



ВЫБОР СОСТАВОВ СВАРОЧНЫХ ФЛЮСОВ С УЧЕТОМ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИХ РАСПЛАВОВ

В. Г. КУЗЬМЕНКО, канд. техн. наук, **В. С. ТОКАРЕВ**, инж., **В. И. ГАЛИНИЧ**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),

В. Э. СОКОЛЬСКИЙ, канд. хим. наук, **В. П. КАЗИМИРОВ**, д-р хим. наук (Киев. гос. ун-т им. Тараса Шевченко)

На основании результатов исследований структуры шлаковых расплавов и разработки понятия их структурной основности предложен принцип построения составов флюсов с изменяющейся под влиянием термического цикла сварки основностью.

Ключевые слова: электродуговая сварка, сварочные флюсы, шлаки, выбор составов флюсов, структура шлаковых расплавов, основность

К флюсам для электродуговой сварки предъявляется ряд часто несовместимых требований технологического, металлургического, санитарно-гигиенического и экономического характера [1, 2], каждое из которых в предположении его независимого удовлетворения может быть выполнено при использовании существенно отличающихся между собой типов (составов) флюсов [3, 4]. Столь же противоречивы требования и к свойствам флюсов, от которых зависит характер протекания в функциональных зонах сварочной ванны физико-химических процессов, определяющих качественные характеристики сварного шва [3–5].

В связи с этим существует проблема выбора составов сварочных флюсов, способных обеспечить как требуемые технологические характеристики сварочного процесса (стабильность горения дуги, отсутствие пор, хорошее формирование), так и достаточный уровень прочностных свойств сварного шва. В частности, из практики известно, что для получения хорошо сформированных беспористых швов следует отдавать предпочтение марганец-силикатным (кислым), фторсодержащим флюсам. В то же время для получения менее окисленного и более чистого от неметаллических включений металла шва с высокими прочностными характеристиками целесообразно использовать флюсы основного типа, состоящие из химических и термически устойчивых оксидов.

Если учитывать связь между последствиями применения флюсов и неоднозначностью их функций в отдельных зонах сварочной ванны, то гипотетически идеальный флюс, обеспечивающий наиболее эффективное функционирование этих зон и высокое качество сварного шва, должен при одном и том же химическом составе обладать способностью изменять свои характеристики в зависимости от положения в сварочной ванне — приобретать «кислые» свойства в ее холодных зонах и «основные» — в горячих. Представление о характере изменений свойств флюсов можно получить из схемы сварочной ванны (рис. 1), на которой

обозначены ее зоны, показано их функциональное назначение, а также приведены наиболее соответствующие им типы (составы) шлаков [4].

Даже приблизительная оценка всех последствий применения флюсов при электродуговой сварке до настоящего времени не установлена. Требуется изучение и сопоставление множества разнообразных физико-химических процессов, а также выполнение значительного объема исследований концентрационных и температурных зависимостей свойств шлаков.

Для систематизации факторов, вносимых флюсами и влияющих на свойства сварного шва наряду с составом и физико-химическими свойствами, широко используется такая их коллективная характеристика, как основность [1]. Значимость понятия основность состоит в том, что благодаря ей все многообразие сварочных флюсов сводится к двум группам — кислой и основной. При этом значение основности, равное единице, является границей их раздела. Применение такого понятия как основность позволяет систематизировать шлаки в соответствии с определенной шкалой, мерой основности которой является индекс основности. Такая систематизация вносит определенную ясность в оценку свойств шлаков, однако нельзя утверждать, что связь между основностью в существующем ее представлении и составами шлаков

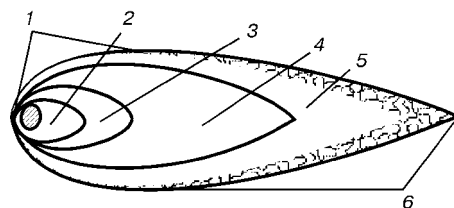


Рис. 1. Зоны сварочной ванны и их функции (в скобках даны соответствующие им оптимальные типы (составы) сварочных шлаков): 1 — плавления металла и флюса (кислые, силикатные, фторсодержащие); 2 — действия дуги (основные); 3 — турбулентного течения металла (основные); 4 — ламинарного течения металла (основные); 5 — обездвиженного жидкого металла (кислые, марганец-силикатные); 6 — твердого состояния металла (алюминатные с образователями игольчатого феррита)



