

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ СО СТАЛЯМИ (Обзор)

Д. М. КАЛЕКО, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализированы современные способы сварки алюминиевых сплавов со сталью. Отмечены технологические приемы минимизации толщины интерметаллидной прослойки в соединениях, включающие нагрев металла соединения ниже температуры плавления стали, ускоренное охлаждение соединения, использование демпфирующих покрытий или прокладок.

Ключевые слова: способы сварки, алюминиевые сплавы и стали, сварные соединения, интерметаллидная прослойка, технологические приемы, тепловложение, гибридная сварка, электронно-лучевая сварка

Конструкторы и архитекторы постоянно в своей работе сталкиваются с дилеммой высокой прочности и малой массы. Решить ее можно путем комбинации прочных и легких материалов. В частности, соединение стальных и алюминиевых элементов получило широкое использование в автомобиле-, судостроении, при изготовлении пассажирских железнодорожных вагонов, а также легких строительных конструкций и декоративных элементов фасадов. При этом объединяются такие качества материалов, как прочность и коррозионная стойкость, низкая масса и легкая деформируемость.

В автомобилестроении тенденция замены стали алюминиевыми сплавами наметилась уже 25 лет назад. Подсчитано [1], что снижение массы автомобиля на 100 кг в среднем экономит 0,3 л бензина на 100 км пробега. Кроме того, при облегчении автомобиля и уменьшении соответствующих энергозатрат можно выполнить норму Европейского Союза на 2012 г. — выброс CO₂ не более 130 г/км [2]. По данным работы [3] потенциал экономии веса при использовании алюминия вместо стали составляет до 42 %. Однако фактически вследствие использования современных высокопрочных сталей эта цифра снижается до 24 %. При массовом изготовлении автомобилей сталь дает экономию стоимости, и, учитывая ее хорошую деформируемость и прочность, остается важнейшим материалом в автомобилестроении.

Европейские автомобилестроители взяли обязательство уменьшить потребление красителей, что привело к изменению конструкции кузова Audi A2 и A8, в которых он составляет почти 24 % массы автомобиля [4]. Так, в современном автомобиле из алюминия делают отдельные детали или целые узлы, как, например, моторный отсек в BMW. В Audi TT только задняя часть

кузова стальная, остальная часть выполнена из алюминиевого сплава (рис. 1).

В судостроении замена стали алюминиевыми сплавами позволяет уменьшить массу судна и понизить центр тяжести, к тому же дает такие важные преимущества, как немагничиваемость и коррозионная стойкость. Из алюминиевых сплавов изготавливают корпусные конструкции (преимущественно, легких судов), а также надстройки, рубки, мосты, кожухи дымовых труб, переборки, выгородки и др. [5]. Широкое применение алюминиевые сплавы нашли и в производстве подвижного железнодорожного состава. Так, в Европе из алюминиевых сплавов изготавливают около 80 % железнодорожных вагонов [6].

В автомобилестроении главным образом используют сплавы системы Al–Mg–Si серии 6000 с хорошими свойствами горячей окраски (сохраняют прочностные свойства при нагреве до 300 °C) [6]. В Европе для наружных деталей корпуса преимущественно применяют хорошо деформируемый сплав EN AW 6016 (Si — 1,0...1,5 %; Mg ≤ 0,25...0,6 %; Mn ≤ 0,2%; Fe ≤ 0,5%; Ti ≤ 1,15 %; остальное Al), в США — сплавы ANSI 6111 (Si — 0,9 %; Cu — 0,7 %; Mn — 0,2 %; Mg — 0,7 %; остальное — Al) и 6061 (Si — 0,6 %; Cu — 0,23 %; Mn — 0,15 %; Mg — 1,0 %; Cr —



Рис. 1. Конструкция корпуса Audi TT из разнородных металлов [4]



0,2 %; остальное Al) [6]. Для опорных рам автомобиля и других деталей, изготавливаемых с применением дуговой сварки, в настоящее время используют сплавы системы Al–Mg с содержанием магния 2...3 % [7].

Известно, что главным препятствием при соединении сталей с алюминиевыми сплавами является ничтожно малая (0,025 ат. %) растворимость железа в алюминии. При этом проблема возникает при образовании хрупких интерметаллидных фаз различного состава как при взаимодействии жидких металлов, так и в результате диффузии элементов при нагреве соединения до температур 350...400 °С, т. е. ниже температуры плавления алюминия. Заметная толщина интерметаллидного слоя играет отрицательную роль уже при охлаждении соединения из-за значительной разницы коэффициента термического расширения (1,2 — сталь, 2,3 мм/100 °С — алюминий), приводящей к появлению значительных внутренних напряжений и нередко к образованию трещин. Высокая твердость интерметаллидного слоя (до HV 1200) и низкая вязкость химического соединения металлов препятствуют релаксации термических напряжений.

Большинство проблем, связанных со сваркой алюминиевых сплавов с другими металлами, и методы их решения изложены в работе [8]. Однако за 30 лет, прошедших с момента ее написания, сварочные наука и техника предложили целый ряд технологических процессов, позволивших приблизиться к удовлетворению требований промышленности при создании гибридных соединений стали и алюминия. Некоторые из них освещены в настоящем обзоре.

