

УДК 621.791.75

*Жданов Л. А., Сливинский О. А., Стреленко Н. М., Нетяга А. В.*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт».  
Украина, г. Киев**ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ  
В МЕТАЛЛЕ ШВА ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКЕ  
ПОД ВЫСОКОКРЕМНИСТЫМИ ФЛЮСАМИ**

*Установлено, что при электродуговой сварке под флюсом образуются неметаллические включения разной морфологии, с переменной объемной долей их в металле шва. Разработана физическая модель образования неметаллических оксидных включений в металле шва. Предложена термодинамическая модель образования оксидных неметаллических включений в металле шва при электродуговой сварке под флюсом на основе созданной физической модели. Проведенные металлографические исследования по изучению содержания неметаллических включений в металле шва и их морфологии, показали адекватность предложенной термодинамической модели.*

Ключевые слова: оксидные неметаллические включения; электродуговая сварка под флюсом; содержание неметаллических включений в металле шва; термодинамическая модель; оксид кремния; оксид марганца; химическая термодинамика; сварочные флюсы.

Одной из актуальных проблем электродуговой сварки под флюсом является снижение уровня неметаллических оксидных включений в металле шва и оптимизация их морфологии. Технологические и металлургические аспекты рассматриваемой проблемы освещены во многих работах. Однако в большинстве случаев рассмотрены конкретные композиции флюс-проволки, или влияние определенных раскислителей на формирование структуры металла шва и его механические свойства. Соответственно, существуют сформированные требования и рекомендации по снижению эндогенных неметаллических включений в металле шва, что позволяет в определенной степени повысить его механические свойства при использовании систем флюс-проволки, которые исследовались. Формирование общих выводов по воздействию определенных композиций сварочных материалов и соотношение компонентов в составе флюса на содержание неметаллических включений в металле шва должно быть осуществлено на основе моделирования процессов образования включений, используя принципы равновесной термодинамики растворов. Разработанная модель позволит проводить прогнозирование содержания неметаллических оксидных включений в металле шва при использовании флюсов различного состава.

**Постановка задачи**

Целью работы является создание расчетной термодинамической модели образования оксидных

неметаллических включений в металле шва при электродуговой сварке под флюсом общего назначения. Определение адекватности предложенной модели при использовании флюсов различных шлаковых систем, и при переменном соотношении компонентов в составе флюса.

Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- сформулировать основные принципы применения равновесной химической термодинамики для моделирования процесса образования оксидных неметаллических включений в металле шва;
- создать термодинамическую модель определения содержания оксидных неметаллических включений в металле шва при электродуговой сварке под флюсом;
- провести экспериментальные исследования для оценки адекватности разработанной модели образования оксидных неметаллических включений.

Для решения поставленных задач необходимо разработать физическую и термодинамическую модель процесса образования неметаллических включений в металле шва с учетом всех взаимодействующих фаз и массопотоков, которые влияют на формирование сварочной ванны. Провести наплавки опытных образцов при использовании флюсов различных шлаковых систем общего назначения и металлографические исследования металла шва. Определить содержание легирующих элементов в металле шва, которые определяются окислительно-восстановительными процессами. Провести анализ

полученных результатов и сформулировать рекомендации по применению разработанной термодинамической модели.

**Основные принципы применения химической термодинамики при расчетах металлургических процессов и особенности ее использования в условиях электродуговой сварки под флюсом**

Процесс электродуговой сварки основан на ряде физических и химических превращений веществ и энергии. При сварке протекают такие процессы, как растворение и выделение веществ из раствора, испарение, диссоциация химических соединений и многоатомных газов, ионизация газов, взаимодействие компонентов газовой, шлаковой и металлической фаз с образованием сложных, комплексных соединений. Протекают обменные и окислительные процессы, разнообразные химические реакции на межфазных границах и непосредственно в середине фаз [1, 2].

