



ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Fe–C–Cr–Al, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Чл.-кор. НАН Украины **В. И. ПОХМУРСКИЙ, М. М. СТУДЕНТ, И. И. СИДОРЯК**, кандидаты техн. наук (Физ.-механич. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины, г. Львов)

И. А. РЯБЦЕВ, Ю. М. КУСКОВ, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследован фазовый состав и процессы структурообразования в покрытиях, полученных методом электродуговой металлизации. Установлено, что структура покрытий системы Fe–C–Cr–Al состоит из мартенсита, троостита и остаточного аустенита с различным содержанием легирующих элементов. При повышении содержания Al более 2 % в шихте порошковой проволоки увеличивается прочность сцепления покрытия с основой, одновременно с этим в структуре покрытия появляется легированный феррит.

Ключевые слова: электродуговая металлизация, покрытия, фазовый состав покрытий, микроструктура покрытий, порошковые проволоки

Разработка оптимальных составов электродных материалов и, в частности, порошковых проволок для электродуговой металлизации (ЭДМ), обеспечивающих получение покрытий с заданными физико-механическими свойствами, невозможна без знания фазового состава и процессов структурообразования в покрытиях в зависимости от химического состава электродного материала. В большинстве порошковых проволок, используемых для ЭДМ коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания, различных осей и т. п., основными элементами, ответственными за фазовый состав покрытий, являются углерод, хром и алюминий. Статья посвящена исследованию совместного влияния углерода и алюминия в шихте порошковой

проволоки на основе феррохрома на фазовый состав покрытий.

Материалы и методика исследований. Для изготовления порошковых проволок для ЭДМ диаметром 1,8 мм применяли холоднокатаную ленту из стали 08кп сечением 0,4×10 мм. В качестве шихтовых материалов использовали феррохром (ФХ-200, ФХ-800), ферромolibден (ФМо-60), ферросилиций (ФС-65), порошок алюминиевый (ПА-4), графит тигельный (ГТ-1), порошок железный (ПЖО). Для исследований было изготовлено несколько порошковых проволок, химический состав шихты которых приведен в табл. 1. С целью сравнения исследовали также покрытия из сплошной проволоки марки У8.

Покрытия наносили с помощью электрометаллизатора ГТ-1, разработанного в ФМИ им. Г. В. Карпенко. Режимы нанесения покрытий: напряжение – 32 В; ток – 140 А; давление воздуха 0,5 МПа;

Таблица 1. Состав шихты порошковых проволок, химический и фазовый состав покрытия

Условное наименование проволоки	Состав шихты порошковых проволок, мас. доля, %						Массовая доля элементов*, %		Фазовый состав покрытия		
	Феррохром	Ферросилиций	Ферромolibден	Графит	Алюминий	Железо	Углерод	Хром	Отношение α-Fe/γ-Fe	Цементит	Оксиды
Сплошная проволока У8	–	–	–	–	–	–	0,8/0,18	–	15/1	До 5 % объема	Следы FeO
Порошковая проволока ХСМ-1	70 (ФХ-200)	10	20	–	–	–	0,4/0,25	10,5/10	8/1	Следы	Следы FeO
Порошковая проволока ХСМ-2	70 (ФХ-800)	10	20	–	–	–	1,1/0,6	10,3/10	3/1	»	Следы Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄
Порошковая проволока ХЮ-1	55 (ФХ-800)	–	–	5	2	38	1,7/1,1	10/9	1/1	»	Следы FeO, Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄
Порошковая проволока ХЮ-2	60 (ФХ-200)	–	–	10	2	28	2,5/1,5	9/9	2/3	»	Следы FeO, Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄

* В числителе – расчетное содержание, в знаменателе – фактическое.

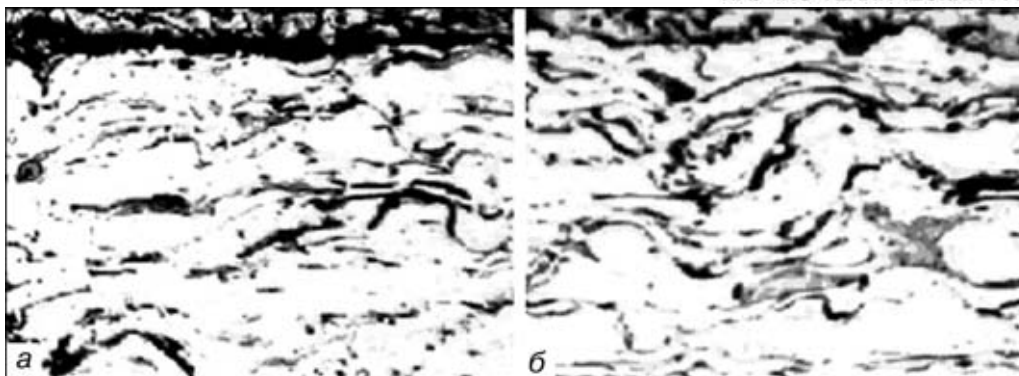


Рис. 1. Микроструктура покрытий с различным содержанием алюминия в шихте порошковых проволок, $\times 200$: а — 2; б — 15 %

расстояние от металлизатора до напыляемого образца — 100 мм.

