

04;05;10;11

Структура и свойства покрытия из $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$, нанесенного на медь высокоскоростной плазменной струей

© А.Д. Погребняк, М.В. Ильяшенко, В.С. Кшнякин,
В.В. Понарядов, Ш.М. Рузимов, Ю.Н. Тюрин

Сумский институт модификации поверхности, Сумы, Украина
E-mail: arogrebnyak@simp.sumy.ua
Беларусский государственный университет, Минск, Беларусь
Национальный университет, Ташкент, Узбекистан
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

В окончательной редакции 6 июня 2003 г.

С помощью высокоскоростной плазменной струи и специально рассчитанных режимов плазмотрона были нанесены покрытия из карбида хрома с никелем на подложку из технической меди. Проведенный анализ покрытия показал образование твердого раствора на основе Ni, формирование сложного карбида хрома (Cr_7C_3) и ГЦК-фазы с параметром решетки 3.614 Å. На поверхности покрытия обнаружен характерный рельеф, связанный с динамическим взаимодействием расплавленных и оплавленных частиц порошка. Твердость покрытия в отдельных участках поверхности и в глубине покрытия достигает 66 ± 4.5 HRC, а сила адгезии — от 25 до 300 МПа.

В последнее время к эффективным средствам повышения надежности и долговечности изделий, оборудования из металлов и сплавов, технологической и инструментальной оснастки относятся методы поверхностной обработки с помощью пучков частиц, плазмы, света. Наиболее распространенным видом такого упрочнения являются различные пленки и покрытия. Одной из новых технологий, обеспечивающей возможность модифицирования поверхности конструкционных материалов, нанесения на них покрытий с защитными и другими функциями, является импульсное плазменно-детонационное напыление [1–4].

Плазменно-детонационная технология основана на использовании импульсных плазменных струй, транспортируемых детонационной волной в плазменном импульсе.

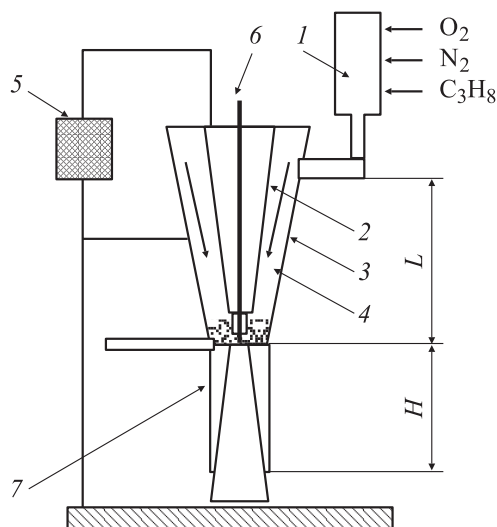


Рис. 1. Схема работы устройства для импульсной плазмодетонационной обработки и нанесения покрытия на металлическую подложку.

Как известно, для формирования плотного, хорошо прилегающего к поверхности изделия покрытия (даже без нагрева), достаточно иметь скорость частиц сплава на основе металлов от 100 до 1000 м/с [2,3]. В последнее время разработаны устройства для нанесения покрытий, где применена боковая подача порошков и используются газодинамические системы управления [1,4]. Газы и порошок вводятся при понижении давления в камере сгорания (КС) периодически после выбрасывания скоростной струи продуктов сгорания. Предложено [4] смешивание компонентов и детонацию горючей газовой смеси осуществлять в специальной камере сгорания *I* (рис. 1), которая выполнена отдельно от импульсного плазмотрона. Плазмотрон состоит из внутреннего конического электрода *2* и внешнего электрода-катода *3*. Между двумя коаксиальными электродами в междуэлектродном зазоре *4* [5,6], который имеет длину *L*, наведено электрическое поле *E* посредством источника высокого напряжения *5*. В центральном электроде встроен расходимый металлический стержень *6*. Стержень, как правило, изготовлен из тугоплавкого материала (W, Mo, Ta, Hf и т.д.). Импульсный плазмотрон содержит ствол *7*, который предназначен для ускорения и нагрева

порошка. Длина ствола H выбирается в зависимости от элементного состава и дисперсности порошка. Для напыления оксидов длина ствола была рассчитана и составила около $H \approx 380$ mm. Порошок вдувается в ствол через трубопровод [7].

Частота следования импульсов составляла 4 Hz. Емкость $C = 600 \mu\text{F}$, $H = 380$ mm между образцами и соплом плазмотрона, скорость перемещения $V = 0.6$ cm/s, число проходов от 1 до 4. Размеры порошков КХН-30 $25 \div 56 \mu\text{m}$ (состав $\text{Cr}_3\text{C}_2 + 30$ wt.% Ni). Следует заметить, что этот порошок был разработан для покрытий изделий, работающих в окислительной и абразивной средах при достаточно высоких температурах от 300 до 800°C. Поэтому исследование таких покрытий не только представляет научную ценность, но и имеет прикладное значение.

