



## ОСОБЕННОСТИ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ МЕТАЛЛА ШВА ПРИ СВАРКЕ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ

В. Н. ШЛЕПАКОВ, д-р техн. наук, С. М. НАУМЕЙКО, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследованы металлургические способы снижения содержания серы в металле шва при сварке порошковой проволокой. Рассмотрена возможность снижения содержания серы в металле за счет использования магний- и кальцийсодержащих лигатур. Показана перспективность повышения механических свойств сварных соединений путем снижения содержания серы в наплавленном металле.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, порошковая проволока, низколегированный металл шва, десульфурация, стадия сварочной ванны, стадия капли, термодинамика реакций десульфурации, кальций- и магнийсодержащие лигатуры, механические свойства, структура металла шва

В области черной металлургии за счет обработки десульфуризирующими флюсами расплавов удается существенно снизить содержание серы в стали [1, 2], вследствие чего повышается ее пластичность, сопротивление вязким и хрупким разрушениям. При электродуговой сварке плавлением содержание серы в металле шва сварного соединения регламентируется исходя из необходимости предотвращения образования дефектов (горячих трещин) и обеспечения требуемых механических свойств сварных соединений [3–5].

Снижение содержания серы в наплавленном металле можно достичь путем использования взаимодействия металла со шлаком и газовой фазой, а также применения исходных материалов с низким содержанием серы.

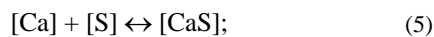
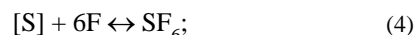
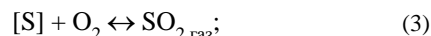
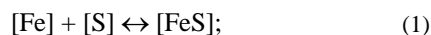
Целью настоящей работы было исследование особенностей десульфурации наплавленного металла путем регулирования состава металлической фазы через сердечник порошковой проволоки.

При сварке некоторых марок стали для обеспечения требуемых физико-механических и служебных свойств сварных соединений в состав порошковых проволок вводили силикокальций, однако при этом уровень содержания серы снижался незначительно. Заметим, что при сварке низкокремнистых сталей силикокальций неприменим. Из-за высокого содержания кремния в металле шва актуальным является использование других десульфураторов на основе кальция и магния. Один из вариантов может быть применение алюмокальциевых и алюмомagneзиовых лигатур в проволоках основного типа. Согласно работе [2], при внепечной обработке стали порошковой проволокой с наполнением гранулированными алюминием и кальцием усвоение последнего составляет

29 %, а при обработке силикокальциевой проволокой — 11 %. Однако, как известно, внепечная обработка стали характеризуется длительным временем существования расплава.

Процесс дуговой сварки плавлением отличается малым временем существования расплава, при этом способе сварки десульфурация протекает как на стадии сварочной ванны, так и на стадии капли. Для стадии капли по сравнению со стадией ванны характерны более высокая температура (свыше 2500 К), а также наличие значительной удельной межфазной поверхности. Такие особенности стадии капли обеспечивают возможность эффективно влиять на процесс десульфурации за счет взаимодействия серы, растворенной в капле, с газовой фазой, образующейся при плавлении компонентов сердечника порошковой проволоки.

С точки зрения термодинамики, при дуговой сварке стали наиболее вероятны реакции, протекающие по следующим схемам:



Расчеты энергии Гиббса  $\Delta G_T^0$  при температуре  $T = 1800 \dots 2500$  К с помощью энтропийного метода проводили по следующим формулам:

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \sum [n_i(H_T^0 - H_{298}^0)_i]; \quad (7)$$

$$\Delta S_T^0 = \Delta S_{298}^0 + \sum [n_i(S_T^0 - S_{298}^0)_i]; \quad (8)$$

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - T\Delta S_T^0 \quad (9)$$



где  $\Delta H_{298}^0$  — стандартная энтальпия, Дж/моль;  $\Delta S_{298}^0$  — стандартная энтропия, Дж/моль;  $n_i(H_T^0 - H_{298}^0)$  — высокотемпературная составляющая энтропии  $i$ -го компонента, кДж/моль;  $n_i(S_T^0 - S_{298}^0)$  — высокотемпературная составляющая энтальпии  $i$ -го компонента, кДж/моль.

Термодинамические данные, необходимые для расчета  $\Delta G_T^0$ , взяты из работ [6–8]. Изменение энергии Гиббса в зависимости от температуры для реакций (1)–(6) показано на рис. 1.

Константы равновесия  $K_p$  рассчитывали по формуле

$$K_p = e^{-\Delta G_T^0/RT}, \quad (10)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная, Дж/кмоль.

Значения констант равновесия  $K_p$  для реакций (1)–(6) при температурах 2000 и 2500 К, характерных для стадий сварочной ванны и капли, приведены в табл. 1.