Содержание углерода в покрытиях определяли кулонометрическим методом; хрома, алюминия и кремния — спектральным методом на дифракционном стилоскопе СЛ-13. Распределение капель по размерам определяли при распылении порошковых проволок на спрессованный снег с последующим ситовым анализом затвердевших капель по фракциям.

Фазовый состав покрытий изучали на дифрактомере «Дрон-3» ($U = 32$ кВ, $I = 13$ мА) с шагом сканирования 0,05, используя компьютерную обработку. Идентификацию фаз проводили по таблицам картотеки JCPDS-ASTM. Объемное соотношение между фазами α - и γ -Fe рассчитывали по интегральной интенсивности дифракционных линий. Распределение элементов в покрытиях определяли на сканирующем электронном микроскопе.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Покрытия, полученные при распылении порошковых проволок, состоят из сильно деформированных зерен — ламелей, которые слабо травятся в трехпроцентном растворе HNO_3 (рис. 1). На межзеренных границах наблюдаются включения оксидных пленок, состав которых соответствует FeO при использовании феррохрома ФХ-200 в шихте порошковой проволоки и FeO, Fe_2O_3 , Fe_3O_4 — при использовании ФХ-800.

Исследования показали, что за счет введения графита в состав шихты не удастся значительно увеличить содержание углерода в покрытии. Так, при введении 5 % графита в состав шихты порошковой проволоки на основе феррохрома ФХ-800 в покрытие содержится 0,85 % углерода, а при 15 % — 1,32. Это связано с тем, что углерод в виде свободного графита в значительной степени выгорает в процессе ЭДМ.

Установлено, что структура покрытия, полученного при использовании сплошной порошковой проволоки из стали У8, состоит из продуктов распада мартенсита — троостита, сорбита и цементита. В покрытии обнаружены включения FeO. Наличие небольшого количества аустенита объясняется тем, что в отдельных крупных каплях углерод выгорает в меньшей степени, чем в мелких, а его высокая концентрация увеличивает стабильность аустенита при быстрой кристаллизации наиболее крупных капель.

При увеличении содержания углерода в покрытии меняется его фазовый состав и увеличивается содержание остаточного аустенита. Так, при использовании в качестве основы шихты порошковой проволоки феррохрома ФХ-200 содержание углерода в покрытии составляет 0,18 %, а количество остаточного аустенита в структуре незначительно при соотношении фаз α -Fe/ γ -Fe = 8/1. Количество цементита невелико. Это свидетельствует о том, что часть α -Fe находится в виде мартенсита, легированного хромом, а незначительная часть — в виде продуктов распада мартенсита — троостита. При использовании в качестве основы шихты порошковой проволоки феррохрома ФХ-800 содержание углерода в покрытии увеличивается и составляет 0,66 %. Количество остаточного аустенита в структуре покрытия также увеличивается при соотношении фаз α -Fe/ γ -Fe = 3/1 и примерно том же составе α -фазы.

При дополнительном введении в состав шихты порошковых проволок графита в структуре покрытия увеличивается количество остаточного аустенита и его содержание достигает максимума при 10 % графита при соотношении фаз α -Fe/ γ -Fe = 2/3. По данным [1] такая структура имеет хорошие трибологические характеристики. Повидимому, углерод, который вводится в шихту порошковой проволоки в виде графита, не полностью переходит в твердый раствор покрытия, а частично остается в свободном состоянии (возможно, на границах ламелей, из которых состоит покрытие). Это подтверждается тем, что на рентгенограммах есть следы свободного графита, а также тем, что при увеличении содержания графита в шихте прочность на разрыв и прочность сцепления уменьшаются соответственно на 30 и 40 %. Свободный графит играет роль твердой смазки, улучшая трибологические характеристики покрытия.

