



ПРИВАРКА СТАЛЬНЫХ ШПИЛЕК К АЛЮМИНИЕВЫМ ЛИСТАМ

Д. М. КАЛЕКО

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

С учетом экономической и экологической целесообразности замены стальных конструкций сплавами алюминия в транспортном машиностроении и строительстве и связанной с этим потребности в стальном крепеже, обеспечивающем необходимую нагрузку, разработаны технология приварки стальных шпилек к алюминиевому листу и конструкция привариваемой шпильки. Показано, что применение для этого теплового барьера в виде испаряемого цинкового покрытия на торце шпильки снижает вероятность образования хрупких интерметаллидных соединений в переходном слое между стальной шпилькой и алюминиевым листом, а увеличенная поверхность приварки обеспечивает равнопрочность соединения со стальной шпилькой. Библиогр. 10, рис. 6.

Ключевые слова: сварка стали и алюминия, приварка шпилек, тепловые барьеры, покрытия

В последние годы замена стали алюминиевыми сплавами, особенно в транспортном машиностроении и отделочных работах при строительстве зданий и сооружений, находит широкое применение и позволяет снизить массу, повысить коррозионную стойкость и связанные с этим экономические и экологические достоинства продукции. При этом, естественно, возникает проблема либо крепления алюминиевых листов к несущей конструкции, либо использования поверхностей алюминиевых корпусов для навешивания на них приборов и аппаратуры, трубопроводов и электрических проводов. Как правило, это решается сверловкой отверстий, ослабляющих алюминиевый корпус, или приваркой крепежных деталей без нарушения целостности конструкции.

Одним из массовых методов присоединения крепежа к изделиям различного назначения является механизированная приварка шпилек [1]. Правда, существующие методы в основном предназначены для соединения однородных металлов.

Шпильки для массового применения, в том числе и из алюминиевых сплавов, изготавливают методом холодной высадки в соответствии со стандартом ISO 13918. Согласно этому же стандарту выбор алюминиевых сплавов ограничен алюминием Al 99,5 и сплавом AlMg3 (AMg3). Учитывая прочность материала, практическое применение шпилек из алюминиевых сплавов предполагает незначительную массу навешиваемого элемента изделия.

Нагрузку на крепеж можно повысить, применив стальные шпильки вместо алюминиевых. Однако известная проблема охрупчивания зоны сварки неразстворимыми соединениями железа и алюминия не позволяет применить стандартные

стальные шпильки и известные способы их приварки к алюминиевым изделиям.

В последние годы появились реальные методы [2] соединения стали и алюминия плавлением, которые позволили получать удовлетворительный результат при уменьшении тепловложения в процесс, главным образом в стальную деталь.

Ранее в работе [3] было показано, что приварка стальных и алюминиевых шпилек к листам из тех же материалов при разнородном их сочетании разрядом конденсаторов дает возможность получить удовлетворительные соединения благодаря кратковременности процесса. Несмотря на наличие в зоне стыка некоторого количества интерметаллидной фазы она не снижает качество соединения, поскольку не представляет собой непрерывный слой, а вкраплена в мягкую алюминиевую матрицу.

Однако при многих достоинствах, обусловленных кратковременностью разряда при конденсаторной приварке шпилек, та же кратковременность процесса требует относительно высокой точности при изготовлении шпильки и производстве работ. В частности, необходимость высокой чистоты поверхности и сохранение с высокой точностью (приблизительно $\pm 2^\circ$ для шпильки М6) перпендикулярности оси ручного инструмента – сварочного пистолета – плоскости соединения. Из геометрических соображений последнее требование возрастает при увеличении диаметра шпильки и соответственно диаметра буртика на ее привариваемом конце. Это обстоятельство сыграло важную роль при выборе способа приварки шпилек по причинам, которые вытекают из изложенного ниже.

