

УДК 621.791.55:669.715

А.О. Кошелев¹, В.В. Антипов², Е.В. Никитина³, И.Ю. Мухина²**МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ ФТОРИДНЫХ ФЛЮСОВ-СУСПЕНЗИЙ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-25-31

Исследовано влияние введения небольших количеств фторидных флюсов на свойства сварных соединений при дуговой сварке алюминиевых сплавов. Установлено, что использование предложенного флюса позволяет улучшить геометрические характеристики сварного шва, обеспечить эффективное рафинирование сварочной ванны, и вследствие этого – повышение механических свойств сварных соединений.

Проведен анализ металлургических процессов, протекающих в сварочной ванне при введении флюсов, предложен механизм действия флюсов.

Ключевые слова: сварка, фторидные флюсы, алюминиевые сплавы, рафинирование сварочной ванны.

А.О. Koshelev¹, V.V. Antipov², E.V. Nikitina³, I.Yu. Mukhina²**MECHANISM OF ACTION OF FLUORID FLUX-SUSPENSIONS AT ARC WELDING OF ALUMINUM ALLOYS**

The effect of introducing small amounts of pure fluoride fluxes on the properties of welded joints in arc welding of aluminum alloys was studied. It is established that the use of the proposed flux can improve the geometric characteristics of the weld, ensure effective refining of the weld pool, and as a result – improve the mechanical properties of welded joints.

The analysis of metallurgical processes taking place in the welding bath during the introduction of fluxes is carried out, the mechanism of action of fluxes is proposed.

Keywords: welding, fluoride fluxes, aluminum alloys, refining of the weld pool.

¹Акционерное общество «Московский машиностроительный завод «Авангард» [Joint Stock Company «Moscow machine-building mill «Avangard»]; e-mail: avangardmos@mail.ru

²Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» [Moscow Aviation Institute (National Research University)]; e-mail: mai@mai.ru

Введение

В настоящее время в России и за рубежом в авиационной и ракетной технике широко применяются алюминиевые сплавы, которые благодаря высокой удельной прочности, жесткости, виброустойчивости и малой плотности обеспечивают высокие тактико-технические характеристики современных устройств. Современная промышленность ставит задачи по совершенствованию применяемых технологий и снижению количества дефектов при производстве [1].

Основными дефектами сварных соединений из алюминиевых сплавов являются газовая и газосадочная пористость и оксидные пленки в шве. Одной из основных причин образования таких дефектов является замешивание в сварочную ванну гидроксидных пленок с поверхности свариваемого металла. В связи с этим большое значение имеет возможность рафинирования сварочной ванны сварочными флюсами [2, 3].

В настоящее время для удаления оксидных пленок при сварке, пайке и литье алюминиевых сплавов применяют флюсы на основе хлоридов щелочных и щелочноземельных металлов с добавками фтористых солей. Такие флюсы сравнительно легкоплавки (температура плавления 400–600°C), обладают достаточными рафинирующими свойствами. Однако из-за высокой гигроскопичности хлоридов сварные и паяные соединения, полученные с использованием таких флюсов, обладают низкой коррозионной стойкостью [4, 5], кроме того, использование непрокаленных флюсов может привести к образованию значительной пористости в швах.

Применение флюсов на основе фтористых солей возможно, поскольку основной задачей флюса является удаление оксидной пленки. Хлориды щелочных и щелочноземельных металлов практически не растворяют оксидные пленки алюминия, и роль хлоридов заключается в обеспечении низкой температуры

плавления флюса. Однако, используя чисто фторидные системы, можно обеспечить температуру плавления флюса 620–650°C, что соответствует требованиям, предъявляемым к флюсам для дуговой сварки алюминиевых сплавов [6, 7].

Относительно механизма действия флюса на оксидную пленку алюминия существуют различные мнения. Большинство исследователей полагает, что непосредственное химическое растворение оксидов во флюсах не всегда является главным для удаления оксидной пленки [8, 9] и что действие флюсов связано в основном с процессом смачивания оксидов и адсорбционной способностью флюсов [10, 11].

В исследованиях [12] отмечается, что удаление оксидной пленки определяется содержанием химически связанной воды во флюсе. Вода, взаимодействуя с алюминием, приводит к дальнейшему окислению, образованию водорода и фтористого водорода. Фтористый водород проникает к поверхности алюминия через трещины и поры в оксидной пленке, помогая ее выпадению в шлак.

