

питаний, согласно СТБ 11.05.04–2007, диффузионные покрытия были признаны искробезопасными и рекомендованы для применения в помещениях категории А по взрывопожарной и пожарной опасности. Исследования также показали возможность использования отходов металлургического производства в качестве основы для производства диффузионно-легированного наплавочного материала, который после нанесения индукционным способом отличается высокой износостойкостью и искробезопасностью.

Литература

1. *Щербаков, В. Г.* Анализ проблемных вопросов при производстве диффузионно-легированных наплавочных материалов в условиях РУП «МЗШ» / В. Г. Щербаков // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф.: в 3 т. / под общ. ред. Б. М. Хрусталева. – Минск, 2008. – Т. 1. – С. 44–46.
2. *Константинов, В. М.* Опыт использования отходов металлической дробы для производства наплавочного сплава в условиях ПРУП «МЗШ» / В. М. Константинов, И. С. Сушко, М. М. Казак, В. Г. Щербаков // Теория и практика энергосберегающих термических процессов в машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2008. – С. 107–110.
3. *Ворошнин, Л. Г.* Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л. Г. Ворошнин, Ф. И. Пантелеенко, В. М. Константинов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 2001. – 148 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ И МИКРОСТРУКТУРЫ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ БОРИРОВАННОГО ПОРОШКА ПР-Х18Н9

О. Г. Девойно, А. Ф. Пантелеенко

*Белорусский национальный технический университет, Минск,
Беларусь, тел.: 293-92-39, e-mail: alex_1895@mail.ru*

Известно, что эксплуатационные характеристики покрытия напрямую зависят не только от его химического состава, но и от морфологии [1, 2], поэтому важным является исследование структуры покрытия, начиная с поверхности.

Методика исследования. Исходный материал – диффузионно-легированный порошок ПР-Х18Н9 [3]. Плазменное напыление проводилось на установке УПУ-3Д. Режимы напыления: дистанция 120 мм; ток 350 А; напряжение 70 В.

Основная часть. Топология покрытия (рис. 1, *а*) показывает, что имеются цельные частицы, не трансформировавшиеся в процессе напыления. Основная часть поверхности представляет собой деформированные фрагменты частиц, которые, вероятно, прогревались, а при ударе деформировались. Имеет место отдельная незначительная пористость различной конфигурации (рис. 1, *а, б*) как возле нетрансформировавшихся частиц (1), так и по поверхности покрытия (2). Представленный при большем увеличении фрагмент покрытия (рис. 1, *б*) подтверждает это.

Следует отметить, что в процессе напыления некоторые порошинки при их переносе плазменным потоком не расплавляются полностью, а лишь нагреваются, что ведет к формированию покрытия с сильно выраженным «рельефом», на поверхности которого четко различимы оплавленные зоны (4) частицы с практически неразрушенным столбчатым (5) боридным слоем (рис. 1, *б*).

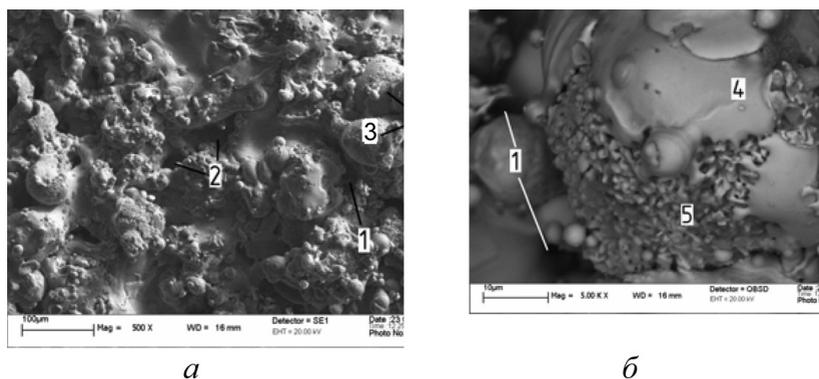


Рис. 1. Морфология плазменно-напыленного покрытия: 1 – поры возле нетрансформировавшихся частиц; 2 – поры между фрагментами покрытия; 3 – нетрансформировавшаяся частица; 4 – оплавленная зона; 5 – неоплавившиеся столбчатые бориды

В случае соблюдения оптимальных параметров плазменного напыления для наносимого материала покрытие должно иметь слоистую морфологию [4]. В нашем случае в отличие от классических представлений особенностями поведения частиц является следующее:

- 1) композиционное строение частицы, каждая зона которой обладает различной теплопроводностью;
- 2) пониженная теплопроводность аустенитной матрицы по сравнению с углеродистой сталью.

