

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОМ НАПЫЛЕНИИ ПРОВОДНИКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ КОМПАКТИРОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

А.Д. Филяков, И.И. Чумачков, В.В. Почетуха

*Сибирский государственный индустриальный университет,*

*ул. Кирова 42, Новокузнецк 654007, Россия,*

*filyakov.1999@mail.ru, I.I.Chumachkov@yandex.ru, v.pochetuhha@mail.ru*

Настоящая работа посвящена исследованию процесса формирования металлических покрытий методом электровзрывного напыления с использованием проводников, изготовленных путём компактирования порошковых материалов. В качестве напыляемого материала применялся медный порошок. Напыление осуществлялось на подложки из быстрорежущей инструментальной стали марки Р6М5 с использованием электровзрывной установки ЭВУ 60/10 М, оснащённой коаксиальными электродами. Полученные покрытия имели среднюю толщину порядка 50 мкм, отличались высокой адгезией к подложке, низкой пористостью. Экспериментально установлено, что при взрыве компактированного проводника формируется высокоскоростной ударный поток, способствующий интенсификации процесса осаждения частиц на подложку. Метод показал высокую эффективность при получении однородных и прочных металлических покрытий при минимальной подготовке исходного материала. В то же время необходимы дальнейшие исследования для более глубокого понимания физических механизмов, лежащих в основе процесса, и факторов, влияющих на морфологию и свойства покрытий.

**Ключевые слова:** электровзрывное напыление; компактированный порошок; структурообразование.

## **THE INVESTIGATION OF THE PROCESS OF FORMATION COATINGS BY ELECTRICAL EXPLOSION SPRAYING OF CONDUCTORS OBTAINED BY POWDER MATERIALS COMPACTION**

A.D. Filyakov, I.I. Chumachkov, V.V. Pochetukha

*Siberian State Industrial University,*

*42 Kirov Str., 654007 Novokuznetsk, Russia,*

*filyakov.1999@mail.ru, I.I.Chumachkov@yandex.ru, v.pochetuhha@mail.ru*

The present work is devoted to the study of the process of metal coating formation by the method of electrical explosion spraying using conductors produced by compacting powder materials. Copper powder (chemical composition mass % u min 99.5, As up to 0.003, Pb up to 0.05, O up to 0.2, Sb up to 0.005) with different dispersion was used as the sprayed material. Spraying was carried out on substrates made of high-speed tool steel grade R6M5 (GOST 19265-73) using an electrical explosive spraying machine, EVU 60/10 M, equipped with coaxial electrodes. The obtained coating had an average thickness of approximately 50  $\mu\text{m}$  and was characterized by high adhesion to the substrate, low porosity. It was experimentally established that during the explosion of the compacted conductor, a high-speed shock flow is formed, contributing to the intensification of the process of particle deposition on the substrate. The method has shown high efficiency in obtaining homogeneous and durable metal coatings with minimal preparation of the source material. At the same time, further research is needed to better understand the physical mechanisms underlying the process and the factors influencing the morphology and properties of the coatings.

**Keywords:** electrical explosion spraying; compacted powder; structure formation.

### **Введение**

Альтернативой существующим методам нанесения металлических покрытий может стать электровзрывное напыление. В рассматриваемом методе используется

ток высокой плотности, генерируемый импульсным разрядом накопительного конденсатора, для нагрева путем омического нагрева, заставляет напыляемый материал (порошок, проволоку или фольгу) пла-

виться, испаряться, расширяться и, наконец, взрываться. Полученные продукты высокотемпературного и высокоскоростного электрического взрыва распыляются на поверхность подложки с образованием покрытия.

Однако метод электровзрывного напыления имеет ряд ограничений. В частности, металлический проводник должен быть изготовлен из тонких фольги или проволок. Увеличение толщины проводника приводит к недостаточному нагреву, несинхронному взрыву и образованию при взрыве более крупных твердых частиц разного размера, что непосредственно приводит к нестабильному качеству и структуре покрытия.

Альтернативой использованию традиционных проводников, выпиленных из проволок и фольг, является применение металлических проводников, полученных методом компактирования порошковых материалов.

Целью настоящей работы является определение процессов, протекающих при использовании электровзрываемых проводников, полученных методом компактирования порошковых материалов, на электровзрывных установках с коаксиальными электродами.

## Результаты и их обсуждение

В качестве подложки, на которую электровзрывным методом наносилось покрытие, использовался образец из быстрорежущей инструментальной стали Р6М5 (ГОСТ 19265-73), диаметр которого составлял 20 мм.

Перед нанесением покрытия подложка была обработана при помощи наждачной бумагой с переходом от более крупного зерна к более мелкому. После завершения механической обработки поверхность тщательно отчищалась при помощи ультразвуковой ванны.

Напыление электровзрывным методом покрытий осуществлялось на экспериментальной электровзрывной установке ЭВУ

60/10 М. Конструктивно она состоит из зарядного устройства, емкостного накопителя энергии и плазменного ускорителя.

