



ФЛЮСОВАЯ ДУГОВАЯ ПАЙКА АЛЮМИНИЯ С ОЦИНКОВАННОЙ СТАЛЬЮ

В. Ф. ХОРУНОВ, О. М. САБАДАШ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11, E-mail: office@paton.kiev.ua

Работа посвящена исследованию процессов при флюсовой дуговой пайке на постоянном токе нахлесточных тонколистовых соединений алюминия с оцинкованной сталью. В экспериментах использовали алюминий АД1, оцинкованную сталь 08Ю и реактивный флюс солевой системы $KF-AlF_3-K_2SiF_6-KZnF_3$. Показано, что при пайке без прохождения припоя через дуговой промежуток реактивный флюс системы $K-Al-SiF$ улучшает условия формирования нахлесточных соединений (смачивание, растекание и заполнение капиллярных зазоров алюминиево-кремниевым припоем) алюминия с оцинкованной сталью за счет быстрого разрушения пленки оксидов и образования слоев из легкоплавких металлических расплавов в месте пайки вследствие реакций флюса с паяемыми материалами. Установлено, что при пайке в условиях дугового нагрева скорость растекания припоя по оцинкованной стали примерно в 3 раза выше, чем по алюминию. Неравномерный угол смачивания на оцинкованной стали составляет $28...33^\circ$, а на алюминии — $8...10^\circ$. Приведены данные о структуре паяных соединений, составе отдельных фаз и химической неоднородности соединений. Согласно результатам микрорентгеноспектрального анализа на контактной границе со сталью образуется переходный слой переменного состава системы $Al-Fe-Si$ толщиной $2...5$ мкм, в котором присутствуют небольшие количества марганца (из стали) и цинка (из покрытия). Показано, что соединения сплава АД1 с оцинкованной сталью 08Ю, паянные алюминиево-кремниевым припоем, равнопрочны алюминиевому сплаву. Нахлесточные соединения допускают загиб на угол 180° , а при многократном перегибе ($5...6$ раз) разрушение происходит по алюминию. Библиогр. 23, табл. 2, рис. 5.

Ключевые слова: алюминий, оцинкованная сталь, дуговая пайка, реактивный флюс, растекание припоя, реакционный слой, паяные соединения

Снижение массы конструкций при одновременном повышении их механических характеристик является одной из главных задач создания экономичных и надежных летательных аппаратов и наземной техники. Тонколистовые конструкции из алюминия и стали отличаются высокой конструктивной прочностью и коррозионной стойкостью, легче в два раза стальных, используются в сложных условиях воздействия знакопеременных нагрузок, температуры и агрессивной среды. В качестве примера можно привести автомобилестроение, где уменьшение массы позволяет повысить эксплуатационный ресурс, достичь существенной экономии топлива и уменьшить негативное влияние на окружающую среду. При этом одним из главных направлений уменьшения массы кузова автомобиля является применение высокопрочных сверхнизкоуглеродистых сталей [1] с алюминиевым или цинковым коррозионностойким покрытием и алюминиевых сплавов. Решение этой задачи связано с рядом сложных проблем. Сталь и алюминий значительно отличаются по физико-механическим (температуре плавления, коэффициенту термического расширения, теплоемкости, прочностным характеристикам) и химическим свойствам (предельная растворимость железа в твердом алюминии соответствует $0,03...0,05$ при эвтектической температуре [2, 3]),

что создает определенные трудности для получения прочных соединений.

Методы сварки алюминиевых сплавов со сталью в твердой фазе взрывом [4] и трением [5] из-за специфики тонколистовых конструкций находят ограниченное применение. В процессах сварки плавлением взаимодействие стали с алюминием в жидкой фазе является причиной формирования переходного слоя из хрупких интерметаллидных фаз системы $Al-Fe$, низкой прочности, пористости и образования трещин в сварных соединениях. Во избежание появления кристаллизационных трещин при сварке листов толщиной $3...4$ мм доля хрупких фаз в сварочной ванне не должна превышать 10 мас. % [6]. Альтернативой технологии дуговой сварки плавлением могут быть современные процессы ТИГ сваркопайки [7], сварки лазером [8, 9], модифицированной МИГ сваркопайки (СМТ процесс) [10–12] с локальным расплавлением алюминия или высокотемпературной пайки (лазером [13], МИГ процесс [14], сжатая дуга [15]), отличающимися меньшим тепловложением. Низкий уровень термомодеформационного воздействия в месте пайки благодаря малому тепловложению и высокая коррозионная стойкость соединений за счет сохранения цинкового покрытия являются основными преимуществами дуговой пайки. Причины, препятствующие широкому использованию дуговой

