

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.3.15

УДК 621.791

С.В. Наумов, А.М. Игнатова, М.Н. ИгнатовПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ УДАЛЕНИЯ
СЕРЫ ИЗ МЕТАЛЛА ШВА ПО РЕАКЦИЯМ
«МЕТАЛЛ – ШЛАК – АТМОСФЕРА» ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
ШЛАКОВЫХ ОСНОВ ИЗ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ
УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА**

Хорошо известны классическое влияние на металл шва серы, которая увеличивает красноломкость при обработке металлов давлением, снижает пластичность и ударную вязкость сварных швов, и традиционные пути удаления серы из расплавленного металла, направленные в основном на взаимодействие расплавленного металла с основными шлаками и десульфурацию самого шлака. Однако эти приемы, как правило, используют в тех случаях, когда вводят в электроды (флюс) специальные компоненты либо назначают дополнительные операции. Эта проблема особенно актуальна при использовании компонентов рециклинга металлургического и петругического производства. Установлено, что при использовании нетрадиционного сырья, а именно сырья габброидной группы Уральского региона, например горнблендита Первоуральского месторождения и отходов петругического производства на его основе в роли электродов (флюсов), происходит снижение содержания серы в наплавленном металле и/или сохранение в пределах, регламентируемых для качественных сталей. Исходя из этого целью работы является нахождение причин снижения содержания серы в наплавленном металле при использовании нетрадиционных компонентов. Методы и методики исследования – растровая электронная микроскопия с микронзондовым анализом шлаковых корок и химический анализ металла шва, расчетные методы и др. В результате в статье объясняются причины пористости шлаковых корок, снижения содержания серы и фосфора в наплавленном металле, описаны механизмы диффузии серы из металла шва в атмосферу через шлак.

В дальнейшем будет рассмотрен и изучен каждый этап процесса удаления серы по механизму «металл – шлак – атмосфера» при сварке с использованием сварочных материалов на основе нетрадиционных компонентов Уральского региона.

Ключевые слова: шлак, шлаковая корка, сварной шов, сварочный материал, покрытый электрод, флюс, сера, пористость, красноломкость, десульфурация, качество стали.

S.V. Naumov, A.M. Ignatova, M.N. Ignatov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**STUDIES CONSISTENTLY REMOVE SULFUR
FROM THE WELD METAL ON THE REACTIONS
OF METAL-SLAG-ATMOSPHERE USING SLAG BASES
OF MINERAL RAW MATERIALS OF URAL REGION**

The classical influence of sulfur on the weld metal which increases the brittleness, sulfur reduces the ductility and toughness of welds, and traditional ways of removing sulfur from molten metal, mainly directed to the interaction with the basic molten metal and slag in the slag desulfurization are known. However, these techniques are used in cases where the electrodes are introduced into the (flux) or special components using additional operations. This problem is particularly relevant when using components and recycling of metallurgical production. When using non-traditional materials, namely gabbroid group of the Ural region, for example at Pervouralsk hornblendite deposits and waste petrugical production based on it as the electrodes (flux), of sulfur reduction takes place in the weld metal and/or maintenance within regulated for quality steels defined. Therefore, the aim of the work is to find reasons to increase the degree of purification of sulfur deposited metal by using non-traditional ingredients. Methods and techniques of research are scanning electron microscopy with microprobe analysis of slag crusts and chemical analysis of the weld metal, and other computational methods. As a result, in the article describing the reason the porosity of slag crusts, reduction of sulfur and phosphorus in the weld metal are described mechanisms of diffusion of sulfur into the atmosphere of the weld metal through the slag.

Each stage of the process of removing the sulfur by the mechanism of metal-slag-atmosphere during welding using welding materials based on non-traditional components of the Ural region will be considered and studied in the future.

Keywords: slag, slag crust, weld, welding material, coated electrode, flux, sulfur, porosity, brittleness, desulfurization, quality steel.

Электрическая дуговая сварка принадлежит к числу активных металлургических процессов. Ее эффективность, наряду с более благоприятными условиями формирования и структурообразования шва, обусловлена рафинированием металла благодаря его взаимодействию со шлаковым расплавом образующегося расплавлением электродного покрытия или самого флюса.

Реализация процессов рафинирования переплавляемого металла от неметаллических включений и вредных примесей определяется физическими и физико-химическими свойствами применяемых электродов (электродного покрытия, флюсов).

При электродуговой сварке флюс служит не только основным средством рафинирования переплавляемого металла от газов, неметаллических включений и вредных примесей, но и средой, которая явля-

ется промежуточной между наплавляемым металлом и окружающей атмосферой. Кроме того, он выполняет ряд вспомогательных функций. Расплавленный флюс защищает металл от непосредственного окисления кислородом, создает тепловую подушку над металлической ванной кристаллизующегося сварного шва [1].

