



УДК 621.791. 947.55.01

Котик В.Т.

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт".
Украина, Киев

ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ ПОР ПРИ СВАРКЕ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Анотація

Проведений аналіз місцерозташування і форми пор при зварюванні вуглецевих сталей. Показано, що пори утворюються в місцях перетину нижньої частини шва із зварюваною кромкою. Розглянута кінетика розвитку пори і запропонований механізм процесу пороутворення.

Abstract

The assaying of a site and the molding box of pores is lead at a welding of simple steels. It is shown, that pores are formed in places of intersection of a drag of a seam with a welded edge. The kinetics of evolution of a pore surveyed and the mechanism of process of a pore-formation is offered.

Вступление

Поры наиболее распространенный дефект процесса сварки. Многочисленные работы в области исследования процессов порообразования позволяют определить основные закономерности и причины появления пористости в сварных швах. Это, прежде всего, изменение растворимости азота

и водорода при переходе металла с жидкого состояния в твердое, либо процессы химического взаимодействия углерода жидкого металла ванны с кислородом, которые вызывают образование нерастворимого в жидком металле окиси углерода. При этом ведущую роль в процессе зарождения поры большинство исследователей отдают водороду, а азот и окись углерода способствуют развитию зародыша [1, 2].

Постановка проблемы

Процесс зарождения поры происходит, в основном, во впадинах между растущими кристаллами металла на границе твердый-жидкий металл. При этом, если пересыщение жидкого металла ванны газами большое, то образовавшийся пузырек вырастает до больших размеров и может оторваться от затвердевших кристаллов металла [3]. В зависимости от условий смачиваемости жидким металлом твердых кристаллов, пузырек отрывается либо полностью (при этих условиях пора не образуется), либо частично, оставив между кристаллами часть пузырька, который в последствии, за счет выделения в него растворимого в металле газа увеличивается в размерах. Давление газа в нем растет, металл вокруг него кристаллизуется,

вязкость металла большая, и в затвердевшем металле образуется газовая пустота-пора. Указанные воззрения на процесс порообразования позволяют сформулировать следующие основополагающие принципы процесса порообразования:

- наличие пересыщения жидкого металла ванны азотом либо водородом, или наличие в жидком металле ванны большого количества растворенного кислорода и возможность протекания реакции окисления углерода;

- наличие на фронте кристаллизации плохо смачиваемых жидким металлом участков, где между растущими дендритами могут возникнуть зародыши, впоследствии развившиеся в пору.

Однако, многочисленные наблюдения возникающей при сварке пористости не вписываются в данную теорию:

- неоднократно замечено, причем для разных металлов, значительно меньшую пористость, или полное отсутствие, при наплавке или сварке со сквозным проплавлением на медной (флюсовой) подкладке по сравнению со сваркой с неполным проплавлением;

- практически невозможно объяснить на основе указанной теории возникающую в результате появления пор в шве потерю герметичности сварного соединения. Понятно, что выросшая до поверхности сварного шва и превратившаяся в свищ пора открывает свою полость в окружающую атмосферу. Однако, нижняя часть поры формируется в процессе кристаллизации сварочной ванны за счет создания избыточного давления газами поступающими в зародыш из жидкого металла. Развитие и рост поры также происходят при наличии избыточного постоянного давления в поре, которое уравнивается статическим давлением жидкого металла над порой. При этом, корень сварного шва, где образуется зародыш кристаллизуется в первую очередь и весь процесс дальнейшего развития поры возможен при наличии в нижней части поры затвердевшего металла герметизирующего пору. То есть, сам механизм роста поры предполагает наличие обязательной герметизации нижней части поры от окружающей атмосферы в процессе роста. Возникает вопрос: как после полного затвердевания сварного шва исчезает герметичность сварного соединения?

Методика и результаты исследований

Необходимо отметить, что наблюдать процессы образования и развития пор при сварке практически невозможно из-за специфических условий процесса сварки. Основной способ контроля наличия пористости — рентгенография (рис. 1) не дает практически никакой информации о конфи-



Рис. 1. Рентгеновский снимок пористого участка сварного шва

гурации, форме и объеме поры, отображая на рентгеновской пленке проекцию поры на плоскость в виде окружности. Наиболее полную информацию можно получить, наблюдая поры в изломе сварных швов, выполненных односторонней сваркой с неполным проваром. Несваренная часть стыка служит концентратором напряжений и, как правило, излом проходит по телу поры, разделяя ее на две части, позволяя тем самым наблюдать место зарождения, размеры, форму и проанализировать процесс ее роста.

