

А.А. Пономарева, Э.В. Лазарсон

Пермский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОБРАЗОВАНИЕ ПОР ПРИ СВАРКЕ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Разработана методика исследования процессов порообразования в сталях, которая заключается в выплавке микрослитков в медном кристаллизаторе в контролируемой атмосфере. Представлены результаты исследования влияния легирующих элементов на образование пор при сварке сталей различного химического состава в среде защитных газов.

Ключевые слова: сварка в среде защитных газов, пористость сварных швов, низколегированные стали, легирующие элементы, контролируемая атмосфера, степень пористости, методика планируемого эксперимента, метод случайного баланса.

К числу наиболее распространенных дефектов сварки плавлением относится пористость швов. Наличие пор может приводить к таким неприятным последствиям, как снижение механических свойств и коррозионной стойкости сварных соединений, нарушение герметичности изделий и др. Исправление пористости требует дополнительных материальных и трудовых затрат, удлиняет производственный цикл изготовления изделий, в целом снижает эффективность производства.

К порам как дефектам в сварных швах относятся по-разному. В одних конструкциях их допускают в тех или иных количествах и размерах, в других не допускают вообще.

Поры опасны, когда они расположены близко друг от друга. При нагружении может произойти разрушение перемычек и развиться довольно крупная трещина. В результате наступит снижение статической и, особенно, усталостной прочности. Из-за пористости шва может произойти потеря герметичности, преимущественно в условиях коррозии [1].

На практике широко используют меры борьбы с пористостью, которые можно отнести к технологическим: защита зоны сварки от попадания воздуха, зачистка поверхности свариваемого металла, осушение сварочных материалов и т.д. Значительно меньше исследованы металлургические меры борьбы с порообразованием в сталях.

Настоящая работа является одним из этапов комплексной работы, проводимой на кафедре сварочного производства ПГТУ, и посвящена изучению зави-

симости между склонностью металла сварных швов к пористости и составом газовой защиты применительно к сталям разного химического состава.

Целями настоящей работы являлись:

- 1) изучение причин и механизма образования пор при сварке сталей различного химического состава в среде защитных газов;
- 2) получение данных о влиянии химического состава стали и состава газовой фазы в зоне дуги на склонность металла сварного шва к пористости;
- 3) разработка эффективных мер борьбы с образованием пор при сварке стальных конструкций самого различного назначения.

Основу работы составляют экспериментальные и теоретические исследования влияния состава газовой фазы, химического состава стали и условий сварки на пористость сварных швов. Сведения о результатах проведенных исследований, свойствах сталей и некоторые другие данные взяты из отечественной и иностранной литературы.

Основная часть исследований была проведена на кафедре «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» и в лаборатории сварки Пермского государственного технического университета.

Ввиду невозможности непосредственного наблюдения за поведением газов в зоне сварки большое значение имеют косвенные методы изучения процессов порообразования. На кафедре сварочного производства и технологии конструкционных материалов ПГТУ ведутся исследования влияния состава смесей газов, композиции наплавленного металла, параметров режима и других условий сварки на процесс образования пор.

Исследование влияния отдельных компонентов газовой атмосферы обычно проводится путем введения изучаемых газов в инертную газообразную среду, например аргон или гелий [2, 3]. Эта методика может быть использована при соблюдении двух требований:

- 1) необходимо иметь возможность составлять смеси различных газов в разных концентрациях и гибко менять составы смесей;
- 2) необходимо гарантировать окружение места сварки проверяемой газовой средой.

Первое требование вызвано отсутствием в сварочной технике устройств для получения газовых смесей различных концентраций в широком диапазоне, второе – возможностью искажения результатов эксперимента из-за нарушений газовой защиты в обычных условиях сварки в среде защитных газов.

Применение данной методики для наших исследований стало возможным в результате конструирования и изготовления смесителя газов, который позволил имитировать процесс сварки в разных газовых средах с соблюдением вышеуказанных требований.

Данная работа состояла из трех частей. В первой части работы исследовалось влияние газовой фазы на склонность материалов различного состава к образованию пор при выплавке слитков в газовой среде.

Во второй части работы проводилось исследование зависимости порообразования в сталях при сварке неплавящимся электродом в среде защитных газов от состава газовой фазы. В работе также учитывается взаимосвязь компонентов газовой среды и их совокупное влияние на порообразование.

