

УДК 621.791.927

Чигарев В. В., Волков Д. А.

**ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА СЕРДЕЧНИКА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННОЙ НАПЛАВКИ
ИЗНОСОСТОЙКОГО СПЛАВА**

Большинство методов нанесения покрытий представляют собой энергоемкие процессы с большим тепловложением в упрочняемое или восстанавливаемое изделие. Вследствие этого неизбежны большие температурные деформации. Этого недостатка лишена электроконтактная наплавка порошковыми материалами, использующая тепловую энергию, выделяемую импульсным электрическим током на активном сопротивлении [1, 2]. Ее характеризуют незначительные энергозатраты, малая зона термического влияния, высокая производительность, хорошие гигиенические условия труда.

При электроконтактной наплавке предпочтение отдают способам, предусматривающим получение покрытий без расплавления порошковых материалов, так как при их плавлении в значительной степени (на 20...30 %) теряются исходные положительные свойства – твердость и износостойкость, т. е. свойства, которые регламентируются при производстве порошков. С другой стороны увеличение 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 [3] показано, что критическая концентрация компоненто-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. Практически нанести покрытия этих составов электроконтактным методом невозможно.

Меры, применяемые в настоящее время для устранения указанного недостатка малоэффективны. Они в основном сводятся к введению в состав порошковой шихты компонентов с высокой электропроводностью (например, меди до 8 % от массы) [3] или к регулированию соотношения размеров частиц наполнителя и матрицы [1] за счет чего можно увеличить содержание диэлектриков в порошковой смеси без повышения ее критического начального электросопротивления.

Целью данной работы является оптимизация состава сердечника порошковой проволоки для электроконтактной наплавки с точки зрения получения экономнолегированного износостойкого сплава высокой электрической проводимости, что должно обеспечить стабильность протекания процесса наплавки.

Процесс спекания порошков пропусканием электрического тока зависит от ряда параметров электрической цепи и характеристик порошковых материалов, которые влияют, в конечном счете, на свойства получаемого покрытия. Основным из них является удельное электрическое сопротивление, которое к моменту завершения стадии холодного прессования порошка (до включения импульса сварочного тока) не должно превышать $15-20 \times 10^{-4}$ Ом·см. В противном случае усложняются условия электрического пробоя порошкового слоя, и снижается стабильность процесса.

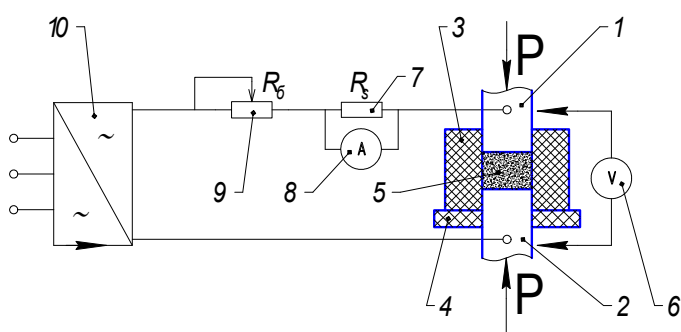
При более высоком электросопротивлении, электрический ток через подпрессованный порошок либо отсутствует, либо токопроводящая перемычка образуется только в отдельной случайной зоне сечения присадочного материала, что создает интенсивный нагрев этой зоны до расплавления со взрывным выбросом части металла в виде капель расплава. Происходит выплеск [4].

С целью выявления процессов, определяющих проводимость и нагрев присадочного материала – порошковой проволоки при электроконтактной наплавке, изучали изменение электрического сопротивления, как порошков в свободном состоянии, так и порошковой проволоки.

Измерение удельного электросопротивления порошка проводили по следующей методике, на экспериментальной установке, собранной на базе машины для точечной контактной сварки МТ-2201УХЛ4 (рис. 1, а и 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

Вторичный контур машины был отключен от сварочного трансформатора. 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 подключен непосредственно к электродам сварочной машины 1 и 2. Это обеспечивало измерение электрического сопротивления постоянному и переменному току, проходящему через подпрессованный порошковый слой. Электроды были изготовлены с плоской контактной поверхностью для обеспечения равномерного объемного сжатия порошковой формовки. На нижний электрод через изолирующую прокладку устанавливалась медная шайба, на которую, в свою очередь, крепили керамическую втулку. 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).