имеет однозначный характер. Одному и тому же значению основности может соответствовать множество типов шлаков, отличающихся как компонентами, так и их соотношениями. Однако значительными недостатками основности в существующем ее представлении (отношение концентраций основных и кислых оксидов, устанавливаемые из элементного определения состава шлака) является отсутствие связи с реальной природой шлаковых расплавов, а также использование в расчетах только концентрационной зависимости изменения основности шлаков без учета влияния температуры. Поэтому получение информации об основности сварочных флюсов исходя из реального состояния их расплавов необходимо для научно обоснованного выбора составов сварочных флюсов.

Свойства шлаков, в том числе и их основность, зависят от их атомно-молекулярной структуры. В последние годы на основе близости строения кристаллического (стекловидного) и жидкого состояния шлаков [6], результатов рентгенографического исследования структуры шлаковых расплавов [7] и разработанной теории плотной упаковки ионов кислорода [8], характерной для строения сварочных флюсов оксидного и солеоксидного типа, предложена методика определения их структурной основности [9, 10]. При этом учитывались индивидуальные особенности поведения ионов, влияющие на формирование структуры шлака [11], которые были установлены в результате анализа положения соответствующих пиков на кривых радиального распределения атомов, площади этих пиков, а также их формы [9, 10].

В соответствии с геометрическими и электростатическими характеристиками катионы в шлаках, с точки зрения структурообразования, можно разделить на три группы. Это прежде всего катионы-комплексообразователи, наиболее ярким представителем которых в составе сварочных шлаков является Si^{4+} . Этот катион обладает наиболее сильными кислотными свойствами, что определяет соответствующий вклад оксида кремния в основность флюса. Особым свойством этого компонента является способность образовывать с кислородом за счет направленно-сконцентрированных ковалентных связей термически устойчивые комплексные структуры, что предопределяет высокую вязкость и низкую электропроводность силикатных шлаков.

Антиподом Si^{4+} в составе сварочных шлаков являются катионы Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ . Они выступают в качестве разрушителей комплексных структур, образуемых катионом Si^{4+} , и способствуют повышению основности и улучшению трансляционных свойств шлаков — вязкости и электропроводности.

Особая роль в изменении основности при нагреве шлаков в расплавленном состоянии принадлежит ионам амфотерных и переходных металлов — алюминия, титана и циркония. Обладая существенно меньшей, чем координация Si–O, долей ковалентной связи, эти ионы способны выполнять двойственные функции за счет изменения катионно-анионной роли и, приспосабливаясь к изменению состояния шлака, существенно влияя на

основность. Так, при исполнении алюминием роли аниона его координация по кислороду составляет 4. При этом алюминий выступает аналогом кремния, замещая его в комплексных кремнекислородных анионах. При координационном числе иона алюминия, равном 6, он приобретает основные свойства и по действию в шлаках сходен с оксидом магния [12].

Таким образом, наиболее важным фактором, от которого зависит структура шлаков и соответственно их свойства, является состав. Еще одним фактором, влияющим на характер изменения свойств шлаков, является температура. Различие между концентрационным и температурным воздействием на шлак состоит в том, что, если изменение его состава приводит к необратимым изменениям структуры и свойств, то при возврате к исходной температуре восстанавливаются также и параметры шлака. Многие авторы [6, 13] отмечают, что повышение температуры также влияет на изменение структуры шлаковых расплавов, как и при введении в их состав основных оксидов. Отличие состоит лишь в механизме достижения результата. Если при введении основных оксидов крупные образования в шлаках разрушаются в результате ослабления связей ионного характера в месте внедрения соответствующих катионов, то повышение температуры приводит к аналогичному эффекту за счет усиления колебательных движений ионов. Отсюда следует ожидать, что повышение температуры расплавленных шлаков будет приводить к увеличению их структурной основности.