В третьей части работы была проведена обработка ранее полученных данных о влиянии состава газовой защиты на порообразование при сварке сталей различного химического состава плавящимся электродом. Опыты были проведены ранее на кафедре «Сварочное производство», анализ же полученных данных приведен в настоящей работе.

Обзор технической литературы показал, что получение бинарных смесей газов с малым (до 1–2 %) содержанием одного из смешиваемых газов является технически весьма сложной задачей. Наиболее просто этот вопрос решается путем создания смеси газов в баллонах. Однако для целей исследования, когда необходимо часто менять составы смесей, такой метод непригоден. В связи с этим был сконструирован и изготовлен смеситель газов с дозировкой компонентов в широком диапазоне концентраций (рис. 1).

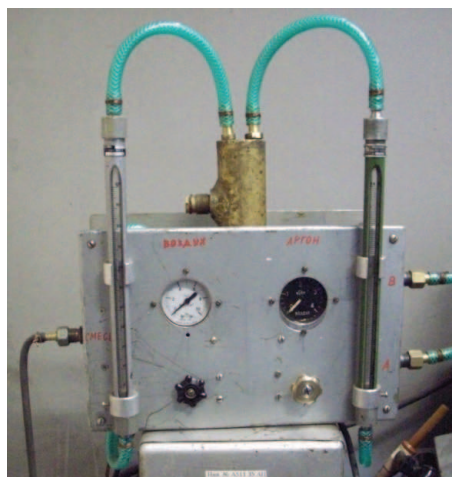


Рис. 1. Смеситель газов

Основной газ (аргон) подается по обычной схеме через редуктор и ротаметр. Расход другого газа (азота) контролируется с помощью второго ротаметра. Основной газ и газ-добавка после ротаметров подаются в смесительный сосуд, откуда полученная смесь по шлангу направляется в сварочную головку.

Смеситель описанной конструкции позволяет вводить добавки одного из газов в количестве 1–100 об. % от общего расхода газовой смеси с точностью до 0,5 об. % газа. В нашей модели смесителя были установлены два ротаметра РС–3.

За основу настоящей методики была взята оригинальная методика, разработанная Э.В. Лазарсоном для исследования процессов порообразования в никеле [4], которая заключается в выплавке микрослитков в медном кристаллизаторе в контролируемой атмосфере. Методика позволяет варьировать состав шихты за счет добавления в нее различных легирующих элементов, а также изменять состав газовой фазы с помощью смесителя газов.

Цель эксперимента заключалась в нахождении наиболее влияющих на порообразование легирующих элементов. В ходе эксперимента выплавлялись восьмigramмовые слитки с различным содержанием легирующих элементов. Шихта составлялась из стружки проволоки СВ-08 и порошков легирующих элементов. Шихта закладывалась в медную изложницу и переплавлялась дугой, горячей в среде аргона с добавлением азота.

В качестве легирующих элементов были использованы следующие материалы: FeCr80 (ГОСТ 4757–91), порошок алюминия марки А1 (ГОСТ 4784–97), FeTi70 (ГОСТ 4761–91), FeMo60 (ГОСТ 4759–91), FeMn78 (ГОСТ 4755–91), FeSi65 (ГОСТ 1415–93), порошок никеля марки Н–2 (ГОСТ 849–97).

Основной и добавочный газы (аргон и азот) подавались из баллонов по обычной схеме через редукторы в смеситель газов, откуда поступали в сварочную горелку. Внешний вид всей установки приведен на рис. 2.



Рис. 2. Оборудование для сварки в среде защитных газов

Первоначально был выбран режим сварки, обеспечивающий хорошее проплавление и перемешивание металла слитка без добавления легирующих элементов ($I_{св} = 150$ А, $t = 12$ с). Значения сварочного тока и напряжения определяли по показаниям соответственно амперметра типа ПМ–70 и вольтметра типа М–358. В результате получались микрослитки, плотность которых сопоставима с плотностью сталей. Подобранный смесь газов Ar + 1 % N₂ обеспечивала гарантированное порообразование.

Было отмечено, что газовая смесь, содержащая всего 1 % азота уже существенно снижает плотность нелегированных образцов, т.е. обеспечивает в них гарантированное порообразование. Поэтому данная смесь газов (Ar + 1 % N₂) была выбрана для дальнейших исследований в качестве защитного газа.

Для определения влияния легирующих элементов на плотность микрослитков, а соответственно, на склонность металлов различного химического состава к порообразованию были проведены две серии дублирующихся опытов по методике планирования экспериментов. В качестве защитного газа применяли смесь Ar + 1 % N₂. Каждая серия состояла из 16 опытов.