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 мм² ($d = 16,0$ мм).

Для получения сравнительных данных производили измерение удельного электросопротивления порошков углеродистого феррохрома ФХ-800, железного порошка ПЖ-1М, смесей железного порошка и феррохрома, при различных содержаниях последнего, а так же смесей железного порошка и феррохрома с добавками карбида бора без оболочки [3, 4].

Были получены следующие зависимости. На рис. 2 показано изменение удельного электрического сопротивления в смесях железо–феррохром при различных давлениях.

Установлено, что в исследованном интервале давлений наименьшей плотностью обладали прессовки из смесей, содержащих 5...7 % феррохрома, наибольшей – около 30 %. Такой характер изменения плотности можно объяснить тем, что в смесях, содержащих до 7 %

феррохрома, его твердые округлые частицы препятствуют перемещению частиц более мягкого железа, имеющих разветвленную поверхность. Происходит заклинивание частиц, образуются арки и мостики, что снижает плотность при всех давлениях и приводит к повышению удельного электросопротивления.

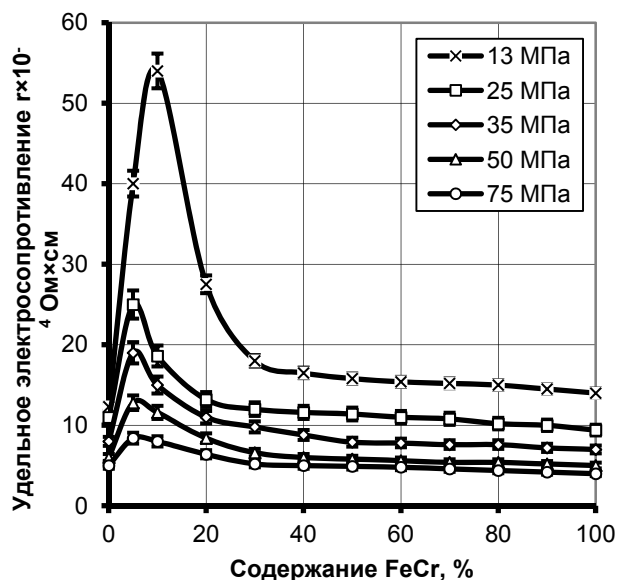


Рис. 2. Зависимость удельного электросопротивления от содержания феррохрома в смесях железо-феррохром при различных давлениях

наплавочных материалов, где имеется несколько компонентов, от которых зависят наплавочно-технологические свойства материалов и наплавленного металла, удобно пользоваться симплексно-решетчатым планированием [5, 6].

Поэтому для установления зависимости удельного сопротивления порошковой смеси при давлениях 10, 35, 50 и 70 МПа от ее состава (железо Fe, феррохром FeCr, карбид бора B_4C) создали математические модели путем симплексно-решетчатого планирования при помощи системы Statistica (StatSoft) [6]. В качестве факторов выступал состав смеси: железо Fe (%), феррохром FeCr (%), карбид бора B_4C (%). В качестве отклика – удельное электрическое сопротивление $R_{уд}$. Использовали стандартный план: 3 factors simplex-centroid design (3 фактора симплекс-центроидное планирование).

Из контурных графиков (рис. 3) зависимости удельного электрического сопротивления от соотношения компонентов смеси при разных давлениях видно, что карбид бора резко повышают удельное электросопротивление порошковой шихты при его добавке к металлическим порошкам (железа и феррохрома), особенно при относительно низких давлениях прессования.

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 [3, 4]. Потеря электропроводности происходит в результате разделения контактов токопроводящих частиц, частицами неэлектропроводного материала.

По условиям износостойкости целесообразно повышать в материале содержание твердых компонентов. С другой стороны, необходимо при этом учитывать снижение технологических свойств порошковых смесей.

При дальнейшем повышении содержания феррохрома в интервале 10...30 % уменьшение удельного электросопротивления и его стабильность объясняется лучшей укладкой частиц и снижением размеров индивидуальных межчастичных пор в результате возрастающего влияния более мелких фракций, которые способствуют расширению площади межчастичных контактов и относительной поверхности токопроводящего контакта.