М.Ф. Иордан и Д.Р. Мильнер [13] пришли к выводу, что действие флюса состоит в отслаивании оксидной пленки от поверхности алюминия за счет электрохимических процессов, протекающих на границе раздела «оксид–металл».

Ряд авторов [14, 15] удаление оксидной пленки объясняли протеканием электродного процесса на границе алюминия с оксидной пленкой, причем роль фторидов заключается в том, что фторид натрия и натриевый криолит, добавленные к хлористым солям, ускоряют удаление оксидной пленки с алюминия вследствие уменьшения потенциала алюминиевого анода [16].

Существование нескольких представлений о механизме разрушения оксидных пленок на алюминиевых сплавах при взаимодействии их с флюсами показывает, что механизм флюсования нуждается в уточнении.

Целью данных исследований было изучение механизма влияния флюсов-суспензий на степень металлургической обработки сварочной ванны, т. е. на процессы удаления из сварочной ванны газов и оксидных частиц.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 8.4. «Высокопрочные коррозионностойкие свариваемые магниевые и литейные алюминиевые сплавы для изделий авиакосмической техники нового поколения («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Методика проведения исследований

Флюсы для сварки приготавливали смешением химически чистых солей (марки ЧДА). Смесь растирали в фарфоровой ступке, просеивали, затем просушивали в течение 1 ч при температуре 120–140°C. Флюс (в виде 5%-ной спиртовой суспензии) наносили с помощью мягкой кисточки на торцевые и корневые поверхности свариваемых кромок. Использование флюсов не требует корректировки режимов сварки.

Для оценки эффективности металлургической обработки флюсами металла сварочной ванны использовали тепловую пробу МАТИ [17] и методику, позволяющую дифференцировать вклад отдельных источников газов в формирование результирующей пористости металла шва [18]. Методика основана на следующих соображениях. При сварке с местным расплавлением частицы гидроксидных пленок с поверхности основного и присадочного металла попадают в сварочную ванну. В связи с этим суммарный объем пор в металле шва должен зависеть от потенциального «запаса» газов в частицах оксидных пленок, от суммарного содержания водорода в сварочной ванне, вероятности всплывания газовых пузырьков и степени металлургической обработки металла сварочной ванны. Поскольку в процессе сварки на рабочих режимах не удается завершить процесс дегидратации замешанных оксидных пленок полностью, водород в металле шва может находиться в связанном виде (потенциальный запас газов), в молекулярном виде (в порах), а также в растворенном виде (атомарный водород). Суммарное содержание молекулярного водорода и водорода, содержащегося в связанном виде в гидроксидных пленках, можно определить с помощью тепловой пробы МАТИ [17].

Для дифференцирования вклада отдельных источников газов в формирование пористости металла шва определяют (по методике, описанной в работе [19]) коэффициент перехода молекулярного водорода из основного металла в шов:

$$z = \frac{(\Sigma V_{\text{непл}})_{\text{м.ш.т.п}} \cdot \frac{T_{\text{т.п}}}{T_{\text{комн}}} - (\Sigma V_{\text{H}_2})}{(\Sigma V_{\text{непл}})_{\text{о.м.т.п}}}, \quad (1)$$

где $(\Sigma V_{\text{непл}})_{\text{о.м.т.п}}$, $(\Sigma V_{\text{непл}})_{\text{м.ш.т.п}}$ – соответственно суммарный объем несплошностей по результатам тепловой пробы основного металла и металла шва; ΣV_{H_2} – объем молекулярного водорода, содержащегося в газовых пузырьках в металле шва; $T_{\text{комн}}$, $T_{\text{т.п}}$ – соответственно температуры комнатная и при проведении тепловой пробы.

По параметрам шва и результатам тепловой пробы металла шва и основного металла рассчитывают и сопоставляют коэффициенты газовыделения с единицы поверхности основного металла (a_1') и с поверхности торцов свариваемых кромок (a_1).

Результаты экспериментов

Проводили исследование сварных швов, полученных аргоно-дуговой сваркой вольфрамовым электродом (с присадочной электрополированной проволокой марки Св-АМг6 диаметром 2 мм по ГОСТ 7871–75) пластин из сплава марки АМг6 размером 2×100×300 мм по ГОСТ 21631–76 встык на весу (по режиму: $I_{\text{св}}=150$ А (сила сварочного тока); $V_{\text{св}}=20$ м/ч (скорость сварки); $V_{\text{пл}}=75$ м/ч (скорость подачи присадочной проволоки); $U_{\text{св}}=12\div 14$ В (напряжение сварочной дуги)), и прилежащего к ним основного металла. Режим тепловой пробы МАТИ: температура 580±5°C, время изотермической выдержки 15 мин.

