



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-95-98>  
УДК 621.74

Поступила 24.09.2024  
Received 24.09.2024

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СЕРЫ И ФОСФОРА НА КАЧЕСТВО МЕТАЛЛА ШВА ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКЕ И СПОСОБЫ ИХ УДАЛЕНИЯ

А. С. САИДАХМАТОВ, М. М. АБДУРАХМОНОВ, Н. С. ДУНЯШИН, Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан, ул. Университетская, 2. E-mail: [asror\\_khan@mail.ru](mailto:asror_khan@mail.ru)

Н. И. УРБАНОВИЧ, С. С. КАРПОВИЧ, Г. Ф. ЛИВШИЦ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: [pmstm@bntu.by](mailto:pmstm@bntu.by)

*В статье представлены источники поступления серы и фосфора в сварочную ванну, проанализировано их влияние на качество металла шва при электродуговой сварке и предложены способы их удаления. Показано, что влияние серы и фосфора на образование горячих трещин взаимно усиливается тем, что места ликвации соединений этих элементов в металле шва совпадают. Удалению серы способствуют вводимый в расплав сварочной ванны Mn и содержащиеся в шлаке основные оксиды марганца и кальция, а удалению фосфора – содержащиеся в шлаке основные оксиды FeO и CaO.*

**Ключевые слова.** Дуговая сварка, флюс, шлак, сварочная ванна, шихта.

**Для цитирования.** Саидахматов, А. С. Изучение влияния серы и фосфора на качество металла шва при электродуговой сварке и способы их удаления / А. С. Саидахматов, М. М. Абдурахмонов, Н. С. Дунышин, Н. И. Урбанович, С. С. Карпович, Г. Ф. Лившиц // *Литье и металлургия*. 2024. № 4. С. 95–98. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-95-98>.

## STUDY OF METAL REFINING DURING ELECTRIC ARC WELDING

A. S. SAIDAKHMATOV, M. M. ABDURAKHMONOV, N. S. DUNYASHIN, Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan, 2, Universitetskaya str. E-mail: [asror\\_khan@mail.ru](mailto:asror_khan@mail.ru)

N. I. URBANOVICH, S. S. KARPOVICH, G. F. LIUSHYTS, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: [pmstm@bntu.by](mailto:pmstm@bntu.by)

*The article presents sources of sulfur and phosphorus entering the weld pool, their influence on the quality of weld metal during electric arc welding and methods of their removal. It is shown that the influence of sulfur and phosphorus on the formation of hot cracks is mutually enhanced by the fact that the liquation sites of the compounds of these elements in the weld metal coincide. Sulfur removal is facilitated by Mn introduced into the weld pool melt and the main oxides of manganese and calcium contained in the slag, and phosphorus removal is facilitated by the main oxides of FeO and CaO contained in the slag.*

**Keywords.** Arc welding, flux, slag, weld pool, charge.

**For citation.** Saidakhmatov A. S., Abdurakhmonov M. M., Dunyashin N. S., Urbanovich N. I., Karpovich S. S., Liushyts G. F. Study of metal refining during electric arc welding. *Foundry production and metallurgy*, 2024, no. 4, pp. 95–98. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-95-98>.

Использование минеральных ресурсов Республики Узбекистан для разработки и промышленного производства сварочных материалов (флюсов и покрытий электродов) – одно из приоритетных направлений [1, 2]. К флюсам и покрытиям предъявляют ряд требований, в частности обеспечение глубокого рафинирования сварочной ванны от вредных примесей, таких, как сера и фосфор. Цель данной работы – изучение влияния серы и фосфора на качество металла шва при электродуговой сварке сталей и способов их удаления. Полученные знания могут применяться в дальнейшем для разработки составов флюсов и покрытий с использованием местного сырья.

Рафинирование металла – процесс его очистки от вредных примесей. Для стали это очистка от серы и фосфора. Поскольку их наличие – крайне нежелательное явление, рафинирование можно рассматривать как одну из важнейших металлургических операций, в том числе при сварке [3].

Источниками поступления серы и фосфора в расплавленный металл являются основной металл; присадочный металл (проволоки, прутки, стержни покрытых электродов); шлак, образующийся при

расплавлении флюсов, покрытия и шихты порошковых проволок, в которые сера и фосфор попадают из сырьевых материалов.