Из изменений энергии Гиббса и констант равновесия реакций на стадии капли ( $T \geq 2500$  К) видно, что наилучшим десульфуратором является кальций, способный активно удалять серу в газовую фазу и фтор. Поскольку значение константы равновесия образования сульфида кальция при  $T = 2500$  К намного выше, чем оксида, фторида серы и сульфида магния, определяющую роль в процессе десульфурации играет взаимодействие кальция и серы на стадии капли, а при кристаллизации металла получает развитие реакция связывания серы в сульфиды марганца.

Для подтверждения результатов расчетов была проведена экспериментальная проверка. В качестве объекта исследования выбрана порошковая проволока фторидно-оксидного типа. Сварку выполняли на воздухе трубчатой конструкции диаметром 1,6 мм с использованием опытных проволок на постоянном токе прямой полярности:  $I_{св} = 250 \dots 260$  А,  $U_{д} = 21 \dots 22$  В, вылет электрода 20 мм. Сварку осуществляли с использованием полуавтомата ПДГО-510 (производство фирмы «СЭЛМА»), имеющего бесступенчатую регули-

Таблица 1. Константы равновесия

Реакция	2000 К	2500 К
$[Fe] + [S] \leftrightarrow [FeS]$	$4,125 \cdot 10^{-2}$	—
$[Mn] + [S] \leftrightarrow [MnS]$	$4,278 \cdot 10^{-3}$	—
$[Ca] + [S] \leftrightarrow [CaS]$	$2,127 \cdot 10^{-4}$	$1,211 \cdot 10^{-2}$
$[S] + O_2 \leftrightarrow SO_2 \text{ газ}$	$4,310 \cdot 10^{-4}$	$6,817 \cdot 10^{-3}$
$[S] + 6F \leftrightarrow SF_6$	$2,910 \cdot 10^{-4}$	$1,380 \cdot 10^{-4}$
$[Mg] + [S] \leftrightarrow [MgS]$	$1,181 \cdot 10^{-5}$	$1,387 \cdot 10^{-6}$

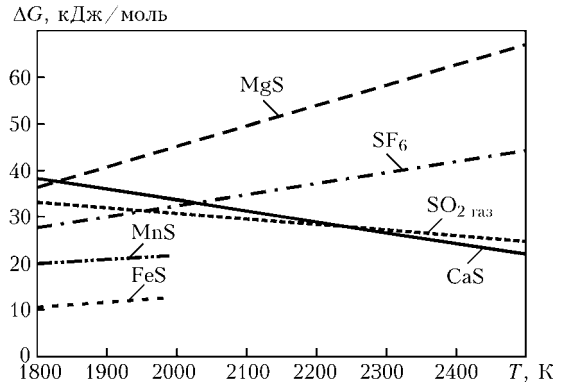


Рис. 1. Изменение энергии Гиббса  $\Delta G$  при образовании оксида, фторида серы и сульфидов в зависимости от температуры

ровку скорости подачи проволоки, и источника питания дуги ВС-600 со ступенчатой регулировкой напряжения холостого хода. Пробы для химического анализа выполняли в шесть слоев с подформовкой боковых поверхностей валика медными пластинами. Химический состав наплавленного металла определяли с помощью спектрального и химического анализов. Исследовали влияние содержания серы на структуру и механические свойства металла многослойных швов, выполненных в нижнем положении. Основным металлом контрольных стыковых соединений была сталь СтЗсп толщиной 20 мм. Уровень легирования наплавленного металла С–Si–Mn–Ni, полученного с использованием проволок всех типов, не изменяли. Сварку стыков для проведения механических испытаний проводили по ГОСТ 26271–91. Металлографический анализ структуры металла шва проводили после травления в 4%-м растворе  $HNO_3$  в спирте на микроскопе «Neophot-302» и сканирующем электронном микроскопе JSM-840. Объемную долю неметаллических включений определяли с помощью количественного анализатора «Omnimet».

Данные о способах введения кальций- и магнийсодержащих лигатур в сердечник проволоки, а также о содержании серы в наплавленном металле приведены ниже.

Десульфураторы (форма введения), мас. %	S, мас. %
0	0,020
2,0 Mg	0,009
1,75 Mg (1,0 Mg; 1,5 AlMg)	0,008
1,25 Mg (3,5 AlMg)	0,005
1,4 Ca (3,5 AlCa)	0,002
0,8 Ca; 0,75 Mg (1,5 AlMg; 2,0 AlCa)	0,003

Влияние содержания серы в наплавленном металле на структуру показано на рис. 2, а механические свойства металла швов — в табл. 2.

