ВОПРОСЫ СВАРКИ, ЛИТЯ, МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.791.927.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-4-239-43-48

*И. В. Зорин, Ю. Н. Дубцов, Г. Н. Соколов, В. И. Лысак,
Ю. В. Андриянов, О. А. Слепов, А. А. Тазов*

ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЦ ТУГОПЛАВКИХ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ НА ПЕРЕНОС МЕТАЛЛА В СВАРОЧНОЙ ДУГЕ ПРИ НАПЛАВКЕ КОМПОЗИЦИОННОЙ ПРОВОЛОКОЙ*

Волгоградский государственный технический университет
e-mail: naplavka34@yandex.ru

Показано, что введение в составе наполнителя композиционной проволоки (КП) микроразмерных частиц тугоплавких соединений TiB_2 , ZrB_2 , CeO_2 способствует повышению качества массопереноса металла в сварочной дуге. Установлено, что под влиянием частиц рассмотренных компонентов плавящиеся разнородные по теплофизическим свойствам компоненты наполнителя КП более активно формируются в металлическую каплю, а ее перегрев снижается. Это способствует повышению качества переноса электродного металла в сварочной дуге и увеличению коэффициентов перехода легирующих элементов в наплавленный металл.

Ключевые слова: композиционная проволока, частицы тугоплавких соединений, сварочная дуга, металлическая капля, поверхностное натяжение, массоперенос, наплавленный металл.

*I. V. Zorin, Yu. N. Dubtsov, G. N. Sokolov, V. I. Lysak,
Yu. V. Andriyanov, O. A. Slepov, A. A. Tazov*

EFFECT OF PARTICLE REFRACTORY CHEMICAL COMPOUNDS ON METAL TRANSFER IN THE ARC IN SURFACING COMPOSITE WIRE

Volgograd State Technical University

It is shown that the introduction of micro-sized particles of refractory compounds TiB_2 , ZrB_2 , CeO_2 in the composition of the filler of the composite wire (CW) contributes to an increase in the quality of mass transfer of metal in the welding arc. It was found that under the influence of particles of the considered components, melting components of the CW filler, heterogeneous in terms of thermophysical properties, are more actively formed into a metal drop, and its overheating decreases. This helps to improve the quality of transfer of the electrode metal in the welding arc and to increase the conversion factors of alloying elements into the weld metal.

Keywords: composite wire, particles of refractory compounds, welding arc, metal drop, surface tension, mass transfer, deposited metal.

Введение

Повышение качества плавления проволок с порошковым и композиционным наполнителем для сварки и наплавки высоколегированных специальных сплавов представляет приоритетную задачу современного сварочного производства [1–3]. В этой связи особую актуальность приобретает использование в процессах сварки и наплавки в аргоне композиционных проволок (КП), обеспечивающих формирование термо- и износостойкого наплавленно-

го металла на основе интерметаллида Ni_3Al [4]. Характерной особенностью существования сварочной дуги на торце такой проволоки является периодичность, с которой анодное пятно дуги существует сначала на свободном вылете тугоплавкого сердечника, а затем, в результате расплавления компонентов наполнителя и оболочки, на поверхности металлической капли [5]. В процессе наплавки это дает возможность дифференцировать тепловое воздействие дуги во времени на формирующийся расплав капли,

© Зорин И. В., Дубцов Ю. Н., Соколов Г. Н., Лысак В. И., Андриянов Ю. В., Слепов О. А., Тазов А. А., 2020.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 19-48-340010.

предотвращая ее перегрев. Вместе с тем многостадийность кинетики расплавления КП [4], обусловленная наличием компонентов со значительно отличающимися температурами плавления, повышает чувствительность формирующегося на торце расплава к случайным колебаниям величины сварочного тока и напряжения на дуге в процессе наплавки. По этой причине отделение капли от торца КП может происходить преждевременно, когда она еще не сформировалась или с запозданием, что приводит к замыканию дугового промежутка каплей большого объема. Вследствие этого коэффициент перехода легирующих элементов в наплавленный металл непостоянен и химическая однородность наплавленного металла нарушается.