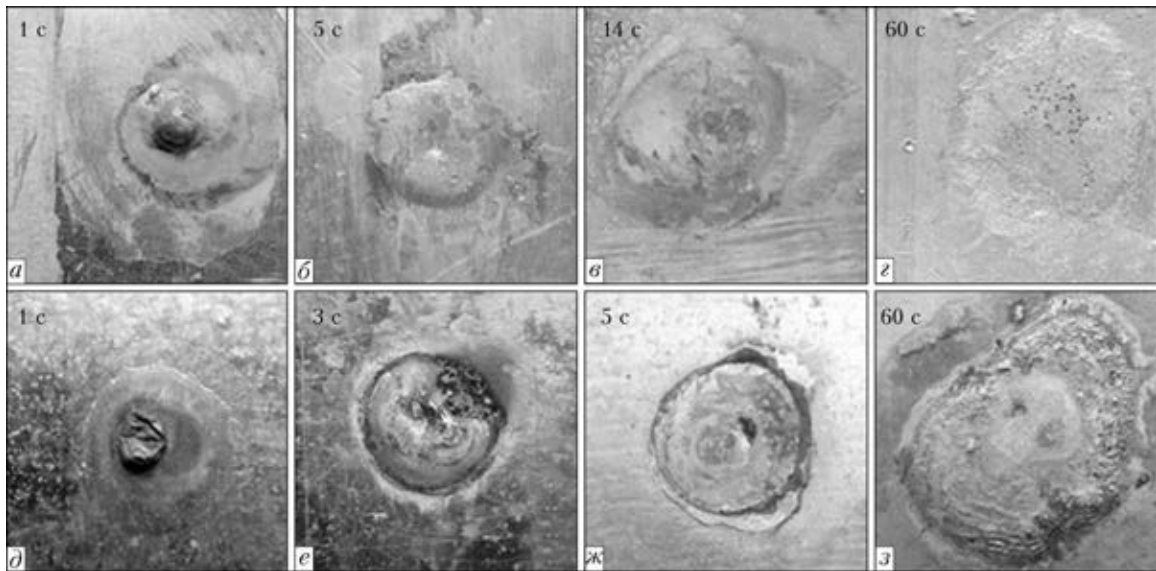


Рис. 1. Капли застывшего припоя системы Al–12Si на алюминии АД1 (а–д) и оцинкованной стали 08Ю (е–ж): а–д — АД1; е–ж — сталь 08Ю (дуговая пайка в аргоне, $I_{п} = 25$ А, $T_{п} = 600...615$ °С, аппарат MASTERTIG MSL™ 2300 ACDC фирмы «Kemppi», Финляндия); з — сталь (печная пайка в азоте, $T_{п} = 600 \pm 3$ °С)

пайки в изготовлении прочных тонколистовых конструкций, в большей части связаны с трудностями в достижении высокого качества соединений. Это можно осуществить путем применения сварочных установок с обратной связью и малым тепловложением [16].

Для разных типов (нахлесточное, тавровое, стыковое) соединений тонколистовой оцинкованной стали с алюминием используют алюминиевые припои системы Al–Si. При растекании алюминия [17] и алюминиево-кремниевых расплавов [18] по углеродистой стали в результате реакционной диффузии на контактной границе образуется переходный слой (ПС) металлической системы Al–Fe–Si, тормозящий растекание и приводящий к его полной остановке. В то же время известно, что при высокотемпературной пайке алюминия [19] и его сплавов с нержавеющей сталью [20, 21] реактивные смеси солевой системы $KF-AlF_3$, содержащие добавки гексафторсиликата калия и калий-цинкфторида, активно разрушают (растворяют) оксиды, образуют (из восстановленных кремния и цинка в составе фторидов) на алюминии слой легкоплавкого сплава Al–Si(Zn), который улучшает растекание и капиллярные свойства готового припоя.