Менее требователен по технике сварки метод приварки шпилек дугой постоянного тока корот-

ким циклом, который сопоставим по диаметрам привариваемых этим способом шпилек с конденсаторной сваркой. Благодаря существенному увеличению времени сварки (от единиц до десятков миллисекунд) удастся успешно приваривать шпильки по замасленной или окисленной поверхности при допустимой непараллельности свариваемых поверхностей до 10° . Эти особенности обусловили применение, например, в автомобильной промышленности, исключительно приварки шпилек коротким циклом. Однако использование этого метода ограничивается либо толщиной листа (более $1/4$ диаметра шпильки), либо проблемами при сварке разнородных металлов, в том числе, при сварке стальных шпилек с алюминиевым листом.

Таким образом, назрела необходимость разработки технологии соединения этих металлов методом приварки шпилек коротким циклом с учетом запросов промышленности и строительной индустрии. При этом задача разбивается на две части — предложить технологию, позволяющую избежать или значительно затруднить образование интерметаллидов железо–алюминий в металле стыка, и форму стальной шпильки, повышающую прочность соединения до требований стандарта ISO 14555 (соединение должно выдерживать изгиб шпильки на угол не менее 60°).

Как было отмечено выше, помешать образованию интерметаллических соединений железа и алюминия при сварке плавлением, к которой относится приварка шпилек, можно путем уменьшения времени взаимодействия этих металлов и обеспечения допустимого парциального состава жидкой фазы перед окончанием процесса. Наиболее благоприятны условия при минимальном содержании железа в расплаве и высокой скорости охлаждения, обуславливающей ничтожно малую взаимную диффузию элементов. Второе условие хорошо выполняется при приварке шпилек коротким циклом, поскольку энергия, вложенная в свариваемые детали, не превышает 1 кДж, и она отводится в холодные детали.

Для выполнения первого условия была предложена [4] шпилька с барьерным покрытием, которое служит для торможения плавления материала шпильки (в обсуждаемом процессе — стали) путем поглощения энергии дуги, нагревающей свариваемые поверхности.

Для исследований были выбраны два варианта широко применяемых покрытий: цинковое и хромовое, имеющих резко отличающиеся тепловые свойства. Температура испарения цинка ($906,2^\circ\text{C}$) ниже температуры плавления стали, а у хрома — выше (2672°C), но зато хром имеет значительно более высокую теплоту испарения, чем цинк (соответственно $\sim 6,6$ и $\sim 1,7$ кДж/г). Такой выбор позволил сравнить роль теплофизических

параметров — температуры и теплоты испарения — в торможении плавления металла шпильки. Последнее оценивали по микроструктурам сварных соединений.

Первую серию экспериментов проводили со стандартными (в соответствии с ISO 13918) стальными шпильками М6 без покрытия, с цинковым и хромовым покрытиями толщиной 20 мкм. Приварку коротким циклом к листу А0 толщиной 3 мм проводили на установке GLV 650 при токе около 600 А (нерегулируемый) и переменных значениях времени сварки и длины дуги, определяющей не только напряжение на дуге, но и скорость погружения шпильки в ванну расплавленного металла на поверхности листа при дугоконтактной сварке с пружинной осадкой. Сварку вели с аргонной защитой зоны соединения при расходе газа 15 л/мин во всех экспериментах.

Влияние покрытия на шпильке на характеристики дуги изучали с помощью цифрового осциллографа С9-8. Анализ осциллограмм показывает, что при использовании оцинкованных шпилек напряжение на дуге несколько повышается по сравнению с приваркой непокрытых шпилек из-за интенсивного испарения цинкового покрытия и соответствующего повышения давления в коротком дуговом промежутке.

Как видно из рис. 1, наименьшую прочность имеют соединения со шпильками без покрытия, а наибольшую при оптимальном времени сварки — оцинкованные шпильки. Хромовое покрытие не дает такой выразительный эффект, как цинковое, из-за значительно большей, чем у цинка, температуры испарения. Поэтому основной металл хромированной шпильки плавится еще до испарения покрытия, чем обуславливается увеличение объема жидкой железной фазы в стыке по сравнению с приваркой оцинкованных шпилек. Вместе с тем при увеличении продолжительности сварки выше оптимальной прочность соединений с хромированными шпильками больше, чем у не-

