

# **СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ ПОРОШКОВЫХ СИСТЕМ ГАЗОПЛАМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ**

**И. М. Крижевский, М. Д. Яньшин**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Беларусь*

Научный руководитель И. В. Агунович

Из методов газотермического напыления газопламенное напыление является наиболее простым, дешевым и мобильным. Отсутствие угара легирующих элементов, большая производительность при высоком коэффициенте использования материала обеспечивают преимущества этого метода по сравнению с плазменным и детонационно-газовым напылением. Результатом использования этой методики является получение коррозионно-стойких, жаростойких и износостойких покрытий на деталях машин (штуки переключения, ролики рольгангов, посадочные места подшипников, валы и т. д.). Использование оплавленных покрытий из самофлюсующихся порошков позволяет добиться высокой термостойкости и химической устойчивости во многих агрессивных средах.

Основными параметрами напыленных покрытий, определяющими их качество, являются прочность сцепления нанесенного материала с поверхностью детали и плотность покрытия.

Целью данной работы было исследование микроструктуры покрытий, полученных газопламенным напылением на основе порошковых систем Ni-Cr-B-Si, Ni-Cr-B-Si+W-Co, Fe-B, и их механических свойств.

## **Методика исследований**

Покрытия наносили при помощи высокоскоростной газопламенной установки «ТРУ-БИ» производства БНТУ. В качестве газов были использованы МАФ, кислород и воздух. Температура факела составляет приблизительно 2800 °С. Скорость частиц на выходе – около 200 м/с. После напыления покрытия подвергались оплавлению в печи при температуре 1080 °С в течение 5 мин.

В качестве напыляемого материала применяли порошок на основе никеля Ni-Cr-B-Si (С – 1,5 мас. %; Cr – 26 мас. %; Si – 2,3 мас. %; В – мас. 3 %; Ni – остальное) с размером частиц 30–50 мкм; Ni-Cr-B-Si+W-Co (W-Co – 25 % мас.) с размером частиц 10 мкм; Fe-B (Fe – 3 % масс), размер фракций  $\approx$  50 мкм. Вследствие очень высокой твердости карбида вольфрама предполагалось получение особенно стойкого покрытия в условиях эрозионного и абразивного износа.

#### Результаты исследований

На поверхность основы напыляемый порошок поступал в виде мелких расплавленных или пластифицированных частиц, которые, ударяясь о нее, деформировались и, закрепляясь, накладывались друг на друга, образуя слоистое покрытие (рис. 1). Граница раздела между слоями 2, полученная за один проход распылителя, возникает из-за различной выдержки между нанесением частиц в слое и между слоями. За период выдержки межслойного нанесения поверхность ранее нанесенного слоя покрытия загрязняется, окисляется и контактные процессы между ней и напыляемыми частицами затрудняются, что и является причиной возникновения границы. При напылении частицы переплавляются, испаряются и вступают в химическое взаимодействие с нагретым газом и окружающей средой. Удар и деформация частиц приводят к их чрезвычайно быстрой кристаллизации и охлаждению со скоростями, достигающими  $10^6$ – $10^8$  К/с. Таким образом, достигается возможность получения микрокристаллической структуры и даже аморфной.

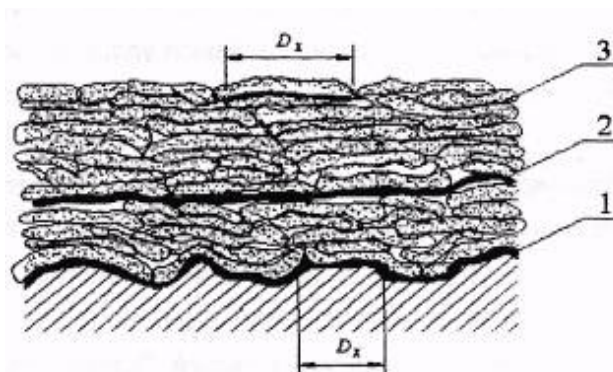


Рис. 1. Схема структуры покрытий:

1 – граница между покрытием и основой; 2 – межслойная граница;  
3 – граница между частицами; Dx – диаметр участка пятна контакта,  
на котором происходит «приваривание» частицы

Микроструктура покрытий, полученных при газопламенном напылении, является сложной и многофазной. Так, микроструктура после напыления порошка Ni-Cr-B-Si является двухфазной, с резко очерченными межфазными границами, довольно однородная. Размер фаз в среднем  $\sim$  2–10 мкм (рис. 2). Структура состоит из твердого раствора на основе никеля, многокомпонентной эвтектики боридов, карбидов и силицидов.