Для проверки высказанных выше предположений нами исследовалось изменение структурной основности трех существенно различающихся типов флюсов при температуре 1523...1723 К [10, 14]. Один флюс был кислым и по составу соответствовал марке АН-348-А, второй относился к ярко выраженному основному типу (АН-15М), а в третьем, нейтральном флюсе, преобладающим компонентом был оксид алюминия (АН-67). Основность определяли исходя из структурных параметров, установленных нами в ходе рентгеноструктурных исследований. Ее зависимость от температуры показана на рис. 2. Из рисунка следует, что на расплавы флюсов основного и нейтрального типов значительно влияет температурный фактор — флюс увеличивает свою основность после плавления. Неожиданным образом проявляет себя кислый флюс марки АН-348-А. После плавления он становится несколько менее кислым, значение его основности приближается к единице. При дальнейшем нагреве в исследованном диапазоне температур этот флюс становится еще более кислым, по сравнению с исходным состоянием. Это можно объяснить наличием внутриобъемного перераспределения кислорода, принадлежащего иону марганца, и соответствующим увеличением в координации Si–O доли температурно-устойчивой ковалентной связи [6].

Характер изменения структурной основности флюсов основного и нейтрального (алюминатного) типов также имеет принципиальные различия. В отличие от флюса АН-15М, расплав алюминатного флюса увеличивает свою основность при нагреве

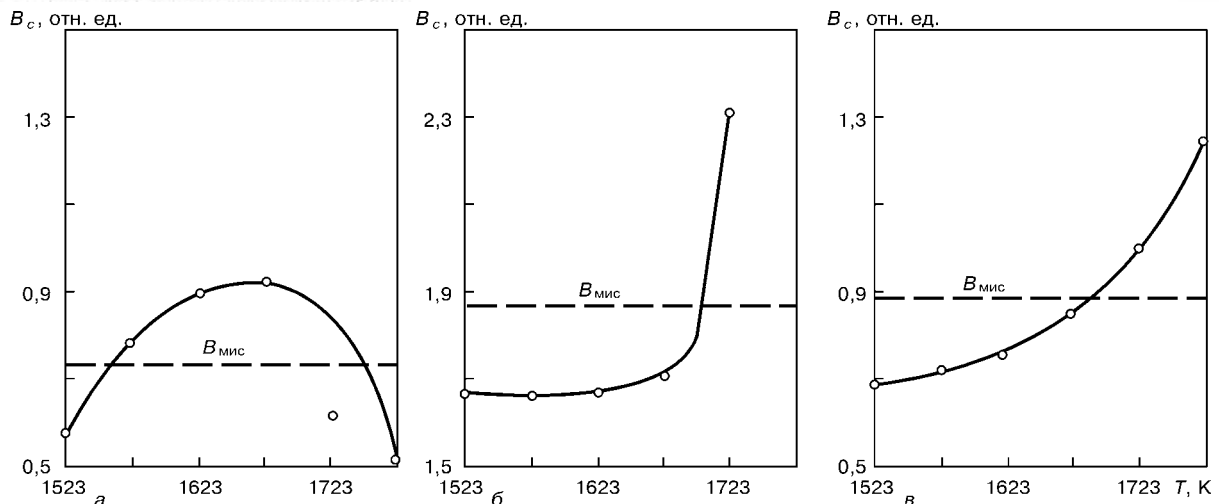


Рис. 2. Изменение структурной основности B_c сварочных шлаков разных марок в зависимости от температуры: а — АН-348-А; б — АН-15М; в — АН-67; $B_{\text{мис}}$ — основность по формуле МИС

более умеренно, что, по-видимому, обусловлено наличием в его составе 14 мас. % SiO_2 и 36 мас. % Al_2O_3 , а также способностью последнего изменять координационное число в зависимости от кислотно-основных характеристик среды. Ион алюминия, трансформируясь в тетракоординацию, достраивает кремнийкислородный каркас. Благодаря этому ограничивается повышение основности шлака, вызванное тенденцией к распаду его структуры при нагреве. При увеличении доли шестикоординированного иона алюминия происходит разрушение

кремнийкислородных образований. Этот фактор сдерживает снижение основности остывающего алюминатного шлака. Таким образом, под влиянием температурного и концентрационного факторов наблюдаются такие структурные изменения алюминатных шлаков, которые влияют на их основность и прочие свойства в более широких пределах, чем возможно для флюсов кислого и основного типов. Это создает предпосылки для выбора составов флюсов, способных адаптировать свои свойства к состоянию отдельных зон сварочной ванны, что предоставляет более широкие возможности для разработки флюсов с высокими технологическими и металлургическими характеристиками.