Вид и количество одновременных физико-химических явлений, протекающих в реакционной зоне сварки, зависит от способа и режима сварки, вида, типа, индивидуальных свойств и состава присадочных материалов, и материалов которые свариваются. Базой для их изучения при сварке является химическая равновесная термодинамика — наука, позволяющая оценить границы и направление процессов, сопровождающихся изменением их энергетических эффектов. При этом с помощью основных термодинамических характеристических функций участников реакции (энтальпии, энтропии и теплоемкости) равновесная химическая термодинамика позволяет провести определение направления химических реакций, температуры начала и окончания процесса, как диссоциации, так и образования соединений, температуру перехода элементов и соединений в жидком и газообразном состоянии, состав фаз, появляющихся в результате реакций [1, 3].

При электродуговой сварке под флюсом в процессе охлаждения газы частично выделяются, однако значительное количество их остается в металле. Протекания всех процессов происходит с большой скоростью. Однако, в связи с кратковременностью существования расплава и постоянным обновлением взаимодействующих фаз, часть реакций и процессов в зоне сварки может не доходить до полного завершения и, следовательно, не достигать равновесного состояния. Это и определяет физико-химические и механические свойства сварного шва [2, 3].

Насыщение металла газами приводит, как показали многочисленные эксперименты, к изменению механических свойств металла и к нарушению однородности шва. Наличие неметаллических включений в металле резко снижает его пластичность и ударную вязкость. Присутствие неметалли-

ческих включений в наплавленном металле способствует также образованию трещин в сварном соединении. Поэтому важно знать кинетику процессов насыщения металла газами и выделения их из металла [2, 3].

**Физическая модель образования неметаллических включений в металле шва при электродуговой сварке под флюсом**

Для создания физической модели образования неметаллических включений в металле шва при электродуговой сварке под флюсом, необходимо знать какие физико-химические процессы протекают в реакционной зоне.

Процессы, протекающие при сварке под флюсом, отличаются от других электродуговых способов сварки тем, что в реакционной зоне присутствуют три взаимодействующие многокомпонентные фазы: расплавленный шлак, расплавленный металл и газовая фаза. Таким образом, считается, что основной массообмен элементами протекает на грани шлак-металл.

При электродуговой сварке под флюсом сварочный дуговой разряд обеспечивает наличие расплавленного флюса, образующего шлаковый купол, который закрывает сварочную дугу от взаимодействия с воздухом. Газообразные оксиды и пары элементов из столба дуги могут переходить через шлаковый купол в воздух. Обратный массообмен, из воздуха в зону сварки, менее вероятен, хотя иногда происходит попадание азота из воздуха в зону сварки.

Электродный металл переносится в сварочную ванну мелкими или крупными каплями, которые замыкают или укорачивают дуговой промежуток, и каплями, которые сползают по шлаковому куполу. Газовые пузыри всплывают из жидкого металла и шлака, и попадают в атмосферу газового купола. Этому процессу мешает частично расплавленный флюс, поэтому на поверхности шлаковой корки образуются поры. Мелкие капли жидкого металла тяжелее шлака, поэтому они оседают в сварочную ванну. Шлаковые капли легче металла, поэтому они поднимаются вверх сварочной ванны и переходят в шлак. Капли шлака, которые не успели выйти из ванны и перейти в шлак, образуют шлаковые экзогенные включения.

Дуга интенсивно плавит и испаряет электродный металл. Передним фронтом дуги плавится и испаряется флюс и основной металл. Чем больше напряжение на дуге, тем больше дуговой промежуток и быстрее плавится и испаряется шлак. В дуговом промежутке, вследствие высокой температуры, оксиды и другие соединения диссоциируют.

Столб дуги в направлении от электрода к ванне расширяется, тем самым создает мощный плазменный поток от электрода к ванне. Плазменный поток

заставляет перемещаться пары электродного металла и шлака, мелкие капли и газы в реакционной зоне сварки. По мере удаления от центра дуги температура плазмы снижается, тем самым создавая условия для образования оксидов, конденсирующиеся в шлаке. В приэлектродной области элементы могут как растворяться в сварочной ванне, так и испаряться из раствора.

На основе выше сказанного, была разработана физическая структурная схема образования оксидных неметаллических включений при электродуговой сварке под флюсом (рис. 1) [4].