Для оценки влияния флюсов на величину поверхностного натяжения металла сварочной ванны использовали пробу на проплавление на весу (рис. 1). При пробе на проплавление конфигурация поверхности сварочной ванны определяется балансом сил:

$$P_d + G + \Sigma \sigma_i = 0, \quad (2)$$

где P_d – сила, связанная с воздействием дуги; G – масса жидкого металла; $\Sigma \sigma_i$ – силы, обусловленные поверхностным натяжением жидкого металла со стороны проплава.

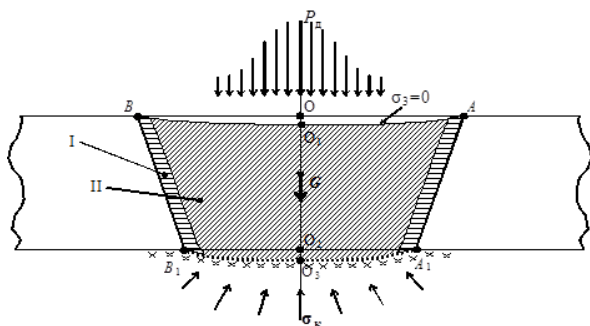


Рис. 1. Силы, действующие на сварочную ванну при дуговой сварке (сечение, перпендикулярное направлению сварки):

I – зона ламинарного течения; II – зона турбулентного течения; σ_3 – поверхностное натяжение в зеркале сварочной ванны ($T = T_{\text{кип}}$); σ_k – силы поверхностного натяжения в корневой части сварочной ванны

Поскольку объем и, следовательно, масса сварочной ванны определяются тепловым балансом при фиксированном режиме сварки, конфигурация корневой поверхности сварочной ванны зави-

сит от величины и распределения сил, противодействующих силам ($P_d + G$), т. е. сил, связанных с поверхностным натяжением жидкого металла. Они определяются, с одной стороны, величиной поверхностного натяжения жидкого металла, с другой – кривизной его поверхности, а также деформационной способностью слоя. Поэтому при идентичных режимах сварки без флюса и с использованием флюса по изменению величины проплава шва h можно судить об изменении сил поверхностного натяжения σ . В качестве основных геометрических параметров сварочной ванны использовали: ширину шва – b , ширину шва с корневой стороны – b_k , величину проплава корня шва – h .

Для исследования были предложены различные составы флюсов (табл. 1). Результаты исследования влияния составов флюсов на геометрические параметры сварных соединений приведены в табл. 2. Как следует из анализа полученных данных, наилучшая форма сварных соединений достигается при использовании флюса Б5, что позволяет снизить величину проплава в 3,5–4 раза по сравнению с использованием шаблона. Это связано с тем, что за счет введения в состав флюса Б5 таких активных компонентов, как фторборат калия и фторцирконат калия, по-видимому, обеспечивается более полное удаление поверхностных оксидных пленок, благодаря чему повышается поверхностное натяжение расплавленного металла с корневой стороны сварочной ванны.

Результаты определения пористости металла шва ($V_{\text{пор}})_{\text{м.ш}}$ и значений суммарного объема несплошностей в шве после проведения тепловой пробы показали (табл. 3), что использование

Составы исследуемых флюсов

Марка флюса	Состав флюса, % (по массе)				
	LiF	AlF ₃	CaF ₂	K ₂ ZrF ₆	KBF ₄
А4	64	13	23	–	–
Б5	44	32	–	14	10
Д7	46	39	25	–	–
МАТИ-6	32	27	17	14	10

Таблица 1

Влияние состава флюсов на геометрические параметры сварных соединений

Марка флюса	Величина проплава h , мм	Ширина шва с корневой стороны b_k , мм	h/b_k
МАТИ-6	0,82±0,08	10,0±0,10	0,08±0,01
А4	1,02±0,11	10,5±0,3	0,101±0,09
Б5	0,75±0,07	9,5±0,1	0,078±0,007
Д7	1,14±0,03	10,0±0,17	0,114±0,001
Шабрение кромок	2,44±0,24	10,7±0,7	0,23±0,01

