

## ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ СПЛАВОВ

А. И. БЕЛЫЙ, А. П. ЖУДРА, В. И. ДЗЫКОВИЧ, В. В. ПЕТРОВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены особенности формирования композиционных сплавов на базе карбидов вольфрама при дуговой наплавке. Установлено, что при разработке электродного материала наиболее целесообразно в качестве износостойкой фазы применение сферических гранул карбидов вольфрама, которые в меньшей степени подвержены растворению в процессе наплавки. Установлено оптимальное содержание армирующей фазы в электродном материале, которое должно колебаться в пределах 60...70 % массы материала по объему. Разработана газшлакообразующая и легирующая системы и изготовлены опытные составы электродов. Опытным путем установлен ряд технологических особенностей по обеспечению однородности покрытия, состоящего из компонентов, различных по удельному весу и гранулометрическому составу, а также нанесению его на стержень электрода. Определены особенности процесса наплавки разработанными электродами, представлены результаты металлографических исследований наплавленного металла. Лабораторные испытания на абразивный износ композиционных сплавов опытными электродами показали их высокую эффективность. Библиогр. 10, табл. 1, рис. 2.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка, композиционный сплав, покрытый электрод, карбид вольфрама, армирующие частицы, износостойкость

Существующие способы получения композиционных сплавов методом наплавки основаны на использовании эффекта армирования наплавленного металла частичками плавящихся карбидов вольфрама WC + W<sub>2</sub>C (релит), которые имеют высокую твердость (HV 1800...2200) и большой удельный вес. Наиболее распространенный способ получения композиционных сплавов — ручная ацетилено-кислородная наплавка с присадкой. В качестве присадочного материала чаще всего применяют разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона ленточный или, значительно реже, трубчато-зерновой релит, а также прутки или гибкие шнуры зарубежных фирм [1–3]. В последние годы получили распространение плазменно-порошковая и лазерная наплавки композиционных сплавов [4, 5]. В меньшей степени в настоящее время применяют индукционную или плазменную наплавку с присадкой порошка или ленточного электрода [6]. Известно также о применении печного способа получения композиционных сплавов [1,7]. Однако большой объем подготовительных работ, применение в качестве матрицы низкотемпературных материалов и высокая энергоемкость сдерживают распространение указанного способа.

Все упомянутые выше способы наплавки нуждаются в стационарных постах и специализированном оборудовании. Однако возникают проблемы с наплавочными материалами при необходимости упрочнения деталей в полевых условиях и если затруднен демонтаж деталей. В таких случаях для дуговой полуавтоматической или ручной наплавки композиционных сплавов в Украине применяются

только импортные материалы. Как правило, это порошковые проволоки, электроды, прутки известных фирм DURUM, Castolin, Sulzer Metco Woka и др.

В связи с этим значительный интерес представляет разработка отечественных электродных материалов для дуговой наплавки композиционных сплавов. Применение электродуговой наплавки имеет целый ряд преимуществ перед другими способами: универсальность и простота технологического процесса; высокая производительность по сравнению с газовой наплавкой; низкие энергозатраты на наплавку; широкий диапазон регулирования основных параметров режима наплавки; возможность механизации и автоматизации процесса наплавки. Для реализации электродугового способа наплавки необходимо создание новых отечественных электродных материалов, позволяющих получать композиционные сплавы с заданными высокими служебными характеристиками. Максимальная эффективность таких сплавов достигается за счет оптимальной концентрации армирующей фазы, которая в наибольшей мере определяет износостойкость наплавленного металла, а также работоспособностью матрицы (износостойкость, трещиностойкость, пористость и т. д.). При этом износостойкость полученных сплавов в значительной мере также зависит от химического состава матрицы, который определяется степенью растворения гранул карбида вольфрама вследствие диффузии вольфрама и углерода в сварочной ванне при наплавке. Также это приводит к снижению концентрации армирующей фазы и

увеличению хрупкости матрицы за счет образования вторичных сложных железобольфрамидов карбидов [8, 9]. Особенно это проявляется при использовании гранул карбида вольфрама, полученных традиционным путем дробления слитков. Как правило, такие гранулы поражены множеством трещин, имеют неправильную форму и острые углы, что способствует их значительному растворению в жидком матричном расплаве.

