

Д. А. Чинахов, канд. техн. наук

(ФГБОУ ВПО «Юргинский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования „Национальный исследовательский Томский политехнический университет”» (ЮТИ ТПУ))

Влияние расхода активного защитного газа и сварочного тока на содержание марганца и кремния в металле сварного шва*

В настоящее время сварка применяется для получения неразъемных соединений широчайшей гаммы металлических, неметаллических и композиционных конструкционных материалов в условиях земной атмосферы, океана и космоса. Несмотря на непрерывно увеличивающееся применение в конструкциях и изделиях легких сплавов, полимерных материалов и композитов, основным конструкционным материалом остается сталь. Мировой рынок сварочной техники и услуг возрастает пропорционально росту мирового потребления стали.

Сварочные процессы протекают по сложным физико-химическим законам при высокой температуре. Совокупность различных факторов и явлений определяет качество сварных соединений. Особенно сильно это влияние сказывается при сварке сталей, склонных к закалке. Постоянно разрабатываются новые и совершенствуются старые технологии и способы сварки, приемы управления свойствами и геометрией сварного шва [1–7].

Цель работы — изучить влияние расхода активного защитного газа (CO_2) и сварочного тока на содержание марганца и кремния в металле сварного шва при сварке плавящимся электродом.

При сварке сталей плавящимся электродом в среде защитных газов состав металла шва зависит от доли участия электродного и основного металлов, интенсивности реакций в капле и сварочной ванне, потери элементов из электродного и основного металлов [1, 2, 7], а также от расхода и состава защитного газа [1, 2, 6, 7].

Уменьшение содержания марганца и кремния в металле шва наблюдается с увеличением скорости истечения защитного газа CO_2 при сварке открытой дугой (рис. 1 а) проволоками диаметром 1,2 мм [6, 7]. Проведенные экспериментальные исследования на многослойных сварных образцах из стали 45 с применением разных по составу сварочных проволок (Св-08Г2С, Св-08ГСМТ) и разных способов газовой защиты (традиционная и двухструйная) показали зависимость содержания марганца и кремния в металле шва от тока сварки (табл. 1–3). Полученные результаты отражают влияние сварочного тока и скорости

истечения защитного газа на химический состав металла сварных швов и, как следствие, на их эксплуатационные свойства.

Начиная с 250 А ($U = 27$ В, $l = 12$ мм), когда дуга становится полупогруженной (рис. 1 б), содержание марганца в металле шва практически стабилизируется, причем на уровне гораздо более высоком, чем в металле шва, полученного при сварке открытой дугой (140–220 А).

При сварке открытой дугой с традиционной газовой защитой проволокой Св-08Г2С в диапазоне токов 140–190 А выгорает 30–35% содержащегося марганца (0,58–0,6% массовой доли), а при сварке на токе 280 А выгорает около 20% марганца (0,32–0,35% массовой доли) при одинаковом расходе защитного газа (табл. 2, рис. 2 а). Меньшее выгорание марганца происходит за счет увеличения скорости подачи сварочной проволоки, наблюдается более быстрый перенос капли в сварочную ванну и сокращение времени пребывания капли в перегретом состоянии. При сварке в тех же условиях с двухструйной газовой защитой выгорание марганца увеличивается и составляет примерно 36–41% (0,7–0,74% массовой доли) и 24% марганца (0,4–0,44% массовой доли) соответственно, что свидетельствует о повышенном газодинамическом воздействии на каплю расплавленного металла и более интенсивном протекании металлургических процессов.

Аналогичная картина наблюдается и при сварке проволокой Св-08ГСМТ (табл. 3, рис. 2 б). При сварке открытой дугой с традиционной газовой защитой в диапазоне токов 140–190 А выгорает 30–40% содержащегося марганца (0,33–0,44% массовой доли), а при сварке на токе 280 А выгорает около 20% марганца (0,21–0,23% массовой доли) при одинаковом расходе защитного газа. При сварке с двухструйной газовой защитой 39–42% (0,45–0,47% массовой доли) и 29% марганца (0,32–0,34% массовой доли) соответственно.