Таблица 2

Суммарный объем несплошностей в металле шва до и после проведения тепловой пробы при использовании различных флюсов

Подготовка кромок	Марка флюса	$(\Sigma V_{\text{пор}})_{\text{м.ш}}$	$(\Sigma V_{\text{неспл}})_{\text{м.ш т.п}}$
		см ³ /100 г	
Нанесение флюса на торец и корневую поверхность шва	А4	0,07±0,01	0,19±0,04
	Б5	0,04±0,02	0,20±0,05
	Д7	0,08±0,03	0,18±0,05
	МАТИ-6	0,07±0,03	0,16±0,05
Шабрение	–	0,15±0,02	0,48±0,20

Таблица 3

Таблица 4

Влияние флюсов на пористость металла шва и результаты тепловой пробы при аргоно-дуговой сварке вольфрамовым электродом с присадочной электрополированной проволокой (исследовано 18 образцов)

Вариант	Пористость металла шва ($\Sigma V_{пор}$) _{м.ш}	Тепловая проба металла шва ($\Sigma V_{непл}$) _{м.ш.т.п}
	см ³ /100 г	
МАТИ-6	0,14±0,01	0,38±0,03
А4	0,21±0,02	0,47±0,04
Б5	0,30±0,03	0,48±0,10
Д7	0,18±0,04	0,40±0,08
Травление пластин	0,41±0,20	0,87±0,10

фторидных флюсов позволяет снизить пористость металла шва в 1,5 раза (табл. 4). Так, при использовании флюса пористость металла шва составляет: $(V_{пор})_{м.ш}=0,04\div 0,07$ см³/100 г, тепловая проба металла шва $(V_{непл})_{м.ш}=0,16\div 0,21$ см³/100 г.

Использование стандартной технологии подготовки кромок, включающей травление пластин и шабрение кромок перед сваркой, приводит к образованию большей пористости: $(V_{пор})_{м.ш}=0,13\div 0,17$ см³/100 г, тепловая проба металла шва: $(V_{непл})_{м.ш}=0,38\div 0,68$ см³/100 г.

Следовательно, использование флюсов позволяет не только снизить пористость металла шва, но и потенциальный запас газов в шве. Меньшую пористость металла шва и лучшую металлургическую обработку металла сварочной ванны обеспечивают флюсы марок Д7 и МАТИ-6. В случае использования суспензии флюса оксидные пленки в шве не образуются и при испытании сварных соединений на изгиб (угол изгиба составляет $\alpha=130\div 180$ град, типичным результатом для сварных швов по ПИ 1.4.1555–2000 является $\alpha=90$ град) разрушение происходит не по оси шва и носит вязкий характер. Кроме того, при использовании флюсов наблюдается также некоторое повышение механических свойств сварных соединений: $\sigma_{в.св}=330\div 350$ МПа (по ПИ 1.4.1555–2000 – $\sigma_{в.св}=305$ МПа). Предложенные флюсы не снижают коррозионные свойства сварных соединений – потеря механических свойств при испытаниях на общую коррозию не превышает 1,8%.

Для анализа механизма действия флюса на рафинирование сварочной ванны от газовых и оксидных включений рассчитаны и сопоставлены коэффициенты газовой выделенности для различных вариантов подготовки поверхности.

Пористость в металле шва, связанная с присутствием молекулярного водорода в основном металле, пропорциональна коэффициенту перехода молекулярного водорода из основного металла в шов:

$$[(\Sigma V_{H_2})_{мол}] = z[(\Sigma V_{непл})_{о.м.т.п}], \quad (3)$$

где $[(\Sigma V_{непл})_{о.м.т.п}]$ – суммарный объем несплошностей по результатам тепловой пробы основного металла.

Проведение эксперимента по проплавлению зашабренной с двух сторон пластины позволило по уравнению (3) рассчитать коэффициент z , равный 0,2.

С учетом полученного значения коэффициента z рассчитаны значения коэффициентов газовой выделенности с единицы травленной по стандартной технологии пластины:

$$\frac{T_{комн}}{T_{т.п}}(\Sigma V_{непл})_{м.ш.т.п} = \frac{100(a_1 \cdot b + 2\delta \cdot a'_1)}{P/l} + \frac{T_k}{T_{т.п}} \cdot z(\Sigma V_{непл})_{о.м.т.п} \quad (4)$$

где b – ширина шва; P – масса шва; l – длина шва.