Активирование процессов смачивания, растекания и улучшения капиллярных свойств алюминиевых припоев может быть осуществлено и при дуговой пайке за счет использования реактивных фторидных флюсов солевой системы $KF-AlF_3$. В настоящей работе при проведении экспериментов использовали некоррозионно-активный флюс ФАФ 540, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона [22].

В условиях ТИГ процесса смачивание паяемых материалов (алюминия АД1 и оцинкованной ста-

ли 08Ю) жидким припоем и активность флюса ФАФ 540 солевой системы $KF-AlF_3-K_2SiF_6-KZnF_3$ оценивали по площади растекания навески (массой 0,17 г) алюминиево-кремниевое сплава (Al–12 % Si). Аргонодуговую горелку устанавливали в центре образца так, чтобы дуга возбуждалась на навеску припоя. Температурный интервал пайки 600...615 °С задавали значением постоянного тока прямой полярности и временем выдержки. Подача защитного газа (аргона марки А) в зону пайки составляла 6...9 л/мин.

Значительное различие физико-химических свойств алюминия и стали, наличие цинкового покрытия на стали, локальный нагрев, кратковременное взаимодействие жидкой и твердой фаз в процессе пайки оказывают значительное влияние на растекание припоя.

Установлено, что в относительно равных временных интервалах и режимах дугового нагрева скорость перемещения периметра капли припоя и соответственно площадь растекания припоя по оцинкованной стали больше, чем по алюминию (рис. 1).

Кинетика растекания припоя связана со сложными процессами химического взаимодействия солевого и металлического расплавов на контактной границе с алюминием и оцинкованной сталью. Смачивание жидким припоем и растекание его по оцинкованной стали улучшается при разрушении поверхностной пленки оксидов (в результате химического взаимодействия с соевым расплавом) и распределении припоя по перегретому (примерно 200 °С выше температуры плавления) цинковому расплаву. При этом жидкотекучесть припоя незначительно изменяется при растворении в нем всего металла покрытия. Сог-

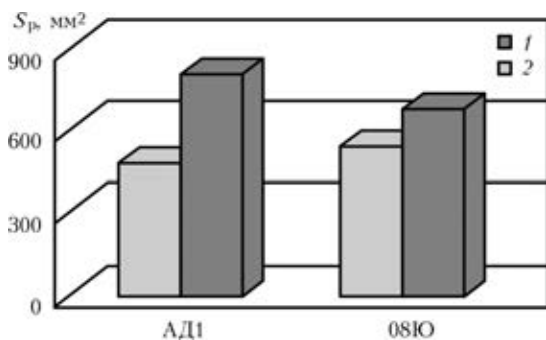


Рис. 2. Площадь растекания S_p припоя системы Al–12Si при флюсовой дуговой (1) и печной (2) пайке

ласно работе [23] жидкотекучесть алюминиевых сплавов с 7...11 % Si и 8...15 % Zn такая же, как и у промышленных силуминов, а механические свойства выше и зависят от содержания цинка, тогда как образование на межфазной границе со сталью ПС металлической системы Al–Fe–Si, как уже упоминалось, тормозит и останавливает растекание припоя.

Максимальная площадь растекания припоя на поверхности оцинкованной стали составляет $S_p = 540 \text{ мм}^2$ за время $t = 5 \text{ с}$ при установленном режиме (сила тока $I_{п} = 25 \text{ А}$, напряжение $U_{п} = 12 \pm 0,3 \text{ В}$) дугового нагрева. На тех же режимах пайки сравнимая площадь растекания ($S_p = 560 \text{ мм}^2$) припоя на алюминии может быть получена при большем (примерно в 3 раза) времени и локальным проплавлением этого материала (рис. 2).

