



УДК 669.187.56.001.1

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКИ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ МАЛОЙ ТОЛЩИНЕ НАПЛАВЛЯЕМОГО СЛОЯ

К. А. Цыкуленко, А. К. Цыкуленко

Рассмотрены способы получения неразъемных соединений из разнородных материалов. Проанализирована возможность электрошлаковой наплавки слоя малой толщины. Предложены пути решения проблемы получения тонкого наплавленного слоя в процессе электрошлаковой наплавки жидким металлом, где основную роль должен играть флюс. Определены требования к флюсу.

Methods of producing permanent joints of dissimilar materials are considered. The feasibility of electroslag surfacing of a thin layer is analysed. The ways of solution of the problem of producing thin deposited layer during the process of electroslag surfacing with a liquid metal where the main role is played by a flux are suggested. The requirements to the flux are defined.

**Ключевые слова:** электрошлаковая наплавка; жидкий присадочный металл; глубина провара; химический состав наплавленного слоя; флюс

Многие отрасли современной техники ощущают потребность в биметаллах. Имеются различные способы изготовления биметаллических конструкций, среди которых наиболее заметное место занимают процессы сварки и пайки. Оба этих процесса получения неразъемного соединения имеют преимущества и недостатки и занимают свои ниши в общем объеме производства биметаллов. Одним из основных достоинств пайки является нагрев всех соединяемых тел ниже температуры их плавления. Таким же достоинством обладает и сварка в твердом состоянии без процесса плавления металла. В промышленном производстве биметаллов этот вид сварки нашел довольно широкое применение при изготовлении, главным образом, листового проката. Вместе с тем, образующееся за счет совместного пластического деформирования в контактной зоне равнопрочное сварное соединение характеризуется, как правило, пониженными пластичностью и особенно ударной вязкостью в зоне соединения металлов. Обусловлено это тем, что существенную роль в образовании такого соединения играют диффузионные процессы, для протекания которых чистые (ювенильные) поверхности необходимо сблизить на расстояние межатомного взаимодействия. Давление, приводящее к сближению двух

поверхностей на расстояние, необходимое для действия сил притяжения атомов, и одновременно обеспечивающее очистку поверхностей от окисных пленок и адсорбированных газов, является все же недостаточно эффективным средством в этом отношении по сравнению с химической очисткой и защитой поверхностей с помощью расплавленного флюса. При пайке обеспечивается очистка поверхностей, а кроме того, гораздо легче происходит необходимый физический контакт жидкого металла с поверхностью твердого тела. Препятствием же для достижения необходимых механических свойств паяных соединений в ряде случаев являются более низкие прочность и пластичность большинства припоев по сравнению с паяемым металлом.

Наиболее оптимальные свойства зоны соединения обеспечиваются при сварке плавлением. В этом случае расплавленный металл кромок свариваемых деталей смешивается самопроизвольно или сливается с дополнительным (присадочным) металлом без приложения внешнего усилия, образуя общую ванну. При этом происходит разрушение пленок, покрывающих поверхность соединяемых элементов, и сближение атомов металла свариваемых деталей до расстояния, при котором возникают металлические связи. Дальнейшая кристаллизация расплавленного металла начинается от частично оплавленных зерен основного металла.

Образование общей металлической ванны при смешивании основного и присадочного металла во

© К. А. ЦЫКУЛЕНКО, А. К. ЦЫКУЛЕНКО, 2001



время сварки является в ряде случаев отрицательным фактором, который препятствует получению доброкачественного соединения из разнородных металлов, приводя к появлению промежуточных, хрупких структур и т. п. Применительно к наплавке, расплавление основного металла и смешивание его с присадочным металлом приводит к изменению состава последнего. Это вызывает необходимость контроля глубины провара и обеспечения его постоянства во всех сечениях наплавляемого изделия. В противном случае получаемый металл наплавки будет иметь в различных сечениях разный состав а, следовательно, и свойства.

Достичь стабильности состава наплавляемого металла можно двумя способами: снижением глубины провара при неизменной толщине наплавки и увеличением толщины наплавки при неизменном проваре. И в том, и в другом случае может быть получена та минимальная доля основного металла в общем объеме наплавленного металла, которая может быть приемлема с точки зрения состава и свойств металла наплавки.