Последовательно рассчитать коэффициенты газовой выделенности с единицы поверхности возможно, осуществив ряд экспериментов (различных вариантов аргоно-дуговой сварки):

- проплавление по целой пластине без присадочной проволоки – в этом случае в результате исключения влияния присадочного металла и поверхности торцов могут быть определены коэффициенты газовой выделенности с единицы поверхности основного металла – a_1 ;

- сварка пластин встык без присадочной проволоки – определение ранее коэффициентов a_1 позволяет рассчитать коэффициенты газовой выделенности с поверхности торцов свариваемых кромок – a'_1 .

Расчеты показали: $(a_1)_{травл}=0,00053$ см³/см², с поверхности торцов: $(a'_1)_{травл}=0,0016$ см³/см², что в 3 раза выше, чем коэффициент газовой выделенности с верхней поверхности шва. Полученная разница в коэффициентах $(a_1)_{травл}$ и $(a'_1)_{травл}$ связана с тем, что при аргоно-дуговой сварке вольфрамовым электродом на переменном токе за счет катодной очистки верхней поверхности шва происходит частичная дегазация частиц оксидных пленок. Очистки поверхности торцов пластин за счет катодного распыления не наблюдается.

Аналогичная картина наблюдается и при сопоставлении коэффициентов газовой выделенности с верхней и торцевой поверхностей при сварке встык шабренных листов:

$$(a_1)_{шабр}=0 \text{ см}^3/\text{см}^2, \quad (a'_1)_{шабр}=0,00024 \text{ см}^3/\text{см}^2.$$

Наибольший интерес представляют результаты по определению коэффициента газовой выделенности с торца пластин при использовании флюсов:

$$(a'_1)_{фл} = -0,0032 \text{ см}^3/\text{см}^2.$$

Полученная в результате расчетов отрицательная величина коэффициента газовой выделенности с поверхности торцов при нанесении флюсов и

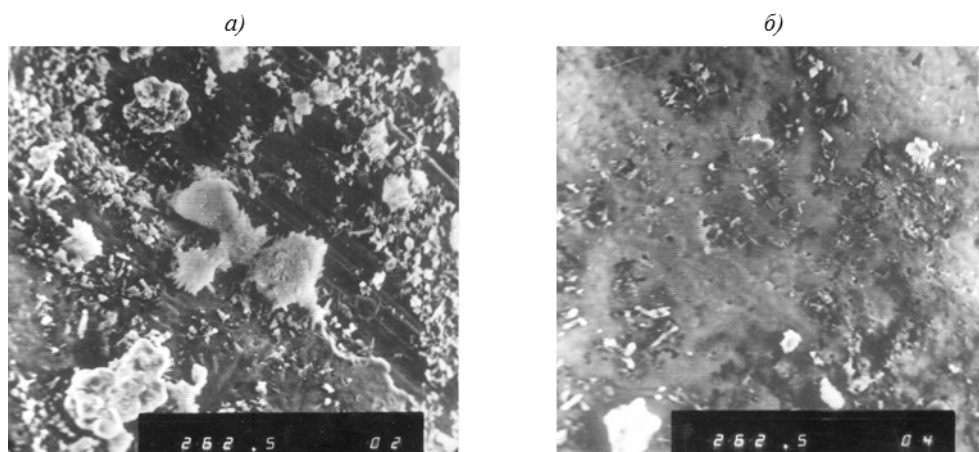


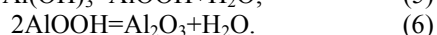
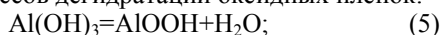
Рис. 2. Корневая поверхность шва при использовании флюсов ($\times 262,5$):
 а – вблизи границы сплавления; б – в зоне II сварного шва

сопоставление ее с коэффициентами газовыделения с торцов с травленной и зашабренной поверхностью позволяет подтвердить предположение о значительной дегазации сварочной ванны и рафинировании ее от оксидных включений за счет введения фторидных флюсов.

