота и температуры на процесс образования связанных с ним пор определяющее влияние оказывают еще и другие факторы. Одним из таких факторов, как показывают проведенные аналитические и экспериментальные исследования, является содержащийся в металле сварочной ванны кислород. Он способен тормозить поступление атомов азота из расплава в газовую полость развивающегося зародыша или пузырька (эффект кислородного адсорбционного торможения). Вновь установленная закономерность была использована при разработке технологического процесса сварки стальных конструкций в углекислом газе на открытых площадках при воздействии ветра скоростью до 8...10 м/с. Библиогр. 11, табл. 1, рис. 1.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, поры, азот, кислородное адсорбционное торможение, плотный шов, технология

Общепринятый технологический процесс сварки в углекислом газе не позволяет получать качественные сварные соединения на открытых площадках при ветре скоростью свыше 2...3 м/с, поскольку в этом случае нарушается газовая защита зоны сварки, в которую в недопустимом количестве попадает атмосферный воздух. Это приводит к образованию чрезмерной пористости, вызываемой содержащимся в воздухе азотом.

Существующие способы сварки в углекислом газе, позволяющие вести процесс при скоростях ветра свыше 3 м/с, предполагают применение различных ветрозащитных устройств; специальных сварочных горелок, повышающих газодинамическую устойчивость струи защитного газа, с использованием соответствующих режимов сварки; сварочных проволок, легированных сильными нитридообразующими элементами (Al, Ti, Zr и др.).

Однако по целому ряду причин указанные способы и технологии сварки распространения в строительстве и на монтажных площадках не получили.

Рациональным путем решения проблемы увеличения объемов сварки в углекислом газе и как следствие повышения уровня механизации сварочных работ на открытых площадках является поиск и разработка способа сварки, при котором имеется реальная возможность непосредственного воздействия на сам механизм образования пор

азотного происхождения и, управляя им, приостанавливать их формирование.

Для этого прежде всего необходимо было найти объяснение некоторым известным и противоречивым фактам, связанным с азотным порообразованием:

при дуговой сварке на открытом воздухе пористость швов (по количеству и размерам пор), выполняемых проволокой марки Св-08, значительно меньше пористости швов, выполняемых проволокой марки Св-08Г2С;

при дуговой сварке (наплавке) в струе воздуха проволокой марки Св-08А с расходом воздуха 30 л/мин поры в швах не образуются. В то же время при использовании проволоки марки Св-08Г2С получение плотных швов не наблюдается;

при сварке в смеси  $\text{CO}_2 + 4\% \text{N}_2$  поры отсутствуют. Вместе с тем при сварке в смеси ( $\text{Ar} + 20\% \text{CO}_2 + 4\% \text{N}_2$ ) швы изобилуют порами;

при ручной дуговой сварке на увеличенной длине дуги электродами с рутиловым покрытием поры в швах не образуются, при сварке электродами с основным покрытием, обеспечивающим лучшую газовую защиту зоны сварки, имеет место существенная пористость швов;

при ручной дуговой сварке электродами с меловым покрытием, не обеспечивающим достаточно полную газовую защиту зоны сварки от воздуха, поры в сварных швах отсутствуют.

Приведенные факты, представленные в таблице и на рисунке, дополненные информацией по содержанию азота и кислорода в металле шва

\* В порядке обсуждения.

## Содержание газов и оценка порообразования в металле сварных швов, полученных с различными вариантами защиты зоны сварки от воздуха

Способ и условия сварки	Содержание газов, %		Пористость	Источник информации
	[N]	[O]		
1. Сварка в CO <sub>2</sub> , проволока Св-08Г2С	0,015	0,06	Нет пор	Данные авторов
2. Сварка на воздухе, проволока Св-08Г2С	0,13	0,06	Поры (крупные)	[1]
3. То же, проволока Св-08	0,15	0,08	Поры (мелкие)	То же
4. Сварка в струе воздуха, расход 30 л/мин, проволока Св-08А	0,18	0,13	Нет пор	[1]
5. Сварка в смеси CO <sub>2</sub> + 4 % N <sub>2</sub> , проволока Св-08Г2С	0,03	0,07	Нет пор	Данные авторов
6. Сварка в смеси (Ar + 20 % CO <sub>2</sub> ) + 4 % N <sub>2</sub> , проволока Св-08Г2С	0,04	0,03	Поры	То же
7. Ручная дуговая сварка короткой дугой, электроды МР-3	0,02	0,08	Нет пор	->-
8. То же, удлиненной дугой	0,04	0,08	Нет пор	->-
9. Ручная дуговая сварка короткой дугой, электроды УОНИИ-13/55	0,02	0,02	Нет пор	->-
10. То же, удлиненной дугой	0,03	0,02	Поры	->-
11. Ручная дуговая сварка, электроды с меловым покрытием	0,14	0,13	Нет пор	[2]

*Примечание:* считается [1], что при сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей поры в металле шва в общем случае образуются при содержании в нем азота свыше 0,01...0,03 %.