Эти функции флюса и определяют предъявляемые к нему требования:

1. Флюс должен обеспечивать легкое возбуждение электродугового процесса и высокую стабильность энергетических режимов при его проведении. Для этого необходимо, чтобы в расплавленном флюсе присутствовали легко ионизирующиеся компоненты, способствующие возникновению дугового разряда.

2. Плотность флюса должна быть меньше плотности металла во избежание запутывания частиц флюса в наплавляемом металле (для предотвращения возникновения дефектов при сварке – шлаковых включений).

3. Расплавленный флюс должен служить достаточно надежной преградой для перехода в металл кислорода из атмосферы и шлака. Он должен быть бескислородным и негигроскопичным, т.е. не должен иметь в своем составе легко восстанавливаемых оксидов, а также кристаллизационной и адсорбированной влаги. В противном случае возможно восстановление оксидов и влаги и насыщение сварного шва водородом, кислородом и ненужными металлическими примесями.

4. Расплавленный флюс должен иметь высокое межфазное натяжение на границе с наплавляемым металлом, обладать достаточно высоким межфазным сцеплением (когезией) и минимальным межфазным натяжением на границе с неметаллическими включениями. Это облегчает их удаление из наплавляемого металла и позволяет получать сварные швы с равномерной поверхностью и легкой отделяемостью шлаковой корки.

5. Флюс должен обладать рафинирующей емкостью, т.е. быть способным ассимилировать значительное количество вредных примесей. Это обеспечивает глубокое рафинирование сварного шва от газов, неметаллических включений и примесей.

6. Флюсы не должны содержать дорогостоящие и дефицитные компоненты. Приготовление флюса, в том числе его выплавка и подготовка к сварке, должно происходить с минимальными трудностями [2].

7. Электроды (флюсы) не должны содержать компоненты, вредные для здоровья.

На практике все эти требования вступают в противоречие, и создание флюсов, полностью им удовлетворяющих, практически невозможно. В каждом конкретном случае приходится идти на компромисс, выбирая какое-то оптимальное решение, в наибольшей степени удовлетворяющее всему комплексу условий. Изменяя число и соотношение компонентов флюсов, можно в широких пределах варьировать температуру их плавления, стабильность энергетического режима, электропроводность, вязкость, поверхностное натяжение и другие параметры, определяющие эффективность процесса электродуговой сварки.

Температура кипения шлака или отдельных его компонентов должна быть достаточно высокой. Этим условиям в значительной степени удовлетворяет фтористый кальций. Хорошее формирование сварного шва дают шлаки, затвердевающие в широком интервале температур, т.е. так называемые «длинные» шлаки, к которым относятся силикатные системы. Однако качественное формирование шва может быть получено и при использовании «коротких» шлаков. Отделимость шлаковой корки от поверхности шва во многом зависит от химического состава наплавляемого металла. Она получается удовлетворительной в тех случаях, когда в шлаковой корке не образуются соединения с кристаллической решеткой, аналогичной металлу. В этом отношении существенную роль играет также величина адгезии шлака к металлу: чем она меньше, тем лучше отделимость шлаковой корки [3, 4].

Если применяемый флюс имеет невысокое содержание кремнезема, то не способен полностью ассимилировать такие неметаллические включения, как оксиды железа, при сварке. Исходя из этого необходимо, чтобы флюсы имели повышенное содержание кремнезема (SiO_2), позволяющего связывать оксиды железа в более прочные соединения $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$.

Минимальной окислительной способностью обладают шлаки, не содержащие в своем составе оксидов, термодинамически менее устойчивых, чем оксиды легирующих элементов, присутствующих в наплавляемом металле, а также соединений, повышающих активность кислорода в шлаковых расплавах. С этой точки зрения наилучшими являются бескислородные шлаки, например фтористый кальций.

Обессеривающая способность шлаков тем выше, чем выше их основность, т.е. чем больше в них свободного оксида кальция. С ростом основности шлака увеличивается коэффициент распределения серы между шлаком и металлом. С этой точки зрения желателен использовать в процессах электродуговой сварки известковистые шлаки. Однако высокое содержание извести в шлаках повышает их гигроскопичность и вероятность насыщения металла водородом в процессе сварки. Интенсивное удаление серы из металла может быть достигнуто также за счет применения шлаков, хотя и не достигающих высоких коэффициентов распределения серы, но способных легко отдавать ее в атмосферу.

Для очистки наплавляемого металла от неметаллических включений при сварке шлаки должны обладать максимальной адгезией к неметаллическим включениям и минимальной адгезией к металлу.