Выше уже было упомянуто, что влияние хрупкой интерметаллидной зоны тем меньше, чем она тоньше. В соответствии с [9, 10] толщина этой зоны не должна превышать 10 мкм. Очевидно, что обеспечить такую толщину можно только путем ограничения нагрева стыка соединения. Все современные способы основаны на соблюдении этого условия.

Дуговая сварка. Большое внимание при изготовлении сталеалюминиевых деталей уделяется традиционным способам сварки в новом воплощении.

Сварка неплавящимся электродом соединений стали с алюминиевыми сплавами сейчас применяется редко, хотя есть сведения [11] о хороших результатах при использовании стали DC05 ($C \leq 0,06$, $Mn \leq 0,35$) толщиной 0,8 мм со сплавом EN AW 6016 толщиной 1,15 мм. Заготовки диаметром 9,5 мм показали коэффициент вытяжки 7,9. При большей деформации появляются трещины, зарождающиеся в алюминии.

Значительные успехи достигнуты при дуговой сваркопайке плавящимся электродом в инертном

газе (МИГ). Сваркопайка стали с алюминием, основанная на существенной разнице температур плавления алюминия (~ 660 °С) и стали (~ 1500 °С), позволяет создавать со стороны алюминиевого сплава сварное соединение с закристаллизовавшимся присадочным металлом, а со стороны стали — паяное. При этом процесс, естественно, следует вести таким образом, чтобы деталь нагревалась выше температуры плавления алюминиевого сплава, но ниже температуры плавления стали.

Наиболее простая форма соединений, выполняемых сваркопайкой плавящимся электродом, нахлесточная. При этом деталь из алюминиевого сплава находится со стороны плавящегося электрода, а стальная деталь преимущественно нагревается за счет теплоотвода от алюминиевой. В работе [11] показано, что при удалении оси дуги от кромки алюминиевой детали на 3 мм образование интерметаллидных фаз удается уменьшить до толщины 2...3 мкм в центральной части шва и менее 1 мкм на границе. Для достижения оптимальных свойств стыковых и нахлесточных соединений усиление шва, а также длина выхода должны соответствовать 2,5-кратной толщине листа. Статическая прочность такого соединения находится на уровне слабейшего из партнеров. Смазываемость стали алюминием улучшается цинковым покрытием на стали, что было отмечено еще В. Р. Рябовым в 1969 г. [12]. При этом жидкий алюминий растворяет цинк [13].

Влияние состава присадочных материалов на характеристики сварнопаяного соединения алюминия со сталью изучали многие экспериментаторы. Эти исследования включали испытания проволок из материала на цинковой и алюминиевой основе [10]. Показано, что применение проволоки из цинкового сплава усложняет подачу присадки и управление геометрией сварного соединения из-за низких твердости и температуры плавления материала. В то же время при этом типе присадочной проволоки уменьшалась толщина слоя интерметаллидной фазы и увеличивалась коррозионная стойкость соединения. В итоге лучшей композицией была признана проволока из $AlSi3Mn1$. Этот же металл применяли и в исследованиях [11], результаты которых приведены выше. Ранее [14] в качестве присадочного материала использовали высококремнистую проволоку из эвтектического сплава $AlSi12$. Однако незначительная разница между температурой плавления $AlSi12$ (577 °С) и температурой испарения цинка (907 °С) требует чрезвычайно точного тепловложения в шов во избежание испарения цинка с поверхности стали и соединения чистой стали с алюминием с образованием Fe_2Al_5 или $FeAl_3$. Здесь также была учтена способность кремния тормозить образование интерметаллидной фазы [12, 13].

В настоящее время присадочный материал AlSi3Mn1 применяют при сварке Cold Metal Transfer (CMT), разработанной фирмой «Фрониус» [2, 15, 16]. Система управления короткодуговым процессом обеспечивает почти бестоковый переход присадочного материала на основной алюминиевый сплав, а расплав смачивает оцинкованную сталь. Инновация этого процесса не только в том, что, благодаря очень точному управлению током короткого замыкания, может быть снижен ввод теплоты, но и в том, что, вследствие периодического изменения направления движения плавящейся проволоки, происходит хороший капельный переход расплавленного металла и может быть реализована сварка без брызг.

Были испытаны [1] сварнопаяные соединения из стали DC05 с цинковым покрытием 140 г/см² толщиной 0,8 и 1,0 мм и сплава AW 6016T4, толщина которого варьировалась от 1,15 до 1,2 мм. В качестве присадочного материала применяли сплав AlSi5, процесс вели в чистом аргоне. Оба листа располагали в одной плоскости и смещение по высоте не превышало 0,35 мм вдоль стыка. Статическая прочность соединения была равна прочности основного металла, и при толщине стали 0,8 мм соединение разрушалось по стали, а при толщине стали 1,0 мм — по ЗТВ алюминиевого сплава. В первом случае расчетное напряжение разрыва составляло 190 МПа (основной металл имел предел прочности 210 МПа у алюминиевого сплава и 280 МПа у стали), а во втором — 210 МПа. В полученных соединениях средняя толщина интерметаллидной каемки сверху, снизу и по торцу листов не превышала 5 мкм, которую авторы статьи считают не критичной.