Рассмотрим характер изменения структурной основности и вязкости расплавов флюсов кислого (силикатного), алюминатного и основного типов, соотносенный с термическим циклом, а следовательно с их расположением относительно зон сварочной ванны (рис. 3). Выбором именно этих свойств флюсов объясняется их значимость в определении степени окисления металла и качества формирования шва.

Для кислых высококремнистых флюсов характерна высокая активность оксида кремния. В присутствии фтористого кальция, особенно на стадии плавления, оксид кремния интенсифицирует образование тетрафторида кремния SiF_4 , благодаря которому улучшается защита сварочной ванны от воздуха и нейтрализуется вредное влияние водорода. Кислые высококремнистые флюсы образуют на поверхности сварочной ванны и даже в ее высокотемпературных зонах вязкие расплавы. Это обеспечивает их высокую формирующую способность за счет эффективного подавления возмущений сварочной ванны [5]. Однако большое содержание в них кремнезема и оксидов марганца, активных по отношению к жидкому металлу, приводит к насыщению его кислородом, особенно в высокотемпературных зонах сварочной ванны [1]. Следствием этого является образование в металле шва значительного количества неметаллических включений.

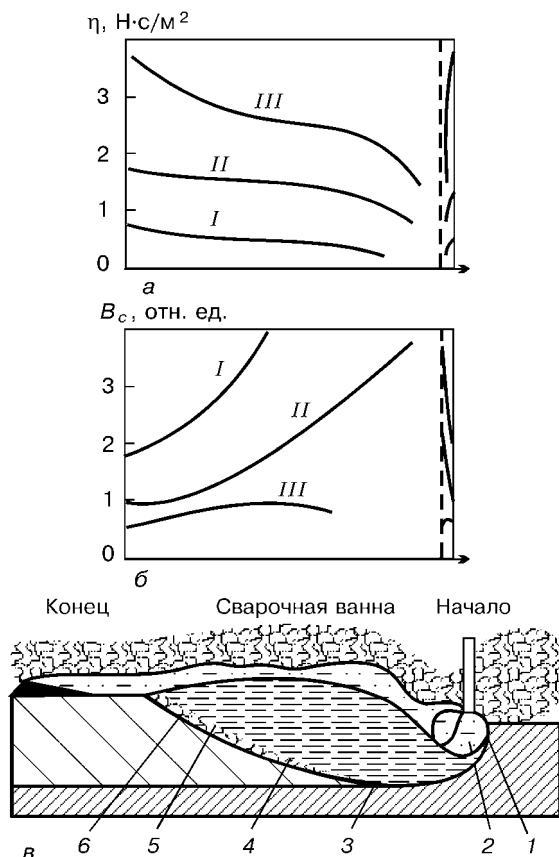


Рис. 3. Изменение вязкости шлаков η (а) разных типов и основности B_c (б) в зависимости от расположения относительно зон сварочной ванны (в): I — флюс АН-15М; II — АН-6; III — АН-348-А; 1-6 — см. рис. 1

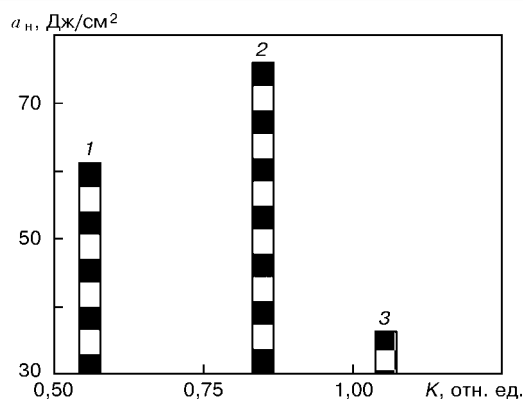


Рис. 4. Изменение сравнительной ударной вязкости a_n металла сварных швов, выполненных с использованием флюсов разных типов: 1 – АН-65; 2 – АН-67; 3 – АН-60