Одним из наиболее эффективных способов в этом отношении является электрошлаковая наплавка. Таким способом можно наплавить слой металла толщиной 20...90 мм при глубине провара всего 1,5...2,0 мм [1]. В этом случае доля основного металла в зоне соединения уменьшается с 7,5 % до чуть более 2 % с увеличением толщины наплавки. Дальнейшее снижение доли основного металла при канонической схеме электрошлаковой наплавки затруднительно, поскольку шлаковая ванна в этой схеме является зависимым источником теплоты, т. е. существует жесткая взаимосвязь между электрическим режимом и скоростью плавления электрода. Поэтому изменить толщину или скорость наплавки без соответствующего изменения количества тепла, выделяемого шлаковой ванной, невозможно. В свою очередь, это препятствует существенному снижению доли основного металла в объеме металла наплавки.

Попытки преодолеть жесткую зависимость между производительностью классического электрошлакового процесса и его температурными параметрами привели к созданию способов электрошлаковой наплавки, где вместо расходных электродов используется жидкий присадочный металл. Появилась возможность существенного увеличения толщины наплавляемого слоя практически без увеличения глубины провара основного металла. При этом наплавку можно осуществлять как в горизонтальном, так и в вертикальном положении. При горизонтальной наплавке провар основного металла составляет обычно 5...10 мм [2], а при вертикальной — 1,5...2,0 мм, причем величина его обусловлена не столько тепловыми параметрами процесса, сколько возможностями его контроля и поддержания постоянным на заданном уровне. Поскольку толщина наплавленного слоя в этом случае ограничивается только практической целесообразностью, долю основного металла можно

получить сколь угодно малой, увеличивая толщину наплавленного слоя.

Иное дело наплавка слоя достаточно малой толщины с достаточно малой же долей основного металла. Уже при толщине наплавленного слоя 15 мм и менее доля основного металла может превысить 10 %, что в ряде случаев недопустимо. Например, в последнее время возникает все большая практическая необходимость в наплавке высоколегированных сталей и сплавов на элементы из углеродистой или низколегированной стали. К биметаллическим конструкциям такого типа принадлежат, например, композитные заготовки круглого профиля из углеродистой стали с наружным слоем из коррозионно-стойкой высоколегированной стали типа 18-8.

В этом случае приемлемая доля основного металла может быть получена только за счет уменьшения глубины провара. Действительно, уже 10 %-ная доля основного металла, например стали 20, в наплавленном слое из стали 18-8, содержащей 0,03 % углерода, выводит металл из марочного состава, и если содержание хрома и никеля еще можно компенсировать добавками соответствующей лигатуры, то предотвращение чрезмерного науглероживания наплавленного металла представляет собой серьезную проблему.

Одной из успешных попыток существенного снижения величины провара является способ электрошлаковой наплавки с использованием плавящегося электрода, установленного с малыми зазорами между наплавляющимися и формируемыми деталями [3]. Этот способ успешно применяется при наплавке относительно небольших по площади поверхностей, например при производстве термометалла. Эффективность этого процесса обусловлена авторегулированием скорости наплавки, оплавлением кромок наплавляемого металла. Скорость наплавки в этом случае постоянно возрастает. Подобный процесс не имеет места при каноническом электрошлаковом процессе плавления расходного электрода, установленного в кристаллизаторе с большими зазорами.

Радикальным способом получения тонкого наплавленного слоя был бы способ, обеспечивающий нулевой провар. Такой способ, названный Н. Ф. Лашко и С. В. Лашко сваркопайкой [4, 5], имеет одновременно характерные особенности сварки плавлением и пайки, при котором достаточно одну из соединяемых деталей нагреть до расплавления, а другую нагреть ниже температуры солидус. Этот процесс осуществим при непосредственном соединении металлов или сплавов, сильно отличающихся по температурам плавления (например, при соединении стали с медью), и необходим, когда температура плавления одного из металлов выше температуры кипения другого металла (например, при соединении вольфрама, молибдена, ниобия с медью).

Решение проблемы существенно осложняется, если разница в температурах плавления основного и наплавляемого металла незначительна, например, при наплавке специальных сталей и сплавов на углеродистые и низколегированные стали. Рассмотрим



условия, требуемые для осуществления процесса сварко-пайки применительно к этому случаю.