Существенное влияние на геометрию шва и характеристики соединения имеет покрытие поверхности стального листа. Были проверены пять различных покрытий — цинк, никель, титан, алюмокремний и алюмоцинк [3]. Термостойкие покрытия из титана и никеля после соединения частично или полностью сохраняются. Титановый слой полностью препятствует образованию хрупких железоалюминиевых фаз [17], но требует повышенного тепловложения, что создает над по-

верхностью стали высокое усиление шва, что ухудшает условия деформируемости изделия.

Никелевое покрытие также препятствует росту интерметаллидных фаз. Благодаря применению флюсующих средств удалось улучшить смачиваемость поверхности стальной детали и получить плоскую геометрию шва. Все соединения с никелевым покрытием при испытании на растяжение разрушились по основному материалу алюминиевого листа.

При алюмосиликатном покрытии, позволяющем работать без флюсующих средств, образуется очень равномерная интерметаллидная фаза со средней толщиной 5 мкм. Как отмечают авторы [3], такое покрытие не имеет преимуществ перед горячим цинкованием, однако создает хорошо смачиваемые поверхности и плавный переход от шва к стальному листу, что заметно улучшает механические показатели.

Микрофотографии соединений алюминия со сталью и разными покрытиями, полученных с помощью CMT [10] (рис. 2), показывают диффузионный характер образования интерметаллидного слоя.

Одним из способов получения удовлетворительного соединения между сталью и алюминием может быть покрытие стали медью таким образом, чтобы при импульсной сварке в инертной среде получить алюминиевую бронзу со стороны алюминия [18].

Снижение плотности тепловой мощности, вкладываемой в стык, была достигнута при стыковой дуговой сварке в инертной среде давлением 600...1000 Па при соединении сталеалюминиевых трубчатых переходников в криогенном машиностроении [19, 20]. Отличительной особенностью этого процесса является диффузная форма дуги, а также относительно низкая температура катода и его интенсивное испарение при температурах, не превышающих температуру плавления при атмосферном давлении более чем на 100...300 °С. Это создает возможность получения соединений по схеме сварка-пайка без существенного проявления диффузии соединяемых металлов.

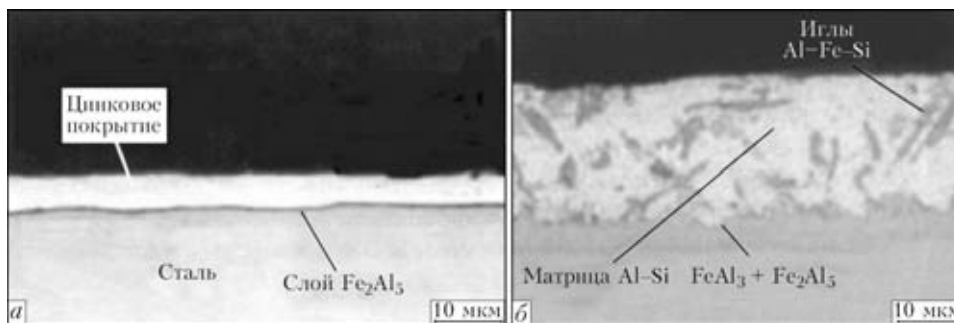


Рис. 2. Микроструктуры соединений алюминия со сталью с цинковым (а) и алюмосиликатным (б) покрытиями

Во многих конструкциях, где дуговая сварка не может быть успешно заменена более «деликатными» способами, для соединения стали и алюминия используют биметаллические переходники, получаемые различными способами, которые рассматриваются ниже.

Лазерная сварка. В настоящее время этот способ находит все более широкое применение в массовом и серийном производстве не только при создании миниатюрных соединений, но и протяженных швов в автомобилестроении. Учитывая возможность тонкого управления тепловой мощностью импульсного лазерного излучения, исследователи не обошли вниманием и этот способ сварки плавлением для соединения стали с алюминием.

При создании нахлесточных соединений нагрев неодимовым лазером ведется со стороны стали [21]. При этом стальной лист нагревается до температуры плавления алюминия, оставаясь твердым. Статическая прочность таких соединений достигает 70...90 % прочности алюминия. Как и при сварке плавящимся электродом, соединение носит сварнопаяный характер.

Прочность лазерных сварнопаяных соединений может быть повышена за счет применения присадочного металла на алюминиевой основе и

предварительного подогрева стального оцинкованного листа вторым лазерным лучом для повышения смачиваемости поверхности расплавленной присадкой [22]. При статическом испытании на растяжение нахлесточное соединение разрушалось по алюминиевому листу. Толщина интерметаллидной каемки на стальном листе не превышала критического значения (рис. 3). Фирма «Cogus RD & T» (Нидерланды) назвала такой процесс бесфлюсовой лазерной пайкой (Fluxless Laser Brasing) [23].

Разработчики технологии соединения стали с алюминием видят большие преимущества гибридной лазерно-дуговой сварки (рис. 4). Повышение скорости процесса СМТ при опережающем лазерном нагреве позволяет минимизировать образование интерметаллидных фаз и охрупчивание зоны соединения [4]. Однако при этом вступают в противоречие необходимость хорошего нагрева стали для достаточной ее смачиваемости и снижение тепловода во избежание роста интерметаллидной фазы. В Бремерском институте прикладной лучевой техники (Bremer Institut fuer angewandte Strahltechnik) удалось подбором режима излучения СО₂-лазера и сварки МИГ получить стыковые соединения листов толщиной до 3 мм с прочностью 140 МПа [24].