Противоположным образом ведут себя в сварочной ванне расплавы основных флюсов. При нагревании в их структуре происходит разрушение термически непрочных ионных связей, в результате чего исходная основность таких флюсов еще больше увеличивается и сохраняется на всей поверхности сварочной ванны. Основные флюсовые расплавы, покрывающие ее поверхность, имеют низкую вязкость, что предопределяет их ограниченные формирующие возможности. Положительной стороной применения основных флюсов является отсутствие в них кремнезема и оксидов марганца, что ограничивает уровень насыщения металла кислородом и создает благоприятные условия для удаления неметаллических включений.

В отличие от кислых (силикатных) и основных, расплавы флюсов алюминатного типа за счет перестройки структуры в разнотемпературных функциональных зонах сварочной ванны способны обеспечивать следующие преимущества:

образовывать в зоне 1 относительно кислые шлаки, обеспечивающие эффективную газовую защиту сварочной ванны;

повышать основность шлака в зоне 2 и ограничивать переход кислорода в расплавленный металл;

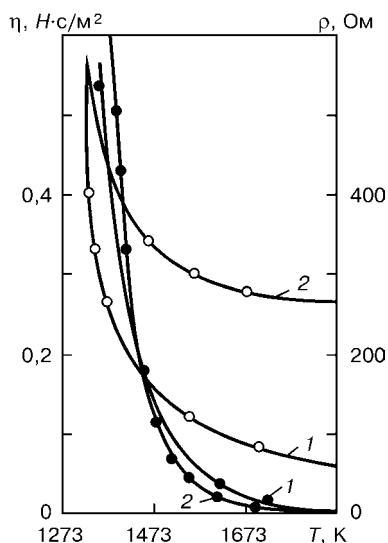


Рис. 5. Изменение физических свойств флюсов марок АН-67 (1) и АН-60 (2) в зависимости от температуры: ○ – вязкость; ● – электропроводность

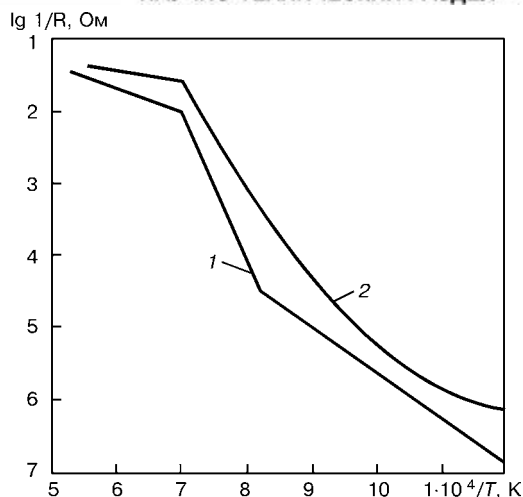


Рис. 6. Изменение электропроводности флюсов марок АН-67 (1) и АН-60 (2) в зависимости от температуры в координатах $\lg 1/R - 10^4/T$

противодействовать снижению вязкости шлака в зоне 3 за счет перехода иона алюминия из октакоординированного состояния в тетракоординированное, благодаря чему подавляется возмущение на поверхности сварочной ванны;

образовывать в зонах 3 и 4 при обратной перестройке иона алюминия в октакоординированное состояние основные относительно маловязкие шлаки и таким образом способствовать удалению из металла неметаллических включений;

образовывать в зоне 5 кислые относительно вязкие шлаки, ограничивая тем самым вероятность появления соответствующих дефектов.

Таким образом, отличием нейтральных флюсов алюминатного типа от кислых и основных является способность изменять свою основность, находиться в кислом состоянии в низкотемпературных зонах сварочной ванны 1 и 5 и становиться основными в ее высокотемпературных зонах 2–4. Это приближает их к гипотетически идеальному флюсу, требования к которому были сформулированы нами выше. В результате выполнения ряда экспериментов было установлено, что суммарное содержание оксидов алюминия и кремния в сварочных флюсах такого типа должно составлять 40...60%. При этом для обеспечения повышенных механических свойств металла шва, особенно в условиях низких температур, необходимо, чтобы оксид алюминия в составе таких флюсов преобладал.