Следовательно, в разрабатываемом наплавочном материале, целесообразно использовать порошковые смеси с содержанием феррохрома более 30 %, так как при этом порошковая смесь имеет стабильное удельное сопротивление, не превышающее 20×10^{-4} Ом·см при всех давлениях прессования (рис. 2), что в большей степени удовлетворяет процесс электроконтактной наплавки [1].

При создании и совершенствовании

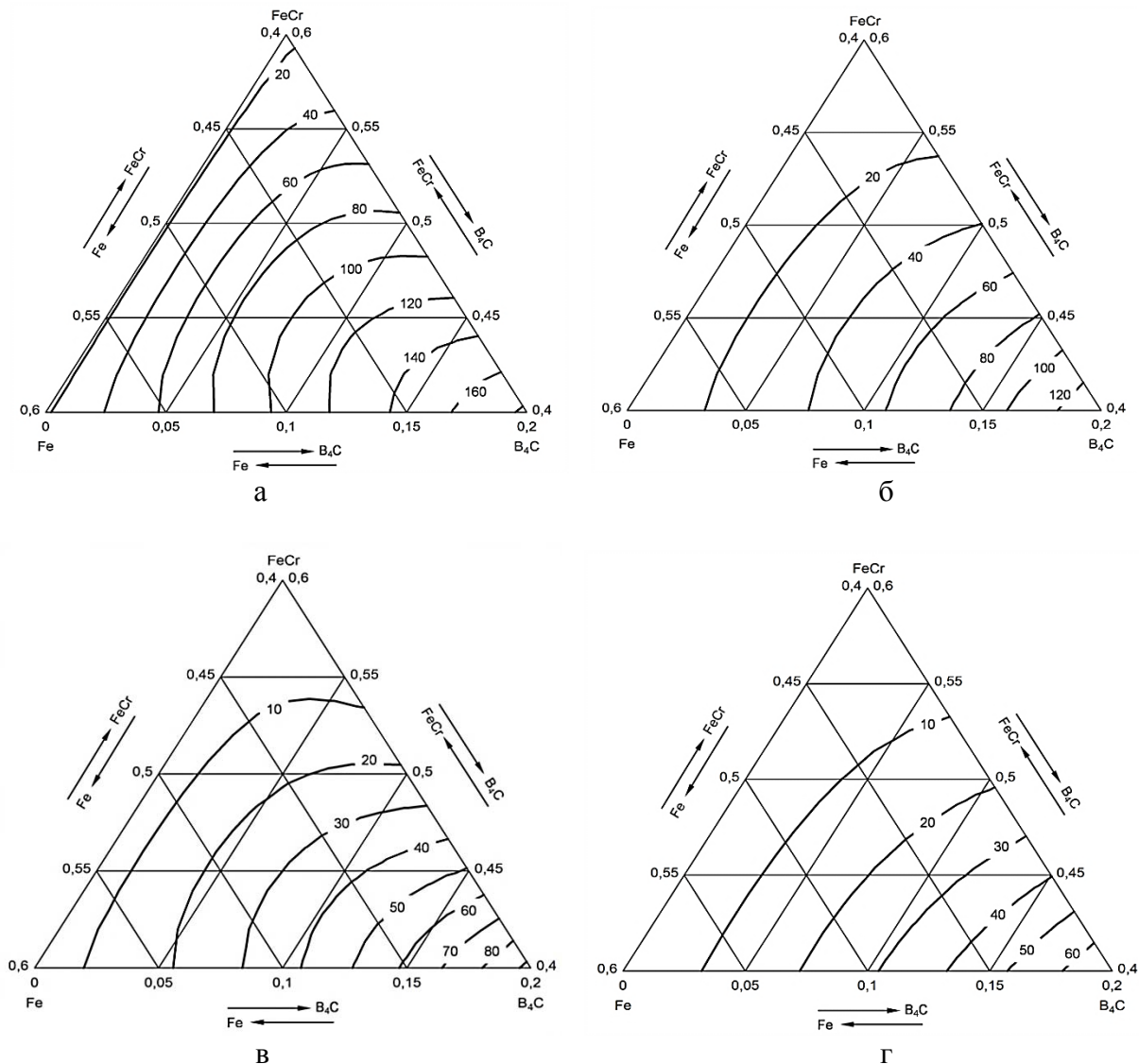


Рис. 3. Контурные графики зависимости удельного электрического сопротивления от соотношения компонентов смеси при давлениях:
 а – 10 МПа; б – 35 МПа; в – 50 МПа; г – 70 МПа