Вероятность перехода газов из металла в шлак тем больше, чем выше растворимость газов в шлаке. Однако шлаки, растворяющие большие количества газов, например известковистые (водород), карбидные (азот), в то же время могут поглощать их не только из металла, но и из воздуха. При этом защитные свойства шлаковой корки, естественно, снижаются, так как газопроницаемость ее увеличивается. К этому следует добавить, что уже в исходном состоянии такие шлаки могут иметь повышенное содержание газов, которые в процессе переплава могут перейти в металл [5].

Из приведенного анализа видно, что наибольшему числу требований, причем наиболее важных (возбудимость и стабильность процесса, минимальная окислительная способность, хорошее рафинирование), удовлетворяют фтористый кальций, оксиды кальция и кремния.

Помимо этого в результате сравнительного анализа компонентов шихты флюсов и минерально-сырьевой базы Уральского региона было установлено, что на территории Ломовского и Первоуральского месторождений имеются горные породы, отвечающие удовлетворяющим всему комплексу условиям в качестве компонентов шихты сварочных флюсов (табл. 1) [6, 7].

Несмотря на все особенности компонентного состава шлака, которые вступают в противоречие по функциональности (по рафинированию, температуре плавления, вязкости и т.д.), габброиды Ломовского и Первоуральского месторождений по минеральному и оксидному

составу уже обладают всеми качествами для использования их в сварочных флюсах, что было подтверждено экспериментально¹ [2, 8]. В настоящее время могут использоваться синтетические и рудоминеральные компоненты сварочных материалов [9], но использование нерудных синтетических шлаковых основ экономически целесообразней.

Таблица 1

Силикатный анализ габброидов Уральского региона (Ломовского и Первоуральского месторождений) по ГОСТ 2642.0–86–2642.15–97

Оксидный химический состав, мас. %	Материал	
	Габбро-диабаз (Ломовское месторождение)	Горнблендит (Первоуральское месторождение)
SiO ₂	46,6–48,6	43,6–49,5
TiO ₂	3,0–4,4	1,6–2,6
Al ₂ O ₃	12,4–13,3	11,7–13,5
FeO + Fe ₂ O ₃	8,6–13,3	9,8–15,0
MnO	0,1–0,2	–
MgO	3,7–4,2	7,5–9,1
CaO	8,3–8,5	9,0–10,6
K ₂ O + Na ₂ O	3,5–3,7	1,0–2,5
Cr ₂ O ₃	–	<0,5
P ₂ O ₅	0,47	–
S _{общ}	<0,03	<0,03

Однако при использовании этих горных пород в сварочных материалах были достигнуто низкое содержание вредных примесей в металле шва. Исходя из этого целью работы является исследование последовательности удаления серы из металла шва по реакциям «металл – шлак – атмосфера», объясняющее причину низкого содержания вредных примесей в наплавленном металле. Для этого рассмотрено влияние каждого компонента на сварочно-технологические свойства, способность рафинирования сварного шва, способность связывания вредных примесей и неметаллических включений в сложные оксидные

¹ Пат. № 2448824 Российская Федерация: МПК В 23, опубл. 27.04.2012. Шихта для получения сварочного плавного флюса: К 35/40, В 23 К 35/362 / Игнатов М.Н., Игнатова А.М., Наумов С.В.

соединения, а также их влияние при взаимодействии выделяющихся газовых составляющих, что объяснит пористость шлаковых корок в некоторых случаях.

Поскольку горные породы Уральского региона не содержат фтористый кальций, то введение небольшого количества (1–3 %) CaF_2 позволяет достигать желаемой вязкости шлаковой системы сварочных материалов. Кроме того, при выплавке флюса наблюдается нестабильность процесса из-за высокого содержания оксидов натрия и калия, и введение фтористого кальция также решает эту проблему. В совокупности с хромистой рудой в шихте до 3 % и оксидом кремния достигается лучшее связывание оксидов железа в сложные шпинели, уменьшается его воздействие на сварной шов и проникновение в него.

Однако при применении CaF_2 образуются летучие токсичные оксиды, хотя при использовании углеродфторсодержащих добавок доля образования таких оксидов уменьшается [10, 11]. Флюсы системы $\text{CaF}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ не чувствительны к гидратации, но степень очистки от оксидных и шаровидных силикатных включений меньше, чем при использовании шлаков $\text{CaF}_2\text{--CaO--Al}_2\text{O}_3$ или $\text{CaF}_2\text{--CaO}$, поэтому природный компонент на основе $\text{SiO}_2\text{--CaO--Al}_2\text{O}_3$ с добавкой только в небольшом количестве CaF_2 либо использование петруггических отходов этой шлаковой системы будут наиболее полно удовлетворять условиям проведения сварки под слоем флюса.