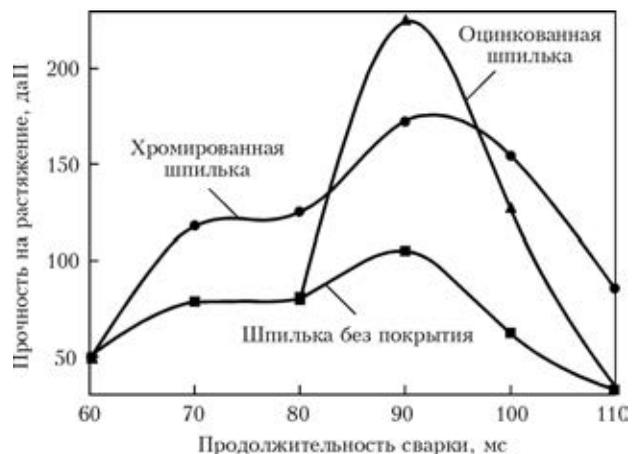


Рис. 1. Зависимость прочности сварных соединений от состава покрытия и продолжительности сварки

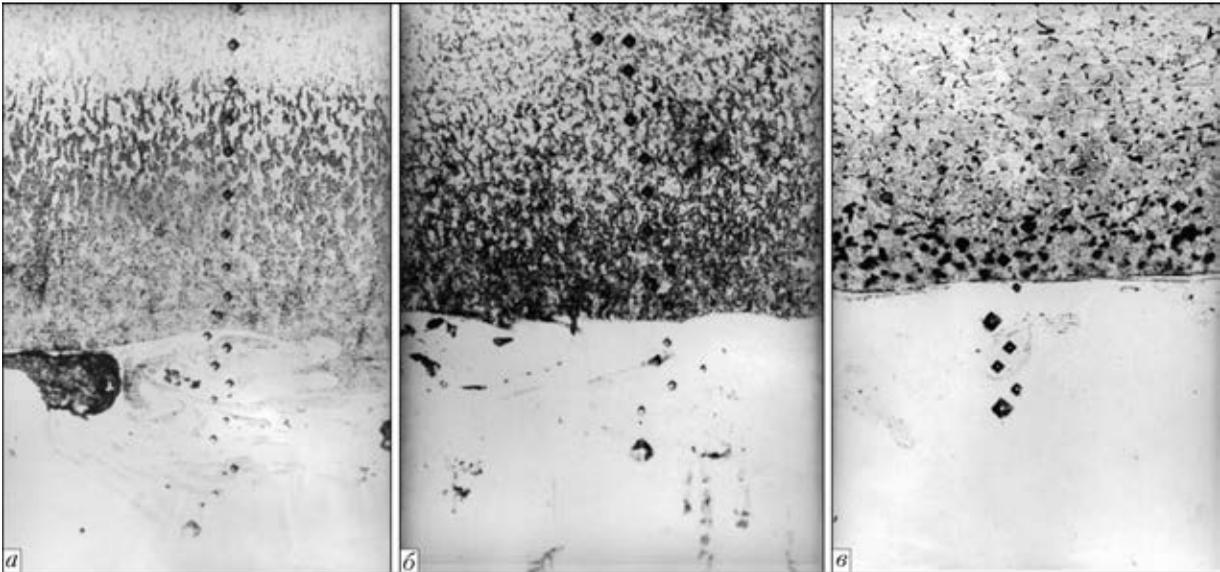


Рис. 2. Микроструктуры ($\times 200$) зоны соединений стальных шпилек М6 с алюминиевым листом толщиной 3 мм с разными покрытиями до сварки: а — без покрытия; б — хромовое; в — цинковое

покрытых, поскольку часть тепловой энергии расходуется на испарение хрома, а у оцинкованных ниже из-за того, что цинковое покрытие за это время полностью испаряется, оголяя стальную сердцевину шпильки и приводя к уравниванию прочности соединений оцинкованной и непокрытой шпильки с алюминиевым листом.

При продолжительности нагрева, меньше оптимальной, роль покрытий становится неощутимой из-за недостаточного испарения и соответственно снижения эффекта охлаждения стальной основы шпильки.

На рис. 2, где представлены микроструктуры соединений, полученных со стальной шпилькой М6 стандартной формы и разными покрытиями, хорошо видна зона термического воздействия (ЗТВ) дуги, уменьшающаяся при переходе от непокрытой шпильки к хромированной и далее к оцинкованной.