В результате дуговой плавки получались микрослитки металла с разной плотностью за счет возможного образования в них пор. Степень пористости металла слитков определялась путем гидростатического взвешивания. Метод гидростатического взвешивания заключается во взвешивании образцов в двух средах: в воздухе и воде. По двум полученным значениям веса образца в воздухе и воде с помощью формулы [1] определялась плотность образцов.

$$\gamma_i = \frac{P_{\text{возд}} (\gamma_{\text{воды}} - \gamma_{\text{возд}})}{P_{\text{возд}} - P_{\text{воды}}} + \gamma_{\text{возд}},$$

где $P_{\text{возд}}$ – вес образца в воздухе, г; $P_{\text{воды}}$ – вес образца в воде, г; $\gamma_{\text{возд}}$ и $\gamma_{\text{воды}}$ – плотности воздуха и воды соответственно при нормальном атмосферном давлении и при температуре воздуха 20 °С, г/см³.

Учитывая сложность исследуемой системы сплавов, для повышения эффективности исследований опыты проводили по методике планируемого эксперимента. Исходя из предположения, что количество значимых эффектов значительно меньше общего числа эффектов, для планирования отсеивающего эксперимента был использован сверхнасыщенный план, а при обработке результатов опытов применялся метод случайного баланса [5–7].

В качестве параметра оптимизации была принята плотность металла микрослитков γ , г/см³. Независимыми переменными (факторами) являлись процентные содержания компонентов шихты при выплавке слитков. При этом имелось в виду, что начальной задачей настоящего исследования являлось лишь выявление элементов, значимо влияющих на склонность металла

к пористости. При введении какого-либо элемента в шихту часть его неизбежно переходит в металл слитка, причем в большинстве случаев между содержаниями элемента в шихте и в металле существуют пропорциональная зависимость. Указанное соображение дало основание отказаться от трудоемкого химического анализа металла и значительно упростило задачу планирования эксперимента.

Для единства решения задач исследования в целом во всех экспериментах предельные значения интервалов варьирования для каждого фактора выдерживали постоянными (1 %). Это обеспечило возможность сравнивать данные разных серий опытов по отдельным факторам, а при общем анализе – возможность усреднения данных (табл. 1). Матрица планирования и результаты опытов приведены в табл. 2.

Таблица 1

Интервалы варьирования и уровни факторов

Интервалы варьирования	Химические элементы, %						
	Cr	Al	Ti	Mo	Mn	Si	Ni
Основной уровень (0)	0,625	0,515	0,625	0,625	0,565	0,515	0,75
Интервал варьирования	0,375	0,485	0,375	0,375	0,435	0,485	0,25
Верхний уровень (+1)	1	1	1	1	1	1	1
Нижний уровень (-1)	0,25	0,03	0,25	0,25	0,13	0,03	0,5

Таблица 2

Матрица планирования и результаты опытов

Номер опыта	Факторы							Параметр оптимизации		
	X1 (Cr)	X2 (Al)	X3 (Ti)	X4 (Mo)	X5 (Mn)	X6 (Si)	X7 (Ni)	Y1 (γ , г/см ³)	Y2 (γ , г/см ³)	Y _{ср} (γ , г/см ³)
1	+	+	+	+	+	+	-	7,855 312	7,833 157	7,844 234
2	-	+	+	+	-	-	+	7,816 361	7,827 082	7,821 722
3	+	-	+	+	-	-	+	7,613 679	7,672 821	7,643 25
4	-	-	+	+	+	+	-	7,727 918	7,695 408	7,711 663
5	+	+	-	+	-	+	-	7,814 614	7,709 158	7,761 886
6	-	+	-	+	+	-	-	7,818 072	7,796 859	7,807 466
7	+	-	-	+	+	+	-	7,682 138	7,692 311	7,687 225
8	-	-	-	+	-	+	+	7,612 674	7,601 954	7,607 314
9	+	+	+	-	-	+	+	7,800 616	7,790 23	7,795 423