Ситовый анализ фракционного состава покрытий из порошковой проволоки с графитом и без него показывает, что размер капель при ЭДМ колеблется в пределах 10...200 мкм, при этом массовая доля капель размером 10...50 мкм составляет примерно 60 %. Мелкие капли содержат меньше углерода и хрома, причем для порошковой проволоки, в состав которой входит графит, концентрация углерода больше как в малых, так и в больших каплях (табл. 2). Очевидно, что в процессе ЭДМ насыщение покрытия углеродом



Таблица 2. Размер капель электродного металла и содержание в них углерода и хрома

Размер капель, мкм	Проволока У8		Порошковая проволока ХСМ-2		Порошковая проволока ХЮ-2	
	Массовая доля углерода, %	Массовая доля углерода, %	Массовая доля хрома, %	Массовая доля углерода, %	Массовая доля хрома, %	
10... 50	0,22	1,2	7,0	0,60	9,0	
50... 150	0,26	1,5	8,5	0,68	9,5	
160... 200	0,30	2,3	10,0	0,83	11,5	

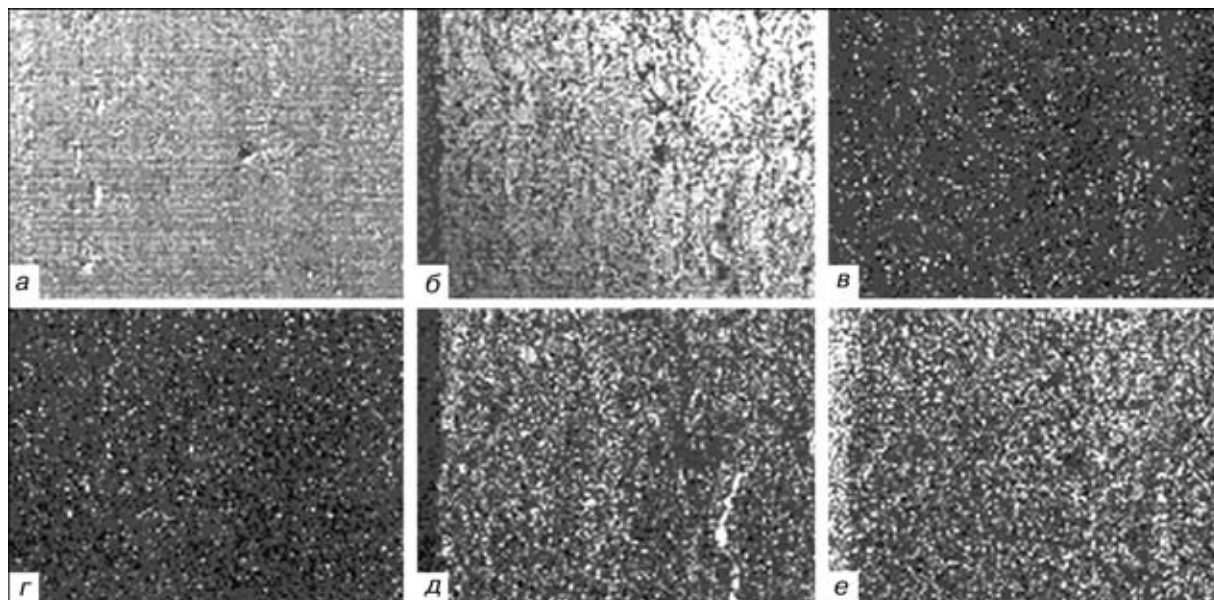


Рис. 2. Распределение легирующих элементов в покрытии, нанесенном с помощью порошковой проволоки типа FeCr + Al + C, полученное на электронном сканирующем микроскопе: а – в первичных электронах; б – во вторичных электронах; в – Al; г – Si; д – Cr; е – Fe (белые точки – место расположения данного элемента)

идет за счет высокоуглеродистого феррохрома и графита. В структуре всех покрытий с шихтой на основе феррохрома ФХ-800 есть следы всех трех оксидов железа – FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄.

Как установлено в работе [2], высокая адгезия покрытий с микротвердостью более 5000 МПа обеспечивается за счет алюминия, содержащегося в шихте порошковой проволоки. Алюминий взаимодействует в расплаве капель с железом с прохождением экзотермических реакций, выделяя большое количество тепла:

$3 \text{ Fe} + \text{Al} = \text{Fe}_3\text{Al} + 0,75 \text{ кДж/г шихты порошковой проволоки};$

$2/3 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} = 4/3 \text{ Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 3,5 \text{ кДж/г шихты порошковой проволоки};$

$2/3 \text{ Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} = 4/3 \text{ Cr} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 2,7 \text{ кДж/г шихты порошковой проволоки}.$

Температура капель, которые содержат алюминий, на 200... 400 °С выше, чем у капель, которые его не содержат. Кроме того, алюминий в расплавленной капле при контакте с поверхностью, на которую наносится покрытие, реагирует с находящейся на ней оксидной пленкой с прохождением экзотермических реакций. При этом температура в месте контакта поднимается, что обеспечивает лучшее соединение напыляемого покрытия с основой.

