

## УПЛОТНЕНИЕ И ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ С НЕЭЛЕКТРОПРОВОДНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКЕ ИЗНОСОСТОЙКОГО СПЛАВА

Волков Д. А.

Рассмотрен характер уплотнения и изменения удельного электрического сопротивления металлических порошков с неэлектропроводными функциональными наполнителями при электроконтактной наплавке в зависимости от давления на электродах и содержания карбида кремния и карбида бора в порошковой смеси. При помощи аппарата математической статистики установлена функциональная взаимосвязь между содержанием карбидов в порошковой смеси и давлением на электродах, а так же влияние этих факторов на уплотнение и удельное электрическое сопротивление порошковой шихты при электроконтактной наплавке. Получены уравнения регрессии, позволяющие прогнозировать электрическую проводимость порошковой смеси в зависимости от ее состава и давления на электродах. Установлены предельные давления электроконтактной наплавки, обеспечивающие стабильное протекание процесса.

Розглянуто характер ущільнення і зміни питомого електричного опору металевих порошків з неэлектропроводними функціональними наповнювачами при електроконтактному наплавленні в залежності від тиску на електродах і вмісту карбіду кремнію та карбіду бору в порошкової суміші. За допомогою апарату математичної статистики встановлено функціональний взаємозв'язок між вмістом карбідів в порошкової суміші та тиском на електродах, а також вплив цих факторів на ущільнення і питомий електричний опір порошкової шихти при електроконтактному наплавленні. Отримані рівняння регресії, що дозволяють прогнозувати електричну провідність порошкової суміші в залежності від її складу і тиску на електродах. Встановлено граничний тиск електроконтактного наплавлення, що забезпечує стабільне протікання процесу.

The paper considers the nature of the consolidation and changes in electrical resistivity of the metal powders with non-conductive fillers with functional filler with electric-surfacing depending on the pressure on the electrodes and the content of silicon carbide and boron carbide in the powder mixture. By means of the apparatus of mathematical statistics established the functional relationship between the content of the carbides in the powder mixture and the pressure on the electrodes, as well as the influence of these factors on the seal and the electrical resistivity of the powder charge with the electric-surfacing. The regression equations used to predict the electrical conductivity of the powder mixture, depending on its composition and pressure of the electrodes. Established limit pressure electric-welding to ensure a stable flow of the process.

Волков Д. А.

канд. техн. наук, доц. каф. ОиТСП ДГМА  
[sp@dgma.donetsk.ua](mailto:sp@dgma.donetsk.ua)

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.791.927

Волков Д. А.

### УПЛОТНЕНИЕ И ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ С НЕЭЛЕКТРОПРОВОДНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКЕ ИЗНОСОСТОЙКОГО СПЛАВА

В настоящее время повышение эксплуатационной надежности деталей и узлов современной техники без существенного увеличения их массы и стоимости является весьма сложной, и, в то же время, актуальной задачей. Одним из путей решения этой задачи является создание композиционных износостойких покрытий на рабочих поверхностях контактирующих деталей узлов трения [1]. Важное место в упрочнении и восстановлении поверхностей трения занимает технология нанесения покрытий из композиционных порошковых материалов на основе металлической матрицы и разнообразных функциональных наполнителей методом электроконтактной наплавки (припекания) [2, 3].

Повышение износостойкости рабочих поверхностей деталей, при одновременном сокращении расхода легирующих элементов, возможно только при широком использовании композиционных материалов, твердая составляющая которых является диэлектриком. Однако в работе [4] показано, что критическая концентрация компонентов-диэлектриков не превышает 1–2 % от массы. При превышении указанных пределов происходит нарушение стабильности электроконтактного процесса в результате разделения токопроводящих частиц порошкового материала частицами с высоким электрическим сопротивлением. Тем не менее, на практике для обеспечения требуемых эксплуатационных показателей покрытия должны содержать 5–10 % и более функциональных наполнителей. Нанесение износостойких покрытий с более высоким содержанием компонентов-диэлектриков методом электроконтактной наплавки вызывает существенные затруднения [5].