Кроме того, в настоящее время уделяют повышенное внимание созданию бесфторидных флюсов. Это связано не только с дефицитностью фтористого кальция, но и его токсичностью. При сварке на фторидных шлаках выделяются газообразные соединения фтора, например, при повышенных температурах фторид может вступать во взаимодействие с парами воды с образованием HF . Но из-за высокого содержания оксида железа в рассматриваемых породах как компонентах сварочных флюсов лучше будет кислая основа, так как это позволяет связывать оксиды железа в более прочные соединения $\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$.

Сварочный флюс на основе габброидов Уральского региона является достаточно кислым с удовлетворительной температурой плавления и хорошими сварочно-технологическими свойствами, сварной шов получается плотным, без дефектов. По своему химическому составу (см. табл. 1) он имеет все показатели для того, чтобы его можно было использовать в качестве флюса. Высокое содержание SiO_2 способству-

ет хорошей ассимиляции оксидов железа, формированию ровной поверхности шва, хорошей отделяемости корки шлака от металла. Умеренное содержание Al_2O_3 способствует хорошему формированию шва. Отсутствие фторидов исключает выделение токсичных газов в процессе сварки. К тому же температура плавления шлака 1300–1400 °С, что соответствует температуре плавления сварочных флюсов.

Однако в ряде случаев шлаковые корки пористые, в то же время это не сильно влияет на сварочно-технологические свойства (слегка усиливается шипение, отделимость падает до 4 баллов по РД 03-613), а наплавленный металл без пористости. На рис. 1 представлен внешний вид сварочных корок, где была обнаружена пористость шлака. Возможно, при взаимодействии металла шва и шлака происходят реакции рафинирования и диффузионные процессы (сера – шлак – атмосфера), при этом образуются газовые составляющие, из-за чего шлаковая корка и пористая.

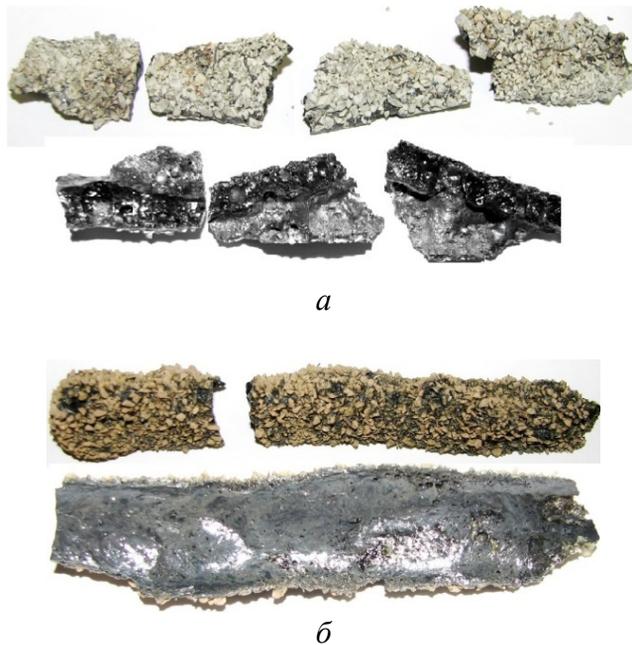


Рис. 1. Внешняя и внутренняя поверхности сварочной корки после сварки под слоем флюса ($\times 2$): *a* – шлак габбро-диабазы; *б* – шлак горнблендита

Если рассматривать химический состав сварных швов и основного металла ($S = 0,14 \%$) с проволокой ($S \leq 0,05 \%$), то результаты свар-

ки под слоем флюса (флюсы содержат менее 0,03 % серы) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав сварных швов, выполненных сваркой под флюсом [12]

Номер основы*	Химические элементы, %										
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti
1	99,351	0,047	0,291	0,569	0,005	0,003	0,023	0,031	0,029	0,02	0,004
2	99,431	0,046	0,328	0,481	0,004	0,003	0,041	0,026	0,032	0,012	0,007
3	99,547	0,049	0,317	0,509	0,005	0,002	0,083	0,018	0,031	0,014	0,004

* Основа 1 – под флюсом из габбро-диабазы, 2 – горнблендита, 3 – горнблендита с подшихтовкой 2 % CaF_2 и хромистой руды до 3 %.

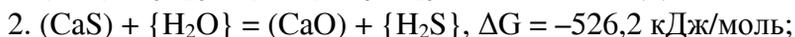
Таким образом, видно, что содержание серы и фосфора резко снизилось по сравнению с основным металлом, проволокой и флюсом, что говорит о необходимых реакциях, предотвращающих при сварке переход серы из шлака в металл.