Ряд металлов, образующих оксидные неметаллические включения, попадает в зону сварки из жидкой капли на торце электрода. Температура капли позволяет протекать реакциям образования оксидных неметаллических включений. С другой стороны, из расплавленного флюса, в ионизированную и неионизированную плазму попадает оксид этого металла. В ионизированной плазме очень высокая температура, поэтому он частично распадается на компоненты, и все эти компоненты и сам оксид, который частично остался, переходят в неионизированную плазму. С неионизированной плазмы часть оксида переходит обратно в расплавленный флюс. Другие все компоненты переходят в виде газов в сварочную ванну и каплю.

Переходящая в расплав жидкой ванны капля электродного металла содержит элементы, образующие оксидные включения, растворенный кис-

лород и оксиды которые образовались на стадии капли. В сварочной ванне также протекают реакции образования оксидных неметаллических включений. Эта реакция протекает до температуры солидуса. В реакционной зоне сварки взаимодействующие расплав ванны и капли электродного металла контактируют с расплавленным шлаком, который в дальнейшем образует шлаковую корку. На межфазной границе взаимодействия расплава металла и шлака, происходит взаимосвязанный переход оксидов металла из жидкой ванны в шлак, и компонентов шлаковой системы – оксидов металлов в сварочную ванну. При дальнейшем охлаждении сварочная ванна кристаллизуется, образуя металл шва. В этом металле шва остаются оксиды, которые не успели перейти в шлак, нерастворенный кислород и металлы, которые не образовали химические соединения.

**Термодинамическая модель определения содержания неметаллических оксидных включений в металле шва при электродуговой сварке под флюсом**

Нами была разработана термодинамическая модель, с помощью которой можно определить содержание неметаллических оксидных включений в металле шва [4, 5].

На рис. 2 представлена структурная схема разработанной термодинамической модели. Она