Сера является вредной примесью, значительно усиливающей склонность к образованию горячих (кристаллизационных) трещин при сварке. Она практически не растворима в твердом железе и находится в стали в виде неметаллических сульфидных включений FeS с температурой плавления 1193 °С. Более того, FeS образует с Fe легкоплавкие эвтектики с температурой плавления всего 985 °С. Эти эвтектические образования в виде легкоплавких прослоек располагаются при кристаллизации металла шва по границам зерен, ослабляя связь между ними. Чем больше в металле серы, тем больше эвтектики, тем больше прослойки и ослабление связи между зернами. При возникновении растягивающих напряжений, а такие напряжения при сварке присутствуют всегда, эти связи могут разрываться с образованием горячих трещин.

Содержание серы в сталях, сварочных материалах, во всех компонентах, присутствующих при приготовлении флюсов, электродных покрытий, шихты проволоки, строго ограничивают.

С повышением содержания серы в металле шва склонность его к образованию трещин резко возрастает. Возрастает она также и при сварке сталей, содержащих в повышенных концентрациях никель. В этом случае на базе сульфида никеля NiS образуются эвтектики с очень низкой для стали температурой плавления – всего 644 °С. Усилить вредное действие серы могут и другие элементы, в частности углерод (сульфиды углерода), особенно при сварке углеродистых и низколегированных сталей.

В связи с этим для получения качественного шва содержание серы в расплавленном металле сводят к минимально возможному уровню. С этой целью, во-первых, надо ограничивать содержание серы в свариваемом металле и сварочных материалах, во-вторых, если уже она попала в расплавленный металл, необходимо постараться ее оттуда удалить или каким-то образом нейтрализовать ее вредное воздействие. Руководствуясь этим соображением, при сварке сталей применяют связывание серы в сульфид марганца (MnS) с более высокой температурой плавления 1610 °С, который не образует с железом легкоплавких эвтектик и плохо растворяется в железе.

Связывание S в MnS происходит по реакции:



с константной равновесия:

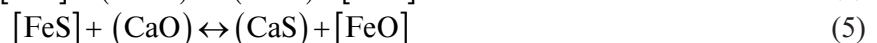
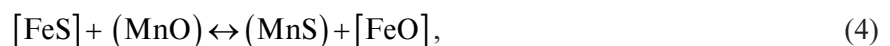
$$K = \frac{(\text{MnS})[\text{Fe}]}{[\text{FeS}][\text{Mn}]} \quad (2)$$

Отсюда

$$[\text{FeS}] = \frac{(\text{MnS})[\text{Fe}]}{K[\text{Mn}]} \quad (3)$$

Концентрации FeS в металле уменьшаются с увеличением Mn, т.е. для борьбы с S в сварочную ванну следует вводить Mn. Отметим, что реакция [FeS] с [Mn] происходит при понижении температуры ванны и идет вяло. Поэтому значительная часть серы (даже при большом содержании Mn) может оставаться связанная в виде сульфидов железа FeS.

Уменьшение FeS в жидком металле достигается дополнительным воздействием шлаков, содержащих MnO и CaO, по реакциям:



с константами равновесия:

$$K = \frac{(\text{MnS})[\text{FeO}]}{[\text{FeS}](\text{MnO})} \quad (6)$$

$$K = \frac{(\text{CaS})[\text{FeO}]}{[\text{FeS}](\text{CaO})} \quad (7)$$

Анализ этих реакций и их констант равновесия показывает, что уменьшению FeS в металле способствует лучшее раскисление жидкого металла (снижение FeO в металле) и увеличение MnO и CaO в шлаке, т.е. повышение основности. Поэтому основные шлаки более благоприятны для уменьшения концентрации S в металле, что имеет место на практике. Металл шва, полученный электродами типа

УОНИ (с основным покрытием), содержит серы меньше, чем полученный рутиловым и другими электродами. Поэтому сварные соединения, выполненные электродами УОНИ, менее склонны к образованию горячих трещин.