Плазменный ускоритель, схематическое изображение которого представлено на рис. 1, выполнен в виде двух коаксиально расположенных цилиндрических электродов с замыкающей перемычкой, которая плотно прижата кольцом-каналом перпендикулярно их осям.

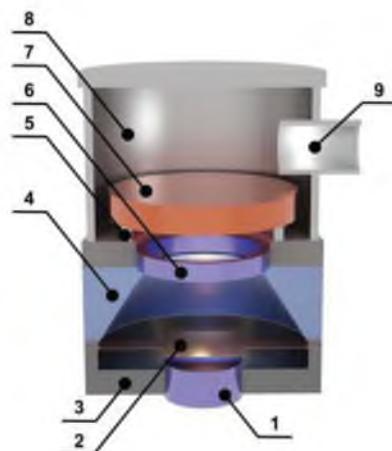


Рис. 1. Схематическое представление плазменного ускорителя ЭВУ 60/10 М. 1 – внутренний цилиндрический электрод, 2 – проводник для электровзрыва, 3 – изолятор, 4 – разрядная камера (сопло), 5 – держатель образца, 6 – наружный кольцевой электрод, 7 – образец, 8 – вакуумная технологическая камера; 9 – система вакуумной откачки

Перемычкой является электровзрываемый проводник, состоящий из спрессованного медного порошка марки ПМС-1 (химический состав масс. % и мин. 99.5, As до 0.003, Pb до 0.05, O до 0.2, Sb до 0.005) с размером частиц 100 мкм. Компактирование порошкового материала производилось на гидравлическом прессе, развивающим усилие на штоке 50 тонн.

Внешний вид полученного проводника показан на рис. 2. Его средняя толщина составила 140 мкм. Масса – 1.19 г.



Рис. 2. Изображение электровзрываемого проводника, полученного из прессования медного порошка

Структуру полученного покрытия изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira 3.

На рис. 3 показан макроснимок образца после напыления покрытия, полученного при электрическом взрыве проводника, состоящего из компактированного медного порошка. Полученный слой имел металлически-оранжевый цвет и различную шероховатость. Были видны массивные включения, состоящие из нерасплавленных частиц медного проводника. Нерасплавленные частицы проводника Cu остались неизменными.

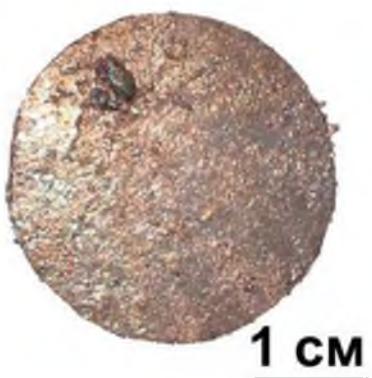


Рис. 3. Макроснимок поверхности полученного покрытия

На рис. 4 показана структура покрытия. Средняя толщина полученных покрытий составляет 50 мкм. Полученное покрытие имеет высокую адгезию к поверхности и низкую пористость.

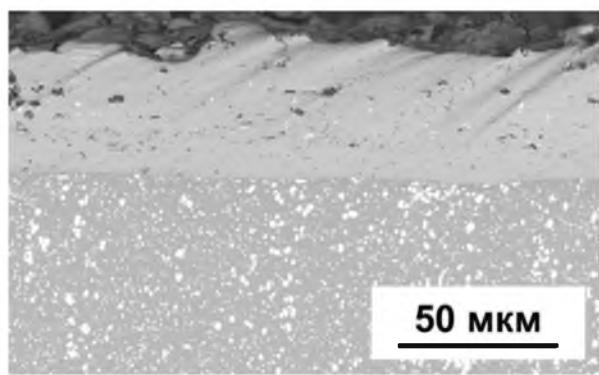


Рис. 4. СЭМ изображения структуры полученного покрытия

Во время электровзрывного напыления компактированный порошок нагревался, а затем взрывался, и в результате получались распыленные частицы разных фаз и масштабов. Частицы сопровождались ударной волной, генерируемой взрывом, в результате формировалась струя, ударяющаяся о поверхность подложки с высокой скоростью. Расплавленные частицы сталкивались, деформировались, конденсировались и сжимались, образуя покрытие. Высокоскоростной струйный поток, образованный продуктами взрыва и ударной волной, образовывал типичный двухфазный поток [1].

### Заключение

В результате проведенного исследования показано, что применение электровзрываемых проводников, изготовленных методом компактирования медного порошка, на установке ЭВУ 60/10 М позволяет получать адгезивно-сплошные покрытия толщиной около 50 мкм. Благодаря формированию высокоскоростному ударному потоку, образующемуся при взрыве, распылённые частицы эффективно осаждаются на поверхность. Расплавленные фрагменты деформируются и конденсируются, тогда как более массивные, не полностью расплавившиеся частицы остаются единичными включениями. Однако для полного понимания протекающих при электрическом взрыве компактированных порошков процессов требуются дальнейшие исследования.

### Библиографические ссылки

1. Gu H, Duits MHG, Mugle F. Droplets Formation and Merging in Two-Phase Flow Microfluidics. International. *Journal of Molecular Sciences* 2011; 12(4): 2572-97.