Микротвердость, измеренная при нагрузке 50 г, по линии, перпендикулярной поверхности соединений (рис. 3), показывает, что во всех случаях максимальная зафиксированная твердость в 2 раза ниже твердости интерметаллида $FeAl_3$ (9600 МПа [5]).

Таким образом, покрытие на привариваемой поверхности шпильки позволяет управлять тепловыделением в материал шпильки и получить соединение стальной шпильки с алюминиевым листом, не имеющее хрупкого интерфейса. Однако прочность такого соединения не превышает прочность алюминиевого сплава (в наших экспериментах разрушающее напряжение достигало 800 МПа).

Следует заметить, что теплорегулирующие покрытия применяли и ранее, например, алюминиевые покрытия при сварке ниобия с цирконием [6]. Однако при этом покрытие играло роль радиатора, охлаждающего ЗТВ. Легкоплавкие же гальванические покрытия (цинк, серебро) при сварке стали и алюминия плавлением предназначены для улучшения смачиваемости стали алюминием [7].

Поскольку прочность соединения, как известно, зависит от его площади (при прочих равных условиях), то для обеспечения равнопрочности соединения у стальной шпильки следует увеличить диаметр привариваемой поверхности пропорционально отношению пределов прочности на растяжение стали и алюминия. Принимая прочность стали 08, из которой в основном штампуются шпильки, равной 325 МПа [8], а прочность алюминиевого сплава АД — 60 МПа [9], получаем коэффициент увеличения диаметра стандартного буртика — 2,3. Учитывая, что в результате осадки шпильки в ванну расплавленного металла на листе вокруг буртика образуется валик, повышающий

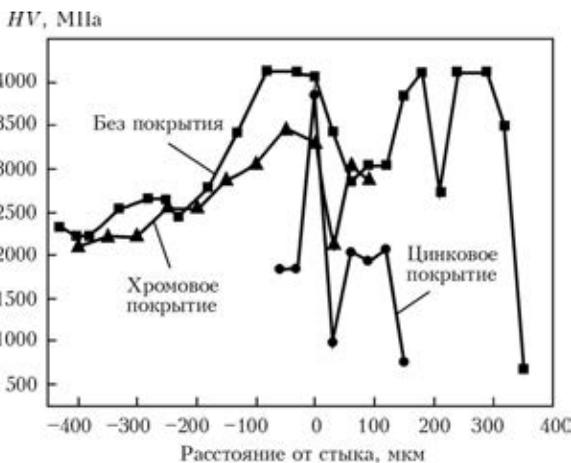


Рис. 3. Распределение микротвердости перпендикулярно плоскости соединения стальной шпильки с алюминиевым листом

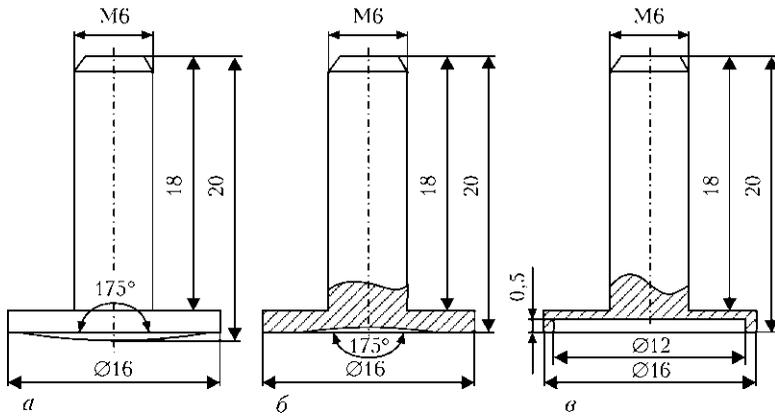


Рис. 4. Эскизы (а–в) стальных шпилек для приварки к алюминиевому листу методом короткого цикла с вращающейся дугой