Номер опыта	Факторы							Параметр оптимизации		
	X1 (Cr)	X2 (Al)	X3 (Ti)	X4 (Mo)	X5 (Mn)	X6 (Si)	X7 (Ni)	Y1 (γ , г/см ³)	Y2 (γ , г/см ³)	Ycp (γ , г/см ³)
10	–	+	+	–	+	+	+	7,831 539	7,775 528	7,803 533
11	+	–	+	–	+	–	–	7,616 552	7,605 945	7,611 249
12	–	–	+	–	–	–	–	7,666 276	7,623 395	7,644 835
13	+	+	–	–	+	+	–	7,811 001	7,809 252	7,810 127
14	–	+	–	–	–	+	–	7,725 295	7,754 434	7,739 864
15	+	–	–	–	–	–	–	7,641 337	7,648 371	7,644 854
16	–	–	–	–	+	+	+	7,719 878	7,743 828	7,731 853

По исходной диаграмме рассеивания был произведен предварительный отбор значимых факторов. Для каждого фактора была подсчитана разность между медианами верхнего и нижнего уровней и число так называемых «выделившихся» точек.

Обработанная диаграмма рассеивания приведена на рис. 3. Здесь синие столбики показывают длину медиан, а голубые – число «выделившихся» точек. На первом этапе исследования признаны значимыми линейные эффекты X2 и X3 (Al и Ti). Была проверена значимость этих эффектов, и оказалось, что значимым является только эффект, оказываемый алюминием.

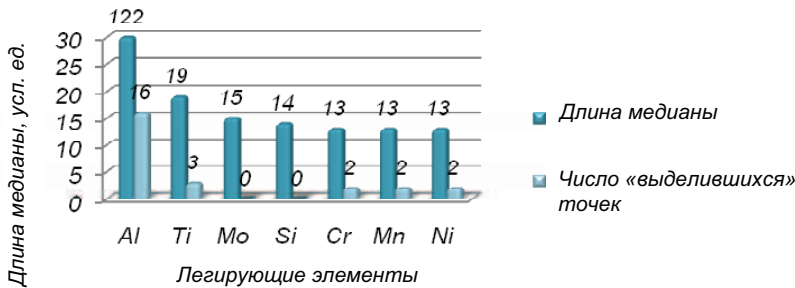


Рис. 3. Влияние легирующих элементов на плотность микрослитков

На следующем этапе в рассмотрение были включены парные взаимодействия. Из рис. 4 видно, что наиболее влияющими являются взаимодействия MoNi и MnSi. Данные эффекты проверялись на значимость. Оказалось, что оба эффекта значимы, а другие эффекты проверять нет необходимости в соответствии с оценкой по критерию Фишера.

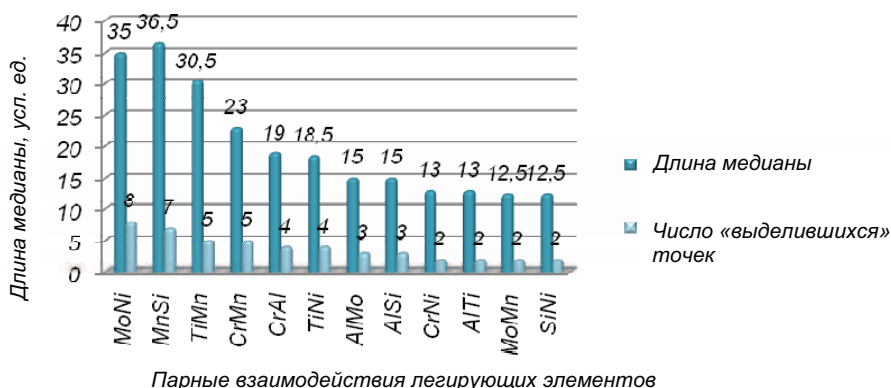


Рис. 4. Совместное влияние легирующих элементов на плотность микрослитков

В результате 16 опытов из 28 потенциально возможных эффектов было выделено три значимых, оказываемых алюминием, совместно молибденом и никелем, совместно марганцем и кремнием. Следующим по значимости оказываемого эффекта элементом после алюминия выступает титан. Влияние этих элементов на порообразование при сварке требует дальнейшего комплексного изучения и уточнения.

Анализ полученных данных позволил раскрыть некоторые стороны механизма образования пор. Газовые смеси и легирование металла были использованы как инструмент исследования сложных процессов порообразования в сварных швах.

На основании вышеприведенных данных можно сделать следующие выводы о влиянии азота газовой фазы на пористость при сварке сталей:

1. Присутствие азота в сварочной атмосфере оказывает больше влияние на пористость сварных швов. Увеличение содержания азота сверх критического приводит к быстрому возрастанию пористости шва, однако только до определенного предела, выше которого величина пористости плавно снижается.