Обсуждение результатов экспериментов

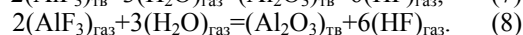
Механизм действия флюсов можно представить следующим образом. В процессе сварки происходит плавление флюса, представляющего собой механическую смесь компонентов и нанесенного на соединяемые кромки в виде спиртовой суспензии. Причем если вблизи границы сплавления не наблюдается плавление отдельных компонентов флюса (рис. 2, а), то ближе к центральной (более сильно нагретой) части шва уже появляются отдельные участки, покрытые тонким слоем расплавленного флюса и лишь единичные неоплавленные частички (рис. 2, б).

Известно, что оксидные пленки содержат различные микронесплошности. При нагреве на межфазной поверхности раздела «металл–оксид», характеризующейся повышенной энергией, происходит объединение вакансий, возникновение микропор и, вследствие этого, ослабление связи между пленкой оксида и подложкой. Возникающие из-за различия в температурных коэффициентах линейного расширения (ТКЛР) пленки и металла термические напряжения разрушают пленку над микропорами. Образованию трещин способствуют поры, имеющиеся в наружном слое оксидной пленки и дополнительно образующиеся из-за развития процессов дегидратации оксидных пленок:



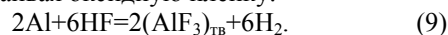
По данным работы [19], на 1 см^2 пленки площадь, занятая порами, составляет 10^{-3} см^2 . Трещины образуются на расстоянии 10^{-4} см (1 мкм) от пленки. Восстановлению сплошности пленки препятствует расплавленный флюс.

Фториды, затекая в трещины, взаимодействуют с гидроксидными пленками на поверхности алюминиевого сплава (подложки). В работе [17] отмечается, что фторид алюминия (AlF_3) в присутствии алюминия (или алюминиевого сплава) обладает заметной летучестью, поэтому при нагреве в процессе сварки протекает реакция выделения поверхностной влаги с парами AlF_3 с образованием фтористого водорода:



Термодинамический расчет реакций, протекающих между отдельными компонентами флюса и подложкой, показал, что при температурах 700–1300 К (температурный интервал, захватывающий области зоны термического влияния (700–900 К) и сварочной ванны (900–1300 К)) возможно протекание реакции только между фторидом алюминия и парами воды (рис. 3, реакции 1 и 1'). Реакции между другими компонентами флюса (рис. 3 – MgF_2 (2, 2'); LiF (3, 3'); CaF_2 (4)) термодинамически невозможны.

Фтористый водород вступает во взаимодействие с подложкой, растворяет алюминий – тем самым отслаивая оксидную пленку:



Растворение подложки фтористым водородом (рис. 3, реакции 5 и 5') термодинамически возможно, причем может образовываться фторид алюминия как в твердой (более предпочтительно), так и в газообразной форме. Через некоторое время в результате протекания реакции (9) пленка оказывается полностью отделенной. Отделению пленки от сплава (подложки) способствуют, с одной стороны, термические напряжения в пленке, сворачивающие ее, с другой – выделяющиеся в результате протекания реакций (5), (6) и (9) газы (водород), что приводит в конечном счете к диспергированию пленки. В результате на корневой

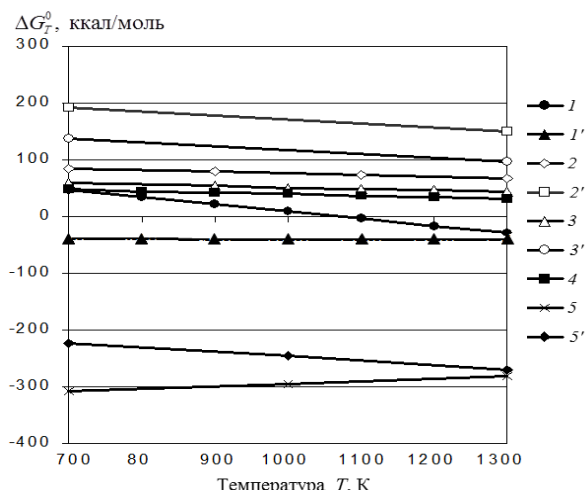
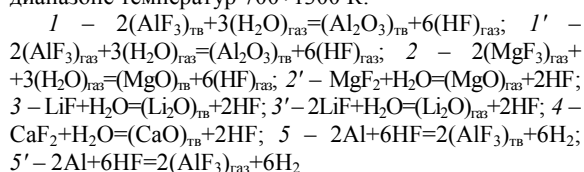


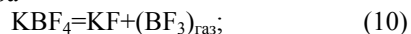
Рис. 3. Изменение ΔG_T^0 для реакций 1 (1')–5 (5') в диапазоне температур 700–1300 К:



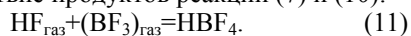
поверхности шва возникают участки очищенной поверхности – блестящие «ручейки» (рис. 4). При сварке встык без флюса таких очищенных участков не наблюдается. Кроме того, рельеф поверхности складчатый, вблизи центра шва характерно присутствие толстой складчатой оксидной пленки (рис. 5).