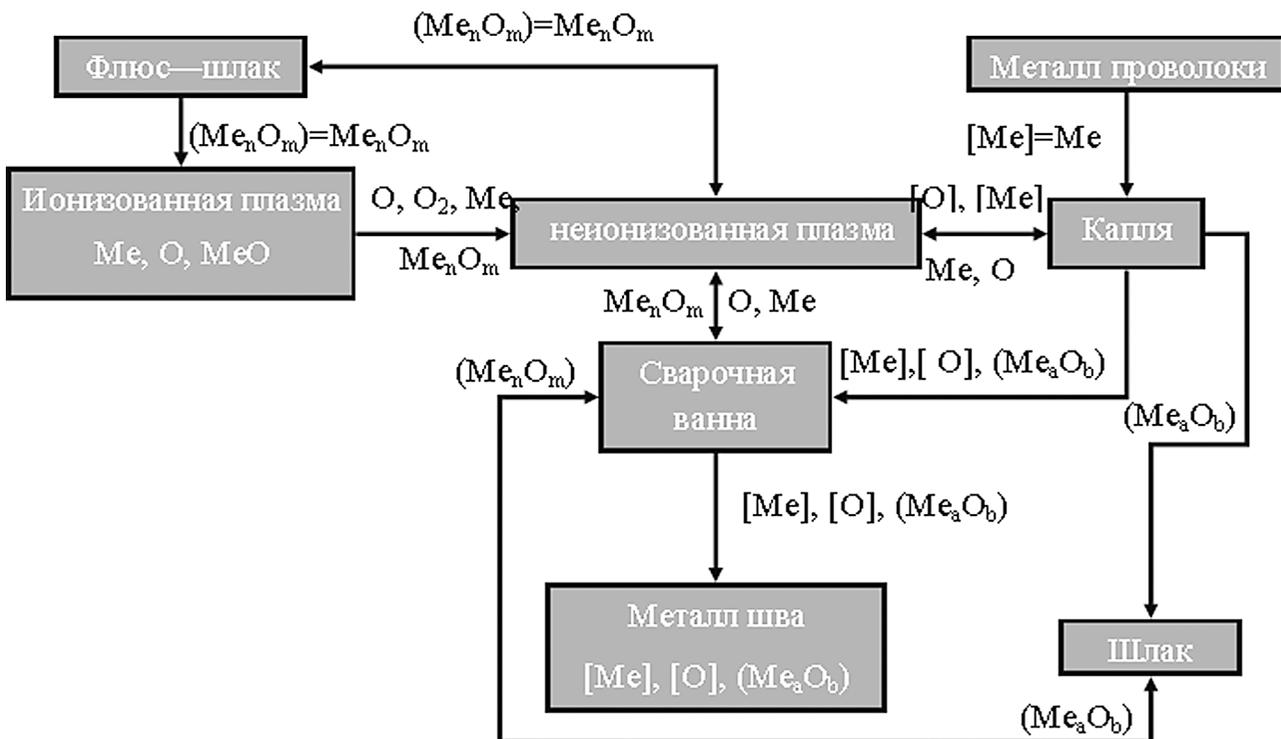


Рис. 1. Структурная схема образования оксидных неметаллических включений в металле шва при электродуговой сварке под флюсом

