

**Современное состояние контактной точечной сварки соединений «алюминий-сталь»**

Аспирант Караминадик И.

Научный руководитель - к.т.н., доцент Демченко Е.Б.

Белорусский национальный технический университет

г. Минск

Основным препятствием получения сварных соединений алюминия и его сплавов со сталями является химическое взаимодействие этих металлов, приводящее к необратимому образованию интерметаллических соединений по линии перехода. В соответствии с диаграммой состояния *Al* с *Fe* образует химические соединения: твёрдые растворы, интерметаллиды и эвтектику. Растворимость *Fe* в твёрдом *Al* весьма незначительна. Граница твёрдого раствора *Fe* в *Al* при температурах (225...600) °С находится при содержании (0,01...0,022) % *Fe*. Растворимость *Fe* в *Al* при эвтектической температуре (654 °С) составляет 0,053 %. При содержании порядка 1,8 % *Fe* (при 654 °С) образуется эвтектика *Al+FeAl<sub>3</sub>*. Это и определяет механические свойства сварных соединений.

Поэтому для сварки алюминия с другими металлами необходима разработка такого метода, при котором на границе контакта исключается появление интерметаллических соединений. Для этого используют плакированные *Al*, *Mn*, *Zn* стальные детали или прокладки в виде фольг на основе *Al-Si* и др., биметаллические прокладки *Al-Cm*, полученные самыми разными способами.

Авторы [1] проводили исследование точечной сварки импульсами с высокой плотностью тока (30...65) кА, создаваемыми разрядами конденсатора листов толщиной 1 мм из сплава *Al-2,7Mg* со сталью, плакированной сплавом *Al-30Mn* в листах толщиной 0,8 мм с размещением между ними фольги толщиной (3...100) мкм из сплава *Al-Si* (11 %). Длительность полуволны импульса 1,3 мкс, электрод диаметром 4 мм из *Cu-1Cr* сплава. Установлено, что разрушение при растяжении происходит по *Al*, а фольга при толщине более 50 мкм и *Al-Mn* покрытие при сварке расплавляются и выдавливаются из зоны контакта, что приводит к непосредственному соединению алюминиевого сплава со сталью.

В работе [2] описана сварка алюминия *Al* со сталью *Ст* с применением промежуточной прокладки из биметалла *Al-Cm*. Промежуточная прокладка в виде ленты имеет ширину (20...30) мм и толщину (1,0...1,3) мм. При изготовлении прокладки ленты *Al* и *Ст* накладывают один на другой и соединяют прокаткой. Затем выполняют прокатку с обжатием до 50 % с образованием молекулярного склеивания в зоне соединения *Al-Cm*. После прокатки выполняют термообработку в печи для снижения внутренних напряжений. При соединении деталей из *Al* со *Ст* между ними устанавливается промежуточная прокладка из *Al-Cm*, и выполняется контактная точечная сварка. Способ разработан для автомобилестроения при соединении кузова из *Al* с опорами из *Ст*. Точечные соединения после испытаний на отрыв показали хорошую работоспособность.

Авторами работы [3] разработана технология точечной сварки *Al* со *Ст* путём размещения между ними биметаллической *Al-Cm*-прокладки, полученной совместной прокаткой этих металлы с последующей термообработкой биметалла. Прокладки располагают между свариваемыми деталями таким образом, чтобы контактировали между собой одноименные металлы. Установлено, что испытания деталей на коррозию и на вибрации дали положительные результаты с целью замены в автомобилестроении стальных деталей на алюминиевые.

В работе [4] рассматривается весьма перспективное внедрение *Al*-листа в автомобилестроение. Для решения задачи исследовали технологию, которая предусматривает получение прокаткой 0,8 мм листа *Fe-Al*-биметалла, закладываемого между 1 мм листом *Al* и 0,8 мм листом стали при контакте слоёв с одноименными металлами. Затем производят контактную точечную сварку с образованием литых ядер между соединяемыми листами и соответствующим слоем биметалла. В *Al*-листе непосредственно под литым ядром наблюдается появление трещины, обусловленное, снижением прочности на отрыв в связи с образованием ин-

терметаллидного слоя на поверхности биметалла. Так как *Al* обладает меньшим, чем сталь пределом прочности на срез, разрушение происходит в *Al*.

Предложен способ контактной точечной сварки *Al* со *St* внахлестку [5], отличающийся тем, что между соединяемыми материалами помещают прокладку из биметалла, располагая рядом одинаковые материалы. Сначала пропускают ток, соответствующий необходимой для сварки *St* погонной энергии, а затем уже пропускают ток, обеспечивающий сварку *Al*. При этом при сварке *St* ток пропускают в направлении от *St* к *Al*, при сварке *Al* - наоборот. Приведено 9 примеров сварки *Al* 5083 толщиной 1 и 4 мм со *St* SUS 304 толщиной 0,8 мм и 1 мм и оцинкованной *St* толщиной 0,8 мм. Рассмотрен биметалл прокладки: чистый *Al* толщиной 1,5 и 3,5 мм, сплав *Al* 3003 толщиной 1,5 мм и *St* SUS 304 толщиной 0,3 и 0,5 мм. Приведён режим сварки: сила давления на электроды 300 кг, ток для сварки *St* (12...14) кА - 4 цикла, ток для сварки *Al* (23...25) кА - 4 цикла. Радиус кривизны рабочей поверхности электрода 100 мм. Предложенный способ сварки исключает появление дефектов сварки в виде отслоений, трещин, изменения окраски поверхности металла, деформации изделия.

