



## ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛА «WELDING AND CUTTING», 2008, № 5

*Ое. Е. Guengoer (Турция), С. Gerritsen (Голландия).  
ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ  
И МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ  
АЛЮМИНИЕВО-СТАЛЬНЫХ ПАЯНОСВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ*

Ввиду отсутствия четкого термина соединения, в котором только одна из деталей расплавляется и припаявается к другой (которая остается твердой), в этой публикации называется паяносварным, а процесс — сваркопайкой. По характеру рассматриваемых в работе соединений можно считать, что термин паяносварной шов очень хорошо подходит для описанных швов.

Соединение стали с алюминием широко используется в автомобильной промышленности из-за необходимости снижения массы с целью сокращения потребления топлива и, таким образом, выделения  $\text{CO}_2$ . Другие примеры применения можно найти, например, в судостроении, аэрокосмической промышленности, пассажирском железнодорожном транспорте и производстве бытовых электроприборов. Хотя механическое соединение алюминия со сталью (например с использованием винтов, болтов или заклепок) является очевидным решением, сварка плавлением алюминия со сталью является сложной проблемой из-за существенных различий в их физических и химических свойствах таких, как электрическое сопротивление и коэффициент термического расширения (КТР). Однако наиболее проблематичным для процессов сварки плавлением является образование хрупких интерметаллидных фаз (ИМФ) таких, как  $\text{FeAl}_3$  и  $\text{FeAl}_5$ , оказывающих отрицательное влияние на механические свойства соединений. Толщина интерметаллидного слоя, как известно, играет решающую роль для рабочих характеристик соединения и напрямую связана со скоростью охлаждения/тепловложения. В литературе часто сообщается, что приемлемая прочность соединений может быть обеспечена при толщине промежуточного слоя меньше 10 мкм по толщине. Для сведения ИМФ до минимума, а также для ограничения толщины прослойки время, в течение которого алюминий является расплавленным, и, период, в течение которого соединение находится при повышенной температуре, должны быть минимальными.

Если говорить о различиях в электрическом сопротивлении, точечная сварка сопротивлением является наиболее подходящим вариантом. Из-за больших различий в электрических свойствах диапазоны сварочных параметров для стали и алюминия не слишком сильно совпадают, что усложняет получение качественного шва. При решении этой проблемы часто предлагается использовать биметаллические переходные полосы, или как альтернативу вставки припоя. Однако

это делает процесс сварки намного сложнее, поскольку вставки должны находиться точно между сварочными электродами. Этому процессу присущи также недостатки как с точки зрения металлоемкости, так и стоимости. Более того, из литературы известен пример, показывающий, что сварные соединения, полученные сваркой сопротивлением с переходными полосками, обеспечивают статическую и динамическую прочность, не превышающую эти величины для заклепочных соединений с самопрошивкой. В ходе других исследований в соединениях наблюдались усадочные дефекты в швах, а испытания на отслоение показали неприемлемую хрупкость соединений.

Еще одним вопросом является различие в термических свойствах. Во-первых, теплопроводность алюминия в пять раз выше этого значения для стали. Это большое различие вызывает неравномерное рассеяние тепла и обычно приводит к образованию асимметрических валиков при сварке. Большое различие в температуре плавления (для чистого  $\text{Al } T_{\text{пл}} = 660^\circ\text{C}$ , а для чистого железа  $T_{\text{пл}} = 1535^\circ\text{C}$ ) также способствует образованию неровного валика. Кроме того, большое различие в КТР этих двух материалов приводит к большим усадочным напряжениям, что может вызвать чрезмерное коробление, а это в свою очередь может привести к низким показателям статических и динамических механических свойств или даже к прямому разрушению металла шва после охлаждения.

В настоящий момент есть несколько новых вариантов сварки МИГ/МАГ, что позволяет выполнять сварку с более низким тепловложением, в основном путем использования источника питания с цифровым управлением. Одним из таких процессов является процесс с холодным переносом металла, разработанный компанией «Фрониус». Для этого варианта нововведение заключается не только в том, что за счет очень точного управления током короткого замыкания можно снизить тепловложение, но и в том, что путем периодического отведения присадочной проволоки можно реализовать оптимальный переход капель и сварку без разбрызгивания. В настоящее время сваркопайка является наиболее перспективным методом для соединения стали с алюминием способами сварки плавлением. При этом способе алюминий расплавляется и обеспечивается смачивание им твердой стали, и, таким образом, он сплавляется с ней. Тем не менее, хрупкие интерметаллиды также могут образовываться путем



диффузии в твердой фазе, а также когда расплавленный алюминий контактирует со сталью. Таким образом, этот метод не позволяет полностью избежать образования интерметаллидов. Однако толщину слоя интерметаллидов можно свести к минимуму за счет более низкого тепловложения. Следовательно, процесс с переносом холодного металла уже был изучен для сваркопайки алюминия со сталью, причем низкое тепловложение ограничивает образование хрупких интерметаллидов системы железо–алюминий.