Для исследования фазового состава покрытия проводили измерения на установке ДРОН-2 в кобальтовом излучении. Морфологию поверхности и микроанализ с помощью дисперсии по энергии проводили на сканирующем электронном микроскопе (SEM с EDS) РЭММА-2М и СХА-733 JEOL. Элементный анализ был проведен с помощью вторичной ионной масс-спектрометрии (SIMS) на установке МС-7201 М с пучком ионов Ar и энергией до 20 keV. Твердость покрытия измеряли по Роквеллу в единицах HRC, а силу адгезии определяли методом скрабирования алмазной пирамидкой на поперечном и косом шлифе.

Анализ дифрактограмм, измеренных на установке ДРОН-2 в кобальтовом излучении на покрытии, показал, что в составе покрытия имеется три фазы: твердый раствор на основе Ni с периодом решетки $a = 3.525 \text{ \AA}$ (табличные данные для Ni $a = 3.524 \text{ \AA}$), соединение Cr_7C_3 , а также гранецентрированная кристаллическая (ГЦК) фаза с параметром решетки 3.614 \AA .

На рис. 2, *a, b* приведены изображения поверхности (*a*) покрытия и излома покрытия (*b*). Структура и морфология покрытия заметно отличаются по глубине: имеются светлые участки (характерные для карбида хрома) и блестящие темные участки (характерные для металлической фазы никеля). Микроанализ, проведенный в этих участках (рис. 2, *c*), показал наличие Cr, Ni, O, Cu и Fe в покрытии, причем есть блестящие участки, в которых находится только Ni с небольшим содержанием примеси Cr, Cu. В тех областях, где имеется блестящий оттенок, обнаружено около 96% Ni и около 4% Cr. Очевидно, что в этой области находится зерно или порошок никеля с небольшим содержанием Cr, появившегося в результате оплавления порошинки и

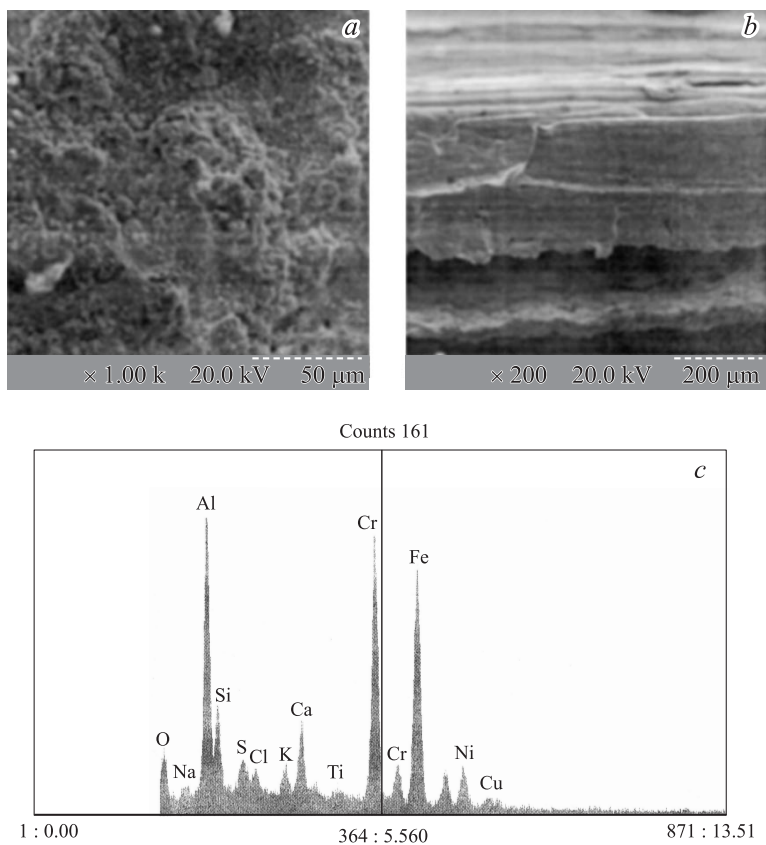


Рис. 2. *a* — морфология поверхности покрытия из $\text{Cr}_3\text{C}_2+30 \text{ wt.}\% \text{ Ni}$, полученная при помощи растрового электронного микроскопа; *b* — структура покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2+30 \text{ wt.}\% \text{ Ni}$ в изломе; *c* — рентгеновские спектры, снятые на покрытии и измеренные на установке РЭММА-2М с дисперсией по энергии (в точке смешанного состава — серый цвет); *d* — зависимость твердости по глубине покрытия (косой шлиф) при нагрузке на пирамидку 50 г.