Работы по созданию технологии распыления тугоплавких соединений, проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона, позволили выйти на промышленный выпуск гранул плавящихся карбидов вольфрама сферической формы практически всех фракционных составов от 0,05 до 0,8 мм. Прочность сферических частиц в 1,5...1,7 раза выше прочности дробленых зерен аналогичного состава, а микротвердость после распыления выросла до  $HV$  2800...3000 [10]. При этом исследованиями установлено, что благодаря сферической форме армирующих частиц удалось значительно снизить растворение их при наплавке и уменьшить переход вольфрама и углерода из армирующих частиц в матрицу. Так, при газовой наплавке ленточным релитом с дроблеными армирующими зернами размером 0,45...0,63 мм, среднее содержание вольфрама в матрице композиционного сплава достигает 18...20%, а со сферическими армирующими зернами такого же размера 11...12% [10]. Таким образом, при разработке нового электродного материала было целесообразно в качестве армирующей фазы использовать сферические гранулы карбида вольфрама  $WC + W_2C$  и тем самым обеспечить их минимальное растворение в сварочной ванне.

Известно, что соотношение между содержанием армирующих частиц и сплавом-связкой композиционного сплава является одним из определяющих условий износостойкости сплава в целом. Данное соотношение зависит от вида и конструкции присадочного материала, гранулометрического состава армирующих частиц и должно находиться в пределах 60...70%, что обеспечивает содержание износостойкой фазы в наплавленном слое порядка 40% по объему и его высокую износостойкость. Это соотношение легло в основу создания нового наплавочного электродного материала.

Главной особенностью разрабатываемых электродов является то, что армирующие гранулы вводятся в состав покрытия электродов, которое в результате состоит из компонентов, значительно отличающихся между собой размером и удельной массой частиц. Это потребовало в дальнейшем определенных технологических приемов при изготовлении электродов такого состава. В качестве износостойкой составляющей применяются гранулированные частицы карбидов вольфрама сферической формы размером 0,45...0,63 мм, 0,63...0,80 мм. Выбор таких частиц обусловлен конструктивными особенностями оборудования

для производства электродов и требуемым коэффициентом массы покрытия.

Газошлакообразующая и легирующая система представлена традиционными шихтовыми компонентами, применяющимися для изготовления сварочных и наплавочных материалов. Гранулометрический состав шихтовых материалов находился в пределах 0,28...0,40 мм. В качестве газошлакообразующей системы принята система на основе мрамора и плавиковошпатового концентрата. Раскисление сварочной ванны осуществлялось путем введения в состав покрытия электродов ферромарганца и ферросилиция. Для частичного ограничения образования в матрице наплавленного композиционного сплава хрупких железобольфрамидов структур в состав покрытия вводят легирующие ферросплавы, содержащие титан и ванадий.

Эти элементы имеют большее сродство к углероду, чем железо и вольфрам и, в первую очередь, образуют свои карбиды, снижая, таким образом, количество вторичных железобольфрамидов карбидных фаз. Учитывая приведенное выше различие компонентов по удельному весу и гранулометрическому составу, их смешивание проводилось с соблюдением необходимых технологических мер, обеспечивающих однородность состава покрытия. При этом, с учетом высокого коэффициента массы покрытия, опрессовка электродов проводилась на скоростях, значительно ниже обычных, установленных при изготовлении типовых электродов. Отношение массы сферических частиц карбидов вольфрама, находящихся в покрытии, к массе металлического стержня находилось в пределах 60...65%.