Необходимым и достаточным условием образования металлической связи является вступление в контакт очищенной от окисной пленки, адсорбированных газов и других загрязнений поверхности металла, на которую производится наплавка, нагретой до температуры не выше температуры солидус ( $T_S^0$ ), с жидким металлом, наплавляемым на указанную поверхность, нагретым в свою очередь до температуры выше температуры ликвидус ( $T_L^0$ ), и поддержание этого контакта в течение определенного времени.

Рассмотрим осуществимость этого условия при электрошлаковом процессе. Очевидно, что температура электрошлакового процесса ( $T_{ш}$ ) должна удовлетворять условию  $T_L^0 < T_{ш} \leq T_S^0$ . В этом случае исключается опасность расплавления основного металла шлаковой ванны и его пережога. В то же время создаются условия для длительного контакта шлаковой ванны и жидкого металла с наплавляемой твердой поверхностью. Это благоприятствует полноте протекания рафинирующих реакций шлака с металлической поверхностью и диффузионных процессов между жидким и твердым металлом.

Для черных металлов и специальных сплавов диапазон температур  $T_S^0 - T_L^0$  довольно узок. В таблице приведены значения температур ликвидус и солидус для некоторых сталей и сплавов, из которой видно, что указанный диапазон составляет в большинстве случаев 100...200 °С, а иногда и того меньше.

Это означает, что температура электро-шлакового процесса при наплавке-пайке может изменяться в довольно узком интервале, что требует точного соблюдения состава флюса и электрических параметров плавки. Так, в вышеуказанных примерах  $T_{ш}$  должна находиться в пределах 1370...1480 °С для наплавки стали типа 18-8 на сталь 20 и в пределах 1250...1430 °С при наплавке валковой БРС на сталь 50.

Стабилизировать температуру шлаковой ванны можно, доведя ее до кипения. В этом случае независимо от режима плавки температура шлаковой ванны будет постоянна. Увеличение электрической мощности будет приводить лишь к большей интенсивности кипения шлака. Именно этот принцип был положен в основу способа электрошлаковой наплавки с уменьшенной глубиной провара [1, 6]. В этом способе используется эффект снижения температуры шлаковой ванны в результате выкипания отдельных компонентов шлака. Такими компонентами, имеющими низкую температуру кипения, могут быть, например,  $Na_2B_4O_7$ ,  $CaCl_2$ , KF. Введение во флюс 10...20 % легкокипящего компонента дает возможность снизить температуру шлаковой ванны и поддерживать ее на одном уровне [11]. Примером такого флюса может служить флюс следующего состава, %:  $B_2O_3$  32...45,  $CaF_2$  20...25,

**Примерные значения температур ликвидус и солидус некоторых сталей и сплавов**

Материал (содержание элемента, %)	$T_L$ , °С	$T_S$ , °С	Источ-ник
Железо Армо	1535	1530	[7]
Сталь 10	1530	1480	[7]
Сталь 30Х	1520	1480	[7]
Сталь 50	1480	1430	[7]
Сталь типа 18-8	1370...1400	-	[8]
Сталь типа Х17			
Углеродистая сталь (0,12...0,15 % С)	1430...1480	-	[8]
Высокоугеролистая сталь (0,7...1,1 % С)	1370	-	[8]
Быстрорежущая сталь типа М2 (4Cr; 5Mo; 2V; 6W):			
с содержанием 1,0 % С	-	1245	[9]
с содержанием 1,6 % С	-	1210	[9]
с содержанием 1,9 % С	-	1200	[9]
Жаропрочные сплавы на никелевой основе:			
A286 (<0,08 С; <1,0 Si; <1,0 Mn; 13,5...16,0 Cr; 24...27 Ni; 1,0...1,5 Mo; 0,1...0,5 V; 1,9...2,35 Ti; <0,35 Al; 1,9...2,35 Nb, $10^{-4}$ ... $10^{-3}$ В)	1430	1370	[10]
Инконель 625 (<0,1 С; <0,5 Si; <0,5 Mn; 20...23 Cr; >58 Ni; 8...10 Mo; 3,15...4,15 Nb; <0,4 Ti; <0,4 Al)	1400	1380	[10]
Инконель 706 (<0,06 С; <0,35 Si; <0,35 Mn; 14,5...17,5 Cr; 39...44 Ni; 2,5...3,3 Nb; 1,9...2,0 Ti; <1,0 Co; <0,4 Al; <0,006 В)	1371	1334	[10]
Инконель 718 (<0,08 С; <0,35 Si; <0,35 Mn; 17...21 Cr; 50...55 Ni; 2,8...3,3 Mo; 4,75...5,5 Nb; 0,65...1,15 Ti; 0,2...0,8 Al; <1,0 Co)	1336	1260	[10]