В результате математической обработки при помощи системы Statistica (StatSoft) [6] были получены следующие уравнения регрессии для специальной кубической модели:

при $P = 10$ МПа:

$$R_{y\partial} = + 17,967 \cdot Fe + 183,553 \cdot B_4C + 15,967 \cdot FeCr + 17,841 \cdot Fe \cdot B_4C + 3,468 \cdot Fe \cdot FeCr - 60,158 \cdot B_4C \cdot FeCr + 625,436 \cdot Fe \cdot B_4C \cdot FeCr; \quad (1)$$

при $P = 35$ МПа:

$$R_{y\partial} = + 10,111 \cdot Fe + 138,547 \cdot B_4C + 4,765 \cdot FeCr - 81,481 \cdot Fe \cdot B_4C - 0,645 \cdot Fe \cdot FeCr - 124,572 \cdot B_4C \cdot FeCr + 270,0 \cdot Fe \cdot B_4C \cdot FeCr; \quad (2)$$

при $P = 50$ МПа:

$$R_{y\partial} = + 5,944 \cdot Fe + 93,0358 \cdot B_4C + 3,9721 \cdot FeCr - 51,2385 \cdot Fe \cdot B_4C - 1,7657 \cdot Fe \cdot FeCr - 106,3839 \cdot B_4C \cdot FeCr + 265,9764 \cdot Fe \cdot B_4C \cdot FeCr; \quad (3)$$

при $P = 70$ МПа:

$$R_{y0} = + 3,9129 \cdot \text{Fe} + 69,6584 \cdot \text{B}_4\text{C} + 4,3947 \cdot \text{FeCr} - 33,2572 \cdot \text{Fe} \cdot \text{B}_4\text{C} - 2,9844 \cdot \text{Fe} \cdot \text{FeCr} - 73,8935 \cdot \text{B}_4\text{C} \cdot \text{FeCr} + 87,6705 \cdot \text{Fe} \cdot \text{B}_4\text{C} \cdot \text{FeCr}. \quad (4)$$

Из анализа уравнений регрессии было установлено, что коэффициенты модели значимы, а качество специальной кубической модели хорошее (значение коэффициента детерминации $R\text{-Sqf}$ близко к 1).

Таким образом, было доказано, что необходимое для процесса спекания начальное электросопротивление холодных порошковых прессовок можно обеспечить у порошков железа, феррохрома при давлении выше 10 МПа, а у смесей железа с 20 % феррохрома и более при давлении выше 35 МПа. Добавка в шихту из металлических порошков железа и феррохрома карбида бора повышает электросопротивление смеси и по условиям электропроводности уже 5...15 мас. % B_4C , вводимого в смесь железо-феррохром, требуют давления прессования более 50 МПа, что не целесообразно в условиях электроконтактной наплавки.

Очевидно, что увеличение содержания износостойкой фазы – карбида бора возможно только при использовании в качестве присадочного материала при электроконтактной наплавке порошковой проволоки, оболочка которой обеспечит необходимое начальное сопротивление межэлектродной области для нормального протекания процесса. При этом содержание карбида бора в шихте можно увеличить до 15...20 %.

На основании вышесказанного, можно рекомендовать следующий состав шихты порошковой проволоки для экономнолегированной электроконтактной наплавки: Fe – 40...50 %; FeCr – 35...40 %; B_4C – 15...20 %.

Очевидна необходимость исследования изменения начального электрического сопротивления всего присадочного материала в процессе наплавки.

Для этого изготавливалась порошковая проволока рекомендованного состава сегментного сечения. Измерение электросопротивления порошка, находящегося в порошковой проволоке, встречает определенные трудности.

Поэтому изучали изменение электрического сопротивления пустой оболочки и оболочки с порошком, а сопротивление порошка рассчитывали по формуле:

$$R_{\text{пор}} = \frac{R \cdot R_{\text{об}}}{R_{\text{об}} - R}, \quad (5)$$

где R , $R_{\text{об}}$ – соответственно электрические сопротивления всего присадочного материала и пустой оболочки, Ом.