Объемная доля неметаллических включений при содержании серы 0,003 мас. % в наплавленном металле составляет 0,3 %, а при  $S = 0,02$  мас. % — 0,85 %. В то же время из рис. 3 видно, что при низком (0,003 мас. %) содержании

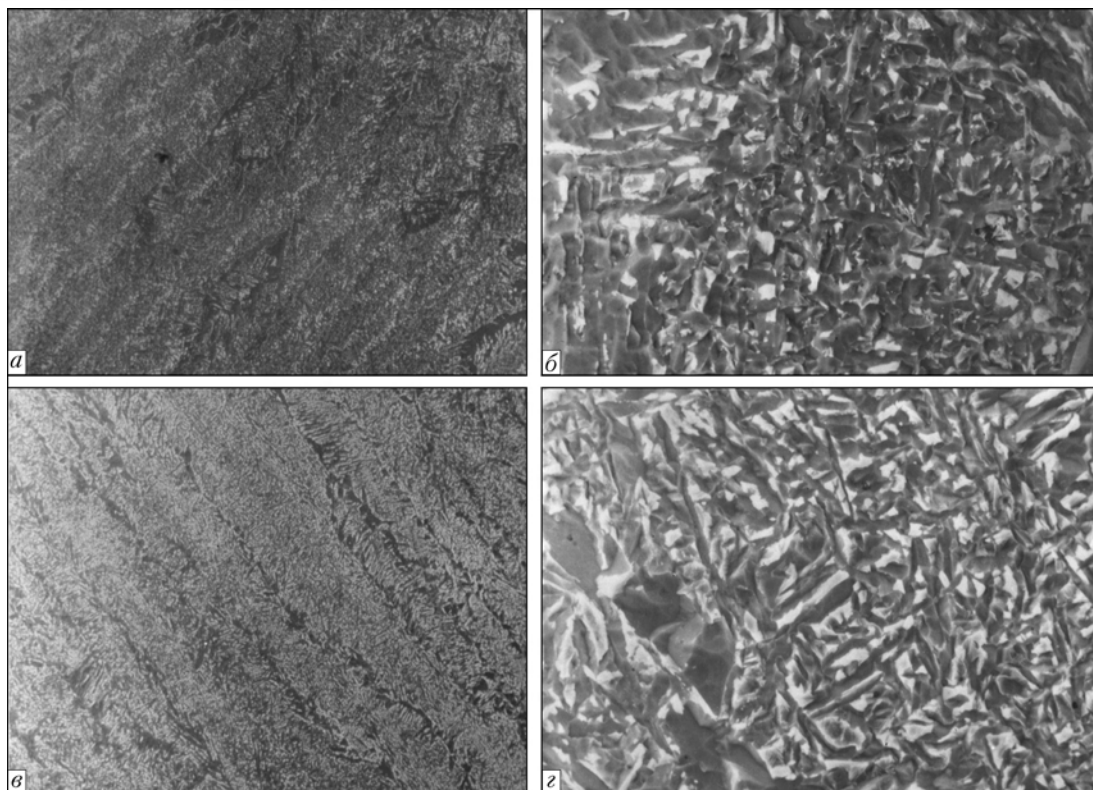


Рис. 2. Микроструктура наплавленного металла шва с содержанием серы 0,003 (а, б) и 0,020 мас. % (в, з): а, в,  $\times 100$ ; б, з,  $\times 1000$

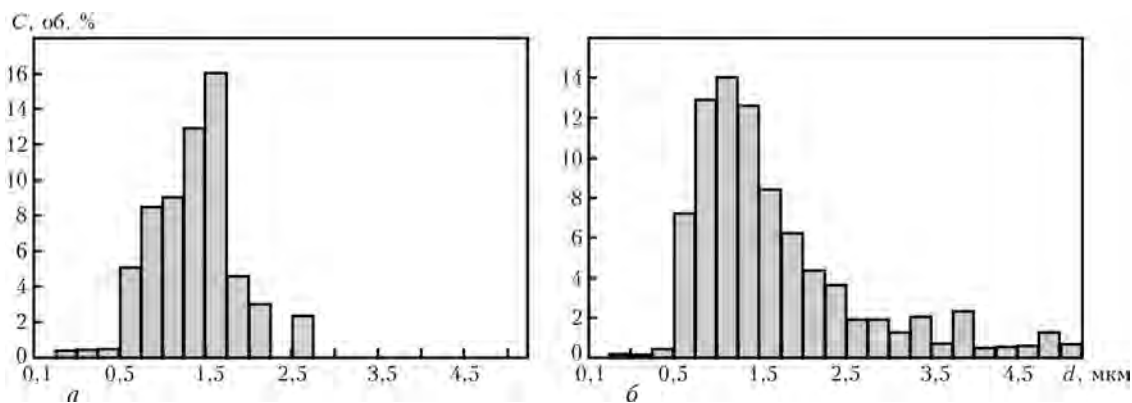


Рис. 3. Распределение неметаллических включений по размерам в наплавленном металле с содержанием серы 0,003 (а) и 0,020 мас. % (б): С — содержание неметаллических включений

Таблица 2. Влияние содержания серы в наплавленном металле на механические свойства металла шва

S, мас. %	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	KCV (Дж/см <sup>2</sup> ) при температуре			
				+20 °C	-20 °C	-40 °C	-60 °C
0,003	635	525	23,3	140,0	68,1	57,5	52,5
0,008	590	480	22,1	90,0	65,5	45,1	—
0,020	500	400	21,0	85,2	42,8	35,2	—

серы в наплавленном металле объемная доля дисперсных неметаллических включений выше, чем при  $S = 0,020$  мас. %.