Таблица 3. Состав шихты порошковых проволок, химический и фазовый состав покрытия при различном содержании в нем алюминия и углерода

Условное наименование проволоки	Состав шихты порошковых проволок, массовая доля, %				Массовая доля элементов в покрытии, %*			Фазовый состав покрытия		
	Феррохром ФХ-800	Графит	Алюминий	Железо	Углерод	Хром	Алюминий	α-Fe/γ-Fe	Цементит	Оксиды
ХЮ-3	70	–	2	28	1,02/0,6	10,3/10	0,4/0,4	3/1	Следы	Следы Fe ₂ O ₃ и Fe ₃ O ₄
ХЮ-4	70	5	2	23	1,6/1,0	11,0/10,5	0,4/0,4	1,4/1	»	Следы FeO, Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄
ХЮ-5	60	5	10	25	1,5/0,9	10,5/9,8	2,2/2,0	1,4/1	»	То же
ХЮ-6	60	5	15	20	1,5/0,95	10,5/10,2	3,2/3,0	2,2/1	»	»
ХЮ-7	60	5	20	15	1,5/0,9	10,0/9,7	4,3/4,1	9/1	»	»

* В числителе – расчетное содержание, в знаменателе – фактическое.



Исходя из этих соображений, были проведены исследования влияния алюминия на структуру и свойства покрытий, получаемых методом ЭДМ (табл. 3). Рентгеноструктурный анализ покрытий, которые содержат до 3 % алюминия показывает, что их структура состоит из α -Fe и γ -Fe. При содержании 4,1 % алюминия аустенит в структуре покрытия практически исчезает. Распределение хрома и алюминия в покрытии достаточно равномерное и только на границах ламелей встречаются узкие участки, обогащенные алюминием и хромом. По-видимому, эти участки являются оксидными пленками, состоящими из оксидов алюминия и хрома — Al_2O_3 и Cr_2O_3 (рис. 2).

Микротвердость покрытий, содержащих 3 % алюминия, составляет 4000...6000 МПа. Минимальные из этих значений соответствуют микротвердости аустенита, максимальные — мартенсита. При содержании 4,1 % алюминия микротвердость покрытий резко падает до 2000...3000 МПа. Это связано с тем, что в структуре покрытия исчезают мартенсит и аустенит и появляется δ -феррит, легированный алюминием и хромом. Такая смена фазового состава обусловлена совместным действием алюминия и хрома как сильных ферритообразующих элементов. Практически отсутствие в структуре покрытия карбидов свидетельствует о том, что алюминий вытесняет углерод из кристал-

лической решетки железа. Он находится в свободном состоянии в очень мелкодисперсном виде и при металлографическом исследовании не обнаруживается.

Заключение. Покрытия системы Fe-C-Cr-Al, полученные с помощью порошковых проволок методом ЭДМ, формируются из расплавленных капель с разным содержанием легирующих элементов. Мелкие капли, по сравнению с крупными, имеют меньшее содержание углерода и хрома. Структура покрытий — мартенсит, троостит и остаточный аустенит с различным содержанием легирующих элементов.

Повышение содержания алюминия в шихте порошковой проволоки приводит к увеличению прочности сцепления покрытия с основой, одновременно с этим в структуре покрытия появляется легированный феррит. При содержании 4,1 % алюминия структура покрытия практически полностью становится ферритной.

1. *Зносостійкі газотермічні покриття з порошкових дровів системи Fe-Cr-C / В. І. Похмурський, В. В. Широков, М. М. Студент та ін. // Проблеми трибології. — 1997. — № 3. — С. 48-56.*
2. *Студент М. М. Розробка захисних та відновних електрометалізаційних покриттів з використанням порошкових дровів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Львів, 1998. — 18 с.*

Phase composition and processes of structure formation in coatings produced by electric arc metallizing were studied. It was established that structure of the Fe-C-Cr-Al system coatings consisted of martensite, troostite and retained austenite with a different content of alloying elements. Increase of more than 2 % in the aluminium content of the flux-cored wire core leads to increase in the coating to substrate adhesion strength and formation of alloyed ferrite.

Поступила в редакцию 27.03.2002

Седьмая международная конференция по электронно-лучевым технологиям (ЕВТ'2003)

1-6 июня 2003, г. Варна, Болгария

На конференции будут рассматриваться следующие вопросы:

- физика мощных электронных пучков
- электронно-оптические системы и их применение для измерения и управления электронными пучками
- электронные устройства
- электронно-лучевая сварка
- электронно-лучевая плавка и переплав
- высоко-скоростное нанесение покрытий
- модификация поверхности и др.

Адрес оргкомитета:

Проф. Г. Младенов
Ин-т электроники БАН
72, Царьградское шоссе
1784, София, Болгария

Тел.: +359 2 750757; +359 2 7144377
Факс: +359 2 9753201
E-mail: mladenov@ie.bas.bg