В последнее время имеется много публикаций, авторы которых повышение механических свойств металла шва, особенно хладостойкости, при сварке сталей связывают с наличием в его структуре

Таблица 1. Содержание кислорода, азота и водорода в металле шва, полученного при сварке стали 09Г2БТ проволокой Св-09ГНМТ с использованием исследуемых флюсов

Марка флюса	Массовая доля элементов, %		
	[O]	[N]	[H]
АН-60	0,049	0,012	0,00014
АН-67	0,030	0,013	0,00009



Таблица 2. Характеристика неметаллических включений в металле шва, полученного при сварке под флюсами марок АН-60 и АН-67 при двухслойной наплавке [21]

Марка флюса	№ слоя	Объемная доля неметаллических включений, %	Количество неметаллических включений (шт.) размером, мм				Всего
			0...0,4	0,4...1,2	1,2...2,0	> 2	
АН-60	1-й	0,327	70	539	232	119	960
	2-й	0,590	101	841	313	128	1383
АН-67	1-й	0,241	64	485	194	50	793
	2-й	0,220	81	615	220	69	981

значительного количества игольчатого феррита. Многие исследователи объясняют его появление достаточно низким (0,02... 0,03 %) содержанием кислорода и присутствием нитридов титана, алюминия, бора в металле шва в качестве зародышей при кристаллизации металла [15–19]. В зоне 6 наблюдаются все изменения металла сварочной ванны, происходящие в процессе взаимодействия со шлаком в предшествующих зонах. Поэтому состав неметаллических включений, образующихся с участием сварочного шлака, будет определять структуру металла шва. Как подтверждают результаты металлографического анализа [20], такие условия достаточно полно удовлетворяются при использовании алюминатного флюса типа АН-67, содержащего также оксиды титана, циркония и бора. По-видимому, этим можно объяснить более высокие значения ударной вязкости металла сварного шва, полученного с использованием флюса указанной марки. На рис. 4 показано изменение ударной вязкости сварных швов при использовании флюсов различных типов, увязанное с размером неметаллических включений через относительный безразмерный параметр K , отражающий тенденцию к их измельчению [20].

Зависимость физических свойств флюса типа АН-67 — вязкости и электрического сопротивления — от температуры показана на рис. 5 [21]. Характер изменения структурно-чувствительных свойств шлака свидетельствует о замедленной тенденции к распаду соответствующих его структурных образований. Это подтверждают данные об изменении электропроводности R в координатах $\lg 1/R - 1 \cdot 10^4/T$ (рис. 6). При использовании флюсов типа АН-67 на поверхности сварочной ванны образуются вязкие шлаки, благодаря этому обеспечивается хорошее качество формирования поверхности сварного шва при многодуговой сварке на форсированных режимах.

На основе проведенных структурных исследований шлаковых расплавов и вытекающих из них теоретических предположений были разработаны ряд марок сварочных плавящихся флюсов для различных отраслей промышленности.

Флюс марки АН-22М предназначен для сварки среднелегированных сталей аустенитной проволокой. Его высокие технологические и металлургические характеристики обеспечиваются при суммарном содержании оксидов алюминия и кремния в пределах 38... 46 мас. % с некоторым увеличением содержания кремнезема и основностью флюса по формуле МИС до 1,35.

Флюс марки АН-66 нашел применение в судостроительной промышленности для сварки на повышенных скоростях стыковых и тавровых соединений из углеродистых и низколегированных сталей. Его использование обеспечивает хорошую отделимость шлаковой корки. Содержание комплексобразующих оксидов в этом флюсе составляет 37... 53 %, его основность по формуле МИС близка к 0,90. Наиболее полно принцип адаптации свойств алюминатного шлака к функциональным задачам зон сварочной ванны был реализован при разработке флюса марки АН-67, основность которого по формуле МИС составляет 0,75. Суммарное содержание комплексобразующих оксидов в этом флюсе составляет 45... 55 мас. %, что обеспечивает выполнение сварки на высоких скоростях и получение швов с хорошим формированием. За счет введения до 40 % Al_2O_3 и ограниченного присутствия оксидов марганца и кремния (до 15 % каждого) сварочный шлак флюса АН-67 существенно уменьшает окисление металла в зоне высоких температур сварочной ванны, эффективно удаляет неметаллические включения в последующей зоне и снижает их содержание в металле шва (табл. 1, 2) [21].