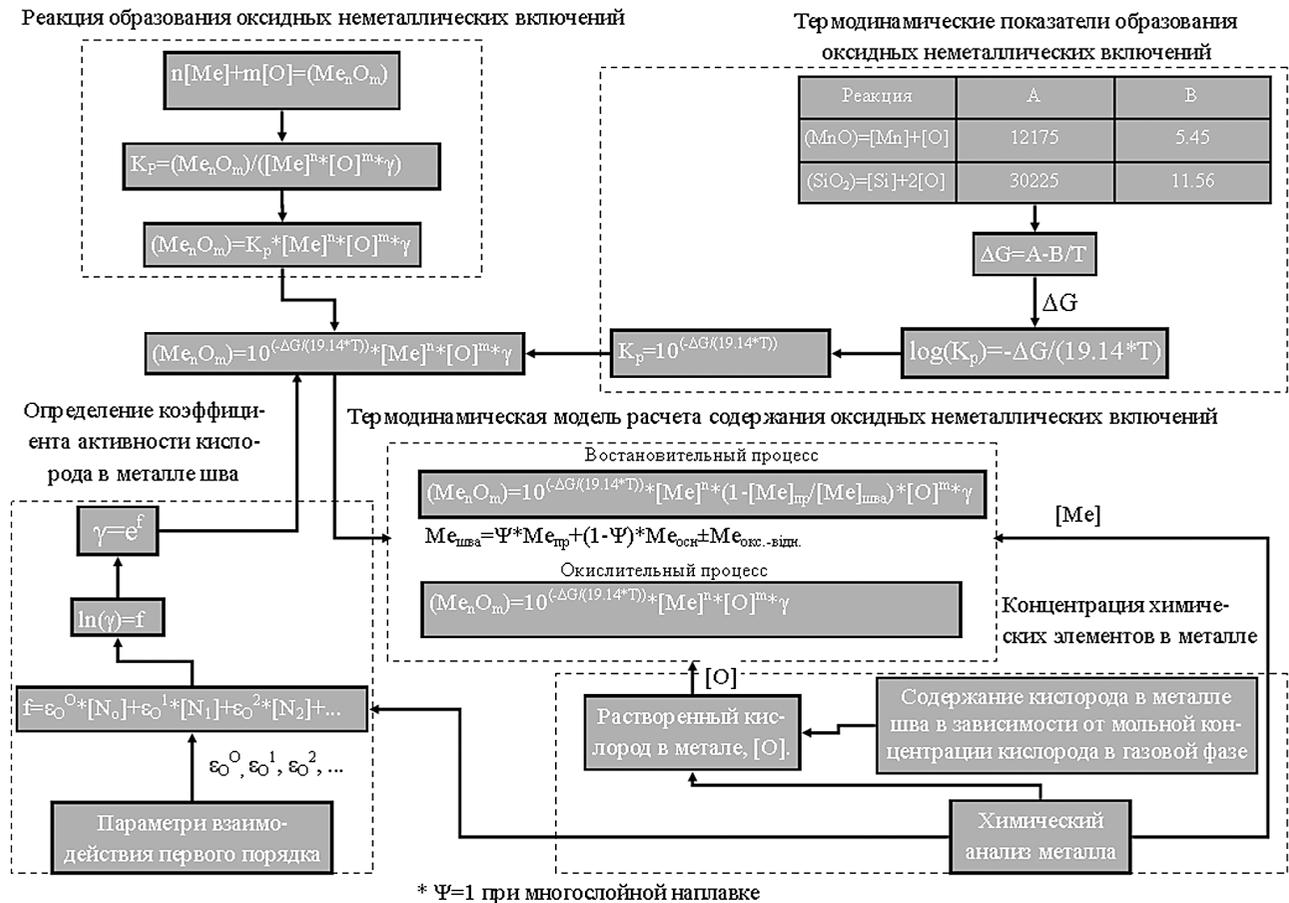


Рис. 2. Структурная схема термодинамической модели, определяющей содержание неметаллических оксидных включений в металле шва при электродуговой сварке под флюсом

состоит из 4-х основных блоков, в которые закладываются исходные данные необходимые для расчета:

- 1) концентрация химических элементов в металле шва;
- 2) термодинамические характеристики образования оксидных неметаллических включений;
- 3) определение коэффициента активности кислорода в металле шва;
- 4) реакции образования оксидных неметаллических включений.

В блоке концентрации химических элементов в металле шва представлены данные химического анализа металла наплавленных валиков (табл. 1) и анализ сварочной проволоки (табл. 2). Химический состав металла наплавленных валиков, полученный с помощью метода «мокрой химии».

В блоке термодинамических показателей образования оксидных неметаллических включений приведены экспериментальные данные протекания химических реакции с растворенным

Таблица 1

**Химический состав наплавленного металла**

Марка сварочного флюса	Массовая доля элементов, %				
	C	Si	Mn	S	P
ESAB ОК 10.71	0.05	1.214	2.58	0.022	0.028
АН-348 А	0.035	0.97	2.57	0.031	0.029
ОСЦ-45	0.04	0.2	2.3	0.023	0.026
АН-60	0.045	1.065	2.81	0.035	0.026
АН-47	0.05	0.826	1.98	0.026	0.026
АН-44	0.035	0.749	0.34	0.029	0.024

Таблица 2

Химический состав сварочной проволоки Св-08Г2С

Сварочная проволока	Массовая доля элементов, %				
	Si	Mn	Al	S	P
Св-08Г2С	0.446	2.03	0.03	0.016	0.026

кислородом в металле шва [4,5]. Температурные зависимости констант равновесия приведены в табл. 3 [6].

В блоке определения коэффициента активности кислорода в металле шва, в параметрах взаимодействия, предложенных Вагнером для многокомпонентных растворов [7, 8], учтено взаимное влияние компонентов на коэффициенты их активности.

Последним блоком, который задает входные параметры, являются химические реакции образования оксидных неметаллических включений.

Константа равновесия выражается через мольные концентрации участников реакции и их коэффициенты активности. Коэффициент активности кислорода находится с помощью расчетов приведенных в предыдущем блоке. Коэффициент активности металлов [Me] принимается равными 1.

При учете всех блоков структурной схемы в одном уравнении получаем расчетную термодинамическую модель, позволяющую рассчитать мольное содержание оксидных неметаллических включений в металле шва.

Так как расчет проводится для многослойной наплавки металла, то необходимо учитывать коэффициент наплавленного металла, который позволяет получить химический состав металла сварного шва.

Полученная расчетная термодинамическая модель имеет два пути решения. Первый расчет выполняется, когда реакция имеет восстановительный характер, второй – реакция имеет окислительный характер. Константа равновесия для расчета берется с блока термодинамических показателей.

Экспериментальное обоснование термодинамической модели по определению содержания неметаллических оксидных включений в металле шва при электродуговой сварке под флюсом

Для анализа микроструктуры шва проводились исследования неметаллических включений в

металле шва, полученных под флюсами ОК 1071 (агломерированный флюс), АН-348А, ОСЦ-45, АН-47, АН-44 (плавленый флюс), АН-60 (пемзовидный флюс). Все флюсы являются высококремнистыми и относятся к одной шлаковой системе  $SiO_2$ -MnO-CaO- $Al_2O_3$ .