Исследования, проведенные в компании «Фрониус», показали, что химический состав присадочной проволоки и основного материала играет важную роль в отношении характера образующейся прослойки, поскольку взаимодействие легирующих элементов (марганца, кремния и цинка) влияет на образование ИМФ. Следовательно, в рассматриваемых в работе исследованиях химический состав присадочной проволоки, а также и металлического покрытия на стали взяты в качестве параметров, влияющих на толщину слоя интерметаллидов и характеристики соединения. Для этой цели выполнены нахлесточные паяносварные швы алюминия и стали с использованием сталей с различным покрытием и различных присадочных проволок. Для сравнения выполняли также заклепочные и адгезивные соединения. Испытания включали исследования сечения, испытания на растяжение, солевым туманом и на циклическую коррозию. Проводили также детальные исследования слоев интерметаллида.

В ходе проведенных исследований изучали влияние различных присадочных проволок и различных металлических покрытий на сталь при пайкосварке алюминия со сталью с низким тепловложением. Эти исследования продемонстрировали потенциальные возможности вариантов процесса МИГ/МАГ с низким тепловложением, особенно с холодным переносом металла для сваркопайки этих сочетаний. Эти результаты показали, что паяносварные швы можно успешно получать со слоями ИМФ толщиной менее 10 мкм, что традиционно рекомендуется для обеспечения максимальных характеристик соединения. Самая большая толщина прослойки наблюдалась в соединениях стали с покрытием «Алузи», полученным с помощью присадочной проволоки  $AlSi_3Mn$  (до 6 мкм). Максимальная прочность была реализована для того

же сочетания основного материала присадки, однако, в этом случае наблюдалось разрушение в ЗТВ алюминия приблизительно при 85 % предела прочности на растяжение основного материала алюминия. Этот уровень прочности сопоставим с тем, которого можно ожидать при сварке алюминиевых сплавов.

Применение подобных режимов сварки при использовании различных присадочных проволок привело к различной толщине слоя ИМФ, длине смачивания, а также характеристикам соединения. Не установлено четкой зависимости между характеристиками соединениями и толщиной слоя ИМФ, которая во всех случаях было ниже 10 мкм. Это может означать, что влияние толщины слоя ИМФ является ограниченным или незначительным, пока она ниже 10 мкм. Эксперименты на различных сталях с покрытием с использованием различных присадочных проволок позволили установить некоторые ключевые параметры, которые необходимо учитывать при выборе присадочной проволоки для получения оптимальных характеристик паяносварного шва:

по сравнению с присадкой на основе алюминия низкая точка плавления и относительная мягкость присадочной проволоки на основе цинка усложнили подачу проволоки и управление геометрией шва (наблюдалась тенденция образования узкого, но очень выпуклого валика шва). Тем не менее, этот тип присадочного материала продемонстрировал преимущества минимальной толщины слоя ИМФ, высоких характеристик соединения, а также лучшую коррозионную стойкость;

присадка  $AlSi_3Mn1$  видимо, предпочтительнее присадки  $AlSi_5$  исходя из получаемых характеристик соединения;

среди различных комбинаций присадочных проволок и сталей с различным покрытием, испытанных в данной работе, самая низкая коррозионная стойкость наблюдалась в соединениях, полученных на оцинкованной стали с присадкой на основе алюминия.

Хотя для паяносварных швов на алюминии получены приемлемые результаты в отношении прочности, образование хрупких ИМФ при термических процессах может снизить формуемость этих соединений. Этот аспект не был изучен в ходе исследований.

## НОВЫЕ КНИГИ

### С. Фельбер. Трубопроводное производство (на английском языке). — Вена: OEGS (Австрийское сварочное общество), 2009. — 792 с.

Во вступлении речь идет о разработке и использовании трубных и дуплексных сталей при строительстве трубопроводов для транспортировки природного газа и сырой нефти в Австрии, Европе, Америке, Австралии; об авариях и их причинах, профилактике, ловушках трещин, коррозии и защите от коррозии; способах определения и оценки дефектов.

Представлены материалы для трубопроводов, которые включают трубные стали (класс прочности X70, X80, X100 и X120) и дуплексные стали (1.4462) с химическим составом, стандартами и обозначениями, физическими свойствами, фазовыми диаграммами, особенностями превращения, выделения фаз, показателями коррозионной стойкости, механическими свойствами, особенностями изготовления.

Даны сведения о свариваемости и термической обработке трубных и дуплексных сталей с учетом эквивалентного содержания углерода  $C_{ЭКВ}$  и твердости, эквивалентном содержании хрома и никеля ( $Cr_{ЭКВ}$  и  $Ni_{ЭКВ}$ ), зоне крупного зерна в ЗТВ, содержании феррита в металле шва и ЗТВ, трещинах, вызванных водородом, горячих трещинах. Приведены особенности о ручной дуговой сварке металлов, дуговой сварке металлов в среде защитных газов, сварке вольфрамовым электродом в среде инертных газов, гипербарической сварке, новых разработках (сварке трением с перемешиванием, электронно-лучевой сварке, электронно-лучевой сварке при уменьшенном вакууме, лазерной сварке, лазерной гибридной сварке).