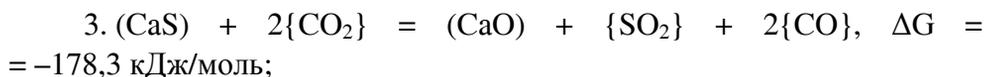
Термодинамический анализ имеющихся данных распределения серы между металлом и шлаком при сварке под слоем флюса показывает, что шлак обладает достаточно высокой серопоглотительной способностью.

С целью проверки возможности предотвращения перехода серы из шлака в металл были проведены термодинамические расчеты распределения серы между металлом и шлаком, при содержании серы в шлаке менее 0,03 % получение требуемого содержания серы в металле не представляет трудностей.

В связи с этим необходимо рассмотреть взаимодействие шлака с газовой фазой. В процессе электрошлакового переплава происходит взаимодействие не только металла со шлаком, но и шлака с газовой фазой. Причем в этом процессе существенная доля серы удаляется в газовую фазу.

При взаимодействии шлака с газовой фазой, содержащей кислород, происходит окисление серы. В зависимости от состава шлака могут происходить следующие реакции:

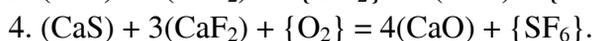
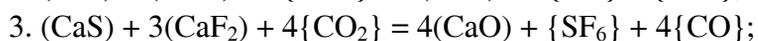
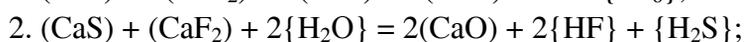




При проведении электродуговой сварки шлак контактирует с атмосферой, таким образом, взаимодействие происходит с кислородом воздуха.

Как следствие, можно сделать вывод, что сера, находящаяся в шлаке, удаляется в газовую фазу. Скорость окисления серы в незначительной степени зависит от ширины шлаковой корки и насыпной массы флюса, поскольку увеличивается площадь контакта шлака с воздухом, и более существенно – от содержания серы в шлаке.

Если в шлаке содержится плавиковый шпат (состав № 3 по табл. 2) [13], то:



Термодинамический анализ этих реакций показал, что наиболее предпочтительной при сварочных температурах (свыше 1600 °С) является реакция № 4. При этом наплавленный металл обладает самым низким содержанием серы по сравнению с остальными швами (№ 1 и № 2).

О предпочтительном развитии реакции образования фторидов серы свидетельствуют опыты, проведенные О.Д. Молдавским, В.М. Шпицбергом и А.Ю. Поляковым. В своих экспериментах они использовали фторидный флюс АНФ-6 и малофторидный известковистый ИМКО-1. При плавке под флюсом АНФ-6 до 35 % серы переходило в газовую фазу, в то время как при плавке под флюсом ИМКО-1 сера в газовой фазе практически отсутствует.

Для поверхностной диагностики сварочных корок проведена растровая электронная микроскопия на оборудовании Carl Zeiss EVO50 XVP. Для проведения исследований взяты образцы после наплавки под флюсом с целью получения сварочного шлака в объеме, достаточном для проведения растровой электронной микроскопии на режиме $I = 550 \text{ А}$, $v_{\text{св}} = 55 \text{ см/мин}$, $U = 30 \text{ В}$ (рис. 2).

Выявлено, что сварочный шлак габбро-диабазы имеет большую шероховатость по сравнению с флюсом на основе горнблендита

(рис. 2, *а*), из-за этого шлаковая корка отходит не самопроизвольно, но легко отделяется. Большой интерес вызывает сварочный шлак флюса на основе горнблендита (рис. 2, *б*). Мелкая чешуйчатость и шероховатость поверхности, мелкие газовые поры размером до 2–3 мкм подтверждаются отделением сварочного шлака с поверхности шва без механического воздействия [14].

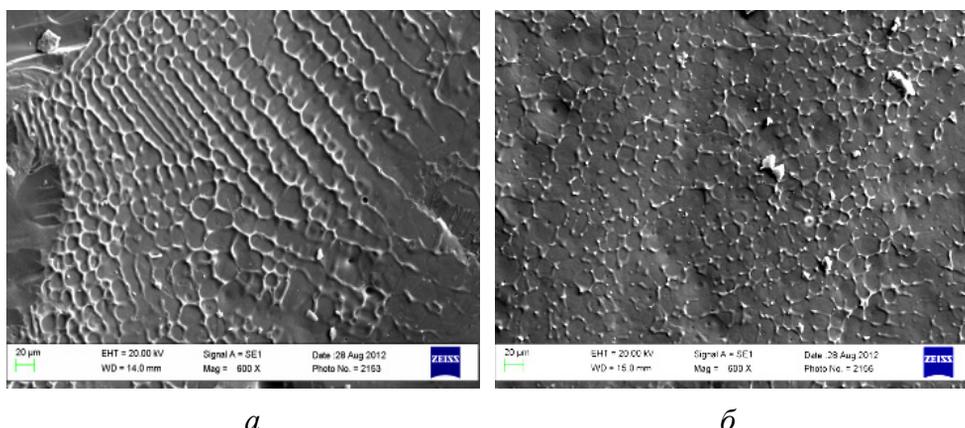


Рис. 2. Поверхность шлаковой корки со стороны сварного шва ($\times 600$): *а* – шлак габбро-диабазы; *б* – шлак горнблендита