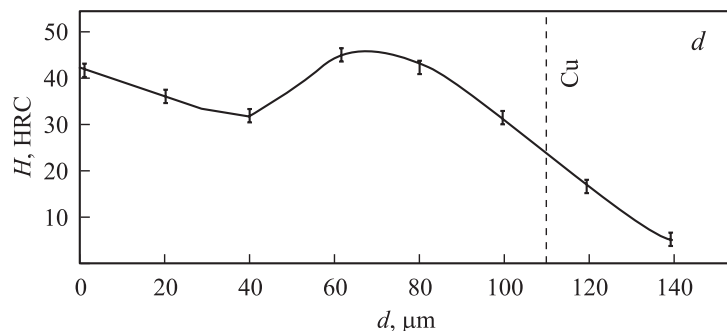


Рис. 2 (продолжение).

смешивания в жидкой фазе или газоплазменном состоянии в момент пролета в плазменной струе порошинок окиси Cr и металлического Ni. В тех областях, с серым фоном, атомная концентрация Cr составляет около 61%, Ni около 8.5%, кислорода около 5.6%, меди около 13.3%, железа 2.6% и алюминия свыше 5%, а элементы сера, кальций, кремний составляют менее 1%. Можно предположить, что Cu проникает из подложки в результате динамического и температурного воздействия плазменной струи. Поэтому ГЦК-фаза с параметром решетки 3.614 Å принадлежит Cu.

Измерения твердости покрытия по поперечному шлифу, проведенные с помощью пирамидки Роквелла, показали, что максимальное значение твердости в светлых участках (Cr_7C_3 — основная фаза) составляет 66 ± 4.5 HRC, а на блестящих темных участках с преобладанием твердого раствора Ni твердость составляет около 45 ± 1.5 HRC. Измерения силы адгезии покрытия к подложке путем скрабирования алмазной пирамидкой по поперечному и косому шлифу показали, что эти значения сильно отличаются и составляют от 25 до 300 МПа.

В таблице приведены значения твердости на поверхности при разных нагрузках на пирамидку. Анализ результатов измерения твердости позволяет сказать о том, что глубина, на которую вдавливается пирамидка, такая же, как характерный размер отпечатка, и составляет десятки микрометров. Рассматривая значения твердости от приложенной нагрузки, мы можем сделать вывод, что размер кристаллов (зерна) в покрытии имеет тот же порядок.

Результаты измерения твердости по Роквеллу на поверхности покрытия при различной нагрузке на пирамидку

№ серии испытания	Нагрузка, g	Твердость, HRC	Примечание
1-4	50	58 ± 1	Серое поле
	100	51 ± 3	
	200	48 ± 5	
6,8,9,12	50	62 ± 4	Однородное серое поле
	100	56 ± 1	
	200	50 ± 1	
10,11,13	50	27 ± 7	Светлое поле
	100	35 ± 3	
	200	50 ± 12	

На рис. 2, *d* представлена зависимость твердости покрытия, полученная с помощью плазмодетонационной установки по глубине покрытия (косой шлиф), при одинаковой нагрузке на пирамидку. Измерение проводилось только по серым участкам покрытия для того, что получить более достоверную информацию о твердости по глубине нанесенного покрытия.

Таким образом, в этом сообщении показано, что при оптимальных расчетных режимах нанесения покрытия из карбида хрома с 30 wt.% Ni можно получить достаточно хорошего качества покрытия с высокой твердостью до 66 HRC и хорошей адгезией, достигающей 300 МПа. При этом покрытие состоит из твердого раствора на основе Ni, сложных карбидов Cr (Cr_7C_3) и ГЦК-фазы на основе Cu (3.614\AA). Испытания деталей тепловых электростанций, таких как лопасти импеллеров, поверхности труб в котлах, работающих в окислительной среде (на воздухе), в шлаковой среде (шлаковые частицы) при высокой температуре ($300 \div 800^\circ\text{C}$) с покрытием из Cr_3C_2+Ni , нанесенных с помощью импульсной плазменной струи, показали их хорошую стойкость и работоспособность.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность О.В. Колисниченко за помощь в проведении экспериментов.

Работа частично финансировалась по проектам 2М/076-2000 и 2М/0145-2001 Министерства образования и науки Украины.

Список литературы

- [1] *Погребняк А.Д., Ильяшенко М.В., Кульментьева О.П.* и др. // ЖТФ. 2001. Т. 21. В. 8. С. 111.
- [2] *Kuroda S.* // *Proced. of the 10th Inter. Thermal Spray Conference 25–29 May, 1999. France.* P. 539.
- [3] *Зверев А.И., Шаривкер С.Ю., Астахов Е.А.* Детонационное нанесение покрытий. Л.: Судостроение, 1979. 178 с.
- [4] *Tsurin Yu.N., Pogrebnyak A.D.* // *Surf. and Coat. Tech.* 1999. V. 111. P. 269.
- [5] *Погребняк А.Д., Ильяшенко М.В., Кишнякин В.С.* и др. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 17. С. 82.
- [6] *Погребняк А.Д., Тюрин Ю.Н., Иванов Ю.Ф.* и др. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 21. С. 58.
- [7] *Pogrebnyak A.D., Pjashenko M.V., Kul'ment'eva O.P.* et al. // *Vacuum.* 2001. V. 62. P. 21.