Установлено, что процент выгорания марганца при переходе из проволоки в сварной шов остается примерно одинаковым и составляет на токах до 200 А около 35%, а на токе порядка 280 А — около 20%, но массовая доля выгоревшего марганца изменяется в зависимости от начального содержания в сварочной проволоке. Разница содержания марганца в металле шва при использовании

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. № 13-08-98002.

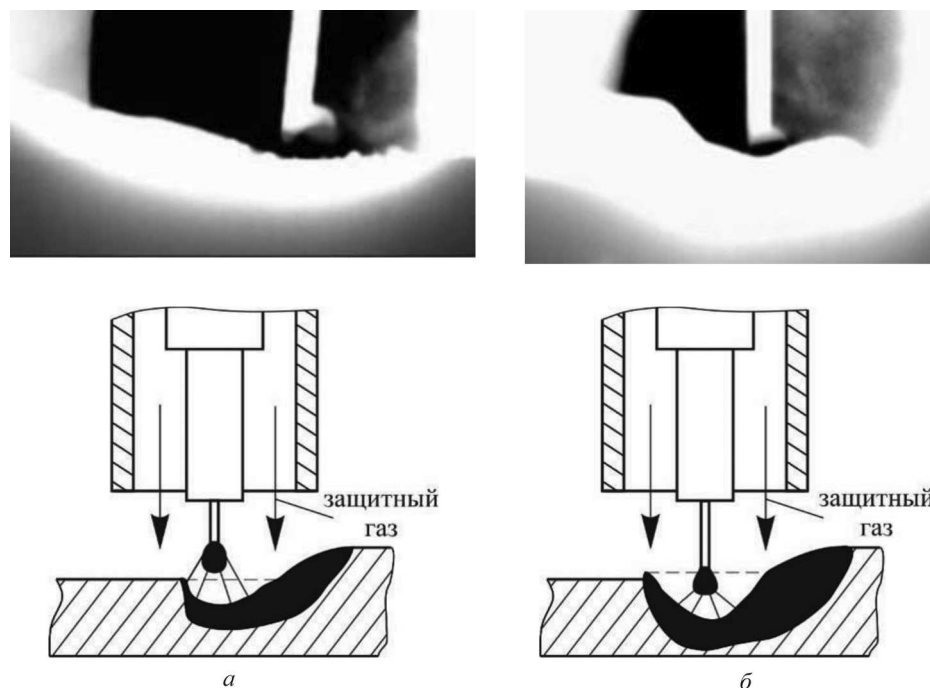


Рис. 1. Формирование капли: а) открытая дуга; б) полупогруженная дуга

Таблица 1

Химический состав основного и сварочных материалов

Наименование материала	Массовая доля элементов, %								
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Ti
По марочнику сталей [9]									
Сталь 45 ГОСТ 1050-88	0,42–0,5	0,5–0,8	0,17–0,37	≤ 0,04	≤ 0,035	≤ 0,25	≤ 0,3		
Св-08Г2С ГОСТ 2246-70	0,05–0,11	1,8–2,1	0,7–0,95	≤ 0,025	≤ 0,03	≤ 0,2	≤ 0,25	—	—
Св-08ГСМТ ГОСТ 2246-70	0,08–0,12	1,0–1,3	0,4–0,7	≤ 0,025	≤ 0,03	≤ 0,3	≤ 0,3	0,2–0,4	0,05–0,12
Осредненные результаты исследований									
Сталь 45	0,44	0,67	0,31	0,049	0,025	0,19	0,11		
Св-08Г2С	0,07	1,80	0,78	0,006	0,020	0,06	0,07	—	—
Св-08ГСМТ	0,12	1,12	0,54	0,022	0,019	0,15	0,14	0,21	0,054

традиционной одноструйной и двухструйной газовой защиты составляет около 5% от начального содержания в сварочной проволоке.