Многочисленные изучения по изломам и макрошлифам формы и места расположения пор в сварных швах при сварке углеродистых сталей позволяют высказать некоторые закономерности их появления:

- поры образуются в корне шва, точнее в месте пересечения нижней части шва с кромками стыка;

- образовавшаяся пора растет совместно с движущимся фронтом кристаллизации, повторяя, практически, в своем развитии рост кристаллов металла, который происходит согласно законам кристаллизации преимущественно по нормали к фронту кристаллизации. При смещении сварного шва со стыка пора, образовавшаяся в месте пересечения нижней части ванны с кромкой стыка, в процессе роста изгибается в сторону середины ванны (рис. 2), аналогично в продольных изломах швов поры наклонены в сторону движения источника тепла;

- образовавшиеся поры бывают двух типов, отличающиеся цветом поверхности металла на стенках поры, который можно наблюдать по изломам швов:

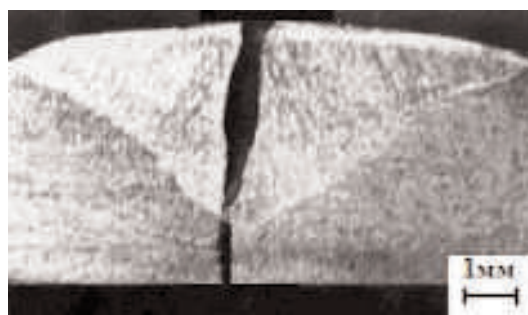


Рис. 2. Развитие поры при сварке со смещением дуги со стыка

- поры, которые в процессе зарождения и роста сохранили перемычку металла в нижней части шва, поверхность стенок светлая, не окисленная;

- поры, в которых в процессе зарождения произошел разрыв перемычки жидкого металла, и рост их происходил при непосредственном контакте стенок поры с атмосферой воздуха, поверхность стенок темная, окисленная (рис. 3). При достижении такой поры в процессе роста верхней поверхности шва, образуется свищ, нарушающий герметичность сварного соединения.

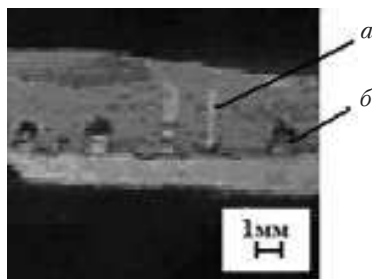


Рис. 3. Поры, изолированные от окружающей атмосферы (а) и без перемычки металла, разорвавшейся в процессе их образования (б)

Если же процесс сварки происходит при плохой защите или с принудительным введением газов в сварочную ванну, то, вследствие значительного пересыщения жидкого металла ванны газами, при кристаллизации наблюдается интенсивное их выделение, металл как бы вскипает и поры возможны по всему объему сварного шва.

Обсуждение результатов

Исходя из установленных закономерностей места расположения пор, очевидно, что, наряду с наличием растворенных в металле газов, существенное влияние на процесс порообразования оказывают кромки стыка свариваемых деталей. Действительно, как неоднократно подчеркивается в многочисленных работах по пористости сварных соединений, лимитирующим звеном процесса порообразования является зарождение поры, то есть образование устойчивого зародыша. Указанный процесс требует определенных затрат энергии на разрыв жидкости и преодоления сил поверхностного натяжения жидкого металла. При этом в кромках, в зависимости от способа их получения, могут находиться микронесплошности, заполненные воздухом либо иными газами. При сварке с несквозным проплавлением такие микронесплошности, попав на границу сплавления, могут служить готовыми зародышами пор, даже при относительно низком пересыщении газами жидкого металла ванны. Для проверки этого

предположения были сварены образцы, в одной из кромок которых были выполнены глухие отверстия диаметром 1 мм на глубину 2 мм, расположенные относительно верхней плоскости листа на разном расстоянии. Последующий излом шва показал (рис. 4), что одно из отверстий, которое оказалось как раз на границе сплавления нижней части шва с кромкой стыка, выросло в пору. Сварка выполнялась под прокаленным флюсом на обычных режимах без всякого дополнительного введения газов в зону плавления. При этом пора в нижней части изолирована от окружающей среды, поверхность стенок светлая, не окисленная и диаметр поры практически соответствует диаметру высверленного отверстия. Таким образом, при отсутствии пересыщения жидкого металла ванны газами, но при наличии на линии сплавления нижней части шва с кромками стыка искусственного зародыша поры, мы получили пору в сварном шве. Те же отверстия, которые были либо ближе к поверхности листов и попали в жидкий металл шва, либо дальше, не получили развития в поры. Исходя из вышеизложенных результатов, можно представить следующий механизм кинетики пористости при сварке.