Целью данных исследований являлось экспериментальное установление характера уплотнения и изменения удельного электрического сопротивления металлических порошков с неэлектропроводными функциональными наполнителями при электроконтактной наплавке в зависимости от давления на электродах и содержания карбида кремния (SiC) и карбида бора (B<sub>4</sub>C) в порошковой смеси, а так же математическое описание взаимодействия данных факторов.

Прессование экспериментальных образцов и определение их удельного электросопротивления, проводили по следующей методике на экспериментальной установке, собранной на базе машины для точечной контактной сварки МТ-2201УХЛ4 (рис. 1, а и б).

Вторичный контур машины был отключен от сварочного трансформатора. Максимальную осадку порошковой смеси определяли в конце цикла прессования по индикатору часового типа 11. Относительную плотность  $\beta$  определяли расчетным путем, причем  $\beta = 1$  соответствует плотности компактного материала, рассчитанной по правилу аддитивности:

$$\beta_{Fe-FeCr-SiC} = \frac{100 \cdot \beta_{Fe} \cdot \beta_{FeCr} \cdot \beta_{SiC}}{[\%Fe] \cdot \beta_{FeCr} \cdot C + [\%FeCr] \cdot \beta_{Fe} \cdot \beta_{SiC} + [\%SiC] \cdot \beta_{Fe} \cdot \beta_{FeCr}}; \quad (1)$$

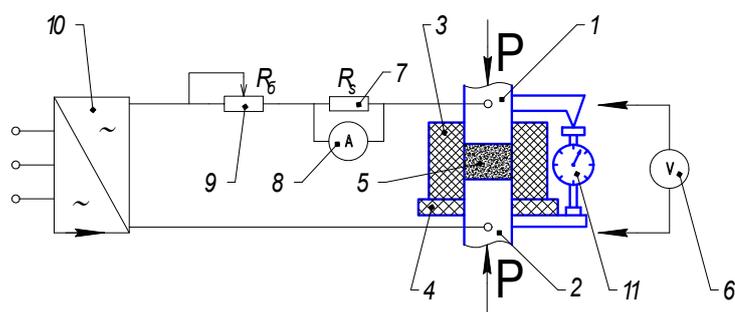
$$\beta_{Fe-FeCr-B_4C} = \frac{100 \cdot \beta_{Fe} \cdot \beta_{FeCr} \cdot \beta_{B_4C}}{[\%Fe] \cdot \beta_{FeCr} \cdot \beta_{B_4C} + [\%FeCr] \cdot \beta_{Fe} \cdot \beta_{B_4C} + [\%B_4C] \cdot \beta_{Fe} \cdot \beta_{FeCr}}, \quad (2)$$

где  $\beta_{Fe}$ ,  $\beta_{FeCr}$ ,  $\beta_{SiC}$ ,  $\beta_{B_4C}$  – плотность отдельных компонентов смеси, кг/м<sup>3</sup>; [%Fe], [%FeCr], [%SiC], [%B<sub>4</sub>C] – содержание компонентов в шихте, %.

Для измерения удельного электросопротивления в качестве источника тока служил сварочный выпрямитель или трансформатор 10 (ВД-306/ТДМ-300), который через балластный реостат  $R_B$  и шунт тока  $R_S$  был подключен непосредственно к электродам сварочной машины 1 и 2. Это обеспечивало измерение электрического сопротивления постоянному и переменному току, проходящему через подпрессованный порошковый слой. Electroды были изготовлены с плоской контактной поверхностью для обеспечения равномерного объемного сжатия порошковой формовки. На нижний электрод через изолирующую прокладку устанавливалась медная шайба 4, на которую, в свою очередь, крепили керамическую втулку 3. Порошковую шихту помещали во втулку, сверху на порошок укладывали медную шайбу и изолирующую прокладку, после чего воздействовали верхним электродом с изменяющимся давлением (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1. Общий вид установки (а) и ее электрическая схема (б) для определения удельного электрического сопротивления порошков под давлением:

1, 2 – электроды контактной машины; 3 – текстолитовая пресс-форма; 4 – изолирующая подкладка; 5 – порошковая формовка; 6 – вольтметр; 7 – шунт тока; 8 – амперметр; 9 – балластный реостат; 10 – источник питания; 11 – индикатор часового типа

Для простоты дальнейших вычислений с помощью балластного реостата задавали фиксированную величину тока через подпрессованную порошковую формовку – 100 А. Ток включали после замыкания межэлектродного пространства. При этом величина тока фиксировалась с помощью амперметра 8. В момент замыкания производили замер падения напряжения в межэлектродной области с помощью вольтметра 6. Прессование вели в керамической пресс-форме 3 высотой 15,0 мм с круглым отверстием площадью 200,96 мм<sup>2</sup> ( $d = 16,0$  мм). Усилие на электродах варьировали в пределах 20–50 МПа. Шихту получали из смеси порошков железа ПЖ-1С и феррохрома ФХ-800 с добавкой карбида кремния зеленого и карбида бора (табл. 1).

Таблица 1

## Основные физико-механические свойства твердых наполнителей

Обозначение соединения	Вид кристаллической решетки	Микротвердость, МПа	Удельное электросопротивление, мкОм·см	Удельная масса, г/см <sup>3</sup>	Температура плавления, °С	Температурный коэффициент линейного расширения (0–1200 °С)·10 <sup>6</sup> 1/град.	Теплопроводность при 20 °С 10 <sup>-3</sup> Дж/см·с·град
SiC	кубич., ромбоэдрич.	33400	10 <sup>2</sup>	2,32	2600	5,68	0,02
B <sub>4</sub> C	ромбоэдрич.	50000	10 <sup>6</sup>	2,3	2350	4,5	0,29

Содержание карбида кремния и карбида бора варьировали в пределах 3–21 %. Во всех смесях железо и феррохром брали в одинаковых массовых соотношениях.

Для сокращения числа экспериментов был принят центрально-композиционный, рототабельный план второго порядка типа  $2^2$ . Для построения модели и ее статистической обработки использовали систему Statistica V6.0.437.0 (StatSoft. Inc. 2001) [6]. Графическая интерпретация полученных моделей представлена на рис. 2, 3.

На рис. 2 представлена зависимость относительной плотности порошковой смеси железо – феррохром Fe – FeCr от давления на электродах и содержания карбида кремния SiC и карбида бора  $B_4C$ .

Величина достоверной аппроксимации полученных моделей составляет:

$$R - sqr = 0,99714 \quad \text{для рис. 2, а;}$$

$$R - sqr = 0,99565 \quad \text{для рис. 2, б.}$$

Данный показатель свидетельствует о хорошем общем качестве полученных моделей.

В результате статистической обработки данных моделей с доверительным интервалом на уровне 95 % было установлено, что модели адекватны. Кроме этого, были получены следующие уравнения регрессии:

$$\beta = 0,437 + 0,047[\%SiC] - 0,003[\%SiC]^2 + 0,0014P \quad (3)$$

$$\beta = 0,49 - 0,0122[\%B_4C] + 0,00077[\%B_4C]^2 + 0,00177P - 0,00004[\%B_4C]P \quad (4)$$