Результаты металлографических исследований показали, что при сравнении металла швов, выполненных с использованием флюсов марок АН-60 и АН-67, в последних наряду со снижением объемной доли неметаллических включений наблюдается незначительная объемная доля железо-марганец-силикатных стекол, сульфидов и пленочных оксисульфидов. Появились также округлые марганец-алюмосиликатные включения и частички корунда. Наряду с округлыми сульфидными и оксисульфидными частицами, располагающимися по границам первичных аустенитных зерен, в металле имеются также компактные включения оксидов титана и частички неправильной формы нитрида титана [15].

Уже более 15 лет флюсы типа АН-67 изготавливаются на Никопольском заводе ферросплавов, Новомосковском трубном заводе и Челябинском трубопрокатном заводе. Указанные флюсы используются как в Украине (Харьковский трубный завод), так и в России (Челябинский трубопрокатный завод, Выксунский металлургический завод) при сварке труб большого диаметра, предназначенных для транспортировки газо- и нефтепродуктов, в том числе в условиях низких температур.

Выводы

1. Несовместимость требований технологического и металлургического характера к флюсам, исполь-



зваемым при электродуговой сварке, а также взаимоисключающий характер течения физико-химических процессов в сварочной ванне, обусловленный экстремально-асимметричным термическим циклом нагрева металла, ограничивают возможность выбора их состава — только кислого или основного типа.

2. На основе результатов рентгеноструктурных исследований и данных о валентно-структурном состоянии ионов (координационные числа, расстояние между группировками ионов, профиль кривых радиального распределения атомов) разработано понятие структурной основности, с помощью которого учитывается влияние как состава, так и температуры флюсовых расплавов, обусловленное их атомно-молекулярной природой.

3. При нагреве до 1523...1773 К кислотные свойства исходно-кислого флюса АН-348-А усиливаются, повышается активность оксида кремния и сохраняется высокая вязкость расплава. Это обеспечивает при сварке получение беспористых швов с хорошим формированием. Флюсы марганец-силикатного типа в результате восстановления оксидов кремния и марганца интенсивно окисляют металл сварочной ванны, способствуя тем самым образованию неметаллических включений в металле шва.

4. Структурная основность исходно-основного флюса АН-15М значительно увеличивается при плавлении за счет разрушения непрочных ионных связей в его структуре. Основные флюсы при сварке образуют на поверхности сварочной ванны маловязкие шлаки, чем существенно ухудшают их формирующую способность. Однако отсутствие в составе этих флюсов легковосстанавливающихся оксидов кремния и марганца ограничивает процессы окисления металла сварочной ванны и образования неметаллических включений в металле шва.

5. Алуминатные флюсы при определенном сочетании оксидов комплексобразующего, модифицирующего и промежуточного характера в результате трансформации их структуры и кислотно-основных свойств могут в «холодных» зонах сварочной ванны образовывать кислые расплавы, а в «горячих» — основные.

6. Способность алуминатных флюсов нейтрального типа адаптироваться к состоянию зон сварочной ванны, изменяя кислотно-основные свойства, и за счет этого обеспечивать как высокие сварочно-технологические, так и металлургические характеристики процесса, реализована при разработке ряда марок сварочных флюсов. Они успешно применяются в судостроении, при сварке труб большого диаметра ответственного назначения для газо- и нефтепроводов, а также в других отраслях промышленности.

The principle of formulation of flux compositions with basicity varied under the effect of a welding thermal cycle is suggested, which is based on results of investigation into structure of slag melts and development of the concept of their structural basicity.