При сварке открытой дугой величина сварочного тока и скорость истечения активного защитного газа из сварочного сопла оказывают значительное влияние на химический состав металла сварного шва. С увеличением воздействия струи активного защитного газа на каплю электродного металла при двухструйной газовой защите возрастает интенсивность протекания металлургических процессов на поверхности капли [10].

Многие исследователи в своих работах [1–7, 11] отмечают более благоприятные условия взаимодействия расплавленного металла с газами и шлаками на стадии капли, а не в сварочной ванне. В своей работе М. Н. Новожилов указывает [2], что удельная поверхность капель расплавленного электродного металла в 5–22 раза (в зависимости от размера капель) превышает удельную поверхность сварочной ванны, а их удельная скорость окисления больше примерно в 39 раз. Можно сделать вывод, что химический состав металла сварного шва в основном определяет состав капель электродного металла.

Таблица 2

Осредненные значения результатов исследований химического состава металла шва образцов из стали 45, заваренных проволокой Св-08Г2С в CO₂ ($U = 27$ В, $l = 12$ мм, $Q = 25$ л/мин, $V_{св} = 20$ см/мин)

Сварочный ток, А	Массовая доля элементов, %								
	С	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Ti
	Традиционная одноструйная газовая защита								
140	0,120	1,205	0,430	0,012	0,015	0,080	0,100	—	—
190	0,140	1,214	0,450	0,012	0,011	0,090	0,100	—	—
230	0,152	1,264	0,461	0,016	0,014	0,089	0,098	—	—
280	0,150	1,461	0,556	0,019	0,022	0,096	0,104	—	—
	Двухструйная газовая защита								
140	0,145	1,066	0,342	0,014	0,015	0,082	0,092	—	—
190	0,133	1,104	0,379	0,018	0,021	0,098	0,103	—	—
230	0,135	1,243	0,444	0,016	0,014	0,080	0,097	—	—
280	0,165	1,363	0,534	0,028	0,031	0,108	0,092	—	—

Таблица 3

Осредненные значения результатов исследований химического состава металла шва образцов из стали 45, заваренных проволокой Св-08ГСМТ в CO₂ ($U = 27$ В, $l = 12$ мм, $Q = 25$ л/мин, $V_{св} = 20$ см/мин)

Сварочный ток, А	Массовая доля элементов, %								
	С	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Ti
	Традиционная одноструйная газовая защита								
140	0,184	0,682	0,221	0,040	0,036	0,120	0,122	0,16	0,012
190	0,124	0,796	0,268	0,037	0,025	0,130	0,143	0,17	0,017
230	0,136	0,864	0,328	0,031	0,016	0,125	0,126	0,17	0,019
280	0,144	0,901	0,341	0,036	0,029	0,167	0,150	0,17	0,019
	Двухструйная газовая защита								
140	0,206	0,652	0,212	0,021	0,037	0,135	0,131	0,16	0,015
190	0,161	0,669	0,229	0,024	0,021	0,126	0,127	0,15	0,01
230	0,151	0,739	0,235	0,035	0,025	0,148	0,137	0,15	0,012
280	0,169	0,792	0,280	0,039	0,018	0,147	0,134	0,15	0,018

Анализ результатов исследований [1, 2, 6–8, 10] показал, что химический состав металла сварного шва, и особенно количество марганца и кремния, зависит от многих факторов: температура капли (сила сварочного тока, напряжение, способ газовой защиты), время взаимодействия капли с защитной средой (сила сварочного тока, расход и скорость газа — с их увеличением время уменьшается), размер капли, состав сварочной проволоки, состав основного металла. С увеличением сварочного тока возрастает содержание марганца и кремния в металле шва, а при увеличении напряжения их содержание

снижается. Уменьшение содержания марганца и кремния в металле шва наблюдается с увеличением расхода и скорости истечения защитного газа CO₂ при сварке открытой дугой.