Установлено, что в зависимости от состава флюса характер насыщения металла шва неметаллическими включениями (НВ) изменяется. Форма и размер включений существенно изменяется. Наблюдается накопление, укрупнение и изменение формы НВ в верхней части сварочной ванны, что свидетельствует об их всплывании с возможностью дальнейшего перехода в шлак. В зонах расположения и накопления НВ наблюдаются массопотоки в сварочной ванне, которые соответствуют существующим моделям перемешивания расплавленного металла [9].

Наиболее мелкодисперсный характер НВ наблюдается на пемзовидном флюсе АН-60 и на плавленом флюсе ОСЦ-45, но количество этих включений гораздо больше (рис. 3).

**Выводы:**

1) установлено, что при электродуговой сварке под флюсом определенной шлаковой системы на основе комплекса оксидов  $SiO_2$ -MnO-CaO- $Al_2O_3$  образуются неметаллические включений разной морфологии, с переменной объемной долей их в металле шва. Морфология НВ и их размер напрямую связан со структурой флюса;

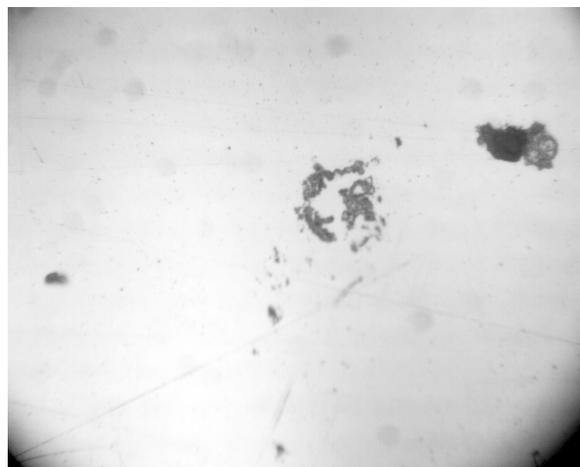
2) проанализировав процесс электродуговой сварки под флюсом, была разработана физическая модель образования неметаллических оксидных включений в металле шва;

3) предложена термодинамическая модель образования оксидных неметаллических включений в металле шва при электродуговой сварке под флюсом на основе созданной физической модели;

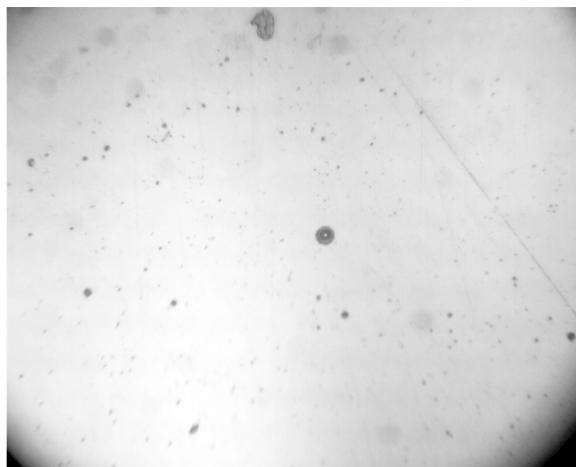
Таблица 3

Зависимость констант равновесия от температуры [6]

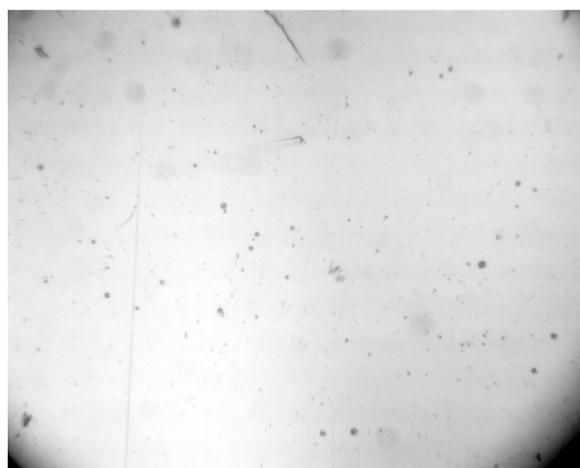
Реакция	$\log(Kp) = -A/T + B$	
	A	B
$(SiO_2) = [Si] + 2[O]$	30225	11.56
$(MnO) = [Mn] + [O]$	12175	5.45