При постоянной интенсивности теплоотдачи источника, ввиду высокой теплопроводности и теплоемкости алюминия, требуется большее количество тепла для получения одинаковой по сравнению со сталью площади растекания припоя. В неизотермических условиях растекание припоя по алюминию ограничивается областью существования тонкого слоя металлического расплава, по которому распределяется припой. Поэтому площадь растекания припоя при неравновесном дуговом нагреве существенно меньше (рис. 2), чем при равновесном процессе пайки в печи с высокой равномерностью температурного поля и максимально допустимом перепаде температуры $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ по алюминиевому изделию. Не-

равновесный угол смачивания на оцинкованной стали составляет 28...33, а на алюминии — 8...10°.

Наиболее распространенным типовым соединением тонколистовых конструкций из алюминия и оцинкованной стали является нахлесточное соединение. Механические характеристики этого типа соединения повышаются с увеличением перекрытия (напуска кромок) тонких листов и качества заполнения припоем зазора с обязательным формированием галтелей вогнутой формы. Флюсовую дуговую пайку нахлесточных образцов из алюминия с оцинкованной сталью выполняли на пластинах толщиной 1 мм с установленным перекрытием кромок 2...6 мм. В качестве паяльных материалов использовали присадочную проволоку АК12 и некоррозионно-активный реактивный флюс ФАФ 540. Алюминиевые пластины перед пайкой подвергали травлению в водных растворах: щелочи (15 % NaOH) и смеси кислот (2 об. % HF и 20 об. % HNO₃), стальные обезжировали ацетоном. В месте пайки на алюминиевую пластину наносили слой флюса (50%-ю водную суспензию). Пайку нахлесточных соединений алюминия с оцинкованной сталью выполняли на предварительно подготовленных пластинах. Влияние режимов дуговой пайки оценивали по качеству формирования, микроструктуре и химической неоднородности швов, способности паяных образцов к загибу на угол 180°, перегибу, кратковременной прочности паяных соединений при комнатной температуре.

Исследования процесса флюсовой дуговой пайки на постоянном токе прямой полярности алюминия с оцинкованной сталью позволили установить оптимальные режимы процесса формирования нахлесточных соединений (табл. 1).

Характерной особенностью техники флюсовой дуговой пайки является возбуждение короткой дуги и ведение ее по расплаву тонкого реакционного слоя на поверхности алюминия, примерно на расстоянии 2...3 мм от стыка, что позволяет уменьшить термическое воздействие на паяемые материалы и сохранить целостность цинкового покрытия. Подача присадочной проволоки осуществляется перед дугой под достаточно малыми уг-

Т а б л и ц а 1. Ориентировочные режимы флюсовой дуговой пайки тонколистового (1 мм) алюминия АД1с оцинкованной сталью 08Ю

$D_{пр}$, мм	$I_{п}$, А	$U_{п}$, В	$v_{п}$, мм/с	Схема ТИГ процесса
1,6	47...50	9...11	12	
1,2	24...26	8...10	1,5...2,0	