В период между напылением слоев на поверхности покрытия происходит адсорбция газов, окисление и отложение пылевидных фракций распыляемого материала и его оксидов. Образование покрытия последовательной укладкой множества деформирующихся частиц неизбежно приводит к появлению микропустот, покрытие формируется в атмосфере, поэтому микропустоты заполняются газом. Вследствие большой шероховатости покрытия и чрезвычайно быстрого растекания и кристалли-

зации частиц в зоне контактов с поверхностью ранее нанесенных частиц остаются дефекты и полости, которые образуются также вследствие выделения газов, растворенных в расплавленных частицах.

Пористость покрытия после напыления порошка Ni-Cr-B-Si высокая (~ 31 %), размеры пор ~ 80 мкм. С глубиной напыленного слоя пористость уменьшается, минимальная пористость наблюдается в месте непосредственного контакта с поверхностью подложки.

Структура и свойства покрытия зависят от гранулометрического состава напыляемого порошка. С уменьшением размера частиц порошка улучшается заполнение покрытия – плотность его увеличивается, объем микропустот уменьшается, строение покрытия становится более однородным. Слишком мелкие порошки непригодны для напыления. Минимальный размер частиц для напыления – 10 мкм, порошки с меньшими размерами частиц комкуются из-за влажности и проявления сил молекулярного сцепления.

При добавлении в порошок Ni-Cr-B-Si карбида вольфрама микроструктура покрытия становится более неоднородной (предположительно, вследствие значительной разницы в размере частиц порошка в механической смеси), но количество пор заметно снижается (~ 22 %), что вызвано большой энергией активации частиц вольфрама (рис. 3). Структурная неоднородность также вызвана различными условиями охлаждения и теплопередачи слоев в процессе напыления. На плоскости шлифа наблюдаются карбиды, неравномерно распределенные в плоскости шлифа.

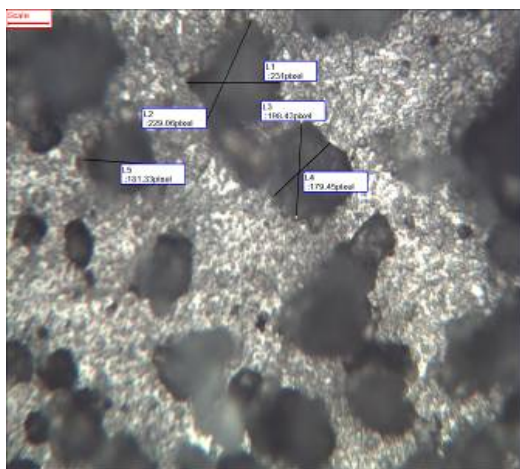


Рис. 2 Микроструктура покрытия сплава Ni-Cr-B-Si ( $\times 300$ )



Рис. 3 Микроструктура покрытия Ni-Cr-B-Si-W-Co ( $\times 300$ )

Микроструктура после напыления Fe-V является двухфазной, неоднородной. Структура предполагает наличие фаз  $Fe_2V$  и FeV и метастабильных боридов  $Fe_3B$  (карбида  $Fe_3C$ ) и  $Fe_{23}B_6$ . Пористость составляет ~ 27 %.

Значения микротвердости напыленных покрытий приведены на рис. 4.

Как видно из гистограммы, наибольшей микротвердостью обладает покрытие системы Fe-V.

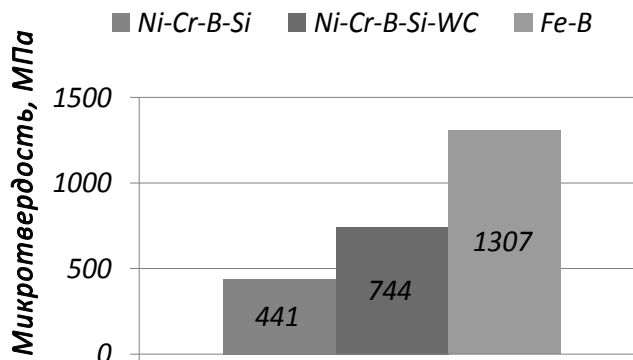


Рис. 4. Микротвердость наплавленных покрытий

### Заключение

Микроструктура покрытий, полученных при газопламенном напылении, является сложной и многофазной. Добавление карбида вольфрама в самофлюсующийся порошок Ni-Cr-B-Si положительно сказывается на свойствах покрытия, полученного газопламенным напылением. Карбид вольфрама помогает сделать структуру покрытия более плотной и уменьшить объем микропустот. Микротвердость покрытия с применением порошка Ni-Cr-B-Si-W-Co увеличивается на 60–70 % по сравнению с простым порошком сплава Ni-Cr-B-Si.

Распределение пор по объему покрытий неравномерно. С глубиной напыленного слоя пористость уменьшается, минимальная пористость наблюдается в месте непосредственного контакта с поверхностью подложки.

С увеличением содержания боридов и карбидов и с уменьшением структурных составляющих и микропустот микротвердость наплавленных покрытий увеличивается.