Проблему повышения качества расплавления и переноса электродного металла в дуге, как правило, успешно решают посредством наложения на нее импульсов тока определенной частоты. Однако в случае использования композиционных проволок, как и порошковых, управление частотой отрыва капли электродного металла требует обеспечения синхронности расплавления оболочки и сердечника (наполнителя), что в практике применения импульсно-дуговых процессов возможно лишь при использовании проволок малого диаметра [6]. Также имеет значение и то обстоятельство, что значительная доля серийного оборудования для автоматизированной наплавки в защитных газах проволоками диаметром до 3,2 мм традиционно комплектуется сварочными выпрямителями, не имеющими возможности формировать импульсы тока. Другим актуальным способом целенаправленного воздействия на процесс расплавления электродной проволоки является создание на его поверхности тонких покрытий, содержащих т.н. активирующие компоненты на основе щелочных, щелочноземельных металлов и галогенидов [7–9]. Действие этих компонентов основано на изменении электрофизических характеристик сварочной дуги, вследствие чего изменяются размеры активного пятна на торце электродной проволоки и соответственно условия теплопередачи от дуги к ней. Таким образом, изменяя концентрацию активатора, становится возможным управлять скоростью расплавления электродного материала и частотой переноса капель в дуге. Подобный прием позволяет реализовать и конструкция композиционной проволоки с тем отличием, что для расположения «активирующих» компонентов тех-

нологически выгодно использовать внутреннюю поверхность оболочки на этапе изготовления КП. Очевидно, что при выборе таких компонентов для наплавки сложнолегированного металла необходимо учитывать не только поверхностно-активные свойства веществ, но и возможное влияние их на структурно-фазовое состояние металла. Целью работы является повышение качества переноса электродного металла в процессе электродуговой наплавки с использованием композиционной проволоки.

Материалы и методы исследований

При наплавке в качестве плавящегося электрода использовали композиционные проволоки диаметром 3 мм, содержащие в наполнителе вольфрамовую (диаметром 0,5 мм) и молибденовую (диаметром 0,45 мм) проволоки, конструктивно отделенные от никелевой оболочки слоем алюминия и порошковой составляющей наполнителя (хром, тантал и молибден) (рис. 1). Такая конструкция КП обеспечивает в наплавленном металле стехиометрическое соотношение между массами никеля и алюминия, соответствующее интерметаллическому соединению γ' -Ni₃Al. Вольфрамовый сердечник выполняет функцию тугоплавкого расходоуемого электрода, обеспечивающего пространственную устойчивость дуги в парогазовой среде, образующейся при смешивании аргона с парами металлов из наполнителя КП. Характерная для композиционного строения неоднородность в распределении теплофизических свойств в поперечном сечении, компенсируется наличием хорошего электрического контакта между поверхностями компонентов КП, что обеспечивает быстрый их нагрев теплом сварочной дуги и Джоулевым теплом на вылете проволоки.

Рис. 1. Схематичное изображение электродной композиционной проволоки:
1 – никелевая оболочка; 2 – деформированные в процессе волочения КП алюминиевые проволоки; 3 – порошковая составляющая наполнителя; 4 – вольфрамовая и молибденовая проволоки

Таблица 1

Содержание в КП							
основных элементов						Компонентов активаторов	
Al	W	Mo	Cr	Ta	Ni	TiB ₂ / ZrB ₂	CeO ₂
10,5–12	4,5–5,5	3,2–4,2	5,5–6,6	3,0–3,5	база	0,45–0,8	0,05–0,1

В наполнитель КП вводили дозированное количество (0,1–1,0 масс.%) микродисперсного порошка диборидов титана TiB₂ и циркония ZrB₂, а также диоксида церия CeO₂. При выборе частиц диборидов полагали, что бор, образующийся при диссоциации соединения TiB₂ и ZrB₂ в сварочной дуге, уменьшит межфазное поверхностное натяжение на границе металлический расплав – парогазовая смесь, что должно оказать влияние на характер формирования металлической капли. В свою очередь образующийся в небольших количествах титан микролегируя металл, наряду с танталом и вольфрамом участвует в формировании термически стабильной γ' -фазы. Вследствие близких атомных радиусов алюминия и титана, по сравнению с другими электроположительными переходными металлами, обеспечивается максимальная растворимость титана в γ' -фазе, что стабилизирует ее [10]. Выбор диоксида церия в качестве компонента "активатора" обусловлен способностью церия нейтрализовать влияние поверхностно-активной серы в процессе кристаллизации наплавленного металла и при длительных высокотемпературных нагревах.