Кроме того, были исследованы и внешние поверхности шлака, образованного в процессе наплавки под слоем флюса на приведенных выше режимах (рис. 3).

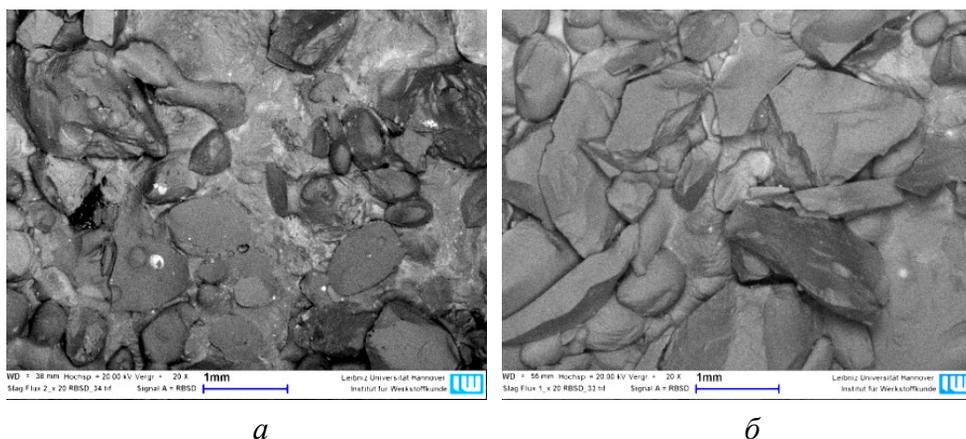


Рис. 3. Внешняя поверхность сварочной корки ($\times 20$): *а* – шлак габбро-диабазы; *б* – шлак горнблендита

Внешняя поверхность шлаковых корок менее пористая, что говорит о предпочтительных и больших в объемах реакциях между металлом и шлаком. Однако реакции «металл – шлак – атмосфера» протекают в основном в процессе сварки, а поскольку шлак затвердевает позже наплавленного металла, то продукты протекающих выше реакций с серой задерживаются в шлаке, что и вызывает внутреннюю пористость шлаковой корки.

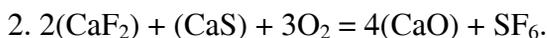
Для десульфурации шлака применимы многие способы, описанные в литературе. В основном они базируются на переводе серы, содержащейся в шлаке, в оксид SO_2 путем продувки газом, например углекислым газом и др.

Однако такие способы, хотя и обеспечивают низкое содержание серы в шлаке, являются экологически опасными из-за образования и выделения в атмосферу токсичных соединений SO_2 и H_2S . Это происходит за счет того, что при продувке шлака протекает химическая реакция взаимодействия серы с газами с образованием вышеуказанных соединений.

Имеются более экологичные способы десульфурации шлака, в частности обработка его плавиковым шпатом. При этом плавиковый шпат взаимодействует с серой шлака с образованием нетоксичного соединения SF_6 . Однако это взаимодействие может происходить в присутствии кислорода. Источником кислорода могут быть оксиды железа, находящиеся в шлаке, либо газы (углекислый газ и др.). При этом протекает реакция



либо



Необходимость ввода дополнительных операций по удалению серы из сварочной ванны лишь усложняет процесс сварки, и полученный рафинированный шлак, как было показано ранее, позволяет получать низкое содержание серы в металле без принятия дополнительных мер.

В заключение можно сказать, что шлаковые корки, образующиеся при плавлении флюса из габбро-диабазы и горнблендита, имеют поры из-за выделяющихся газов в камере при затвердевании шлака. В результате поверхность шлака при затвердевании не пропускает, а поглощает газы, что обуславливается отсутствием пор на внешней по-

верхности сварочных корок и наличием их на внутренней (рис. 3, а, б). Объясняется это так же тем, что при взаимодействии CaS с O_2 ($\Delta G = -779,8$ кДж/моль) образуется оксид кальция и газ SO_2 , который и поглощается шлаковой коркой, а в дальнейшем проходят реакции между шлаком и воздухом. Однако многие механизмы выделения газов в шлаке до конца не изучены, например, минералогами обнаружено, что горные породы содержат инертные газы, а их влияние на процесс сварки покрытыми электродами (флюсом) до конца не изучено.