Скорость сварки стыкового соединения толщиной 1 мм при мощности лазера 4 кВт составляла более 100 мм/с [25].

Процесс гибридной лазерно-дуговой сварки нашел применение при изготовлении специальных биметаллических емкостей и изделий авто- и судостроения [17]. При простом изгибе характеристики таких соединений не критичны, но при глубокой вытяжке — еще не вполне удовлетворительны.

Особое место занимает другой вид гибридной сварки — лазерная сварка с приложением давления (рис. 5), которая объединяет преимущества сварки плавлением и сварки давлением [26]. В частности, можно управлять температурой поверхности раздела путем сканирования лучом. Соединение формируется в процессе сжатия лент роликами.

В экспериментах с полосами толщиной 1 мм из сплава А6061 (0,8...1,2 мас. % Mg, 0,4...0,8 мас. % Si, остальное Al) с пределом прочности более 295 МПа и холоднокатанной листовой стали SPCC (< 0,12 мас. % С, 0,5 мас. % Mn, < 0,04 мас. % Р, < 0,045 мас. % S) с пределом прочности 270 МПа лазерный луч направлялся между свариваемыми полосами, прокатываемыми через ролики, и сканировался с одной поверхностью на другую или только по одной из поверхностей, параллельно линии соединения. Этот прием позволил управлять составом металла стыка и в значительной мере подавить образование хрупких интерметаллидных соединений с помощью тер-

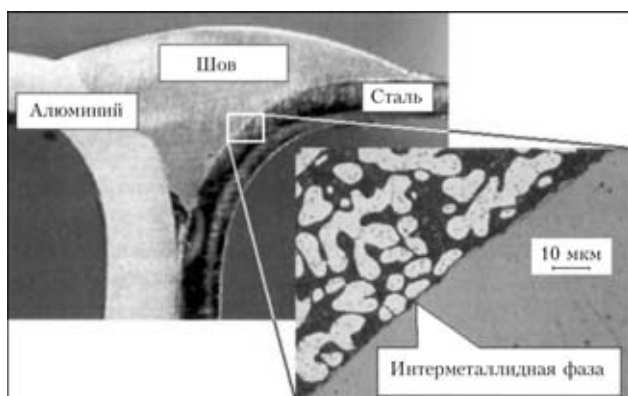


Рис. 3. Схема лазерной сваркопайки при производстве автомобилей [23]

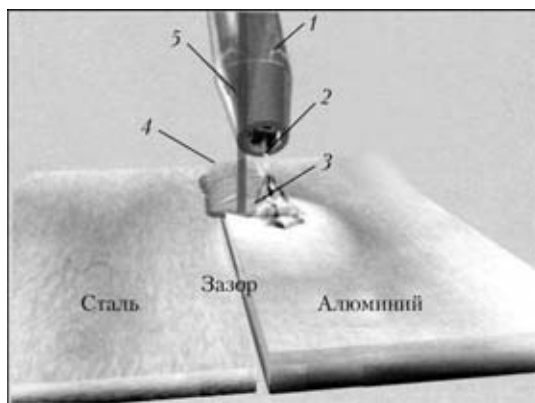


Рис. 4. Схема гибридной лазерно-дуговой сварки [17]: 1 — сварочная горелка; 2 — присадочная проволока; 3 — сварочная ванна; 4 — сварной шов; 5 — луч лазера

мического цикла из быстрого лучевого нагрева и резкого охлаждения при сдавливании роликами [27, 28]. При облучении тонколистового соединения со стороны черного металла происходит оплавление алюминиевого сплава путем теплопередачи [26]. Исследование указанных выше соединений [29] показало, что они достаточно прочные и могут использоваться при изготовлении капота и крыши автомобиля.

Нахлесточное соединение оцинкованной стали и алюминиевого сплава, полученное роликовой лазерной сваркой при мощности луча 1200...1400 Вт и давлении роликов около 3 кН [30], при испытании на срез разрушилось по алюминиевому листу. Толщина промежуточного слоя между сталью и алюминием составляла от 7 до 20 мкм. В ходе электронно-микроскопических исследований [31] установлено, что главная фаза в промежуточном слое была твердым раствором Al-Zn. По дифракции электронов в нем обнаружены интерметаллидные соединения FeAl, Fe₂Al, Fe₄Al₁₃ и Fe₂Al₅Zn_{0,4}. Авторы пришли к выводу о нагреве свариваемых полос выше температуры плавления, а прочность соединения с относительно толстым интерметаллидным слоем определяется образованием фазы Al+Zn с тонкодиспергированными интерметаллидными включениями.

Электронно-лучевая сварка. Успешные соединения алюминиевых и стальных деталей удалось достигнуть при нанесении на сталь буферных покрытий из титана [18], никеля и циркония [32].

Точечная контактная сварка. Соединение при точечной контактной сварке, как и при всех рассмотренных выше способах, происходит при совместной кристаллизации расплавленного металла соединяемых деталей. Из-за известных и упомянутых ранее причин не удается получить удовлетворительное точечное соединение стали и алюминиевых сплавов даже при сварке на конденсаторных машинах с жестким режимом разряда [33].