сварных соединений, дают основание полагать о существовании определяющего влияния находящегося в расплаве кислорода на процесс образования вызываемых азотом пор.

Детальный анализ полученных данных наглядно показывает, что с увеличением концентрации растворенного кислорода порог азотного порообразования резко возрастает.

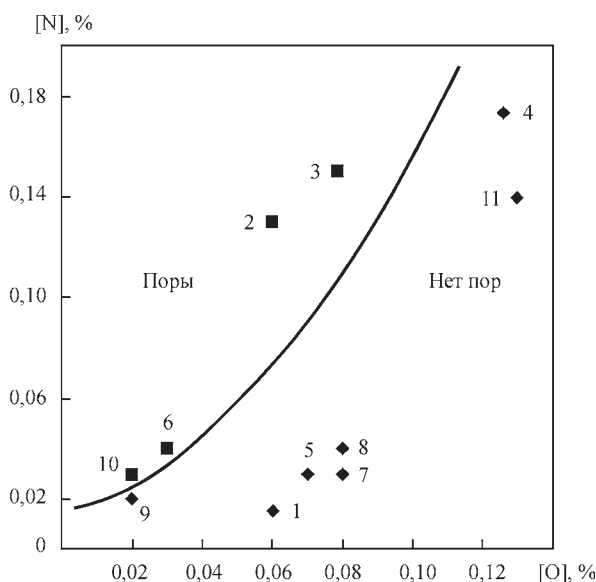
Для выделения растворенных в металле газов в самостоятельную фазу прежде всего необходимо наличие в расплаве центров зарождения (зародышей) газовых пузырьков. Вероятными местами возникновения зародышей являются существующие в сварочной ванне различного вида микропустоты, плохо смачиваемые металлом твердые неметаллические включения и другие содержащиеся в расплаве взвеси. Некоторые исследователи [1,

3], и этой точки зрения придерживаются авторы статьи, считают, что зародыши пор при дуговой сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей преимущественно вызывает реакция образования оксида углерода.

Последующее развитие зародыша и превращение его по достижении критического радиуса в газовый пузырек, а также дальнейший рост пузырька до видимых размеров и переход его при кристаллизации металла сварочной ванны в пору, может происходить под воздействием как продолжающегося образовываться оксида углерода, так и выделяющихся из окружающего объема жидкого металла водорода и азота — газов, находящихся в растворе в пересыщенном состоянии.

Существует мнение [1, 4], что способность металла шва к образованию пор можно теоретически оценивать по суммарному скрытому парциальному давлению газов, способных выделяться из металла в результате прохождения реакций в условиях равновесия. При этом поры (более правильно — пузырьки) способны появиться тогда, когда скрытое суммарное давление газов  $\sum P_i$  (оксида углерода, водорода и азота) будет заметно превышать внешнее давление  $P_{вн}$ , которое условно можно принять равным 0,1 МПа.

Однако приведенные в таблице данные и практика производства сварочных работ указывают на то, что подобный подход к оценке роли всех или одного газа в образовании пор требует уточнения. Так, фактическое участие в порообразовании азота, в частности, при сварке в окислительной среде, расчетным путем через определение скрытого парциального давления находящихся в сварочной ванне газов однозначно определить невозможно. Последнее обусловлено тем, что в этом случае поведение растворенного в жидкой стали азота не подчиняется закону квадратного корня Сиверкса,



Влияние содержания кислорода на образование вызываемых азотом пор в сварных швах соединений, полученных при дуговой сварке плавящимся электродом низкоуглеродистых и низколегированных сталей (№ 1–11 — см. таблицу)

устанавливающего зависимость между концентрацией газа в жидком металле и его парциальным давлением. Согласно этому закону при содержании азота в металле, равном 0,14 и 0,18 %, его расчетные парциальные давления в газовой полости пузырьков должны приближаться соответственно к 12 и 20 МПа, что, как следствие, согласно упомянутому выше мнению, должно вызывать чрезвычайно большую пористость. Однако в действительности даже при таких высоких содержаниях азота пористость в металле швов отсутствует (см. таблицу) и следовательно парциальные давления азота в пузырьках (или развивающихся зародышах) не превышают 0,1 МПа. Причиной этому явлению, как было установлено экспериментальными и аналитическими исследованиями, является высокое содержание в сварочной ванне кислорода — 0,13 %. Таким образом, для качественной оценки вероятности появления газовых пузырей, являющихся предвестниками вызываемых азотом пор, необходимо знание не только концентрационных и температурных параметров растворённого в металле азота, но и понимание специфики влияния на процесс порообразования содержащегося в расплаве кислорода, одного из сильных поверхностно-активных элементов.