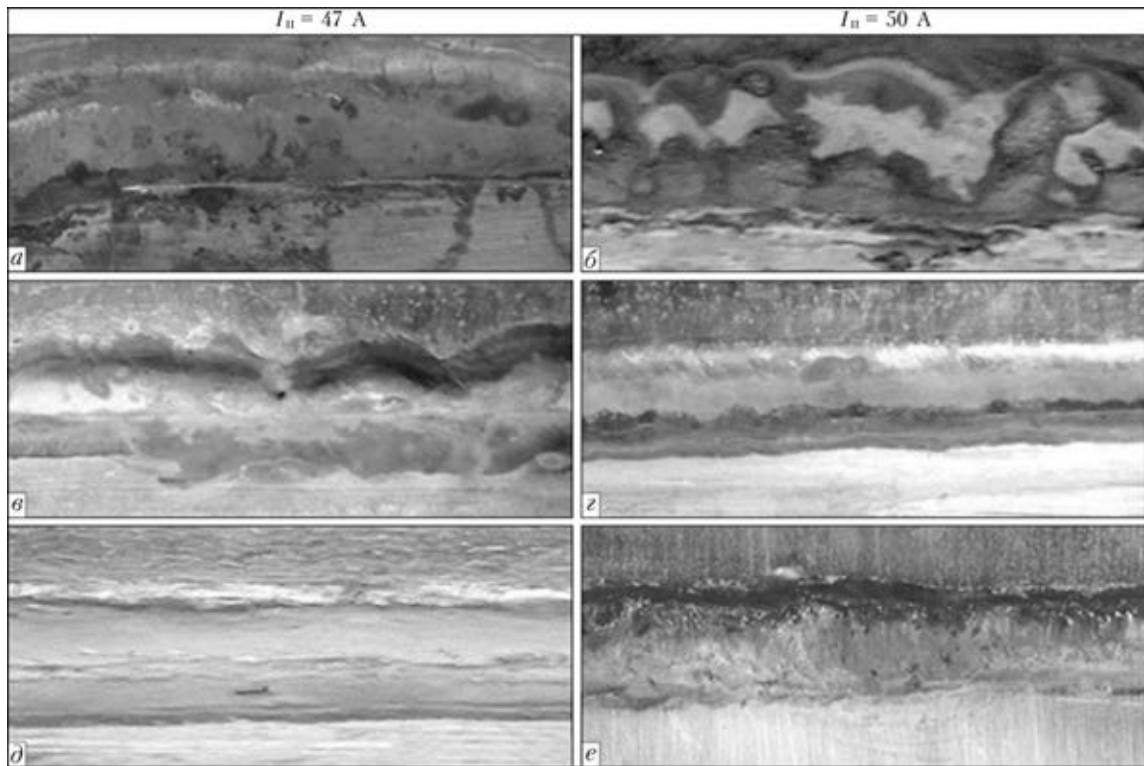


Рис. 3. Внешний вид соединений ($\times 2$) оцинкованной стали 08Ю с алюминием АД1, полученных при флюсовой дуговой ($v_p = 12$ мм/с) пайке: а, б — избыток флюса ($G_{\text{ф}} = 30$ г/м²); в, г — недостаток, д, е — оптимальный расход ($G_{\text{ф}} = 7 \dots 10$ г/м²)

лами, так, чтобы расплавление ее происходило в тонком слое металлического расплава. Оптимальные условия формирования паяного шва достигаются при плавлении присадки в относительно малом объеме жидкого металла реакционного слоя, растекании избытка расплава в зону более высокой температуры и быстром заполнении под действием капиллярных сил паяльного зазора. Это критическое условие обеспечивает установившийся процесс формирования паяного соединения при поддержании одинаковой температуры на кромках листов из соединяемых материалов. Надежность защиты в процессе пайки обеспечивается при расходе аргона марки А, равном 8...10 л/мин, и диаметре сопла горелки 10...12 мм.

Для обеспечения хорошего формирования швов (рис. 3, а, е) расход флюса строго ограничивается и выбирается в зависимости от режима пайки.

Нарушение устойчивого процесса плавления присадочной проволоки, связанное с изменением расхода флюса (отклонением от оптимального), приводит к нерациональному распределению припоя в паяном соединении: наплывам металла на кромку (см. рис. 3, а, б), непропаям (см. рис. 3, в, г) и другим дефектам паяных соединений. Налесточные сталеалюминиевые соединения, полученные при флюсовой дуговой пайке на оптимальных режимах, отличаются полным заполнением припоем переменного зазора при ширине перекрытия 5...6 мм. При этом паяные швы, как

правило, сегментной формы и имеют гладкую поверхность и плавные переходы к алюминию и стали (см. рис. 4). На обратной стороне стыка (участок галтели) припой образует вогнутый мениск с радиусом менее 0,5 мм. Гладкая поверхность шва с плавными галтелями способствует снижению концентрации напряжений, что особенно важно при изготовлении жестких узлов конструкций из этих разнородных металлов.