$CaCl_2$  20...25,  $Na_2B_4O_7$  [10]. Температура плавления флюса 850...900 °С, он хорошо смачивает горячую поверхность твердого металла. Температура шлаковой ванны стабилизируется в результате разложения буры (при 1575 °С) и выкипания  $CaCl_2$  (при 1600 °С). Таким образом, температура шлаковой ванны не может превысить 1575...1600 °С, что и отмечалось при электрошлаковой наплавке стали 12Х18Н9Т на сталь 18ХМ. Толщина наплавленного слоя составляла 40 мм [1].

Наплавку в кипящем шлаке нельзя признать оптимальным решением проблемы из-за изменения его состава в процессе кипения и необходимости постоянной добавки компонентов по мере их улетучивания. Но, главное, это экологические проблемы, которые возникают в связи с интенсивным выделением вредных веществ при кипении шлака.



Видимо поэтому указанный процесс не получил должного распространения.

Таким образом, проблема тонкослойной биметаллической наплавки габаритных изделий не нашла еще своего удовлетворительного решения. Требуется дальнейшие исследования в этом направлении. Представляется, что перспективным путем является электрошлаковая наплавка жидким присадочным металлом с применением легкоплавких флюсов и режимов наплавки, обеспечивающих поддержание температуры шлаковой ванны в требуемом диапазоне, не допуская кипения шлака и оплавления основного металла. Применение жидкого присадочного металла, приготовляемого в отдельном агрегате, освобождает от необходимости иметь температуру шлаковой ванны, достаточную для плавления расходного электрода, и тем самым дает возможность снизить температуру шлаковой ванны до любого заданного уровня.

Для образования неразъемного соединения при электрошлаковой наплавке-пайке с применением жидкого присадочного металла необходимо с помощью шлака очистить поверхность металла, на которую производится наплавка, от окисной пленки, адсорбированных газов и других загрязнений, одновременно нагревая эту поверхность до требуемой температуры. Затем на подготовленную таким образом поверхность залить через этот шлак жидкий присадочный металл, приготовленный в отдельном агрегате, и поддерживать его в таком состоянии определенное время для протекания диффузионных процессов на границе жидкий металл — твердая поверхность, взаимного их растворения и образования центров кристаллизации. Последующая кристаллизация жидкого металла на подложке обеспечивает надежную металлическую связь соединяемых металлов.

Возможны два способа получения указанного соединения: в горизонтальном положении, когда вся наплавляемая поверхность одновременно нагревается и заливается жидким металлом, и в вертикальном положении, когда поверхность нагревается и заливается жидким металлом постепенно. В первом случае источник тепловыделения (шлаковая ванна) неподвижен, во втором — перемещается относительно поверхности. Каждый из этих способов имеет свои технологические преимущества и недостатки. На первый взгляд кажется, что именно первый способ наиболее пригоден для осуществления наплавки-пайки из-за независимого регулирования времени каждого из этапов: рафинирования и прогрева поверхности, а также контактирования жидкого металла с твердой поверхностью. Однако в этом случае невозможно получить достаточно однородное температурное поле на всей поверхности, обогреваемой шлаковой ванной, что делает решение указанной задачи весьма проблематичным из-за узкого температурного интервала, в котором необходимо проводить процесс на-

плавки-пайки. Представляется, что второй способ в этом отношении более надежен, особенно применительно к телам вращения, где при использовании токоподводящего кристаллизатора существенно легче достичь необходимой температурной однородности шлаковой ванны вследствие периферийного тепловыделения. Вместе с тем, относительное перемещение источника тепловыделения связывает по времени этапы процесса наплавки: в этом случае скорость перемещения шлаковой и металлической ванны относительно наплавляемой поверхности должна быть таковой, чтобы обеспечить полное протекание всех процессов на каждом этапе.