Опытным путем установлены режимы сушки и прокалики электродов после опрессовки, при которых обеспечивается соответствующее качество покрытия. Прокалку электродов необходимо осуществлять в вертикальном положении с использованием специальных обойм, так как применение стеллажей для сушки в горизонтальном положении приводит к возможному искажению равномерности покрытия электрода, вследствие его большого удельного веса. Сушка и прокалка электродов проводится по следующему циклу:

- сушка электродов в вертикальном положении при комнатной температуре в течение 24 ч;
- предварительная прокалка электродов в печи при  $T = 200$  °С в течение 1 ч;
- прокалка электродов в печи при  $T = 400$  °С в течение 2 ч.

Для сравнительных исследований изготовлено свыше десяти опытных составов присадочных материалов. Внешний вид электродов с частицами сферических карбидов вольфрама показан на рис. 1.

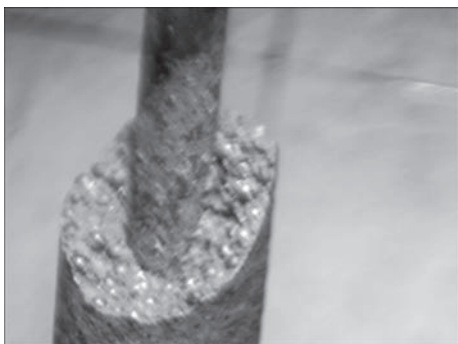


Рис. 1. Электрод для электродуговой наплавки композиционных сплавов

Для оценки технологических особенностей процесса наплавки разработанными электродами и металлографических исследований изготовлены образцы, наплавленные данными электродами. На рис. 2 представлена макроструктура наплавленного композиционного слоя. Концентрация армирующих частиц в плоскости шлифа составляет свыше 45 %.

Необходимо отметить, что процесс наплавки новыми электродами имеет свои технологические особенности. Прямое воздействие дуги на армирующие частицы может привести к их частичному разрушению, появлению мелких частиц карбидов вольфрама и повышению степени насыщения матричного расплава вольфрамом и углеродом.

В связи с этим, при наплавке требуется применение технологических приемов, обеспечивающих переход карбидов вольфрама из покрытия в сварочную ванну при минимальном воздействии дуги на армирующие частицы. Наплавка проводилась в нижнем положении с наклоном электрода вперед при небольших колебаниях, обеспечивающих некоторые запаздывания плавления обмазки и этим способствуя переходу значительной части армирующих частиц в сварочную ванну, минуя область высоких температур. Однако соблюдение указанных приемов не исключает диффузию вольфрама и углерода в сплав-связку. Поэтому полностью исключить образование в матрице сплава нежелательных структур, которые охрупчивают

**Результаты испытаний образцов на абразивное изнашивание**

Маркировка образца	Масса образца, г		Износ, г	Относительная износостойкость
	Начальная	После испытаний		
Сталь 45-1	11,6157	10,9912	0,6245	1,0
ОП-1	12,9226	12,8474	0,0752	8,3
ОП-2	12,7251	12,6587	0,0664	9,4
ОП-3	12,6434	12,5663	0,0771	8,1
Сталь 45-2	11,8264	11,0612	0,7652	1,0
ОП-4	13,0876	12,9895	0,0981	7,8
ОП-5	13,3317	13,2485	0,0832	9,2
ОП-6	12,9581	12,8659	0,0922	8,3
Сталь 45-3	11,7361	11,0518	0,6843	1,0
С-1	12,6769	12,5869	0,0900	7,6
С-2	12,4935	12,3985	0,0950	7,2
С-3	13,1079	13,0058	0,1021	6,7

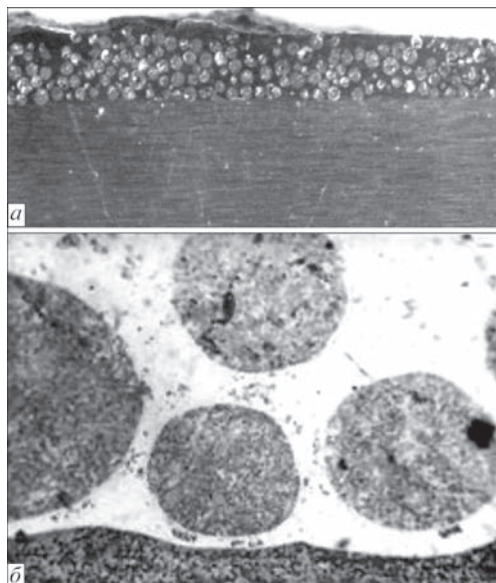


Рис. 2. Макроструктура композиционного сплава: а — ×80; б — ×200

матрицу, в виде вторичных железобольфрамовых карбидов и эвтектик невозможно. Результаты исследований микроструктуры композиционных сплавов, полученных при электродуговой наплавке, будут освещены в отдельной работе.