Марганец имеет наименьшую температуру кипения и теплоту испарения из всех легирующих элементов (табл. 4), входящих в химический состав сварочных проволок. Это приводит к его интенсивному испарению и окислению на поверхности капли расплавленного металла, температура которой составляет около 3000 К [2].

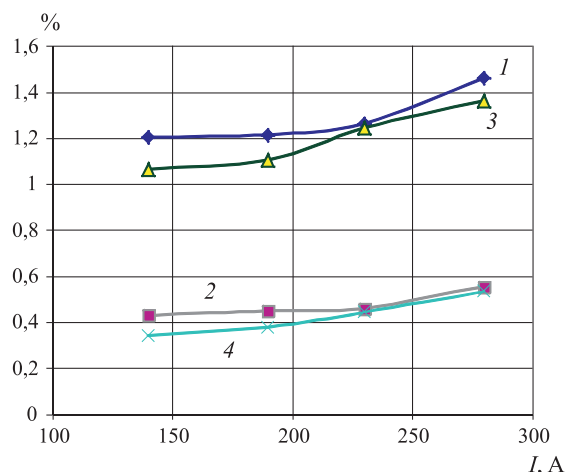
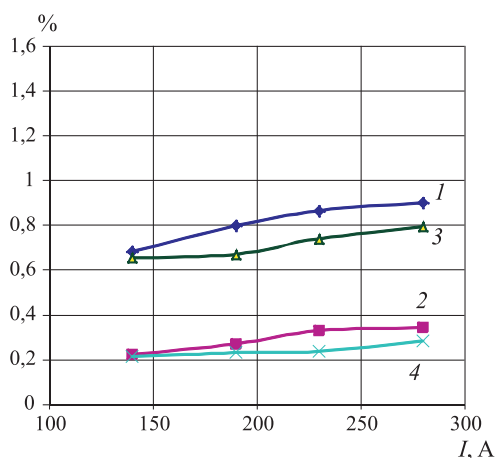


Рис. 2. Зависимость содержания марганца и кремния в металле шва сварных соединений из стали 45: а) сварка проволокой Sv-08Г2С; б) сварка проволокой Sv-08ГСМТ. Традиционная одноструйная газовая защита: ряд 1 — Mn, ряд 2 — Si; двухструйная газовая защита: ряд 3 — Mn, ряд 4 — Si

Таблица 4

Термодинамические свойства простых веществ (при н. у.), входящих в химический состав сварочной проволоки [12]

Наименование	Вещество							
	Mn	Si	Cr	Ni	Fe	Ti	Mo	C графит
Плотность, г/см ³	7,21	2,33	7,19	8,9	7,87	4,54	10,22	2,25
Температура плавления, К	1517	1688	2130	1726	1812	1933	2890	3820
Температура кипения, К	2235	2623	2945	3005	3134	3560	4885	5100
Теплота испарения, кДж/моль	221	383	342	378,6	340	422,6	590	—

Газодинамическое влияние активного защитного газа при сварке в условиях двухструйной газовой защиты на химсостав металла шва однопроходных сварных соединений из стали 30ХГСА [13] подтверждают проведенные исследования по методу полного факторного эксперимента (табл. 5).

Механизированную однопроходную сварку пластин из стали 30ХГСА (табл. 6) размером 150 × 300 мм толщиной 8 мм сварочной проволокой Sv-08Г2С диаметром 1,2 мм в СО₂ выполняли стационарной дугой с двухструйной газовой защитой без предварительного подогрева и последующей термообработки. Управляемые параметры варьировали на двух уровнях: сварочный ток $I_{св1} = 170$ А и $I_{св2} = 200$ А, вылет электродной проволоки $L_1 = 8$ мм и $L_2 = 14$ мм, расход защитного газа $Q_1 = 15$ л/мин и $Q_2 = 20$ л/мин (табл. 5). Напряжение дуги $U_d = 26 \dots 27$ В, скорость сварки $V_{св} = 25 \dots 26$ см/мин. Источник питания ВСЖ-303 УЗ.1, автоматическая сварочная головка ГСП-2, блок управления автоматической сваркой БАРС-2Б.