1. *Рабкин Д. М.* Флюс АН-348-А // Автомат. сварка. — 1951. — № 4. — С. 32–43.
2. *Подгаецкий В. В., Кузьменко В. Г.* Сварочные шлаки. — Киев: Наук. думка, 1988. — 252 с.
3. *Кузьменко В. Г., Галинич В. И., Токарев В. С.* О характерных зонах сварочной ванны при электродуговой сварке под флюсом // Автомат. сварка. — 1997. — № 5. — С. 24–27.
4. *Кузьменко В. Г.* Оценка роли шлаков в различных зонах сварочной ванны при электродуговой сварке под флюсом // Там же. — 1998. — № 12. — С. 11–21.
5. *Кузьменко В. Г.* Влияние шлака на качество формирования поверхности сварного шва // Там же. — 1985. — № 2. — С. 34–38.
6. *Есин О. А., Гельд П. В.* Физическая химия пирометаллургических процессов. — М.: Металлургия, 1966. — 703 с.
7. *Ватолин Н. А., Пастухов Э. А.* Дифракционные исследования строения высокотемпературных расплавов. — М.: Наука, 1980. — 189 с.
8. *Сокольский В. Э., Казимиров В. П., Кузьменко В. Г.* Модель структуры оксидно-фторидных расплавов на основе плотной упаковки атомов кислорода // Проблемы спец. электрометаллургии. — 2000. — № 4. — С. 63–73.
9. *Основность расплавленных флюсов и возможность ее экспериментального определения* / В. Э. Сокольский, В. И. Галинич, В. П. Казимиров и др. // Автомат. сварка. — 1991. — № 5. — С. 35–37.
10. *Изучение свойств шлаковых расплавов применительно к обоснованию составов сварочных флюсов. Ч. 1. Структура* / В. Г. Кузьменко, В. И. Галинич, В. С. Токарев и др. // Там же. — 1999. — № 11. — С. 38–48.
11. *Валентно-структурное состояние ионов и свойства сварочных флюсов* / В. Э. Сокольский, В. П. Казимиров, В. Г. Кузьменко, В. И. Галинич // Изв. вуз. Черная металлургия. — 1999. — № 5. — С. 3–6.
12. *Особенности строения высококремнеземистых и высокоглиноземистых шлаковых систем (сварочных флюсов)* / В. Э. Сокольский, В. И. Галинич, В. П. Казимиров и др. // Расплавы. — 1993. — № 6. — С. 18–20.
13. *Топорищев Г. А.* Современные представления о структуре расплавленных шлаков // Тез. науч. сообщений V Всесоюз. конф. по строению и свойствам металлических и шлаковых расплавов. — Ч. 3. Исследование шлаковых расплавов. — Свердловск: Изд. УНЦ АН СССР, 1983. — С. 3–12.
14. *Рентгенографический метод определения основности расплавов многокомпонентных оксидно-фторидных систем* / В. Э. Сокольский, В. П. Казимиров, В. А. Шовский, В. Г. Кузьменко // Журнал приклад. химии. — 1995. — Т. 68, Вып. 11. — С. 1770–1774.
15. *Liu S., Olson L.* The role of inclusions in controlling HSLA steel weld microstructures // Welding. J. — 1986. — June. — P. 139–149.
16. *Improvement of HAZ toughness in HSLA steel by introducing finely dispersed Ti-oxide* / H. Homma, S. Ohkita, S. Matsuda, K. Yamamoto // Ibid. — 1987. — № 10. — P. 301–309.
17. *Cole W., Colvin P.* Submerged arc weld of higher tensile steels // Met. constr. and Brit. Welding. J. — 1971. — № 4. — P. 131–135.
18. *Notch Toughness of low oxygen content submerged arc deposits* / T. N. North, H. B. Bell, A. Koukabi, I. Craig I. // Ibid. — 1979. — № 12. — P. 343–354.
19. *Подгаецкий В. В., Парфессо Г. И.* К вопросу о зарождении игольчатого феррита в сварных швах // Автомат. сварка. — 1991. — № 10. — С. 10–13.
20. *Токарев В. С.* Влияние неметаллических включений на микроструктуру швов, сваренных под флюсами АН-60, АН-65 и АН-67А // Там же. — 1991. — № 12. — С. 31–36.
21. *Кузьменко В. Г.* Определение температурного интервала плавления сварочных флюсов по данным их электротермического анализа // Там же. — 1992. — № 9. — С. 34–38, 41.

Поступила в редакцию 20.03.2002