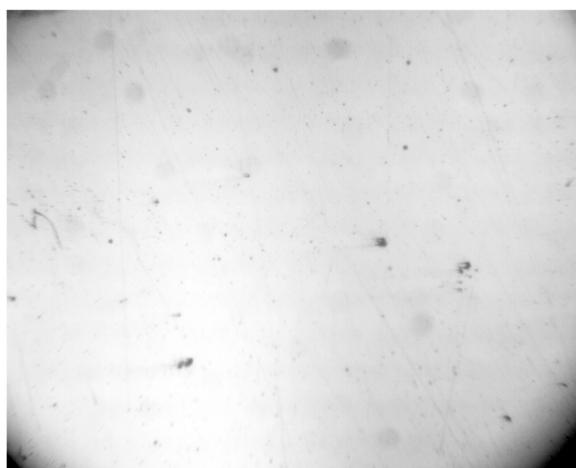
OK 10.71



АН-348 А



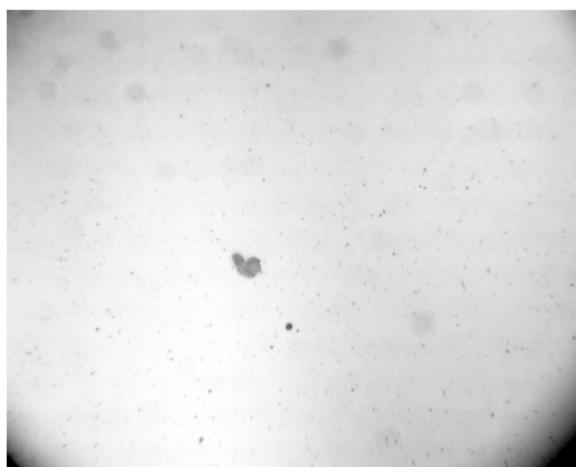
ОСЦ-45



АН-47



АН-60



АН-44

**Рис. 3.** Оксидные неметаллические включения в металле шва при сварке под промышленными флюсами разных марок на краю валика ( $\times 640$ )

4) полученные экспериментальные данные на микрошлифах качественно подтверждают возможность использования предложенной термодинамической модели для прогнозирования неметаллических включений.

#### Литература

- [1] Жданов Л.А., Стреленко Н.М., Коваленко В.Л. Фізико-хімічні процеси при зварюванні та наплав-

- лені. Методичні вказівки до виконання курсової роботи. — К.: НТУУ «КПІ», 2012. — 52 с.
- [2] Волченко В.Н., Ямпольский В.М., Винокуров В.А. и др.; под ред. В.В. Фролова. Теория сварочных процессов: учеб. для вузов по спец. «Оюоруд. и технология сварочн. пр-ва». — М.: Высш. шк., 1988. — 559 с.
- [3] Под ред. акад. Патона Б.Е. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавением. — М.: «Машиностроение», 1974. — 768 с.
- [4] Жданов Л.А., Нетяга А.В. Розрахунок вмісту неметалевих включень у металі шва за допомогою рівноважної термодинаміки // Матеріали сьомої всеукраїнської міжгалузевої науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників «Зварювання та споріднені технології і процеси». — Київ: 14 — 16 травня 2014. — С. 13.
- [5] Жданов Л.А., Нетяга А.В. Термодинамічна модель утворення оксидних неметалевих включень у металі шва при дуговому зварюванні під флюсом // VIII міжнародна конференція молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології». — Київ: 20-22 травня 2015 року. — С. 212.
- [6] Л.А. Чернова, Г.Г. Михайлов Термодинамика процессов взаимодействия кислорода с металлическими расплавами систем Fe-V-Cr (Mn)-Si-O-C // Вестник ЮУрГУ. — 2005. — № 3. — С. 24-27.
- [7] Цымбал В.П. Математическое моделирование металлургических процессов. М.: Металлургия. 1986. — 240 с.
- [8] Коновалов А.В., Куркин А.С. Теория сварочных процессов. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. — 748 с.
- [9] Жданов Л.А., Нетяга А.В. Дослідження особливостей утворення неметалевих включень при зварюванні під флюсами загального призначення // Восьма всеукраїнська міжгалузева науково-технічна конференція студентів, аспірантів та наукових співробітників «Зварювання та споріднені процеси і технології». — Київ: 10-12 червня 2015 року. — С. 51.