Выход из положения был найден благодаря применению промежуточной биметаллической ленты, полученной совместной прокаткой стали и алюминия [34]. При сварке создаются два раздельных ядра на границах алюминий-алюминий и сталь-сталь. При ограничении тепловложения можно избежать диффузионного образования интерметаллидного слоя на внутренней границе биметаллической вставки. Статические и динамические испытания таких соединений показали, что точечные соединения по прочности сравнимы с клепаными.

Прессовая сварка. Этот способ сварки был исследован применительно к соединению алюминиевых шин со стальными элементами токоввода электролизера для производства алюминия [35]. Для уменьшения вероятности образования интер-

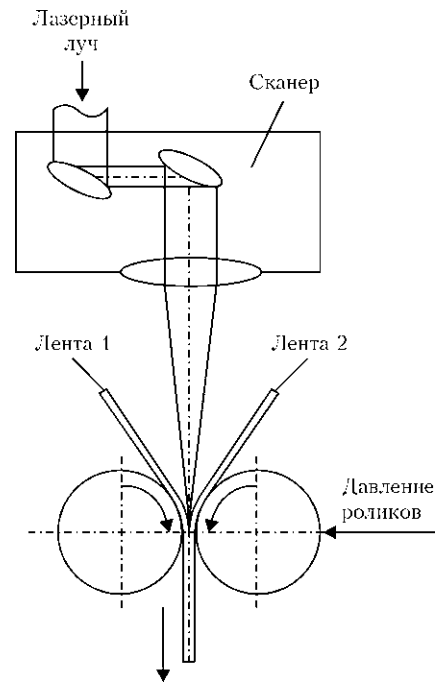


Рис. 5. Схема гибридной лазерно-прессовой сварки

металлидных соединений авторы использовали добавки мелкодисперсных порошков кремния, меди или цинка, которые обеспечивали создание эвтектической фазы с температурой плавления ниже температуры плавления алюминия. Наименьшая толщина (3...5 мкм) интерметаллидной прослойки была достигнута при использовании кремниевого порошка. При этом также наблюдалось наибольшее напряжение разрушения — 55...60 МПа.

Диффузионная сварка. Несмотря на то что процесс соединения идет без расплавления соединяемых деталей, из-за продолжительного времени контакта свариваемых материалов при высокой температуре диффузия алюминия в сталь приводит к образованию богатых алюминием (FeAl₃ и Fe₂Al₅) хрупких интерметаллидных фаз [36].

Сварка взрывом. Биметаллические соединения, полученные сваркой взрывом, широко используют на верфях Японии, Польши, США, Великобритании, Франции и других стран, как уже было замечено выше, в качестве промежуточного элемента, свариваемого известными способами (уже в однородном сочетании) с основным материалом конструкции. Настоящее состояние техники ограничивает применение сталеалюминиевых профилей простой формы с прочностью 120 МПа [24].

Нержавеющая сталь 12X18H10T была успешно сварена взрывом со сплавом АМгб через промежуточный слой АД1 [37, 38]. Граница между АД1 и нержавеющей сталью не имела типичных признаков интерметаллидных соединений, хотя и были обнаружены фазы FeAl₃ и Fe₂Al₅. Напряжение при отрыве также составило 120 МПа.



Результаты испытаний сварки сталеалюминиевых корпусных конструкций с применением биметаллических переходников позволили разработать ЦНИИ «Прометей» (С.-Петербург, Россия) технологические рекомендации по сварке стыковых, тавровых и нахлесточных соединений в производстве надводных судов малого водоизмещения, обеспечивающих требования, предъявляемые к судокорпусным материалам [5].

Сварка трением. Сварка трением чистого алюминия А0 со сталями Ст.3 и 1Х18Н9Т диаметром 16 и 20 мм уже 50 лет назад [39] продемонстрировала возможность получения удовлетворительных сварных соединений благодаря проковке, приводящей к выдавливанию возможных реактивных фаз алюминия и стали (трущаяся поверхность алюминия во время сварки находится в расплавленном состоянии) и схватыванию чистых поверхностей основных металлов. Это показали также наблюдения в электронном и рентгеновском облучении [40].

Свариваемость трением алюминиевых сплавов со сталью находится в прямой зависимости от твердости сплава. Так, сплав АМг6 практически не сваривается трением со сталью, в то время как сплав АМг3 дает со сталью вполне удовлетворительные соединения [41].

К ограничениям, предъявляемым традиционной сваркой трением, относится и требование цилиндрической формы, по крайней мере, одной из свариваемых деталей.

Для соединения же листов оказался вполне подходящим способ Friction Stir Welding (FSW), который в русскоязычной сварочной литературе получил не совсем точное название сварки трением с перемешиванием [42].

При точечной сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава А5052 с низкоуглеродистой сталью несмотря на относительно низкую температуру нагрева (ниже температуры плавления алюминиевого сплава) между соединяемыми металлами наблюдался слой интерметаллидов [43]. Однако прочность соединения на срез была относительно высокая. Покрытие стали цинком, если последний выдавливался из зоны соединения, повышало прочность [44].

Хороший результат получен при сварке FSW алюминиевого сплава с нержавеющей сталью [45]. В переходной зоне также наблюдался слой интерметаллидов, но его толщина ограничивалась лишь несколькими микрометрами.