Рис. 4. Излом шва с образованием поры из засверленного отверстия

В процессе передвижения сварочного источника и оплавления кромок стыка возможно попадание микронесплошности, имеющейся в стыке на границу пересечения нижней части ванны с кромкой и образование зародыша поры (рис. 5, а). Зародыш может образоваться также за счет местного пересыщения газами жидкого металла, образующегося из различных органических соединений, которые могут присутствовать на кромках свариваемого металла. В процессе движения источника он увеличивается в диаметре за счет теплового расширения газа, имеющегося в нем, либо диффузии газов из окружающих объемов жидкого металла (рис. 5, б). При достижении определенных размеров металл в основании поры кристаллизуется и, вследствие усадки металла, возможен разрыв перемычки и

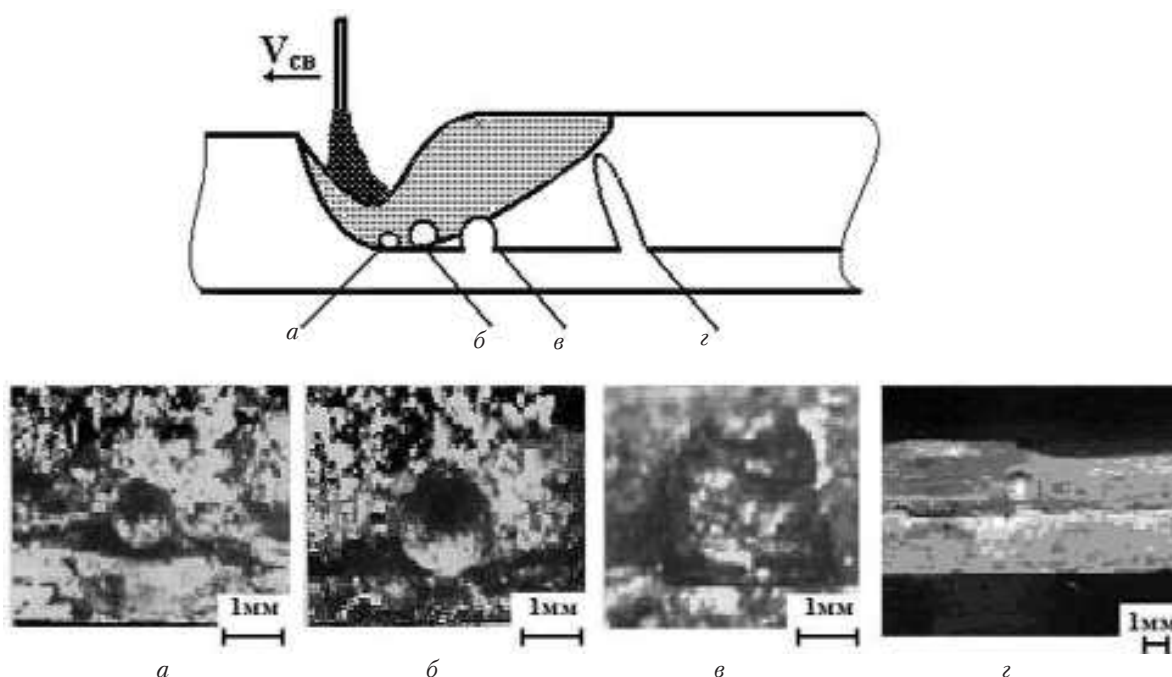


Рис. 5. Схема процесса образования и развития поры

соединение полости поры с атмосферой (рис. 5, в, рис. 6).



Рис. 6. Макрошлиф шва с зародышем поры, полость которого соединяется с атмосферой

В дальнейшем, в процессе кристаллизации металла ванны, пора растет совместно с ростом столбчатых кристаллов ванны, либо, останавливаясь в своем росте через какой-то период времени (рис. 5, г), либо достигая поверхности шва и образуя свищ. При этом пора в процессе своего роста постоянно открыта в атмосферу, и процесс ее развития можно объяснить исходя из теории процессов кристаллизации металлов.