Анализ литературных данных по вопросам поглощения и выделения газов из сварочной ванны и образования пор в металле шва сварных соединений, выполненных дуговой сваркой, ознакомление с диффузией газов в металлических расплавах и с процессами дегазации жидкого металла при производстве стали [1–10], позволили представить следующий путь поступления азота в развивающийся зародыш или растущий пузырек (далее пузырек), состоящий из четырёх основных этапов.

*Первый этап.* Перенос посредством конвективной диффузии (в переносе задействованы конвективные и диффузионные процессы) атомов растворенного в металле сварочной ванны азота к поверхности раздела «металл–газовая фаза пузырька».

Благодаря высокой температуре расплавленного металла и наличию в сварочной ванне при дуговой сварке плавящимся электродом конвективных металлических потоков, постояннодвигающихся со скоростью, в 10...20 раз превышающей скорость сварки [6], и непрерывно омывающих поверхность растущего и всплывающего пузырька, подвод атомов азота к поверхности раздела происходит с высокой интенсивностью.

*Второй этап.* Адсорбция атомов азота поверхностным слоем жидкого металла на границе раздела «металл–газовая фаза пузырька».

Одновременно с азотом к поверхности раздела фаз (поверхностному слою) подводятся другие растворенные в металле сварочной ванны газы, в том числе (и это особенно важно) кислород, который характеризуется высокой диффузионной подвижностью и всегда содержится в сварочном расплаве. При этом атомы кислорода, являющегося сильным поверхностно-активным веществом, согласно закону Гиббса (адсорбция) поглощаются (адсорбируются) поверхностным слоем, занимая в нем в первоочередном порядке соответствующую их концентрации часть свободных адсорбционных мест (центров), а также частично мест, занятых атомами азота, вытесняя последние с поверхности раздела. Это уменьшает долю мест, потенциально способных адсорбировать атомы азота, также обладающего, хотя и в значительно меньшей степени, поверхностно-активными свойствами.

Уменьшение вакантных для азота адсорбционных мест снижает скорость адсорбции  $v_{\text{адс}}$  и как следствие коэффициент массопереноса атомов азота через поверхность раздела «металл–газовая фаза пузырька», что можно оценить выражением:  $v_{\text{адс}} = KC(1 - \alpha)$ , где  $K$  — коэффициент пропорциональности;  $C$  — концентрация азота в сварочной ванне;  $\alpha$  — доля занятых кислородом адсорбционных мест на поверхности раздела, определяемая его содержанием в сварочном расплаве. При малом содержании кислорода в металле сварочной ванны, не более 0,01...0,03 %, когда доля занятых кислородом адсорбционных мест  $\alpha$  крайне мала, имеет место высокая склонность металла швов к образованию пор азотного происхождения (аргоно-дуговая сварка, сварка в смеси углекислого газа с аргоном, ручная дуговая сварка электродами с основным видом покрытия). Заметное повышение стойкости против образования пор наблюдается при содержании кислорода в сварочной ванне порядка 0,07...0,11 %. В этом случае атомы кислорода занимают значительную часть поверхности раздела фаз, что уменьшает скорость адсорбции атомов азота и способствует получению плотных швов при ручной дуговой сварке электродами с рутиловым и кислым покрытиями удлиненной дугой и на открытых площадках при высоких скоростях ветра, а также при сварке в углекислом газе с введенным в зону сварки азотом до 4 % или воздухом до 6 %. При большой концентрации кислорода в расплаве, свыше 0,11...0,13 %, его атомы по-видимому способны занимать всю поверхность раздела ( $\alpha = 1$ ) и даже образовывать в поверхностном слое химические группировки, близкие по составу с оксидом железа. Такой слой фактически приостанавливает переход атомов через поверхность раздела, развитие пузырька не происходит даже при очень высоком

содержании (высокой степени пересыщения) азота в сварочной ванне, 0,14...0,18 %. Именно этим можно объяснить отсутствие видимой пористости при сварке в струе воздуха проволокой Св-08А при расходе воздуха 30 л/мин (дополнительное окисление металл сварочной ванны получает за счет участия в металлургическом процессе кислорода воздуха), а также при сварке электродами с меловым покрытием.

Имеет место явление, которое можно определить как эффект кислородного адсорбционного торможения процесса образования пор азотного происхождения.