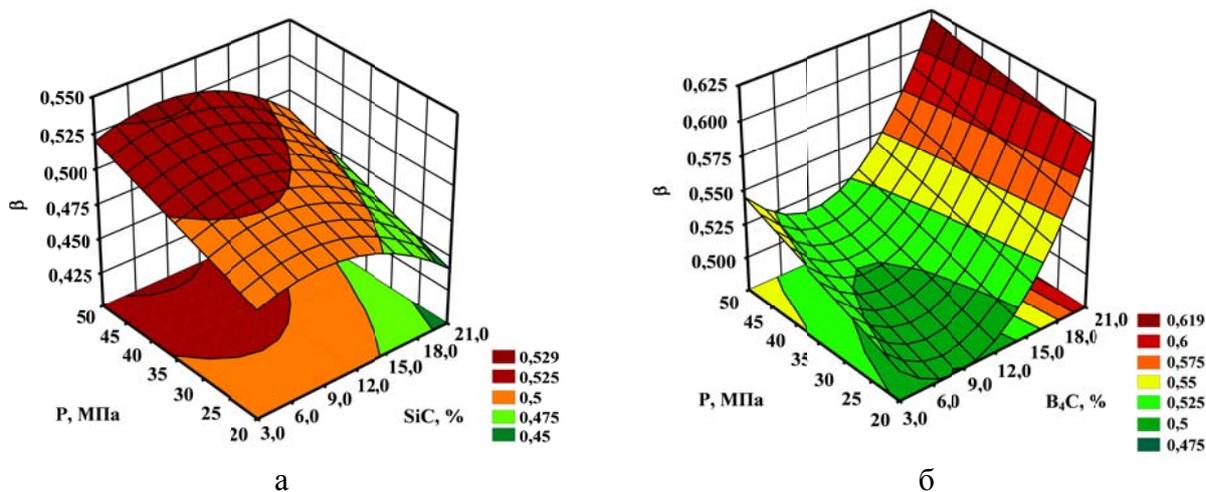


Рис. 2. Зависимость относительной плотности порошковой смеси железо – феррохром Fe – FeCr от давления на электродах и содержания карбида кремния SiC (а) и карбида бора  $B_4C$  (б)

Из анализа рис. 2 и уравнений (3) и (4) установлено, что добавка к смеси железо – феррохром порошков SiC или  $B_4C$  значительно ухудшает их уплотняемость. В работе отмечено [4], что добавка к железному порошку более твердого компонента (феррохрома) ухудшает уплотняемость за счет заклинивающего действия частиц. Еще более твердые, чем феррохром, частицы SiC и  $B_4C$  (табл. 1), вводимые в смесь железо – феррохром, увеличивают торможение или перемещение частиц, повышают внешнее трение между частицами. С ростом содержания SiC более 3–5 % (рис. 2, а) плотность брикета повышается в результате возрастающего действия твердых частиц SiC как абразива, сдирающего неровности и выступы частиц порошка матрицы (железо – феррохром) при прессовании. Это подтверждается микрфотографиями морфологического состава порошков железа, карбида кремния и карбида бора (рис. 3).

Из рис. 3, б и в видно, что частицы карбидов кремния и бора имеют острые, ориентированные в разные стороны кромки. Что в сочетании с высокой микротвердостью частиц (табл. 1) оказывает значительное абразивное воздействие, как на частицы порошковой матрицы, так и на стенки пресс – формы. Это тормозит перемещение частиц и повышает внешнее трение между ними.