2. Основной причиной пористости является резкое падение растворимости азота в жидкой стали при выходе из зоны действия дуги.

3. Ввиду малого содержания азота в твердой стали основной металл и сварочная проволока не могут создавать его опасной концентрации в сварочной ванне.

4. В условиях сварки неплавящимся электродом в среде защитных газов основным источником азота является воздух, попадающий в зону дуги из окружающей атмосферы.

Вторая часть работы заключалась в несквозном проплавлении пластин из стали Ст3 неплавящимся электродом без присадки. Экспериментально был выбран оптимальный режим сварки, обеспечивающий хорошее проплавление металла без прожога и перегрева околошовной зоны: $I_{св} = 45$ А, $V_{св} = 27$ м/ч, $l_d = 3$ мм. Ток постоянный прямой полярности. Расход газовой смеси 1–12 л/мин.

Полученные швы подвергали рентгенографированию на предмет определения пористости. Графическая зависимость влияния состава защитного газа на количество пор в швах при сварке неплавящимся электродом стали Ст3 представлена на рис. 5. Из приведенных данных следует, что уже небольшая добавка азота к аргону (порядка 1 об. %) вызывает значительную пористость швов. Дальнейшее повышение содержания азота в газовой фазе приводило к увеличению пористости до некоторого предела, после чего уровень пористости плавно снижался.

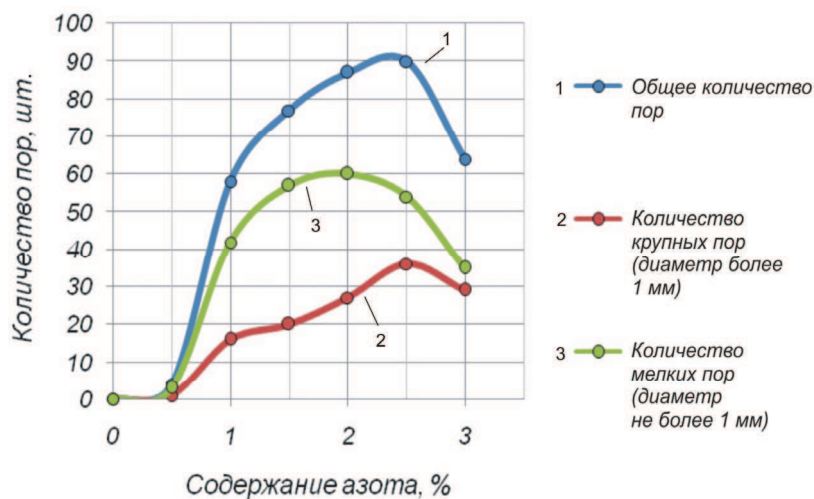


Рис. 5. Влияние содержания азота в смеси газов на пористость образцов

В третьей части работы была проведена обработка ранее полученных данных о влиянии параметров режима сварки и состава газовой защиты на порообразование при сварке сталей различного химического состава плавящимся электродом.

Опыты проводились следующим образом. На пластинах из различных марок стали выполнялись валики полуавтоматической сваркой в среде защитных газов. В качестве электродной проволоки использовалась проволока СВ-08Г2С диаметром 4 мм. Состав газовой фазы варьировался с помощью смесителя газов. Основной газ – CO_2 , добавочный газ – воздух. Режимы свар-

ки были найдены экспериментальным путем и оставались неизменными. Пористость сварных швов определялась рентгенографированием.

Графическая зависимость влияния состава защитного газа на количество пор в швах при сварке легированных сталей представлена на рис. 6.