Вероятно, эти и некоторые другие причины и объясняют неполное расплавление и деформирование наиболее крупных частиц или частиц, попавших в периферийную зону плазменного потока с минимальной температурой, при соударении с подложкой и сохранение их в первоначальном виде.

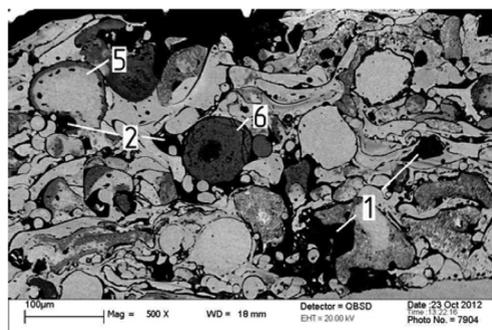
Проанализировав работу [4], можно предположить следующий механизм поведения частицы диффузионно-легированного самофлюсующегося порошка ПР-Х18Н9 в плазменном потоке, отличный от классических представлений: при попадании в плазменный поток происходит нагрев частицы, однако из-за различной теплопроводности и температуры плавления [5] первой расплавляется боридная оболочка преимущественно в местах, где наибольшее содержание низкобористой фазы Fe_2B . Этим и можно объяснить локальный характер зон оплавления на поверхности частицы (рис. 1, б). Затем происходит дальнейшее оплавление боридной оболочки одновременно с нагревом аустенитной сердцевины; при соударении частицы с подложкой происходит ее распределение по поверхности. В том случае, если на поверхности диффузионно-легированных частиц порошка ПР-Х18Н9 сформирован сплошной слой борида FeB , он оплавляется после расплавления зоны низшего борида Fe_2B и аустенитной матрицы. Хотя это требует значительных тепловложений, такая частица хорошо растекается при соударении с поверхностью в процессе плазменного напыления.

При данном характере взаимодействия частица–подложка возможны повышенная пористость и плохая сцепляемость с подложкой (рис. 2). Эти недостатки могут быть устранены последу-

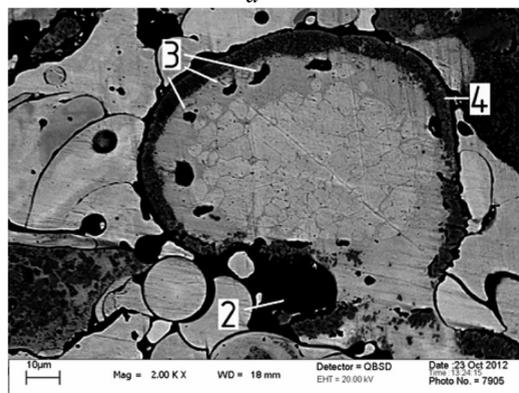
ющей лазерной обработкой, кроме того, лазерное модифицирование могло бы способствовать измельчению микроструктуры, более равномерному распределению элементов по объему покрытия и, следовательно, более высокому комплексу физико-механических свойств.

Одним из важнейших параметров, определяющих характеристики покрытия, является его микроструктура (рис. 2 а, б).

Напыленное покрытие характеризуется высокой пористостью, причем следует отметить несколько типов пористости:



a



б

Рис. 2. Микроструктура напыленного покрытия: 1 – традиционные газные поры, возникающие при плазменном напылении; 2 – поры возле нетрансформировавшихся частиц; 3 – поры в частице; 4 – диффузионная боридная оболочка частицы; 5 – несплавленная диффузионно-легированная частица; 6 – несплавленная диффузионно-легированная частица, закрытая боридами

традиционные газовые поры (1), возникающие при напылении покрытия [4]; пористость, появляющаяся вблизи нерасплавленных частиц (2); ряд пор обладают «наследственным» характером (3) – они образуются в частицах при диффузионном легировании аустенитного порошка ПР-Х18Н9 и соответственно выявляются в нетрансформировавшейся частице в напыленном покрытии (3). Также для напыленного покрытия характерны оксидные пленки, образующиеся на поверхности частиц при их нахождении в плазменном потоке.