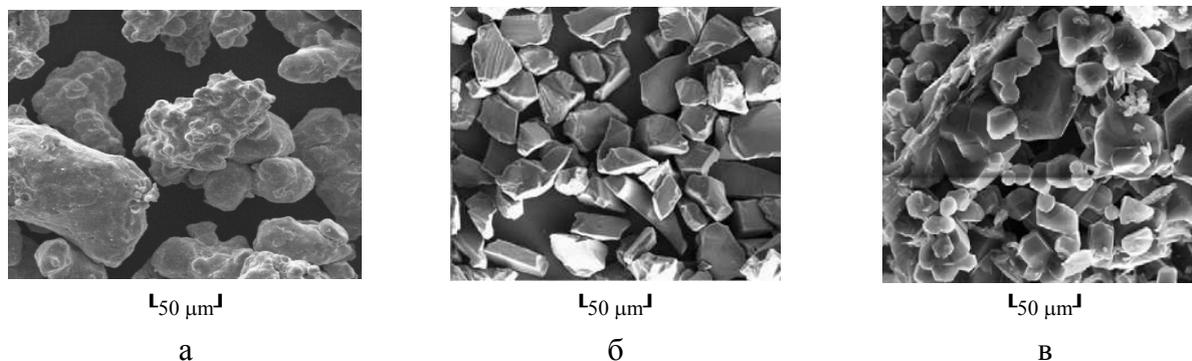


Рис. 3. Микрофотографии морфологического состава исходных порошковых материалов:

а – порошок железа ПЖ-1С; б – порошок карбида кремния (SiC); в – порошок карбида бора (B<sub>4</sub>C) [7]

Повышение плотности порошковой формовки наблюдается до определенного критического содержания твердого компонента (до 7–9 % SiC, рис. 2, а), после которого плотность снижается в соответствии с правилом аддитивности.

Различный характер зависимостей на рис. 2, а и б можно объяснить комплексным влиянием многих факторов, значительно отличающихся в случае добавки SiC и B<sub>4</sub>C. Среди них основными являются физико-механические свойства материалов, зернистость, различное объемное содержание SiC и B<sub>4</sub>C при одинаковом массовом и др.

На рис. 4 представлена зависимость удельного сопротивления порошковой смеси железо – феррохром Fe – FeCr от давления на электродах и содержания карбида кремния SiC и карбида бора B<sub>4</sub>C. Величина достоверной аппроксимации полученных моделей составляет:

$$R - sqr = 0,81349 \quad \text{для рис. 4, а;}$$

$$R - sqr = 0,97512 \quad \text{для рис. 4, б.}$$

Данный показатель свидетельствует о хорошем общем качестве полученных моделей.

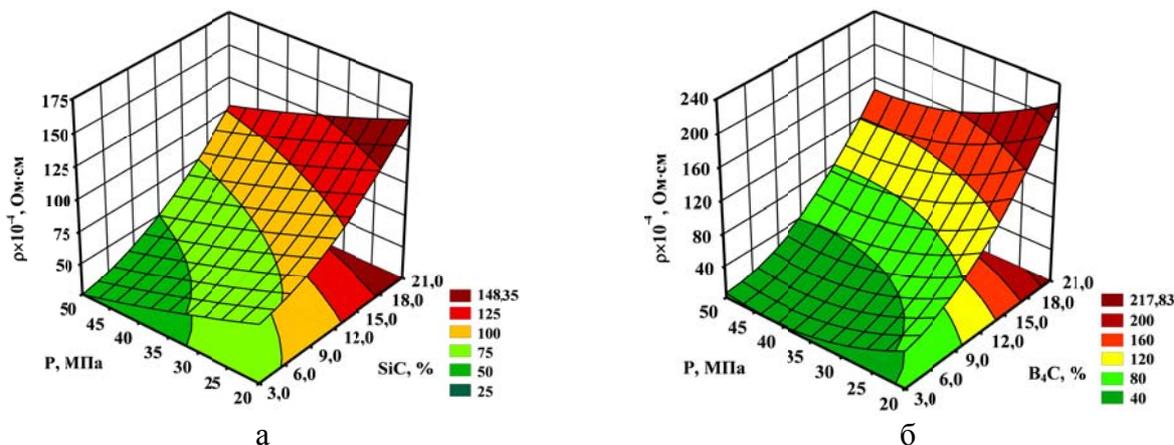


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления порошковой смеси железо – феррохром Fe – FeCr от давления на электродах и содержания карбида кремния SiC (а) и карбида бора B<sub>4</sub>C (б)