Способы FSW и СМТ сравнивали в рамках проекта JOIN B1 [46] при сварке алюминия со сталью. Исследование металлографических шлифов энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией показало, что во всех сварных точках, как и швах, полученных при СМТ, соединения происходят через интерметаллидную фазу. При

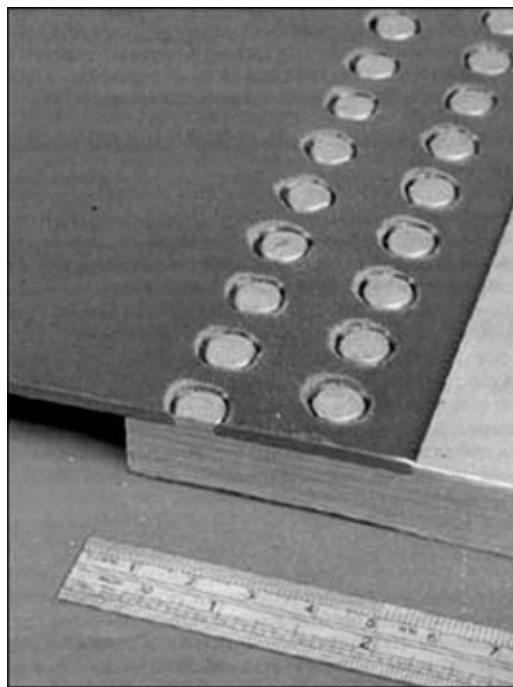


Рис. 6. Пример соединения стального и алюминиевого листов способом Stir-lock

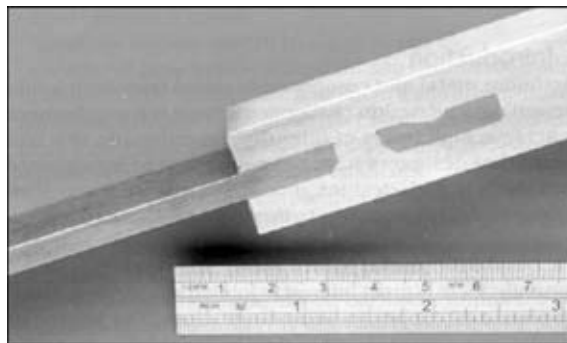


Рис. 7. Защемление способом Stir-lock перфорированного стального листа в алюминиевом

сварке по методу Фрониуса эта фаза имела очень неравномерную толщину, в то время, как при FSW, толщина была почти неизменной. Правда, она сильно зависит от положения по отношению к оси инструмента. Вблизи наконечника толщина интерметаллидной фазы относительно мала — 2,5, а на удалении достигает 12 мкм. Способ FSW был запатентован TWI (ранее UK Welding Institute) в 1991 г. В последние годы там же был разработан способ Stir-lock [47], принцип которого понятен из рис. 6.

В более твердом материале (в нашем обзоре — это сталь, но способ успешно опробован для соединения алюминия с магнием, титаном и медью) делается раззенкованное отверстие, через которое вращающимся инструментом нагревается мягкий металл. Нагретый металл под давлением выжимается в отверстие, создавая головку в свободной полости стального листа, подобную головке заклепки.

Способом Stir-lock соединение также может быть создано при использовании перфорированных вставок, как показано на рис. 7.

В данном обзоре не затронуты способы соединения стали с алюминием совместным деформированием — прокаткой, экструзией, протяжкой и т. п., поскольку они в достаточной мере традиционны и хорошо известны читателю.

Заключение

Как показывает настоящий обзор современных способов сварки алюминиевых сплавов со сталью, полностью избежать образования интерметаллидной прослойки между соединяемыми металлами при способах, использующих тепловое преобразование металлов, не удастся. Однако технологически можно создавать условия, при которых толщина этой прослойки будет минимальна, и ее влияние на характеристики соединения, таким образом, будет не критичным. К таким приемам техники сварки относятся нагрев соединения ниже температуры плавления стали (сваркопайка), ускоренное охлаждение соединения и применение промежуточных демпфирующих покрытий или прокладок. В итоге все определяется значением тепловложения, или, иными словами, температурой нагрева и временем, в течение которого детали находятся при высокой температуре.

Примером успешной сварки алюминиевой проволоки со стальными пластинами может служить ударная конденсаторная сварка [48], при которой нагретый до температуры плавления металл соединяемых материалов удаляется при осадке, а при скорости охлаждения, достигающей 10^6 К/с, температура соединений падает настолько быстро, что взаимная диффузия металлов через границу соединения практически отсутствует.