Установлено, что в результате проведенного термодинамического анализа реакций, протекающих при расплавлении шлака, в составе шихты которого имеется CaF_2 , наиболее вероятным процессом является взаимодействия CaS с CaF_2 и O_2 с образованием шлака из оксида кальция и газа SF_6 при температурах выше 1600 °С.

Таким образом, лучшим путем для достижения низкого содержания серы в металле шва является не только использование исходных качественных сварочных материалов (проволок, флюсов, основного металла) с низким содержанием серы, но и обеспечение эффективного удаления серы при помощи физико-химических реакций в последовательности «металл – шлак – атмосфера».

Список литературы

1. Минералого-петрографическая характеристика техногенных минеральных ресурсов Урала и Предуралья для их переработки петруггией / А.О. Артемов, С.В. Наумов, А.М. Игнатова, М.Н. Игнатов // Георесурсы. – 2012. – № 6(48). – С. 79–83.

2. Игнатова А.М., Артемов А.О., Наумов С.В. Информативность методов и алгоритм оценки и выбора петруггического сырья // Науч.-техн. вестник Поволжья. – 2012. – № 4. – С. 111–115.

3. Моравецкий С.И. Отделимость шлаковой корки при дуговой сварке (обзор). Ч. 1. Механизм химического сцепления шлаковой корки с металлом шва // Автоматическая сварка. – 2011. – № 1. – С. 32–36.

4. Моравецкий С.И. Отделимость шлаковой корки при дуговой сварке (обзор). Ч. 2. Характер влияния основных факторов на отделимость шлаковой корки // Автоматическая сварка. – 2011. – № 2. – С. 22–26.

5. Потапов Н.Н., Воронкова М.Н., Пеньков В.Б. Влияние газов на процесс порообразования в металле швов при сварке электродами с фтористо-кальциевым покрытием // Сварка и диагностика. – 2009. – № 1. – С. 3–5.

6. Подгаецкий В.В., Кузьменко В.Г. Сварочные шлаки. Справочное пособие. – Киев, 1988. – 253 с.

7. Справочник сварщика / под ред. В.В. Степанова. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1974. – 520 с.

8. Наумов С.В., Игнатова А.М. Исследование физико-химических процессов, протекающих при сварке в сварочных материалах на основе техногенных образований // Науч.-техн. вестник Поволжья. – 2012. – № 4. – С. 150–153.

9. Пименов А.В., Шекин С.И. Исследование влияния рудоминеральных и синтетических компонентов на сварочно-технологические свойства флюса и механические свойства металла шва // Вопросы материаловедения. – 2013. – № 1. – С. 146–153.

10. New carbon-fluorine additives for welding fluxes / N.A. Kozyrev, R.E. Kryukov, A.V. Roor, L.P. Bashchenko, U.I. Lipatova // Steel in Translation. – 2015. – № 4. – С. 251–253.

11. Potapov N.N., Rymkevich A.I., Roshchin M.B. Special features of metallurgical processes in the electroslag welding of structural steels using fluxes with reduced basicity // Welding International. – 2012. – № 6. – С. 476–480.

12. Наумов С.В. Разработка шлаковой основы для сварочных материалов из минерального сырья Урала: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2014. – 17 с.

13. Термодинамические аспекты удаления водорода при сварке под фторсодержащими флюсами / Р.Е. Крюков, Ю.В. Бендре, Г.В. Галевский, Н.А. Козырев, В.Ф. Горюшкин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2016. – № 2. – С. 99–104.

14. Исследование зависимости коэффициентов термического расширения металла шва и сварочных шлаков от температуры в диапазоне 100–1000 °С / Е.Е. Корниенко, М.Н. Игнатов, А.М. Игнатова, С.В. Наумов, А.Ю. Чумаченко // Обработка металлов. – 2012. – № 3(56). – С. 116–119.