В результате статистической обработки данных моделей с доверительным интервалом на уровне 95 % было установлено, что модели адекватны. Кроме этого, были получены следующие уравнения регрессии:

$$\rho = 68,001 + 4,26[\%SiC] + 0,084[\%SiC]^2 - 1,62P + 0,009P^2 - 0,048[\%SiC]P; \quad (5)$$

$$\rho = 152,88 + 0,932[\%B_4C] + 0,41[\%B_4C]^2 - 7,256P + 0,087P^2 - 0,06[\%B_4C]P; \quad (6)$$

Из анализа полученных моделей (рис. 4) и уравнений (5) и (6) установлено, что как карбид кремния, так и карбид бора резко повышают удельное электросопротивление порошковых формовок при их добавке к металлическому порошку, особенно при относительно низких давлениях прессования (до 50 МПа). Рост электросопротивления вызван уменьшением числа токопроводящих контактов «металл–металл». Это связано с понижением относительной доли более пластичного порошка железа, за счет которого в такой разнородной смеси в основном и образуется физический контакт между частицами [4]. Для протекания процесса электроконтактной наплавки порошковых смесей необходимо обеспечить удельное электросопротивление не выше  $10\text{--}15 \times 10^{-4}$  Ом·см [2, 3], что ограничивает допустимое содержание в смесях неэлектропроводных компонентов, в данном случае SiC и B<sub>4</sub>C. Потеря электропроводности происходит в результате разделения контактов токопроводящих частиц частицами неэлектропроводного материала.

## ВЫВОДЫ

1. Установлен характер изменения уплотняемости и удельного электрического сопротивления порошковой смеси с неэлектропроводными наполнителями – карбидом кремния SiC и карбидом бора B<sub>4</sub>C при электроконтактной наплавке.

2. Доказано, что добавка в шихту из металлических порошков железа и феррохрома карбида кремния SiC и карбида бора B<sub>4</sub>C ухудшает уплотняемость и повышает электросопротивление смеси: по условиям электропроводности уже 2–6 об. % SiC или B<sub>4</sub>C, вводимого в смесь железо – феррохром, требуют давления прессования более 50–60 МПа, что не всегда целесообразно при электроконтактной наплавке.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепція державної промислової політики України / [М. Г. Чумаченко, О. І. Амоша, М. І. Іванов та ін.] – Донецьк : Інститут економіки промисловості НАН України, 2000. – 424 с. – ISBN 966-02-1169-4.
2. Черновол М. І. Упрочнение и восстановление деталей машин композиционными покрытиями : учеб. пособие / М. І. Черновол. – К. : Вища шк., 1992. – 79 с.
3. Ярошевич В. К. Электроконтактное упрочнение / В. К. Ярошевич, Я. С. Генкин, В. А. Верещакин. – Минск : Наука и техника, 1982. – 256 с.
4. Волков Д. А. Влияние неэлектропроводных составляющих на электросопротивление и уплотняемость порошковых смесей при низких давлениях прессования с пропусканьем электрического тока / Д. А. Волков, В. Т. Катренко, В. А. Пресняков // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – С. 437–441. – ISBN 966-7851-37-0.
5. Чигарев В. В. Оптимизация состава сердечника порошковой проволоки для электроконтактной экономнолегированной наплавки износостойкого сплава / В. В. Чигарев, Д. А. Волков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – № 4 (25). – С. 220–225. – ISSN 1993-8322.
6. Боровиков В. П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA: методология и технология современного анализа данных : учеб. пособие / В. П. Боровиков. – М. : Горячая линия – Телеком, 2013. – ISBN 978-5-9912-0326-5.
7. Порошковые материалы на основе железа и меди : атлас структур / П. А. Витязь, Л. Ф. Корженцева, Л. Н. Дьячкова, Л. В. Маркова. – Минск : Белорусская наука, 2008. – 155 с. – ISBN: 978-985-08-0980-3.

Статья поступила в редакцию 20.10.2014 г.