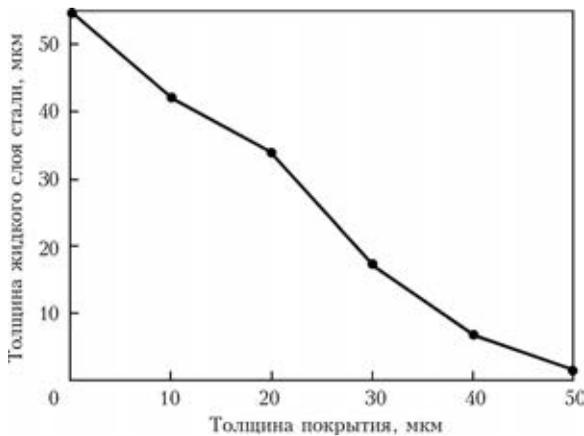


Рис. 5. Расчетная зависимость толщины расплавленного слоя стали на торце шпильки М6 стандартной формы от толщины нанесенного цинкового покрытия (продолжительность сварки 40 мс, сварочный ток 600 А)

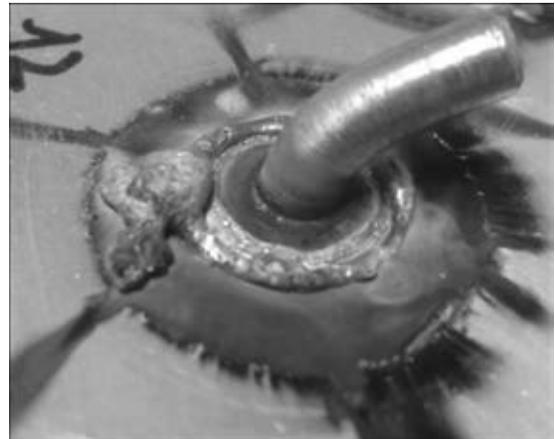


Рис. 6. Соединение стальной шпильки диаметром 6 мм с алюминиевым листом толщиной 3 мм после испытания на ударный изгиб по ISO 14555

площадь соединения, вычисленный коэффициент увеличения диаметра буртика уменьшили до 2,1. Таким образом, для получения соединения, не уступающего по прочности стальной шпильке М6, которая приваривается к алюминиевому листу, диаметр буртика должен быть увеличен с 7,5 до 16 мм.

Приварку шпилек с увеличенным диаметром к легкоплавкому алюминию целесообразно вести с вращением дуги в магнитном поле [10], что уменьшает плотность тепловыделения на листе и соответственно опасность его проплавления. Для этого были изготовлены шпилеки с различной формой привариваемой поверхности (рис. 4).

Толщину цинкового покрытия, удовлетворяющую требованию минимального, но необходимого плавления (для устранения неизбежных отклонений технологических условий от идеальных, о которых говорилось в начале статьи) стальной основы шпильки, вычисляли с помощью специально разработанной Фортран-программы. Поскольку для других металлов, кроме цинка, не были найдены сведения о зависимости теплофизических характеристик в жидком состоянии от температуры, то расчет был проведен только для цинкового покрытия.

На рис. 5 видно влияние толщины цинкового покрытия на толщину расплавленного металла тела шпильки. Понятно, что с повышением продолжительности сварки, связанной с переходом к шпилькам с увеличенным диаметром поверхности соединения, толщина покрытия должна возрастать.

Эксперименты по приварке шпилек, показанных на рис. 4, проводили на аппарате ВМК-16i фирмы «Soyer», толщина цинкового покрытия шпилек составляла 20, 30 и 50 мкм.

В соединениях с оцинкованными шпильками, которые имели ленточный выступ, наблюдалось недостаточное заплавление полости под буртиком, что, естественно, приводило к слабой прочности соединения. Соединение удовлетворительного качества (рис. 6) удалось получить при токе 970 А, напряжении на дуге 22 В, длительности импульса 0,2 с, токе магнитной катушки 1 А, длине дуги (высоте подъема шпильки) 1,5 мм.

Выводы

1. Основным условием получения прочного соединения стальной шпильки с алюминиевым листом, в чем нуждаются авто- и судостроение, а также строительная индустрия, является минимизация образования хрупкого переходного слоя,



состоящего из интерметаллидных соединений железа и алюминия. Используемые в настоящее время методы для соединения алюминиевых и стальных деталей основаны на ограничении энергии нагрева стальной детали и соответственно уменьшения содержания железа в ванне жидкого алюминия.