1. *Schwingverhalten* von mit modifiziertem MSG-Kurzlichtbogenprozess gefuegten Stahl-Aluminium-Mischverbindungen / U. Reisgen, L. Stein, M. Steiners et al. // Schweissen und Schneiden. — 2010. — **62**, № 7/8. — S. 396–399.
2. *Realisierte Vision: Schweissen, was nicht zu schweißen* // Schweiss- und Prueftechnik. — 2011. — № 11. — S. 155.
3. *Reisgen U., Stein L., Steiners M. Stahl-Aluminium-Mischverbindungen: Schweissen oder Loten? Die Kombination zweier etablierter Fuegetechnologien macht Unmoegliches moeglich* // Schweissen und Schneiden. — 2010. — **62**, № 5. — S. 278–284.
4. *Fuegen von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen mit energiereduzierten MSG-Verfahren und Zusatzwerkstoffen auf Aluminium- und Zinkbasis* / M. Staubach, S. Juettner, U. Fuessel, M. Dietrich // Ibid. — 2007. — **59**, № 6. — S. 302–313.
5. *Биметаллические сталеалюминиевые соединения в судостроительных корпусных конструкциях* / А. С. Орыщенко, Е. П. Осокин, В. И. Павлова, С. А. Зыков // Автомат. сварка. — 2009. — № 10. — С. 43–47.
6. *Алюминиевые сплавы — перспективный материал в автомобилестроении* / И. Н. Фридляндер, В. Г. Систер, О. Е. Грушко и др. // Металловедение и терм. обработка. — 2002. — № 9. — С. 3–9.
7. *Sasabe S. Welding properties of aluminium alloys for automotive structures* // Welding in the World. — 2004. — **48**, Special issue. — P. 53–64.
8. *Рябов В. П. Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами*. — Киев: Наук. думка, 1983. — 264 с.
9. *Brukner J. Der Cold Metal Transfer (CMT) — Prozess von Stahl-Alu Verbindungen und seine Moeglichkeiten* // Schweiss- und Prueftechnik. — 2005. — № 10. — S. 147–149.
10. *Guengoer Oe. E., Gerritsen C. Effect of filler wire composition and metallic coating on the joint performance of aluminium/steel braze-welds* // Welding and Cutting. — 2008. — **7**, № 5. — P. 303–312.
11. *Dilthey U., Brandenburg A., Hoecker F. Lichtbogenfuegen und Umformen von Verbindungen aus Stahl und Aluminium* // Schweissen und Schneiden. — 2006. — **58**, № 1. — S. 23–28.
12. *Рябов В. П. Сварка плавлением алюминия со сталью*. — Киев: Наук. думка, 1969. — 232 с.
13. *Fuessel U., Zschetsche J., Juettner S. Worum nicht Aluminium mit Stahl durch Metall-Inertgasloeten verbinden?* // Praktiker. — 2003. — № 4. — S. 120–121.
14. *Kiesche M., Prielzel H., Thomas W. Verbindungsschweißen von Stahl mit Aluminium* // ZIS-Mitteilungen. — 1973. — № 5. — S. 536–545.
15. *Bruckner J. Cold metal transfer has a future joining steel to aluminium* // Welding J. — 2005. — **84**, № 6. — S. 38–40.
16. *Trommer G. Das Beste aus zwei Werkstoffen* // Praktiker. — 2012. — № 3. — S. 58–61.
17. *Esser-Ayertey C. Hamburg ganz in Zeichen der Fuege-, Trenn- und Beschichtungstechnik* // Schweissen und Schneiden. — 2011. — **63**, № 12. — S. 728–737.
18. *Heinz E. Zwei Konkurrenten verbinden sich* // Ibid. — 2009. — № 4. — S. 214–215.
19. *Сидякин В. А., Арбузов В. М., Хорстов В. С. Стыковая сварка разнородных металлов в инертной среде низкого давления* // Мир техники и технологий. — 2009. — № 10. — С. 40–45.
20. *Структура переходной зоны соединений стали 12X18H10T с алюминиевым сплавом АД1 при сварке дугой низкого давления* / А. Н. Муравейник, И. Я. Дзыкович, В. А. Веселов, В. А. Андриенко // Сварка разнородных, композиционных и многослойных материалов: Сб. науч. тр. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1990. — С. 58–62.
21. *Schweißtechnische Einflußfaktoren bei Festigkeitsnachweisen von Druckbechtaltung* // Schweissen und Schneiden. — 2005. — **57**, № 3. — S. 71–94.
22. *Heinz E. Laserstrahlschweiß-Loeten von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen: mechanisch-technologisches Eigenschaftsprofil und mikrostrukturelle Charakterisierung* // Ibid. — 2010. — **62**, № 11. — S. 649–650.
23. *Corus develops new steel-to-aluminium welding technique* // Welding and Cutting. — 2007. — **6**, № 2. — P. 64.
24. *Kubaneck M., Janssen A. Die Verbindungs Spezialisten 2007 — Bericht ueber die Vortraege der Großen Schweißtechnischen Tagung des DVS im September 2007 in Basel Teil 2* // Praktiker. — 2008. — № 1. — S. 32–44.
25. *Vollertsen F., Thomy C. Laser-MIG hybrid welding of aluminium to steel. — A straightforward analytical model for wetting length.* — S. 1., [2009]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IIW-2041–09).
26. *Nishimoto K., Fujii H., Katoyama S. Laser pressure welding of aluminium alloy and low carbon steel* // Quarterly J. Jap. Weld. Soc. — 2004. — **22**, № 4. — P. 572–579.
27. *Kutsuma M., Rathod M., Ammar A. A laser roll bonding of mild steel to aluminium and control of intermetallic compound layer* // Proc. of ICALEO, 2002.
28. *Rathod M., Kutsuma M. Laser roll bonding of A5052 aluminium alloy and SPCC steel* // Quarterly J. Jap. Weld. Soc. — 2003. — № 2. — P. 282–294.
29. *A laser roll welding for joining of low-carbon steels to aluminium alloys* / M. Kutsuma, N. Yamagami, M. J. Rathod, H. Y. Ammar // Welding Intern. — 2006. — **20**, № 6. — P. 446–450.
30. *Mechanical properties of laser-pressure-welded joint between dissimilar galvanized steel and pure aluminium* /