Для оценки износостойкости композиционных слоев, наплавленных опытными электродами, применялась методика испытаний на абразивное изнашивание на машине НК-М, заключающаяся в истирании образцов МИ-90, которые движутся по медной дорожке со скоростью 0,5 м/с под нагрузкой 30 Н. Путь трения составляет 800 м, абразивом служит кварцевый песок. В качестве эталона применяется образец, изготовленный из стали 45. Износостойкость оценивается по отношению потери массы образца эталона к потере массы испытуемого образца. Результаты испытаний представлены в таблице. Данные, приведенные в таблице, показывают, что композиционные сплавы, наплавленные с использованием опытных электродов (ОП-1...ОП-6) не уступают, а в некоторых случаях превосходят серийные (С-1...С-3) в 1,2...1,4 раза и могут успешно применяться для износостойкой наплавки различных деталей.

**Выводы**

1. На основе гранулированных карбидов вольфрама сферической формы разработаны электроды для дуговой наплавки композиционных сплавов, особенностью которых является введение армирующих гранул в состав покрытия электродов. Разработанные электроды обеспечивают концентрацию армирующих частиц в наплавленном композиционном слое не менее 40...50 %.

2. Разработана технология изготовления электродов, обеспечивающая однородность покрытия, состоящего из компонентов различных по удель-



ной массе и гранулометрическому составу. Определены особенности режимов сушки и прокалики электродов.

3. Результаты лабораторных испытаний на абразивное изнашивание позволяют прогнозировать высокие служебные характеристики разработанных электродов.

### Список литературы

1. Жудра А. П. (2014) Наплавочные материалы на основе карбидов вольфрама. *Автоматическая сварка*, 6-7, 69–74.
2. (2016) *Weld hardface and cladding materials guide*. Oerlikon Metco, 8.
3. (2016) *Hard-facing materials*. DURUM Verschleiss-Schutz GmbH.
4. Harper D., Gill M., Hart K.W.D., Anderson M. (2002) Plasma transferred arc overlays reduce operating costs in oil sand processing. *International Thermal Spray Conf., March 4–6, 2002, Essen, Germany*, ASM International, pp. 278–293.
5. Сом А. И. (2004) Плазменно-порошковая наплавка композиционных сплавов на базе литых карбидов вольфрама. *Автоматическая сварка*, 10, 49–54.
6. Белый А. И. (2010) Влияние основных технологических параметров плазменной наплавки ленточным релитом на свойства композиционного наплавленного металла. *Там же*, 6, 30–32.
7. Данилов Л. И., Ровенских Ф. М. (1973) Наплавка деталей засыпных устройств доменных печей композиционным сплавом. *Металлург*, 1, 18–21.
8. Фрумин Е. И., Жудра А. П., Пашченко М. А. (1979) Физико-химические процессы при наплавке ленточным релитом. *Сварочное производство*, 10, 27–32.
9. Жудра А. П., Махненко В. И., Пашченко М. А. и др. (1975) Особенности автоматической дуговой наплавки композиционных сплавов. *Автоматическая сварка*, 8, 16–19.
10. Дзыкович В. И., Жудра А. П., Белый А. И. (2010) Свойства порошков карбидов вольфрама, полученных по различным технологиям. *Там же*, 4, 28–31.