Фосфор в сталях тоже весьма вредная примесь. В отличие от серы фосфор растворяется в железе и может находиться в металле шва как в растворенном состоянии, так и в виде легкоплавких включений – фосфидов железа ( $\text{Fe}_2\text{P}$ ,  $\text{Fe}_3\text{P}$ ) и фосфидных эвтектиках, располагающихся по границам зерен. Фосфор ухудшает механические свойства, вызывая хладноломкость – снижение пластичности и ударной вязкости, особенно при пониженных температурах, а также снижает стойкость металла шва к образованию горячих трещин. Чем больше фосфора и ниже его растворимость в металле (в аустените меньше, чем в феррите), тем больше образуется легкоплавких фосфорсодержащих включений на границах зерен металла шва, тем выше склонность к образованию трещин. Опасность образования трещин от фосфора значительно больше в швах с аустенитной структурой, часто получаемых при сварке высоколегированных сталей. Следует отметить, что влияние фосфора и серы на образование горячих трещин взаимно усиливается тем, что места ликвации соединений этих элементов в металле шва совпадают. Углерод также усиливает вредное действие фосфора. Можно отметить, что при сварке высоколегированных сталей углерод способствует образованию по границам кристаллов легкоплавких пленок карбидного происхождения.

Уменьшения концентрации фосфора в расплавленном металле добиваются, ограничивая его содержание в основном металле, а также удаляя фосфор из расплава сварочной ванны.

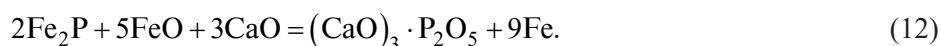
Удаление фосфора основано на его окислении в фосфорный ангидрид и дальнейшем связывании в шлакующиеся комплексные соединения. Окисление осуществляется по реакциям:



Оксид  $\text{P}_2\text{O}_5$ , будучи кислым оксидом, образует комплексные соединения с основным оксидом. Наиболее активно эти операции происходят с  $\text{CaO}$  по реакциям:



Скомбинировав обе реакции, например (8) и (10), получим



Константа равновесия этой реакции:

$$K = \frac{(\text{CaO})_3 \cdot \text{P}_2\text{O}_5}{[\text{Fe}_2\text{P}]_2 \cdot (\text{FeO})_5 \cdot (\text{CaO})_3} . \quad (13)$$

Анализ этого выражения показывает, что уменьшению содержания фосфора в металле способствует увеличение содержания свободных основных оксидов  $\text{FeO}$  и  $\text{CaO}$ . В кислых шлаках основные оксиды  $\text{FeO}$  и  $\text{CaO}$  связаны в комплексные соединения с кислыми оксидами  $\text{SiO}_2$  и  $\text{TiO}_2$ , например  $(\text{FeO})_2 \cdot \text{SiO}_2$ , поэтому концентрация их в свободном состоянии значительно меньше и удаление фосфора из металла в шлак затрудняется. Таким образом, основные шлаки более благоприятны для процесса обесфосфоривания.

### Выводы

1. Влияние серы и фосфора на образование горячих трещин взаимно усиливается тем, что места ликвации соединений этих элементов в металле шва совпадают.
2. Удалению серы способствуют вводимый в расплав сварочной ванны  $\text{Mn}$  и содержащиеся в шлаке основные оксиды марганца и кальция, а удалению фосфора – содержащиеся в шлаке основные оксиды  $\text{FeO}$  и  $\text{CaO}$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Khudoyorov, S. S.** Mineral resources of the Republic of Uzbekistan for the production of fused fluxes for automatic arc welding / S. S. Khudoyorov, N. S. Dunyashin // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. – 2020. – Vol. 7, iss. 5. – P. 13598–13601.
2. **Верхотуров, А. Д.** Методология создания сварочных материалов / А. Д. Верхотуров. – Хабаровск: Изд-во Дальневост. гос. ун-та путей сообщения, 2009. – 128 с.

3. Эрматов, З.Д. Разработка научных основ создания многокомпонентных электродных покрытий для ручной дуговой наплавки / З.Д. Эрматов. – Ташкент, 2021. – 140 с.

#### REFERENCES

1. **Khudoyorov S.S., Dunyashin N.S.** Mineral resources of the Republic of Uzbekistan for the production of fused fluxes for automatic arc welding. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 2020, vol. 7, iss. 5, pp. 13598–13601.
2. **Verkhoturov A.D.** *Metodologiya sozdaniya svarochnyh materialov* [Methodology for the creation of welding consumables]. Khabarovsk Publishing House of the Far Eastern State University of Railway Engineering, 2009, 128 p.
3. **Ermатов Z.D.** *Razrabotka nauchnyh osnov sozdaniya mnogokomponentnyh elektrodnyh pokrytij dlya ruchnoj dugovoj naplavki* [Development of scientific bases for creating multicomponent electrode coatings for manual arc surfacing]. Tashkent, 2021, 140 p.