Таким образом, самым активным десульфуратором являются лигатуры на основе кальция. Это объясняется тем, что кальций связывает серу в сульфид кальция CaS, который не растворяется

в железе. Ассимилируясь с нейтральным шлаком, он снижает содержание сульфида железа в сварочной ванне, а также объем и размеры неметаллических включений в металле шва, что оказывает положительное влияние на механические свойства сварных соединений.



**Выводы**

1. При сварке порошковой проволокой существенную роль в десульфурации металла играют процессы, протекающие на стадии капли, в результате которых образуются летучие фториды и оксиды серы, а также нерастворимые в железе сульфиды. Эффективность десульфурации металла шва на стадии капли выше в случае применения кальцийсодержащих лигатур.

2. На стадии сварочной ванны с серой активно взаимодействуют фтор и марганец.

3. Введение активных десульфураторов на основе лигатур типа алюмокальция в состав сердечника порошковой проволоки приводит к повышению пластичности, снижению содержания и размеров неметаллических включений и повышению вязкопластических свойств металла шва.

1. *Вихлевицук В. А., Харахулах В. С., Бродский С. С.* Ковшевая доводка стали. — Днепропетровск: Системные технологии, 2000. — 190 с.

Metallurgical methods of lowering the content of sulphur in the weld metal in flux-cored wire welding were studied. The possibility of lowering the content of sulphur in the metal by using magnesium- and calcium-containing master alloys is shown. The prospects for improvement of mechanical properties of welded joints by lowering sulphur content in the deposited metal is considered.

2. *Внепечная обработка жидкой стали порошковой алюмокальциевой проволокой / В. П. Онищук, В. В. Кириленко, Д. А. Дюдкин и др. // Металл и литье Украины. — 2000. — № 1/2. — С. 20–23.*
3. *Підгаєцький В. В.* Пори, включення і тріщини в зварних швах. — К.: Техніка, 1970. — 236 с.
4. *Походня И. К., Гаврилюк Ю. А., Орлов Л. Н.* Десульфурация металла при сварке порошковой проволокой // Автомат. сварка. — 1989. — № 11. — С. 47–50.
5. *Походня И. К., Суптель А. М., Шлепаков В. Н.* Сварка порошковой проволокой. — Киев: Наук. думка, 1972. — 210 с.
6. *Киреев В. А.* Методы практических расчетов в термодинамике химических реакций. — М.: Химия, 1975. — 536 с.
7. *Владимиров Л. П.* Термодинамические расчеты равновесия металлургических реакций. — М.: Металлургия, 1970. — 528 с.
8. *Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справ. изд. / Под ред. В. П. Глушко. — В 4 т. — Т. 3: Элементы В, Al, Ca, Th, Ti, Be, Ba и их соединения. — Кн. 2: Таблицы термодинамических свойств. — М.: Наука, 1981. — 400 с.*

Поступила в редакцию 19.09.2008

**ВНИМАНИЮ СПЕЦИАЛИСТОВ!**

**Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности — 2009**

**8-я Международная специализированная выставка и конференция приборов и оборудования для неразрушающего контроля и технической диагностики в промышленности**

18–20.03. 2009

г. Москва СК «Олимпийский»

**Организатор выставки: ООО «Примэкспо»**

Основные тематические разделы:

- ❖ Акустический контроль ❖ Ультразвуковой контроль ❖ Вихретоковый контроль
- ❖ Визуальный и оптический контроль ❖ Лазерные технологии НК
- ❖ Магнитопорошковый контроль ❖ Электромагнитный контроль
- ❖ Инфракрасный и термический контроль ❖ Вибрационный контроль
- ❖ Капиллярный контроль ❖ Течеискание ❖ Радиографический контроль
- ❖ Электрический контроль ❖ Радиационный контроль ❖ Контроль трубопроводов
- ❖ Обучение и сертификация персонала ❖ Аттестация лабораторий
- ❖ Экспертиза и диагностика опасных производственных объектов
- ❖ Контроль напряженно-деформированного состояния для оценки остаточного ресурса

Дополнительную информацию можно получить по E-mail: [ndt@primexpo.ru](mailto:ndt@primexpo.ru), [www.primexpo.ru/ndt](http://www.primexpo.ru/ndt)