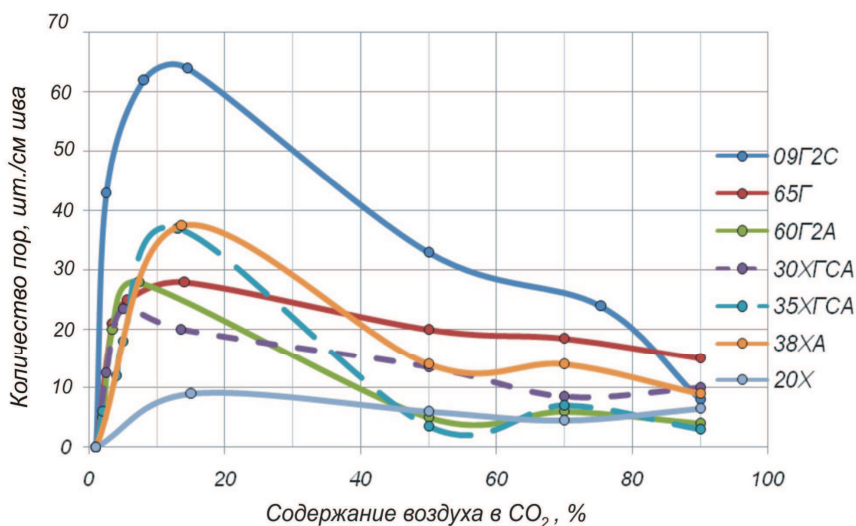


Рис. 6. Влияние состава защитного газа на количество пор в швах при сварке легированных сталей

Характер пористости при добавках воздуха такой же, как при сварке в смесях с азотом. Уже небольшая добавка воздуха к углекислому газу (порядка 1 %) вызывает значительную пористость швов. При дальнейшем увеличении содержания воздуха в газовой фазе происходило увеличение пористости, а затем плавное ее снижение.

Как видно из графика, наибольшее влияние добавки воздуха на пористость стали наблюдается при наплавке валиков на сталь 09Г2С. Наименее всех подвержена пористости от воздуха (а соответственно, и от азота) сталь 20Х.

Изложенные в настоящей работе теоретические и экспериментальные исследования процессов порообразования сталей позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Отработана методика экспериментального исследования влияния легирующих элементов в стали на склонность металла швов к образованию пор. Методика предусматривает, в частности, изучение процессов порообразования на микрослитках, выплавляемых путем дугового переплава компонентов шихты в медном кристаллизаторе в различных газовых средах.

2. Точность оценки плотности металла исследованных сплавов как характеристики пористости доведена до сотых, что позволяет решать поставленные задачи.

3. По полученным опытным данным проведено ранжирование 7 легирующих элементов и 12 двойных эффектов по склонности металла швов к пористости от азота как основного порообразующего газа в сталях.

4. Установлено, что из исследованных элементов наиболее эффективно снижают пористость нитридообразующие элементы Ti, Al, Mo, которые связывают азот в нитриды и за счет этого снижают вероятность образования пузырьков газа в жидком металле.

5. В экспериментах с микрошлифами наиболее сильное влияние на пористость оказал алюминий. Как и титан, алюминий образует с азотом нитриды. Алюминий связывает азот, растворенный в сварочной ванне, тем самым значительно уменьшая пористость металла. Его эффективность требует дополнительного подтверждения. В целом полученные результаты следует считать предварительными.

6. В условиях дуговой сварки сталь особенно чувствительна к пористости от азота, которая связана со значительной растворимостью азота в жидком металле в зоне дуги и чрезвычайно малой растворимостью его в твердом металле. Появление пор в швах наблюдается при введении в аргон свыше 0,5 % азота при сварке неплавящимся электродом и свыше 1 % при сварке плавящимся электродом.

7. В обычных условиях сварки в защитных газах сталей основная роль в порообразовании принадлежит азоту, попадающему в зону сварки из окружающей атмосферы. Возникновение пористости от кислорода и водорода является маловероятным. Можно предположить, что при ручной дуговой сварке покрытыми электродами поры могут возникнуть от азота и кислорода, при сварке под флюсом – преимущественно от кислорода.

Данные проведенных исследований могут быть использованы при разработке новых сварочных материалов (электродов, присадочных проволок) и рациональной технологии сварки сталей.

Список литературы

1. Походня И.К. Газы в сварных швах. – М.: Машиностроение, 1972. – 256 с.
2. Галинич В.И., Подгаецкий В.В. Влияние азота на пористость швов при сварке стали в аргоне и углекислом газе // Автоматическая сварка. – 1961. – № 2. – С. 134–139.
3. Новожилов Н.М. Новое в технологии сварки. – М.: Машгиз, 1955. – 232 с.
4. Лазарсон Э.В., Перминов Ю.Ю., Красильников В.Ю. Использование активных газов и легирующих элементов для изучения условий образования пор в сварных швах // Прогрессивная технология, механизация и автоматизация сварочного производства. – Свердловск, 1986. – С. 109–116.

5. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.

6. Новик Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении. – М.: Московский институт стали и сплавов, 1971. – 106 с.

7. Спиридонов А.А., Васильев Н.Г. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации технологических процессов: учеб. пособие. – Свердловск: Изд-во УПИ им. С.М. Кирова, 1975. – 140 с.

Получено 18.01.2011