В цепочке этапов: очистка поверхности, нагрев до требуемой температуры, выдержка при контактировании жидкого и твердого металла лимитирующим звеном является, по-видимому, этап нагрева. Действительно, этап образования металлической связи при контактировании жидкого и твердого металла, протекающий, как известно, в две стадии, сравнительно непродолжителен. Первая кинетическая (бездиффузионная) активируемая стадия контактно-твердожидкого плавления имеет по данным работы [4] длительность всего 0,01 с, а вторая диффузионная стадия протекает также достаточно быстро в связи с тем, что коэффициент диффузии в жидком металле в  $10^3 \dots 10^4$  выше, чем в твердом.

Что касается очистки поверхности, то этот факт, часто наблюдаемый на огарке расходного электрода, извлеченного из шлаковой ванны при ЭШП, свидетельствует о том, что время, затраченное на рафинирование, по меньшей мере, не больше времени наплавки.

Время, затрачиваемое на нагрев наплавляемой поверхности, определяется площадью этой поверхности, массой наплавляемого тела, тепловой мощностью, выделяемой в шлаковой ванне, и условиями теплопередачи от шлаковой ванны к наплавляемой поверхности. Реальные соотношения этих параметров на практике таковы, что обычные скорости электрошлаковой наплавки составляют 10... 15 мм/мин. Следует учитывать, что большая часть тепла затрачивается на оплавление наплавляемой поверхности. Поэтому следует ожидать, что при одинаковой вкладываемой мощности процесс наплавки-пайки будет протекать существенно быстрее, чем обычной наплавки.

Основную роль в процессе электрошлаковой наплавки-пайки будет играть флюс. Для осуществления процесса необходим флюс, отвечающий следующим требованиям: должен выделять достаточное количество тепла при прохождении через него электрического тока; обеспечивать температуру электрошлакового процесса не выше 1450... 1480 °С; иметь минимальные отклонения по температуре шлаковой ванны при естественных флуктуациях электрических параметров плавки; обеспечивать рафинирование наплавляемой поверх-



ности от оксидных пленок и адсорбированных газов; сохранять в процессе плавки стабильность состава и свойств; иметь при температуре процесса минимально возможную вязкость; иметь широкий температурный интервал плавления.

Анализ стандартных шлаков, применяемых в настоящее время при электрошлаковых процессах, показывает, что флюса, полностью отвечающего указанным требованиям, пока нет. Таким образом, осуществимость эффективной электрошлаковой наплавки-пайки в существенной степени будет зависеть от разработки соответствующего флюса, отвечающего указанным выше требованиям.

1. *Электрошлаковая* сварка и наплавка / Под ред. Б. Е. Патона — М.: Машиностроение, 1980. — 511 с.
2. *Носатов В. А., Овчинникова Т. Х., Кузьменко О. Г.* Электрошлаковая наплавка жидким присадочным металлом штамповых кубиков // Наплавка при изготовлении деталей машин и оборудования. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1988. — С. 75–77.

3. *Пузрин Л. Г., Городецкий А. Ш.* Стабилизация провара основного металла при электрошлаковой наплавке неподвижным электродом // Проблемы электрошлаковой технологии. — Киев: Наук. думка, 1978. — С. 62–66.
4. *Лашко С. В., Лашко Н. Ф.* Пайка металлов. — М.: Машиностроение, 1988. — 376 с.
5. *Лашко Н. Ф., Лашко С. В.* Некоторые проблемы свариваемости металлов. — М.: Машгиз, 1963. — 298 с.
6. *Получение* биметалла электрошлаковой наплавкой / Д. А. Дудко, Н. Я. Щербина, И. И. Сушук-Слюсаренко, И. И. Лычко. — Киев: УкрНИИТИ, 1972 — 17 с.
7. *Хансен М., Андерко К.* Структуры двойных сплавов. В 2-х т. / Пер. с англ. П. К. Новикова и др. — М.: Металлургиздат, 1962. — 1488 с.
8. *Burns. C. F. Jr.* Critical melting points for metals and alloys. — Souderton, PA Solar Atmospheres Inc., 1997. — 22 p.
9. *Hoyle G.* High speed steel. — Butterworth and Co (Publishers) Ltd, 1988. — 212 p.
10. *Solutions to materials problems.* — Product reference guide CD-ROM. — INCO ALLOYS INTERNATIONAL, 1997.
11. *Подгаецкий В. В., Люборец И. И.* Сварочные флюсы — Киев: Техніка, 1984 — 162 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 27.06.2001