Результаты исследования химического состава металла шва сварных образцов представлены в табл. 7.

По результатам исследований разработаны зависимости содержания химических элементов (кремний, марганец, хром) в металле шва однопроходных сварных соединений из стали 30ХГСА от управляемых параметров

Таблица 7

Химический состав металла шва сварных образцов из стали 30ХГСА

№ опыта	C	Si	Mn	Cr
1	0,17	0,65	1,08	0,49
2	0,17	0,75	1,2	0,5
3	0,17	0,77	1,2	0,51
4	0,17	0,73	1,06	0,54
5	0,17	0,74	1,23	0,52
6	0,17	0,69	1,07	0,53
7	0,17	0,72	1,2	0,45
8	0,17	0,77	1,22	0,55

($Q, L, I_{св}$), в которых управляемые параметры представлены в виде безразмерных величин ($x_1 - Q, x_2 - L, x_3 - I_{св}$), изменяющихся в диапазоне от -1 до $+1$. При этом относительная погрешность вычислений не превышает 10%:

1. Зависимость содержания кремния от управляемых параметров:

$$Si = 0,728 + 0,02x_2 + 0,03x_1x_2x_3. \quad (1)$$

Матрица планирования полного факторного эксперимента

Наименование управляемого параметра	№ опыта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1. Расход защитного газа Q , л/мин	15	20	15	20	15	20	15	20
2. Вылет электродной проволоки L , мм	8	8	14	14	8	8	14	14
3. Сила сварочного тока $I_{св}$, А	170	170	170	170	200	200	200	200

Таблица 6

Химический состав основного и сварочных материалов

Наименование материала	Массовая доля элементов, %							
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
По марочнику сталей [9]								
30ХГСА ГОСТ 4543-71	0,28–0,34	0,8–1,1	0,9–1,2	≤ 0,025	≤ 0,025	0,8–1,1	≤ 0,3	≤ 0,3
Св-08Г2С ГОСТ 2246-70	0,05–0,11	1,8–2,1	0,7–0,95	≤ 0,025	≤ 0,03	≤ 0,2	≤ 0,25	
Осредненные результаты исследований								
30ХГСА	0,33	1,01	0,98	0,008	0,022	0,96	0,16	0,18
Св-08Г2С	0,07	1,80	0,78	0,006	0,020	0,06	0,07	

2. Зависимость содержания марганца от управляемых параметров:

$$Mn = 1,158 - 0,02x_1 + 0,022x_3 - 0,015x_1x_3 + 0,018x_2x_3 + 0,055x_1x_2x_3. \quad (2)$$

3. Зависимость содержания хрома от управляемых параметров:

$$Cr = 0,511 + 0,019x_1 + 0,014x_1x_2 - 0,014x_2x_3. \quad (3)$$

Установлено, что содержание углерода в металле шва однопроходных сварных соединений из стали 30ХГСА (в условиях данного опыта) не зависит от управляемых параметров (Q , L , $I_{св}$). Расход защитного газа Q оказывает влияние на содержание марганца и хрома в металле шва, с его увеличением содержание марганца уменьшается, а хрома увеличивается. Повышение расхода газа увеличивает скорость его истечения из сварочного сопла (внутренняя струя), таким образом, струя защитного газа уносит с собой больше испарившегося марганца. Повышение содержания хрома можно объяснить увеличением доли основного металла в сварном шве за счет газодинамического воздействия на сварочную ванну. Увеличение вылета электродной проволоки L приводит к повышению содержания кремния в металле шва. Это можно объяснить падением напряжения на дуге, от которого зависит выгорание кремния при сварке [1, 7, 8]. С увеличением сварочного тока $I_{св}$ возрастает содержание марганца. Стабильный процесс сварки с увеличением тока предусматривает повышение скорости подачи сварочной

проволоки, т. е. ускоряет перенос капли в сварочную ванну и уменьшается время ее пребывания в перегретом состоянии.