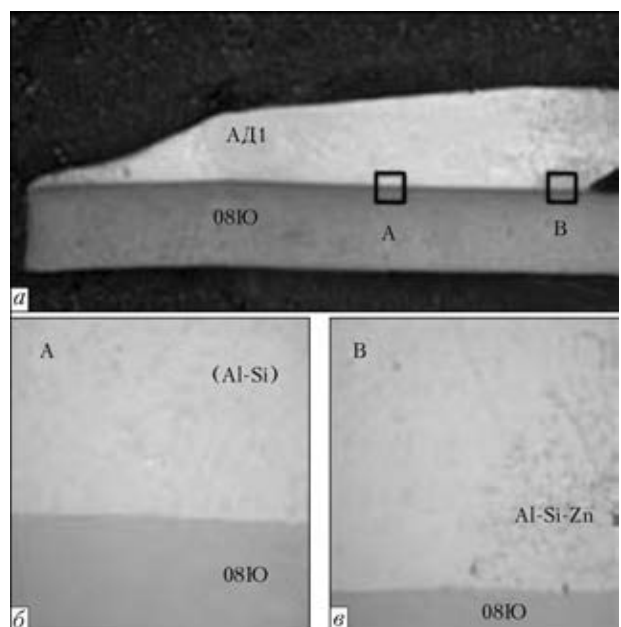
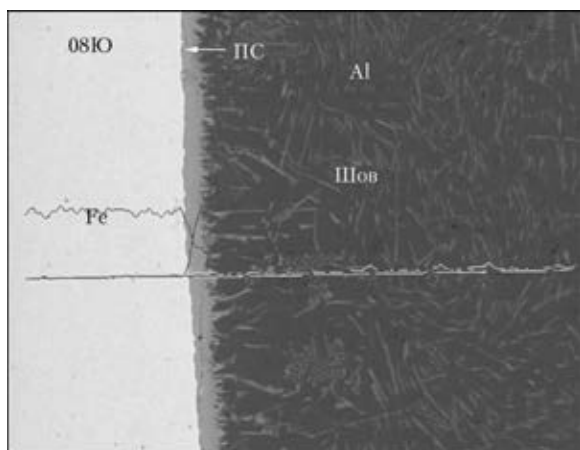


Рис. 4. Макро- (а, $\times 10$) и микроструктуры (б, в, $\times 400$) паяного соединения алюминия АД1 с оцинкованной сталью 08Ю



Таблица 2. Содержание элементов (мас. % в микрообъемах) в паяном соединении сплава АД1 с оцинкованной сталью 08Ю

Участок соединения	Al	Si	Mn	Fe	Zn
08Ю	—	—	0,32	99,68	—
ПС (~5 мкм)	65,58...59,93	5,11...4,75	0,12...0,09	29,20...34,89	0...0,35
Шов (матрица)	93,57...94,30	4,56...4,04	—	1,39...1,24	0,48...0,42

Рис. 5. Микроструктура ($\times 350$) и распределение элементов в паяном соединении алюминия АД1 с оцинкованной сталью 08Ю (микроскоп CamScan)

Паяные соединения алюминия АД1 с оцинкованной сталью 08Ю, полученные в неизотермических условиях (ТИГ процесс $I_{\text{п}} = 24 \text{ A}$, $v_{\text{п}} = 1,5 \text{ мм/с}$), имеют неоднородную структуру (рис. 4, 5).

Контактная граница с алюминием извилистая со следами глубокого (примерно до 180 мкм) межзеренного проникновения эвтектической фазы (Al + Si) в паяемый алюминиевый сплав. Центральную часть шва занимает α -твердый раствор на основе алюминия, в межзеренных прослойках которого расположена пластинчатая дисперсная эвтектика (Al + Si) (рис. 4, а — серые, рис. 5 — светлые ячейки). При исследовании химического состава галтели (см. рис. 4, в) выявлена тенденция легирования паяного шва цинком (образование сплава системы Al-Si-Zn) и увеличение его до 20 мас. % в периферийных участках, граничащих с цинковым покрытием. Согласно результатам микрорентгеноспектрального анализа на контактной границе со сталью образуется ПС переменного состава системы Al-Fe-Si (рис. 5, табл. 2) толщиной от 2 до 5 мкм, в котором присутствуют небольшие количества марганца (из стали) и цинка (из покрытия).

Диффузионная пористость и флюсовые включения в области ПС и паяном соединении алюминия с оцинкованной сталью не обнаружены. Не выявлено также заметных структурных изменений в стали.