Zhdanov L. A., Slyvinsky A. A., Strelenko N. M., Netyaga A. V.

National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute». Kiev, Ukraine

#### FEATURES OF THE FORMATION OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN THE WELD METAL FOR ARC WELDING UNDER HIGH-SILICA FLUX

*It is found that for submerged arc welding of non-metallic inclusions are formed of different morphology, variable volume fraction of the weld metal. Developed the physical model of the formation of non-metallic oxide inclusions in the weld metal. A thermodynamic model of the formation of oxide inclusions in the weld metal when, submerged arc welding based on established physical model. Metallographic studies of the content of non-metallic inclusions in the weld metal and morphology showed the adequacy of the proposed thermodynamic model.*

*Keywords:* oxide nonmetallic inclusions; arc welding under a flux; the content of nonmetallic inclusions in the weld metal; the thermodynamic model; silicon oxide; manganese oxide; chemical thermodynamics; welding fluxes.

#### References

- [1] Zhdanov L.A., Strelenko N.M., Kovalenko V.L. Fiziko-himichni procesi pri zvarjuvanni ta naplavlenni. Metodichni vказivki do vikonannya kursovoi roboti. — К.: NTUU «KPI», 2012. — 52 p.
- [2] Volchenko V.N., Jampolskij V.M., Vinokurov V.A. i dr.; pod red. V.V. Frolova. Teorija svarochnyh processov: ucheb. dlja vuzov po spec. «Ojuorud. i tehnologija svarochn. pr-va». — М.: Vyssh. shk., 1988. — 559 p.
- [3] Pod red. akad. Patona B.E. Tehnologija jelektricheskoy svarki metallov i splavov plavlennim. — М.: «Mashinostroenie», 1974. — 768 p.
- [4] Zhdanov L.A., Netjaga A.V. Rozrahunok vmistiu nemetalevih vkljuchen' u metali shva za dopomogoju rivnovazhnoi termodynamiki // Materiali s'omoi vseukraïns'koï mizhgaluzevoi naukovo-tehnichnoi konferencii studentiv, aspirantiv ta naukovih spivrobitnikov „Zvarjuvannja ta sporidneni tehnologii i procesi”. — Київ: 14 — 16 travnja 2014. — P. 13.

- [5] Zhdanov L.A., Netjaga A.V. Termodinamichna model' utvorennja oksidnih nemetalevih vključen' u metali shva pri dugovomu zvarjivani pid fljusom // VIII mizhnarodna konferencija molodih uchenih ta specialistiv «Zvarjivannja ta sporidneni tehnologii». – Kiïv: 20-22 travnja 2015 roku. – P. 212.
- [6] L.A. Chernova, G.G. Mihajlov Termodinamika processov vzaimodejstvija kisloroda s metallicheskimi rasplavami sistem Fe-V-Cr (Mn)-Si-O-C // Vestnik JuUrGU. – 2005. – № 3. – P. 24-27.
- [7] Cymbal V.P. Matematicheskoe modelirovanie metallurgicheskikh processov. M.: Metallurgija. 1986. – 240 p.
- [8] Konovalov A.V., Kurkin A.S. Teorija svarochnyh processov. –M.: MGTU im. N.Je. Bauman, 2007. – 748 p.
- [9] Zhdanov L.A., Netjaga A.V. Doslidzhennja osoblivostej utvorennja nemetalevih vključen' pri zvarjivanni pid fljusami zagal'nogo priznachennja // Vos'ma vseukraïns'ka mizhgaluzeva naukovu-tehnicna konferencija studentiv, aspirantiv ta naukovih spivrobotnikiv „Zvarjivannja ta sporidneni procesi i tehnologii”. – Kiïv: 10-12 chervnja 2015 roku. – P. 51.