Полученные зависимости свидетельствуют о значительном влиянии расхода защитного газа (скорости истечения газа), вылета электрода и трех факторов (Q , L , $I_{св}$) одновременно на химический состав металла шва, что по своему характеру совпадает с результатами других работ [8, 14, 15].

Установлено, что при сварке плавящимся электродом в CO_2 и его смесях величина сварочного тока и скорость истечения газа из сварочного сопла (расход газа, способ газовой защиты, вылет электрода) оказывают значительное влияние на химический состав металла сварного шва. Способ сварки плавящимся электродом с двухструйной газовой защитой обеспечивает регулируемую газодинамику в зоне сварки и позволяет управлять переносом электродного металла и химическим составом сварного шва, а также стабилизировать процесс сварки.

Список литературы

1. Заруба И. И., Касаткин Б. С., Каховский Н. И., Потаньевский А. Г. Сварка в углекислом газе. Киев: Гостехиздат УССР, 1960. 224 с.
2. Новожилов М. Н. Основы металлургии дуговой сварки в газах. М.: Машиностроение. 1979. 231 с.
3. Сварка и свариваемые материалы: В 3 т. Т. 1. Свариваемость материалов: Справ. изд. / Под ред. Э. Л. Макарова. М.: Металлургия, 1991. 528 с.

4. *Сараев Ю. Н., Чинахов Д. А., Шпигунова О. И.* Способы повышения трещиностойкости сварных соединений легированных сталей типа 30ХГСА // *Технология машиностроения.* № 1. 2001. С. 35–39.
5. *Столбов В. И.* Сварочная ванна: Монография. Тольятти: ТГУ, 2007. 147 с.
6. *Чинахов Д. А.* Роль газодинамического воздействия струи защитного газа на процессы сварки плавящимся электродом: Монография. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 151 с.
7. *Потапьевский А. Г., Сараев Ю. Н., Чинахов Д. А.* Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего: Монография. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 208 с.
8. *Гребенчук В. Г., Карасев М. В., Работинский Д. Н., Карасева С. М., Розерт Р.* Влияние режимов механизированной сварки металлопорошковой проволокой роVVER BRIDGE 60M на свойства наплавленного металла при сварке мостовых конструкций // *Сварка и диагностика.* № 1. 2009. С. 19–24.
9. *Марочник сталей и сплавов /* Под общ. ред. В. Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
10. *Чинахов Д. А., Воробьев А. В., Томчик А. А.* Влияние активного защитного газа на распределение тепла в зоне сварки // *Тяжелое машиностроение.* № 1. 2013. С. 23–26.
11. *Ленивкин В. А., Дюргеров Н. Г., Сагиров Х. Н.* Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. М.: Машиностроение. 1989. 264 с.
12. *Бигеев А. М.* *Металлургия стали: Учебник для вузов/* 2-е изд., перераб. и доп. М.: *Металлургия*, 1988. 480 с.
13. *Чинахов Д. А., Давыдов А. А., Томчик А. А.* Газодинамическое влияние двухструйной газовой защиты на химический состав и свойства сварных соединений из стали 30ХГСА // *Технология металлов.* № 5. 2012. С. 19–23.
14. *Новиков О. М., Радько Э. П., Иванов Е. Н., Иванов Н. С.* Разработка новой технологии дуговой сварки в защитных газах на основе применения пульсаций газовых потоков и потенциалов ионизации // *Сварщик-профессионал.* № 6. 2006. С. 10–13, 16.
15. *Ардентов В. В., Федоренко Г. А.* О струйной защите при газоэлектрической сварке // *Сварочное производство.* № 1. 1973. С. 3–5.