*Третий этап.* Молизация адсорбированных атомов азота. Физически адсорбированные атомы азота, находящиеся в поверхностном слое, вступают в химическое взаимодействие между собой с образованием молекул с очень устойчивыми тремя ковалентными связями:  $2N_{\text{адс}} = N_2$ . При этом выделяется большое количество тепловой энергии, 945 кДж/моль (энергия активации молизации составляет всего 0,4 кДж/моль).

*Четвертый этап.* Десорбция образовавшихся молекул азота в газовую полость пузырька. В условиях высокой температуры расплавленного металла и низкого парциального давления азота в газовой полости скорость десорбции молекул азота лимитируется главным образом интенсивностью массопереноса атомов азота через поверхность раздела фаз, определяемую концентрацией азота и содержанием кислорода в металле сварочной ванны.

Таким образом, и это со всей очевидностью вытекает из изложенного выше материала, одним из основных факторов, определяющих процесс образования пор азотного происхождения при дуговой сварке плавящимся электродом низкоуглеродистых и низколегированных сталей, является также специфическое действие содержащегося в металле сварочной ванны кислорода, что может быть использовано в качестве эффективного регулятора механизма порообразования.

Это положение и его следствие — эффект кислородного адсорбционного торможения — были взяты за металлургическую основу при разработке технологического процесса сварки в углекислом газе, обеспечивающего получение качественных сварных соединений на открытых строительно-монтажных площадках при скорости ветра до 8...10 м/с, когда зона сварки «обогащается» атмосферным воздухом. С целью повышения содержания кислорода в расплаве до умеренного рационального уровня, порядка 0,07...0,09 %, было успешно опробовано применение проволо-

ки с минимально допустимым содержанием элементов-раскислителей и газовой смеси углекислого газа с кислородом, имеющей более высокую по сравнению с чистым углекислым газом окислительную способность [11]. При этом обращалось внимание на влияние содержащихся в металле шва газов на механические свойства сварных соединений.

## Выводы

1. Содержащийся в металле сварочной ванны кислород оказывает значительное влияние на процесс образования пор азотного происхождения при дуговой сварке плавящимся электродом низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Он непосредственно воздействует на механизм поступления атомов (молекул) азота в газовую полость развивающегося зародыша и растущего пузырька, блокируя процесс порообразования (эффект кислородного адсорбционного торможения).

2. Повышение концентрации кислорода в расплаве способно значительно уменьшить склонность металла сварного шва к образованию азотной пористости. Это явление было успешно использовано при разработке технологического процесса сварки в углекислом газе стальных конструкций на открытых площадках при скорости ветра до 8...10 м/с.

1. Новожилов Н. М. Основы металлургии дуговой сварки в газах / Н. М. Новожилов. – М.: Машиностроение, 1979. – 231 с.
2. Алов А. А. Электроды для дуговой сварки и наплавки / А. А. Алов. – М.: Машгиз, 1947. – 87 с.
3. Алов А. А. Основы теории процессов сварки и пайки / А. А. Алов. – М.: Машиностроение, 1969. – 272 с.
4. Походня И.К. Металлургия дуговой сварки. Взаимодействие металла с газами / И. К. Походня. – М.: Машиностроение, 2004. – 256 с.
5. Ершов Г. С. Диффузия в металлургических расплавах / Г. С. Ершов, В. П. Майборода. – Киев.: Наукова думка, 1990. – 224 с.
6. Ерохин А. А. Основы сварки плавлением / А. А. Ерохин. – М.: Машиностроение, 1973. – 448 с.
7. Сварочные материалы для дуговой сварки. Защитные газы и сварочные флюсы / Б. П. Конищев, С. А. Курламов, Н. Н. Потапов [и др.]; под ред. Н. Н. Потапова. – М.: Машиностроение, 1989. – Т. 1. – 544 с.
8. Сварочные материалы для дуговой сварки. Сварочная проволока и электроды; под ред. Н. Н.Потапова. – М.: Машиностроение, 1993. – Т. 2. – 768 с.
9. Кудрин В. А. Теория и технология производства стали: [учебник для вузов] / В. А. Кудрин. – М.: Мир, АСТ, 2003. – 528 с.
10. Римский С. Т. Способы повышения стойкости металла шва к образованию пор при дуговой сварке в защитных газах / С. Т. Римский // Сварщик в Белоруссии. – 2008. – № 4 – С. 15–18.
11. Жизняков С. Н. Влияние кислорода на процесс сварки в смеси  $CO_2 + O_2$  / С. Н. Жизняков, Л. Н. Тималев // Сварочное производство. – 1977. – № 2. – С. 25–27.

Поступила в редакцию 04.04.2016