Процесс автоматизированной наплавки осуществляли на установке A2 Mini Master (ESAB). Изменение силы сварочного тока I и напряжения на дуге U в процессе наплавки регистрировали с частотой дискретизации 5 кГц с использованием аналого-цифрового преобразователя (АЦП) LA-20USB. Для измерения текущих значений сварочного тока один из входных каналов АЦП подключали к измерительному шунту, который на номинальном токе 1 кА обеспечивает падение напряжение 60 мВ. На второй входной канал АЦП через делитель напряжения, подавали уменьшенный в 34 раза сигнал текущего значения напряжения на дуге. Визуализацию аналоговых сигналов с АЦП в виде осциллограмм и их последующую обработку производили в специализированной программе PowerGraph 3.3 Professional. Количественную оценку изменения напряжения на дуге и сварочного тока в процессе наплавки экспериментальными КП производили посредством расче-

та коэффициента вариации количества замыкающий дугового промежутка f .

Результаты и их обсуждение

Экспериментально установлено, что введение в составе КП частиц диборидов способствует созданию условий, при которых плавящиеся разнородные по теплофизическим свойствам оболочка и компоненты наполнителя более активно формируются в металлическую каплю. Вследствие этого уменьшается размер капель и повышается частота их отделения (с 3–4 до 7–9 капель в секунду) с торца КП, что сопровождается увеличением периодичности, с которой анодное пятно дуги перемещается между торцом тугоплавкого сердечника и поверхности металлической капли (рис. 2). В результате перегрев капли уменьшается, а коэффициенты перехода легирующих элементов в наплавленный металл увеличиваются (рис. 3).

Выявлено, что при введении в наполнитель диборидов TiB₂ и ZrB₂ более 0,8 масс. % содержание бора в наплавленном металле достигает значений, очевидно, близких к критическим ($\geq 0,05$ %), при которых бор может образовывать с никелем легкоплавкие эвтектики, что приводит к охрупчиванию наплавленного металла. Частота переноса капель электродного металла в этом случае увеличивается до значений 11–15, что уменьшает время необходимое для формирования однородного химического расплава капли на торце КП. Вследствие этого в наплавленном металле образуются ликвационные участки с химической неоднородностью. При введении в наполнитель TiB₂ менее 0,45 масс. % частота отделения капель электродного металла снижается до 4–5 в секунду, что уменьшает коэффициент перехода легирующих элементов, в первую очередь легкоплавкого алюминия ($k_{\text{п}} \leq 0,65$) в наплавленный металл.

С целью более эффективного воздействия на формирование расплава на торце КП в состав наполнителя вводили кислородосодержащее соединение диоксида церия CeO₂. Совместный анализ изменения тока и напряжения на дуге и видеофиксации дугового процесса показал отличия в характере формирования капель

электродного металла под влиянием этого соединения (рис. 2, б). При введении частиц диоксида церия в количестве 0,05–0,1 масс.% на торце КП при наплавке образуются капли большего размера по сравнению с каплями, формирующимися под влиянием частиц диборидов. Время существования на торце таких капель увеличено в 2–3 раза, что хотя и способствует более полному протеканию стадии рас-

творения тугоплавких компонентов в объеме металлической капли, но повышает степень ее перегрева. Вследствие этого уменьшается коэффициент перехода в металл преимущественно легкоплавкого алюминия (рис. 3). Вместе с тем расплавление КП характеризуется полным отсутствием выбега тугоплавкого сердечника относительно капли и соответственно замыкания дугового промежутка отсутствуют.

Рис. 2. Характер формирования капли электродного металла и изменения тока и напряжения на дуге при наплавке с использованием в наполнителе КП частиц TiB_2 (а), CeO_2 (б) и без них (в)

Отмеченные особенности формирования капель под влиянием CeO_2 , вероятно, связаны с образованием при его диссоциации до 75 % кислорода O_2 , который более эффективно снижает поверхностное натяжение на границе расплав-парогазовая смесь.

Поэтому с увеличением содержания CeO_2 до 0,3–0,5 масс.% размер капель уменьшается, но их частота отделения увеличивается, что нарушает однородность химического состава капли.

Рис. 3. Распределение коэффициента перехода основных легирующих элементов в металл, наплавленный с использованием КП с частицами TiB_2 , ZrB_2 , CeO_2 и без них КП(ст)

Проведенная количественная оценка полученных в процессе наплавки осциллограмм по показателю частоты замыканий дугового промежутка f (табл. 2) позволяет сделать вывод, что введение в наполнитель КП частиц TiB_2 ,

ZrB_2 , CeO_2 способствует уменьшению величины f на один порядок по сравнению с процессом наплавки КП, не содержащей в своем составе компонентов активаторов.