Известно, что процесс кристаллизации возможен при наличии на фронте кристаллизации (в нашем случае нижняя поверхность сварочной ванны рис. 7, б) степени переохлаждения, которая образуется за счет отвода тепла в твердый металл

закристаллизовавшегося шва. Вокруг поры эти условия соблюдаются и возможен процесс роста столбчатых кристаллов, то есть перемещение фронта кристаллизации из положения б в положение а (рис. 7). Однако, в жидком металле, который находится над порой (рис. 7, поз. 4), непосредственный контакт с твердым металлом отсутствует, соседние участки жидкого металла ванны имеют такую же температуру, отвод тепла в газовую полость поры практически невозможен из-за низкой теплопроводности газовой среды, вследствие этого отсутствует степень переохлаждения и кристаллизация не происходит. Процесс роста кристаллов (рис. 7, поз. 3), как известно, происходит с остановками, вызванными выделением скрытой

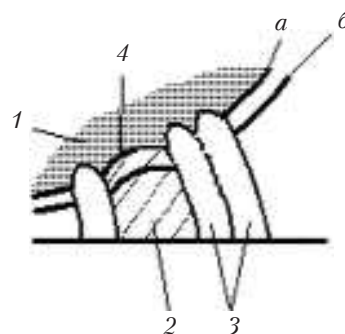


Рис. 7. Схема процесса кристаллизации металла в районе поры:

а, б — положения фронта кристаллизации, 1 — жидкий металл ванны, 2 — полость поры, 3 — растущие столбчатые кристаллы, 4 — купол поры

теплоты плавления, которая подогревает фронт кристаллизации и снижает степень переохлаждения. При этом жидкий металл (поз. 1) над порой удерживается за счет силы поверхностного натяжения, которая достаточно велика при температурах кристаллизации металла. После остановки происходит интенсивный рост кристаллов, находящихся вокруг поры и перемещение вместе с ними купола поры до очередной остановки. Вследствие этого, на внутренней поверхности поры наблюдаются положения фронта кристаллизации в момент остановок (рис. 8). В процессе

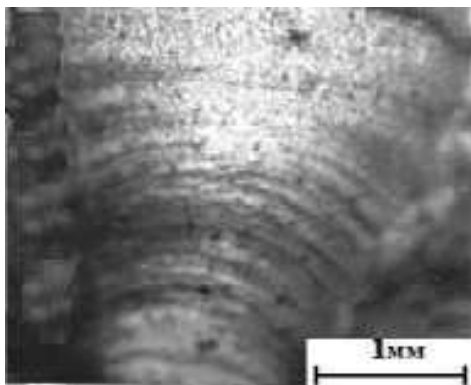


Рис. 8. Внутренняя поверхность поры

своего роста она отклоняется в сторону движения источника тепла, при этом избыточное давление газов в полости поры отсутствует, и процесс ее роста определяется процессом кристаллизации металла сварочной ванны. Если же пора изолирована в нижней части от окружающей среды,

процесс происходит аналогично, а объем поры подпитывается в период остановок растворенными газами, которые всегда присутствуют в жидком металле ванны. Таким образом, процесс роста поры происходит вследствие особых условий процесса кристаллизации жидкого металла ванны в районе образовавшегося зародыша поры.

Выводы

1. На основе многочисленного изучения формы и места образования пор установлено, что поры всегда начинаются с места пересечения нижней части сварного шва с кромками стыка.
2. Показано, что лимитирующим процессом в порообразовании является процесс образования зародыша поры. При этом возникновение зародышей возможно из микронесплошностей, имеющих в кромках, либо вследствие локального пересыщения газами жидкого металла на границе сплавления с кромкой стыка.
3. Процесс развития поры не требует повышенного давления газов внутри поры и представляет собой особые условия кристаллизации металла, находящегося вокруг поры.

Литература

1. Фрумин И.И. Предупреждение пор при сварке и наплавке под флюсом // Автоматическая сварка, 1956. — № 6. — С. 1–30.
2. Походня И.К. Газы в сварных швах. — М.: Машиностроение, 1972. — 256 с.
3. Походня И.К., Демченко В.Ф., Демченко Л.И. Математическое моделирование поведения газов в сварных швах. — К.: Наукова думка, 1979. — 53 с.