Наряду с реакциями (7) и (8) протекают следующие превращения:

– разложение соединения KBF_4 с выделением фтористого бора



– взаимодействие продуктов реакций (7) и (10):



В результате образуется фторборная кислота (HBF_4), которая является значительно более сильной, чем плавиковая. Именно образующиеся пары HF и HBF_4 и являются веществами, способными растворять оксидную пленку. Растворимость же оксидной пленки в расплаве фторидных солей (AlF_3 , LiF , CaF_2 , MgF_2 , SrF_2 и др.) или равна нулю, или совсем незначительна. Поэтому предлагаемый состав флюса обеспечивает более сильное растворение и разрушение оксидной пленки, что

приводит к заметному изменению геометрической формы сварочной ванны и ее дегазации. Кроме того, образующиеся пары HF и HBF_4 способствуют механическому отделению оксидной пленки от подложки.

Кроме отделения оксидных пленок от подложки и выведения ее в шлак флюсы играют и другую положительную роль, обеспечивая дегазацию сварочной ванны. Образующиеся по реакциям (9) и (11) газы провоцируют пузырьковую дегазацию ванны путем интенсификации процесса выделения и коагуляции пузырьков – система стремится к снижению уровня дисперсности и это происходит тем быстрее, чем выше значение поверхностной энергии.

Заключения

1. Установлено, что использование фторидных флюсов-суспензий позволяет улучшить геометрические параметры сварных швов.

2. Показано, что использование фторидных флюсов позволяет рафинировать сварочную ванну, в результате чего обеспечивается снижение пористости металла шва и суммарное содержание газов в шве.

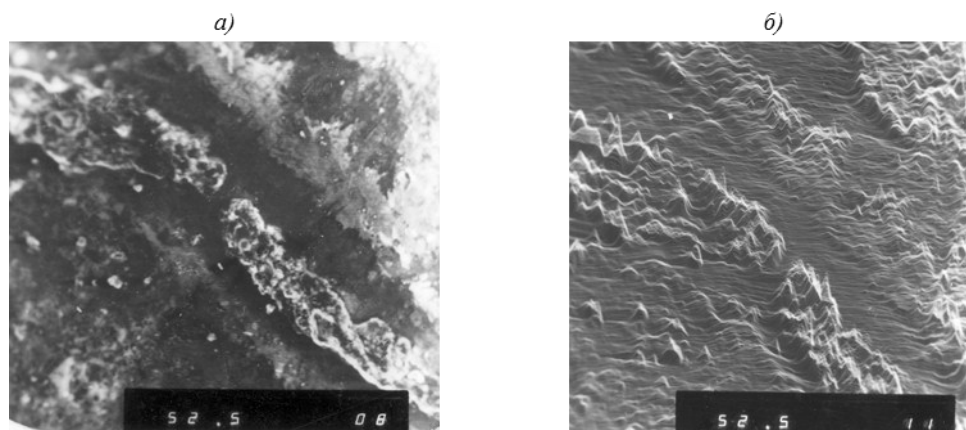


Рис. 4. Центральная зона корневой поверхности шва при использовании флюсов:

а – $\times 52,5$; б – у-модуляция снимка а

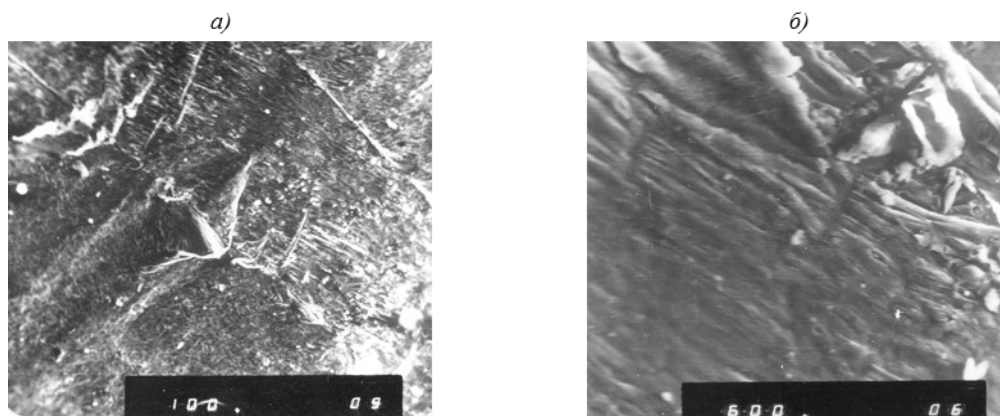


Рис. 5. Центральная зона корневой поверхности шва (а – $\times 100$; б – $\times 600$) при АрДЭС травленных по стандартной технологии листов (без использования флюсов)

3. При использовании предложенных флюсов наблюдается некоторое повышение механических свойств $\sigma_{в.св}=330\div 350$ МПа (стандартные значения механических свойств по ПИ 1.4.1555–2000 – $\sigma_{в.св}=305$ МПа, угол изгиба $\alpha=90$ град), новые флюсы не снижают коррозионные свойства сварных соединений.

4. Предложен механизм воздействия флюсов. Показано, что удаление оксидных пленок в шлак происходит в результате нескольких одновременно протекающих процессов:

– формирования дефектов в пленке (преимущественно в результате реакции дегидра-

тации оксида), облегчающих доступ реагентов к поверхности неокисленного сплава;

– образования в реакционной зоне фтористого водорода и фторборной кислоты, которые растворяют слой сплава под оксидом и способствуют отделению оксидной пленки от подложки.

Отделению оксида от подложки способствуют также механические факторы: собственные напряжения в слое оксида, давление паров выделяющегося водорода на отделенные края пленки. Рафинирование сварочной ванны от газов происходит путем интенсификации процесса дегазации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Развитие алюминийлитиевых сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 183–195.
3. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
4. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е. Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов <001> высококремниевое никелевое жаропрочное сплава, полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №4. С. 25–31.
5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.05.2017).
6. Морозова Г.И., Мухина И.Ю. Наноструктурное упрочнение литейных магниевых сплавов системы Mg–Zn–Zr // *МирТом*. 2011. №11. С. 3–7.
7. Волкова Е.Ф., Мухина И.Ю. Новые материалы на магниевой основе и высокоресурсные технологии их производства // *Технология легких сплавов*. 2007. №2. С. 28–34.
8. Никитинский А.М. Пайка алюминия и его сплавов. М.: Машиностроение, 1983. 192 с.
9. Графас Н.И., Беляев А.И. Некоторые свойства расплавленных солевых флюсов и их роль при плавке и рафинировании расплава // *Цветная металлургия*. 1959. №4. С. 27–31.
10. Альтман М.Б., Лебедев А.А., Чухров М.В. Плавка и литье легких сплавов. М.: Металлургия, 1969. 680 с.
11. Рабкин Д.М. Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов. Киев: Наукова думка, 1986. 256 с.
12. Harvey I. The brazing of aluminium. Part II // *Welding and Metal Fabrication*. 1978. Vol. 46. No. 1. P. 51–54.
13. Jordan M.F., Milner D.R. The removal of oxide from Aluminium by brazing fluxes // *Journal Institute of Metals*. 1956. Vol. 85. No. 2. P. 315–316.
14. Петрунин И.Е., Лоцманов С.Н., Николаев Г.А. Пайка металлов. М.: Металлургия, 1973. 281 с.
15. Сторчай Е.И. Флюсовая пайка алюминия. М.: Металлургия, 1980. 124 с.
16. Никифоров Г.Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. М.: Машиностроение, 1972. 264 с.
17. Никитин В.М., Никитина Е.В., Силантьева С.А., Райков С.В. Влияние подготовки поверхности при аргоно-дуговой сварке листов из сплава АМг6 // *Сварка цветных сплавов: межвузов. сб. научн. тр.* Тула, 1985. С. 44–49.
18. Данков П.Д., Игнатов Д.Б., Шишаков Н.А. Электронно-графические исследования окисных и гидроокисных пленок на металлах. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 200 с.
19. Каблов Е.Н., Морозов Г.А., Крутиков В.Н., Муравская Н.П. Аттестация стандартных образцов состава сложнелегированных сплавов с применением эталона // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 9–11.