Паяные нахлесточные соединения допускают загиб на угол 180° , а при многократном перегибе

(5...6 раз) разрушение происходит по алюминию. Испытания на растяжение при комнатной температуре показали, что соединения сплава АД1 с оцинкованной сталью 08Ю, паянные алюминиево-кремниевым припоем, равнопрочны алюминиевому сплаву.

Выводы

1. Активные слои расплавов (алюминиево-кремниевое и цинковое) существенно улучшают капиллярные свойства припоя, что позволяет соединять тонколистовой алюминий с оцинкованной сталью с большим (до шести толщин) перекрытием.

2. На основании полученных результатов установлены режимы дуговой пайки, обеспечивающие быстрое разрушение (растворение) оксидов, устойчивое плавление, растекание и полное заполнение припоем зазора.

3. В неравновесных условиях на контактной границе со сталью образуется интерметаллидный слой системы Al-Fe-Si шириной 2...5 мкм. Цинк в паяном шве в основном содержится в алюминиевом твердом растворе.

4. Кратковременными испытаниями на срез установлено, что паяные нахлесточные соединения равнопрочны алюминиевому сплаву.

1. *Ductility of interstitial-free steel under high strain rate tension: Experiments and macroscopic modeling with a physically-based consideration* / M. Kuroda, A. Uenishi, H. Yoshida, A. Igarashi // *Int. J. Solids and Struct.* — 2006. — 43. — P. 4465–4483.
2. *Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов: Пер. с англ.* — М.: Металлургия, 1979. — 640 с.
3. *Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник в 3-х т.* / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. — М.: Машиностроение, 1997. — Т. 2 — 1024 с.
4. *Han J. H., Ahn J. P., Shin M. C. Effect of interlayer thickness on shear deformation behaviour of AA5083 aluminum alloy/SS41 steel plates manufactured by explosive welding* // *J. Mat. Sci.* — 2003. — 38. — P. 13–18.
5. *Friction welding process of 5052 aluminium alloy to 304 stainless steel* / S. Fukumoto, H. Tsubakino, K. Okita et al. // *Mat. Sci. and Techn.* — 1999. — 15. — P. 1080–1086.
6. *Рябов В. Р., Рабкин Д. М. Сварка разнородных металлов и сплавов.* — М.: Машиностроение, 1984. — 239 с.
7. *Брукнер Й. Дуговая сварка стали с алюминием* // *Автомат. сварка.* — 2003. — № 11. — С. 185–187.
8. *Dissimilar material joining using laser (aluminum to steel using zinc-based filler wire)* / A. Mathieua, R. Shabadib, A. Deschamps et al. // *Optics & Laser Technology.* — 2007. — 39. — P. 652–661.
9. *Gap-free fibre laser welding of Zn-coated steel on Al alloy for light-weight automotive applications* / Hui-Chi Chen,