Таблица 2

Влияние частиц тугоплавких компонентов на качество переноса электродного металла в сварочной дуге

Частицы	Частота замыканий дугового промежутка, f (Гц)	Коэффициент вариации количества замыканий дугового промежутка
TiB_2	0,0926	0,72
ZrB_2	0,297	0,378
CeO_2	0	0
без частиц	1,78	0,565

Однако уменьшение величины f сопровождается значительным уменьшением значений соответствующего вариативного показателя до нулевых значений только в случае использования частиц CeO_2 , что указывает на повышенную стабильность установившегося режима переноса металла отдельными каплями. Таким образом, при использовании в составе КП частиц TiB_2 , ZrB_2 , CeO_2 можно прогнозировать улучшение качества массопереноса металла при наплавке.

В металле, наплавленном с использованием композиционной проволоки не выявлены дефекты в виде пор, опасных неметаллических включений, трещин. Микролегирования метал-

ла (Ti, Zr, Ce, B) не повлияло на соотношение между содержанием в структуре легированного γ -твердого раствора и легированной γ' -фазы (Ni_3Al). Элементный и морфологический анализ этих фаз является предметом отдельного исследования.

Вывод

Установлено, что введение через наполнитель композиционной проволоки частиц тугоплавких соединений TiB_2 , ZrB_2 , CeO_2 способствует активированию процессов формирования расплава на торце КП вследствие снижения поверхностного натяжения на границе расплав-парогазовая смесь под влиянием поверхностно

активных бора и кислорода. Результатом такого воздействия на расплав является повышение качества переноса металла в сварочной дуге, что увеличивает значения коэффициентов перехода туго- и легкоплавких легирующих элементов в наплавленный металл.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Разработка порошковых проволок для дуговой металллизации жаростойких покрытий на основе нейросетевого моделирования / Ю. С. Коробов, С. В. Невежин, В. С. Верхорубов, Г. А. Ример // Сварка и диагностика. – 2014. – № 5. – С. 18–22.
2. Определение технологических характеристик плавления порошковой проволоки с сердечником из порошка тугоплавких металлов / В. А. Ерофеев, А. В. Масленников, О. И. Зайцев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 11–1. – С. 15–21.
3. Non-wetting behaviour of tungsten carbide powders in nickel weld pool: new loss mechanism in GMAW overlays S. D. Guest, J. Chapuis, G. Wood and P. F. Mendez // Science and Technology of Welding and Joining. – 2014. – Vol. 19. № 2. – P. 133–141.
4. Наплавка трубопрошивных оправок сплавом на основе Ni_3Al с использованием композиционной проволоки / И. В. Зорин, Г. Н. Соколов, Ю. Н. Дубцов, В. И. Лысак, Ан. С. Бобков // Сварка и Диагностика. – 2016. – № 2. – С. 20–23.
5. Thermal- and wear-resistant alloy arc welding depositions using composite and flux-cored wires with TiN, TiCN, and WC nanoparticles / Г. Н. Соколов, И. В. Зорин, А. А. Артемьев, С. К. Елсуков, Ю. Н. Дубцов, В. И. Лысак // Journal of Materials Processing Technology. – 2019. – Vol. 272. – P. 100–110.
6. Оценка параметров импульсно-дуговой сварки высокохромистой порошковой проволокой / Ю. С. Давыдов, Н. М. Разиков, Ю. С. Коробов и т. д. // Сварочное производство. – 2017. – № 6. – С. 14–20.
7. Влияние активирования на перенос металла при сварке в углекислом газе / И. К. Походня, Л. Н. Орлов, А. М. Бейниш // Автоматическая сварка. – 1975. – № 1. – С. 4–6.
8. Влияние покрытия сварочной проволоки на технологические свойства дуги в защитных газах / В. А. Ленивкин, Н. Г. Дюргеров, П. И. Петров, Е. Н. Варуха // Сварочное производство. – 1978. – № 5. – С. 8–10.
9. Исследование сварочных проволок с нанокomпозиционными покрытиями на никелевой матрице при сварке в среде защитных газов / С. Г. Паршин, А. С. Майстро // Сварка и диагностика. – 2015. – № 3. – С. 12–16.
10. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанокomпозиционным упрочнением : монография / Ю. Р. Колобов [и др.] ; под науч. ред. Е. Н. Каблова и Ю. Р. Колобова. – М. : МИСиС, 2008. – 326 с.