- K. Nishimoto, T. Harano, Y. Okumoto et al. // *Ibid.* — 2009. — 23, № 11. — P. 817–823.
31. *HR-TEM* observation of laser pressure weld of galvanized steel and pure aluminium / K. Nishimoto, Y. Okumoto, T. Harano et al. // *Ibid.* — 2009. — 23, № 11. — P. 824–829; Laser pressure welding of aluminium and galvanized steel // *Welding of Light Metals.* — 2008. — 46, № 10. — P. 23–33.
 32. Бондарев А. А., Ищенко А. Я. Технология электронно-лучевой сварки соединений нержавеющей сталь — алюминиевый сплав // *Автомат. сварка.* — 2006. — № 12. — С. 32–35.
 33. Моравский В. Э., Ворона Д. С. Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки. — Киев: Наук. думка, 1985. — 272 с.
 34. Resistance spot welding of aluminium alloy to steel with transition material — from process to performance. Pt 1. Experimental study / X. Sun, E. V. Stephens, M. A. Khaleel et al. // *Welding J.* — 2004. — № 6. — P. 188s–195s.
 35. Корінець І.П., Сахацький В.А., Наконечний А. А. Контактне зварювання алюмінію зі сталлю з застосуванням композитного прошарку // *Зварювання та споріднені процеси і технології. Матеріали конф.* — К.: НТТУ «КПІ», 2011. — С. 29–32.
 36. Rathod M. J., Kutsuma M. Joining of aluminium alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding // *Welding J.* — 2004. — № 1. — P. 16s–26s.
 37. Мангур С. И., Шаповалова О. М., Джур Е. А. Взаимодействие нержавеющей стали и алюминиевых сплавов при сварке взрывом // *Космична наука і технологія.* — 2003. — 9, № 1. — С. 48–49.
 38. Гульбин В. Н., Николаев В. Б. Исследование структуры и свойств сваренных взрывом биметаллических соединений // *Сварка разнородных, композиционных и многослойных материалов: Сб. науч. тр.* — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1990. — С. 92–99.
 39. Гинзбург С. К., Прокофьев С. Н., Штернин Л. А. Условия образования прочного соединения при сварке трением алюминия со сталью // *Свароч. пр-во.* — 1962. — № 12. — С. 12–14.
 40. Scott M. H., Squires I. F., Met B. Metallurgical examination of aluminium-stainless steel friction welds // *British Welding J.* — 1966. — 13, № 3. — P. 151–164.
 41. Вилль В. И. Сварка металлов трением. — М.: Машиностроение, 1970. — 176 с.
 42. Третьяк Н. Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов // *Автомат. сварка.* — 2002. — № 7. — С. 12–21.
 43. Spot welding between aluminium alloy and low-carbon steel by friction stirring / K. Miyagawa, M. Tsubaki, T. Yasui, M. Fukamoto // *Welding Intern.* — 2009. — 23, № 8. — P. 559–564.
 44. Spot welding between aluminium alloy and Zn-coated steel by friction welding / K. Miyagawa, M. Tsubaki, T. Yasui, M. Fukamoto // *Ibid.* — 2009. — 23, № 9. — P. 648–653.
 45. Anders J. Verbindungen Al–Al, Al–Ti und Al–Stahl mittels Rührreibschweißen // *Schweißen und Schneiden.* — 2010. — 62, № 7/8. — S. 440–441.
 46. Schweiß- und Prüftechnik // *JOIN Sonderband.* — 2009. — S. 25–29.
 47. Trabsition joints between dissimilar materials / W. M. Thomas, D. J. Staines, I. M. Norris et al. // *Sudura.* — 2006. — 16, № 4. — S. 17–21.
 48. Калеко Д. М., Моравский В. Э., Чвертко Н. А. Ударная конденсаторная сварка. — Киев: Наук. думка, 1984. — 200 с.

Modern methods of welding aluminium alloys to steel were analyzed. Techniques of minimizing the thickness of intermetallic interlayer in the joints were noted which include heating of the joint metal below the steel melting temperature, accelerated cooling of the joint, and application of damping coatings or inserts.

Поступила в редакцию 06.07.2012

НОВАЯ КНИГА

Металлургия дуговой сварки и сварочные материалы. — Киев: Академперіодика, 2012. — 526 с. — Твердый переплет, 200×290 мм.

Сборник включает 120 статей сотрудников отдела исследований физико-химических процессов в сварочной дуге Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, опубликованных ранее, преимущественно в журнале «Автоматическая сварка», которые обобщают полувековой опыт научно-исследовательской деятельности отдела. Представленные статьи охватывают широкий круг вопросов металлургии дуговой сварки плавлением и разработки сварочных материалов.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов, занимающихся изучением металлургии дуговой сварки, разработкой сварочных материалов и технологий их производства.

По вопросам реализации просьба обращаться в редакцию журнала «Автоматическая сварка»