- A. J. Pinkerton, Lin Li et al. // *Mater. and Design*. — 2011. — 32. — P. 495–504.
10. *The arc characteristics and metal transfer behaviour of cold metal transfer and its use in joining aluminium to zinc-coated steel* / H. T. Zhanga, J. C. Feng, P. Heb et al. // *Mater. Sci. and Eng. A*. — 2009. — 499. — P. 111–113.
 11. *Interfacial microstructure and mechanical properties of aluminium-zinc-coated steel joints made by a modified metal inert gas welding-brazing process* / H. T. Zhang, J. C. Feng, P. He, H. Hack // *Materials Characterization*. — 2007. — 58. — P. 588–592.
 12. *Dissimilar metal joining of steel to aluminum using the arc heat source* / Y. Kim, K. Park, Y. Kim, S. Kim // *Mater. Sci. Forum Vols*. — 2012. — 706-709. — P. 2974–2979.
 13. *Laser brazing of a steel/aluminium assembly with hot filler wire (88% Al, 12% Si)* / A. Mathieu, S. Pontevicci, Jean-Claude Viala et al. // *Mater. Sci. and Eng. A*. — 2006. — 435-436. — P. 19–28.
 14. *Dissimilar metal joining of aluminum to steel by MIG arc brazing using flux cored wire* / M. Taichi, N. Kazuhiro, H. Tong, U. Masao // *ISIJ International*. — 2003. — 43, № 10. — P. 1596–1602.
 15. *Plasma arc brazing: a low-energy joining technique for sheet metal* / U. Draugelates, B. Bouaifi, A. Helmich et al. // *Welding J*. — 2002. — 81, № 3. — P. 38–42.
 16. *Siewert T., Samardzic I., Klaric S. Application of an on-line weld monitoring system* // 1st Intern. conf. on advanced technologies for developing countries, Slavonski Brod, Croatia, Sept. 12–14, 2002. — P. 1–6.
 17. *Кинетика растекания алюминия на железе* / В. Н. Еременко, Н. Д. Лесник, Т. С. Пестун, В. Р. Рябов // *Физическая химия поверхностных явлений в расплавах*. — Киев: Наук. думка, 1971. — С. 203–206.
 18. *О кинетике растекания алюмокремниевых расплавов по железу* / В. Н. Еременко, Н. Д. Лесник, Т. С. Пестун, В. Р. Рябов // *Смачиваемость и поверхностные свойства расплавов и твердых тел*. — Киев: Наук. думка, 1972. — С. 39–41.
 19. *Khorunov V. F., Sabadash O. M., Andreiko A. A. Investigation of fusibility and chemical interaction in the K, Al, Si/F salt system fluxes for high-temperature brazing of aluminium* // Intern. conf. «Brazing, high temperature brazing and diffusion welding». — Aachen, Germany, May, 1998. — P. 200–202.
 20. *Сабадаш О. М., Хорунов В. Ф. Материалы и технология флюсовой пайки алюминия и алюминия с нержавеющей сталью* // *Автомат. сварка*. — 2005. — № 8. — С. 69–74.
 21. *Хорунов В. Ф., Сабадаш О. М. Реактивный фторидный флюс для пайки алюминия и разнородных соединений* // *Адгезия расплавов и пайка материалов*. — 2006. — Вып. 39. — С. 68–75.
 22. *Сабадаш О. М., Хорунов В. Ф. Реактивный флюс для пайки алюминия* // Докл. 2-го науч.-техн. семинара «Сварка и родственные процессы в промышленности», 17 апр. 2007, г. Киев. — Киев: Екотехнологія, 2007. — С. 48–49.
 23. *Новые литейные сплавы. Цинковистые силумины* / А. А. Бочвар, З. Н. Свидерская, Н. И. Рытвин и др. — М.: ЦИИИ ЦМ СССР, 1947. — 108 с.

Поступила в редакцию 13.11.2012

РАЗРАБОТАНО В ИЭС

ТЕХНОЛОГИЯ ВОСТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ МЕТОДОМ ДЕТОНАЦИОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

В ИЭС разработана установка детонационного напыления «Перун-С» и технология нанесения покрытий для защиты от износа и коррозии и для восстановления деталей машин и оборудования в различных отраслях промышленности — авиа-, авто-, турбостроении, энергетике, нефтехимии и др.

Детонационное напыление обеспечивает получение покрытий с прочностью сцепления до 100...150 МПа при пористости менее 1 %. Одной из основных областей применения детонационного напыления является упрочнение новых и ремонт после износа различных деталей и узлов авиационной техники, в частности, упрочнение контактных поверхностей бандажных полок лопаток, лопаток компрессора, топливных форсунок и др. Результатом применения детонационных покрытий, содержащих карбиды вольфрама и хрома, является повышение срока службы изделий в 7-12 раз.

Накоплен опыт использования детонационных покрытий при восстановлении: корпуса II и III ступени газовой турбины авиационного двигателя, крышки III опоры двигателя вертолета, проставки КВД авиационного двигателя, соплового аппарата II ступени свободной турбины двигателя вертолета, антивибрационных полок лопаток АГТД. Одним из примеров служит восстановление изношенной поверхности монорельса закрылки ИЛ-76 после его эксплуатации с одновременным существенным повышением его износостойкости путем напыления покрытия из порошка механической смеси 35%WC+65%Ni-Cr-B-Si (микротвердость слоя 10500 МПа).