2. Разработан метод регулирования сварочного нагрева деталей путем нанесения на нагреваемую поверхность слоя металла, имеющего температуру испарения меньше температуры плавления основного металла. Для стальной шпильки такими материалами могут быть магний, цинк, кадмий, теллур, а также некоторые сплавы этих металлов. С экономической точки зрения преимущество имеет цинк.

3. Для получения соединения, равнопрочного со стальной шпилькой, диаметр привариваемой поверхности шпильки следует увеличивать до размера не менее чем 2,5 диаметра основного тела шпильки. Такие шпильки должны привариваться методом сварки коротким циклом с магнитным вращением дуги, что позволяет уменьшить глубину проплавления алюминиевого листа.

4. Разработана новая форма шпильки, благодаря чему удалось получить соединения, соответствующие показателям удовлетворительной прочности по ISO 14555.

Автор выражает глубокую признательность фирме «Soyer» за помощь в проведении заключительной части экспериментов.

1. Калеко Д. М. Дугоконтактная торцевая сварка шпилек и бонок // Сварщик. — 1999. — № 4. — С. 7–8.
2. Калеко Д. М. Современные способы сварки алюминиевых сплавов со сталями (Обзор) // Автомат. сварка. — 2012. — № 10. — С. 29–36.
3. Калеко Д. М., Моравский В. Э., Четверко Н. А. Ударная конденсаторная сварка. — Киев: Наук. думка, 1984. — 200 с.
4. Пат. 100452 Украина МКІ В23 к 9/20. Шпилька для торцевого приваривания / Б. С. Патон, Д. М. Калеко. — Бюл. № 24, 2012.
5. Вол А. Е. Строение и свойства двойных металлических систем. — М.: Физматгиз, 1959. — 756 с.
6. Использование теплоотводящих алюминиевых покрытий при сварке сплава циркония с 2,5 % ниобия / М. М. Нероденко, А. Б. Гончаров, В. Ф. Кирилук, А. Т. Зельниченко // Автомат. сварка. — 1987. — № 2. — С. 28–31.
7. Рябов В. Ф. Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами. — Киев: Наук. думка, 1983. — 264 с.
8. Марочник стали и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосинкова, С. А. Вяткин и др. — М.: Машиностроение, 1989. — 640 с.
9. Колачев Б. А., Ливанов В. А., Елагин В. И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1972. — 480 с.
10. Пат. 25037 Украина МКІ В23 к 9/20. Спосіб дугоконтактного таврового зварювання і пристрій для його здійснення / Д. М. Калеко, В. Н. Бишовець. — Опубл. 25.12.98, Бюл. № 6.

Поступила в редакцию 20.05.2013

РАЗРАБОТАНО В ИЭС

ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ КОНСТРУКЦИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

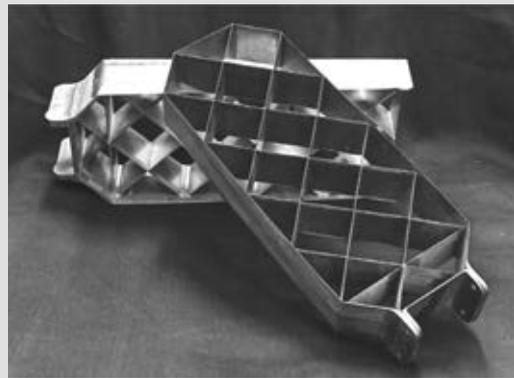
В ИЭС созданы припои и высокоэффективное оборудование для высокотемпературной пайки ответственных конструкций из разнородных материалов.

Паяные соединения медь–вольфрам имеют хорошую работоспособность, в том числе под воздействием нейтронного облучения и жесткого термоциклирования.

Технология высокотемпературной пайки позволяет создавать тонкостенные решетчатые конструкции, применяемые в системах управления летательных аппаратов.



Паяная модель узла дивертора установки термоядерного синтеза (соединение медь — вольфрам)



Высокоэффективные решетчатые рули ракеты, изготовленные пайкой в карусельной вакуумной печи