References

1. Artemov A.O., Naumov S.V., Ignatova A.M., Ignatov M.N. Mineralogo-petrograficheskaiia kharakteristika tekhnogennykh mineral'nykh resursov Urala i Predural'ia dlia ikh pererabotki petrurgiei [Mineralogical and petrographic characterization of technogenic mineral resources of the Urals and the Ural region for their processing petrurgiey]. *Georesursy*, 2012, no. 6(48), pp. 79-83.
2. Ignatova A.M., Artemov A.O., Naumov S.V. Informativnost' metodov i algoritm otsenki i vybora petrurgicheskogo syr'ia [Informative methods and algorithm evaluation and selection of raw materials petrurgichesky]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2012, no. 4, pp. 111-115.
3. Moravetskii S.I. Otdelimost' shlakovoi korki pri dugovoi svarke (obzor). Chast' 1. Mekhanizm khimicheskogo stsepleniia shlakovoi korki s metallom shva [Separation of the slag crust in arc welding (Review). Part 1. The mechanism of chemical adhesion of slag crust from the weld metal]. *Avtomaticheskaia svarka*, 2011, no. 1, pp. 32-36.
4. Moravetskii S.I. Otdelimost' shlakovoi korki pri dugovoi svarke (obzor). Chast' 2. Kharakter vliianiia osnovnykh faktorov na otdelimost' shlakovoi korki [Separation of the slag crust in arc welding (Review). Part 2. The nature of the unfluence of major factors on the separability of the slag crust]. *Avtomaticheskaia svarka*, 2011, no. 2, pp. 22-26.
5. Potapov N.N., Voronkova M.N., Pen'kov V.B. Vliianie gazov na protsess poroobrazovaniia v metalle shvov pri svarke elektrodami s fluoristokal'tsievym pokrytiem [Effect of gases on the process of pore formation in weld metal during welding electrodes a fluorine-coated calcium]. *Svarka i diagnostika*, 2009, no. 1, pp. 3-5.
6. Podgaetskii V.V., Kuz'menko V.G. Svarochnye shlaki [Hearth cinder]. Kiev, 1988. 253 p.
7. Stepanova V.V. Spravochnik svarshchika [Welder directory]. Moscow: Mashinostroenie, 1974. 520 p.
8. Naumov S.V., Ignatova A.M. Issledovanie fiziko-khimicheskikh protsessov, protekaiushchikh pri svarke v svarochnykh materialakh na osnove tekhnogennykh obrazovaniia [The study of physical and chemical processes that occur during welding in welding consumables based on man-made structures]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2012, no. 4, pp. 150-153.

9. Pimenov A.V., Shekin S.I. Issledovanie vliianiia rudomineral'nykh i sinteticheskikh komponentov na svarочно-tekhnologicheskie svoistva fliusa i mekhanicheskie svoistva metalla shva [Investigation of the influence and synthetic components of rudomineralnyh-ing on the operating characteristics of flux, and mechanical properties of the weld metal]. *Voprosy materialovedeniia*, 2013, no. 1, pp. 146-153.

10. Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Roor A.V., Bashchenko L.P., Lipatov U.I. New carbon-fluorine additives for welding fluxes. *Steel in translation*, 2015, no. 4, pp. 251-253.

11. Potapov N.N., Rymkevich A.I., Roshchin M.B. Special features of metallurgical processes in the electroslag welding of structural steels using fluxes with reduced basicity. *Welding international*, 2012, no. 6, pp. 476-480.

12. Naumov S.V. Razrabotka shlakovoi osnovy dlia svarochnykh materialov iz mineral'nogo syr'ia Urala [Development of the basis for slag welding materials from mineral raw materials Urals]. Ph. D. thesis. Ekaterinburg, 2014. 17 p.

13. Kriukov R.E., Bendre Iu.V., Galevskii G.V., Kozyrev N.A., Goriushkin V.F. Termodinamicheskie aspekty udaleniia vodoroda pri svarke pod ftorsoderzhashchimi fliusami [Thermodynamic aspects of removal of hydrogen during welding under fluoride-containing fluxes]. *Izvestiia vuzov. Chernaia metallurgii*, 2016, no. 2, pp. 99-104.

14. Kornienko E.E., Ignatov M.N., Ignatova A.M., Naumov S.V., Chumachenko A.Iu. Issledovanie zavisimosti koeffitsientov termicheskogo rasshireniia metalla shva i svarochnykh shlakov ot temperatury v diapazone 100–1000 °С [The dependence of the coefficients of thermal expansion of the weld metal and slag from the welding temperature in the range of 100-1000 °С]. *Obrabotka metallov*, 2012, no. 3(56), pp. 116-119.

Получено 8.02.2016

Об авторах

Наумов Станислав Валентинович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследо-

вательского политехнического университета; e-mail: NaumovStanislav@yandex.ru.

Игнатова Анна Михайловна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института безопасности труда, производства и человека Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: iampstu@gmail.com.

Игнатов Михаил Николаевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: iampstu@gmail.com.

About the authors

Stanislav V. Naumov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production and Structural Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: NaumovStanislav@yandex.ru.

Anna M. Ignatova (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Institute of Labor, Human, Manufacturing Safety, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: iampstu@gmail.com.

Mikhail N. Ignanov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production and Structural Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: iampstu@gmail.com.