### References

1. Zhudra, A.P. (2014) Tungsten carbide based cladding materials. *The Paton Welding J.*, 6-7, 66-71.
2. (2016) *Weld hardface and cladding material guide*. Oerlikon Metco, 8.
3. (2016) *Hard-facing materials*. DURUM Verschleiss-Schutz GmbH.
4. Harper, D., Gill, M., Hart, K.W.D., Anderson, M. (2002) Plasma transferred arc overlays reduce operating costs in oil sand processing. *In: Proc. of Int. Thermal Spray Conf., March 4-6, 2002, Essen, Germany*. ASM International, 278-293.
5. Som, A.I. (2004) Plasma-powder surfacing of composite alloys based on cast tungsten carbides. *The Paton Welding J.*, 10, 43-47.
6. Bely, A.I. (2010) Influence of main technological parameters of the plasma cladding process on properties of composite deposited metal. *Ibid.*, 6, 25-27.
7. Danilov, L.I., Rovenskykh, F.M. (1973) Surfacing of parts of charging equipment of blast furnace by composite alloy. *Metallurg*, 1, 18-21 [in Russian].
8. Frumin, E.I., Zhudra, A.P., Pashchenko, M.A. (1979) Physico-chemical processes in surfacing by strip relite. *Svarochn. Proizvodstvo*, 10 [in Russian].
9. Zhudra, A.P., Makhnenko, V.I., Pashchenko, M.A. et al. (1975) Peculiarities of automatic arc surfacing of composite alloys. *Avtomatich. Svarka*, 8, 16-19 [in Russian].
10. Dzykovich, V.I., Zhudra, A.P., Bely, A.I. (2010) Properties of tungsten carbide powders produced by different technologies. *The Paton Welding J.*, 4, 22-24.

О. І. Білий, О. П. Жудра, В. І. Дзикович, В. В. Петров

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

### ЕЛЕКТРОДИ ДЛЯ ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ СПЛАВІВ

Розглянуто особливості формування композиційних сплавів на базі карбідів вольфраму при дуговому наплавленні. Встановлено, що при розробці електродного матеріалу найбільш доцільно в якості зносостійкої фази застосування сферичних гранул карбідів вольфраму, які менше схильні до розчинення в процесі наплавлення. Встановлено оптимальний вміст армуючої фази в електродному матеріалі, який повинен коливатися в межах 60...70 % маси матеріала за об'ємом. Розроблено газошлакообразуюча та легуюча системи і виготовлені електроди розроблених складів. Дослідним шляхом встановлено ряд технологічних особливостей із забезпечення гомогенності покриття, що складається з компонентів різних за питомою вагою і гранулометричним складом, а також нанесення його на стрижень електрода. Визначено особливості процесу наплавки розробленими електродами, представлено результати металографічних досліджень наплавленного металу. Лабораторні випробування на абразивний знос композиційних сплавів розробленими електродами показали їх високу ефективність. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 2.

*Ключові слова:* дугова наплавка, композиційний сплав, покритий електрод, карбід вольфраму, армуючі частинки, зносостійкість

A.I. Belyi, A.P. Zhudra, V.I. Dzykovich, V.V. Petrov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

### ELECTRODES FOR ARC SURFACING OF COMPOSITE ALLOYS

This paper considers the peculiarities of formation of composite alloys based on tungsten carbides in arc surfacing. It is determined that application of spherical granules of tungsten carbides, which are to lower degree subjected to solution in process of surfacing, is the most reasonable in development of electrode material. The optimum content of reinforcing phase in electrode metal was determined which shall vary in 60-70% limits of material mass in volume. Developed were gas-slag-forming and alloying systems and pilot compositions of the electrodes were manufactured. A series of technological peculiarities on providing coating homogeneity, consisting of components different on specific gravity and grain-size composition, as well as its deposition on electrode rod were specified in experimental way. Determined were specifics of surfacing process using developed electrodes, presented are the results of metallographic examinations of deposited metal. Laboratory abrasive wear tests of composite alloys with pilot electrodes showed their high efficiency. 10 Ref., 1 Tabl., 2 Fig.

*Keywords:* arc surfacing, composite alloy, coated electrode, tungsten carbide, reinforcing particles, wear-resistance

Поступила в редакцию 28.11.2017