Как было предположено ранее, в самом покрытии содержится некоторое количество не полностью расплавившихся (5) частиц (рис. 2, а, б), которые существенно влияют на прочностные характеристики покрытия. Предположение об отсутствии деформации частиц верно, так как у них полностью сохраняется собственная микроструктура, образовавшаяся при диффузионном легировании: четко различимы боридные оболочки Fe_2B и FeB (4), хорошо прослеживается сетка карбидов и карбоборидов с аустенитными зёрнами. Различие в интенсивности окраски нерасплавившихся частиц объясняется методикой приготовления образца – у более темных частиц на шлифе (б) не снят внешний боридный слой, не видна аустенитная сердцевина частицы.

Данные микроструктурного анализа полностью подтверждаются результатами рентгеновского фазового анализа (рис. 3): на дифрактограмме четко различимо присутствие в покрытии фаз Fe_2B и FeB , также выявлено присутствие метастабильных боридов Fe_3B (структура изоморфна карбиду Fe_3C) и $Fe_{23}B_6$ (пространственная группа $Fm-3m$).

Согласно дифрактограмме в покрытии содержится две модификации железа – $\gamma-Fe$, $\alpha-Fe$, здесь, вероятно, обнаружены частицы порошка ПР-Х18Н9, имеющие аустенитную структуру, и $\alpha-Fe$, которая образуется при модифицировании в плазменном потоке аустенитной сердцевины порошка и его взаимодействии с подложкой.

Таким образом, исследованы морфология, микроструктура и рентгеновский фазовый состав плазменно-напыленных покрытий из диффузионно-легированного аустенитного порошка ПР-

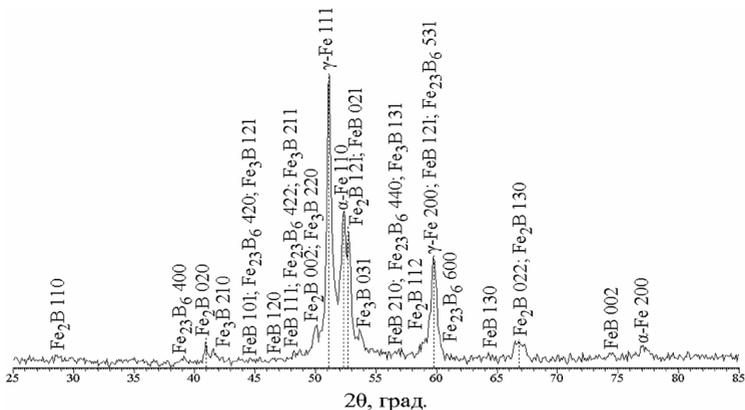


Рис. 3. Фрагмент рентгеновской дифрактограммы (CoK_α) плазменно-напыленного покрытия из диффузионно-легированного аустенитного порошка ПР-Х18Н9

Х18Н9. Напыленное покрытие обладает значительной гетерогенностью и соответственно неоднородными физико-механическими свойствами по слою. Выявлено образование пористости, оксидных пленок, что характерно для данного метода нанесения покрытий [4]. Рентгеновский фазовый анализ подтверждает присутствие в покрытии боридов Fe_2B и FeB .

На основании перечисленного можно предположить также недостаточную адгезию покрытия с подложкой. Для устранения данных недостатков перспективно применение метода лазерного модифицирования покрытий.

Литература

1. Поляк, М. С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения: в 2 т. / М. С. Поляк. – М.: ЛВМ-СКРИПТ; Машиностроение, 1995. – Т. 1. – 832 с.
2. Восстановление и упрочнение деталей машин: справочник / Ф. И. Пантелеенко [и др.]; под ред. В. П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
3. Пантелеенко, А. Ф. Исследование морфологии и микроструктуры диффузионно-легированных порошковых самофлюсующихся материалов / А. Ф. Пантелеенко // Сварка и родственные технологии: сб. докл. Междунар. симп., Минск, 12 апр. 2012 г. – Минск, 2012. – С. 150–152.
4. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П. А. Витязь [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 1998. – 583 с.
5. Przybylowicz, K. Teoria i praktyka borowania stali / Karol Przybylowich. – Kielce: Wydawnictwo Politechniki Swietokrzyskiej w Kielcach, 2001. – 246 с.