Благодаря применению промежуточной биметаллической ленты, полученной совместной прокаткой стали и алюминия удалось получить удовлетворительное точечное соединение стали и алюминиевого сплава [6]. При сварке создаются два отдельных 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 клёпаными.

Были предложены несколько процессов *RSW*, основанных на использовании промежуточного слоя между алюминиевым сплавом и стальными листами. В работе [7] использовали 0,3 мм *Al*-12Si фольгу марки 4047 в качестве промежуточного слоя между оцинкованным 1,0 мм стальным листом *H220YD* и 1,5 мм листом алюминиевого сплава марки 6008. Получен тонкий слой интерметаллидных включений (*IMC*) (0,5...1,5)  $\mu\text{m}$ . Максимальное растягивающее усилие на срез составило 6,2 *kN*; однако при этом всегда имели место разрывы слоя *IMC*. В работе [8] также достигли эффективного точечного соединения при использовании тонкого промежуточного слоя сплава *Al*-20Mg, которое гарантировало лучшие прочностные свойства по сравнению с соединениями *Al*-*St* без сваренного при тех же условиях промежуточного слоя.

Следует отметить, что в большинстве случаев биметаллический промежуточный элемент (плакированный алюминией лист стали) использовался, чтобы увеличить совместимость между сталью и алюминиевым сплавом и улучшить механические свойства соединения. Чтобы достигнуть качества такого соединения, авторы работ [9-11] установили, что толщина алюминиевого покрытия должна составить (40...60) % полной толщины биметаллического элемента. Этот промежуточный элемент обычно изготавливался прессованием, прокаткой, механической сваркой.

Анализ литературных источников позволил выявить направление исследований в области контактной точечной сварки для получения изделий из разнородных материалов на основе соединения «алюминий-сталь».

### Список литературы

1. Разработка технологии соединения листов алюминия и плакированной стали. *Development of joint technology on aluminum and plated steel sheets* /Kigoguki Kukui, Masaniri Jasyuyuta, Takao Taka, Kazuhiro Ogawa //Sumimoto Search. -1997. -N59. p.35-38.
2. Сварные соединения алюминий-сталь: и это возможно. *Aluminium-Stahl-Schweissverbindungen: Und es geht doch* //Autotechnik .- 1994 .- 43, N11-12 .- p.18-19 .
3. Применение переходной [биметаллической] прокладки позволяет производить точечную сварку алюминия со сталью. *Transition material improves spot welding of aluminum to steel* //Weld J.-1994 .-73.-N6.-p.71-73.

4. Соединение [контактной сваркой] разнородных металлов с применением биметаллов. *Join dissimilar metals with clad metal //Weld. J.* -1994 .-73, N2. -p.14.
5. Способ контактной сварки внахлестку алюминия со сталью. Заявка 455066 Японии, МКИ5 В 23 К 11/11, В 23 К 11/20 / Такахаси Хидэдзи, Оути Сэзиро, Сасабэ Сэйдзи; К.к. Кобэ сэйкосё.- № 2-166512; Заявл. 25.6.90; Оpubл. 21.2.92 // Кокай токкё кохо. Сер 2(2). - 1992 .- 12 .- С.399-402 .
6. *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. -N6. -P.188s-195s.
7. Zhang, W.; Sun, D.; Han, L.; Liu, D. *Interfacial microstructure and mechanical property of resistance spot welded joint of high strength steel and aluminium alloy with 4047 AlSi12 interlayer. Mater. Des.* 2014, 57, p.186-194.
8. Ibrahim, I.; Ito, R.; Kakiuchi, T.; Uematsu, Y.; Yun, K.; Matsuda, C. *Fatigue behaviour of Al/steel dissimilar resistance spot welds fabricated using Al-Mg interlayer. Sci. Technol. Weld. Join.* 2016, 21, p.223-233.
9. Haynes, G.; Jha, B. *Joining aluminum to steel with transition material. SAE Technical Paper, 1 March 1999; No.1999-01-0660.*
10. Haynes, G.; Haynes, M.; Jha, B. *Applications for Clad Metals in the Automotive Industry; SAE Technical Paper, No.2000-01-0312; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2000.*
11. Oikawa, H.; Ohmiya, S.; Yoshimura, T.; Saitoh, T. *Resistance spot welding of steel and aluminium sheet using insert metal sheet. Sci. Technol. Weld. Join.* 1999, 4, p.80-88.