На рис. 4 показаны результаты изменения начального электрического сопротивления присадочного материала – порошковой проволоки сегментного поперечного сечения от усилия на электроде P .

При увеличении давления начальное электросопротивление присадочного материала уменьшается, причем более резко выражено падение электросопротивления при наличии оболочки.

Это связано с тем, что уменьшение электрического сопротивления порошка без оболочки вызвано его уплотнением при низких давлениях холодного прессования, а в нашем случае, кроме уплотнения, происходит увеличение площади контакта между оболочкой и деталью, благодаря чему наблюдается более резкое снижение начального электрического сопротивления, причем оно мало зависит от того, какой материал находится внутри оболочки. Эти данные подтверждают, что электросопротивление присадочного материала в начальный период электроконтактной наплавки определяется практически только сопротивлением металлической оболочки порошковой проволоки. Таким образом, использование в качестве присадочного материала при электроконтактной наплавке порошковой проволоки сегментного сечения значительно позволяет расширить технологические возможности данного метода восстановления деталей.

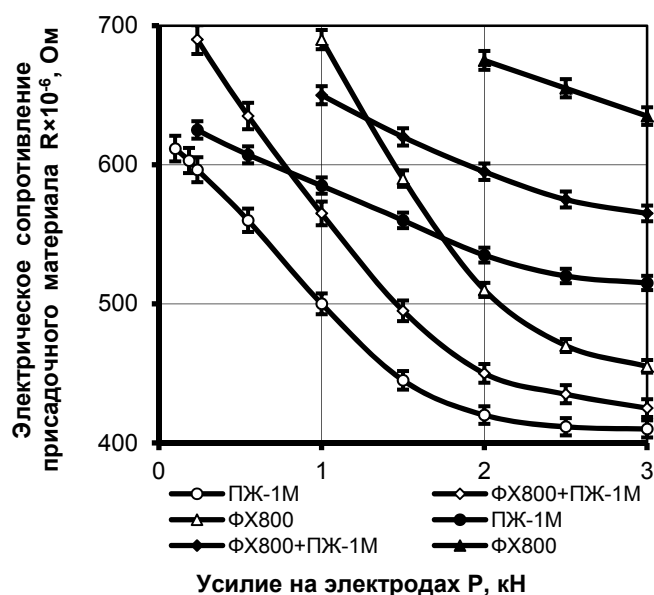


Рис. 4. Зависимость электрического сопротивления присадочного материала от усилия на электроде:

○, □, Δ – порошковая проволока; ●, ◻, ▲ – порошок в свободном состоянии

ВЫВОДЫ

Експериментально встановлено характер змінення початкового удельного електричного опору порошкової шихти при електроконтактній наплавці.

Получены уравнения регрессии, описывающие влияние состава порошковой шихты на удельное электрическое сопротивление.

Установлено, что необходимое для процесса спекания начальное электросопротивление порошковых смесей можно обеспечить у порошков железа, феррохрома при давлении выше 10 МПа, а у смесей железа с 20 % феррохрома и более при давлении выше 35 МПа. Добавка в шихту из металлических порошков железа и феррохрома карбида бора повышает электросопротивление смеси и по условиям электропроводности уже 5...15 мас. % В₄С, вводимого в смесь железо–феррохром, требуют давления прессования более 50 МПа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярошевич В. К. Электроконтактное упрочнение / В. К. Ярошевич, Я. С. Генкин, В. А. Верецагин. – Минск : Наука и техника, 1982. – 256 с.
2. Черновол М. И. Упрочнение и восстановление деталей машин композиционными покрытиями : учеб. пособие / М. И. Черновол. – К. : Вища шк., 1992. – 79 с.
3. Волков Д. А. Влияние неэлектропроводных составляющих на электросопротивление и уплотняемость порошковых смесей при низких давлениях прессования с пропуском электрического тока / Д. А. Волков, В. Т. Катренко, В. А. Пресняков // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – С. 437–441.
4. Волков Д. А. Разработка присадочных материалов для электроконтактной наплавки слоев с регламентированным распределением свойств / Д. А. Волков, В. Т. Катренко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 15.
5. Винарский М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – К. : Техника, 1975. – 167 с.
6. Боровиков В. П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов / В. П. Боровиков. – СПб. : Питер, 2001. – 656 с. : ил.

Статья поступила в редакцию 05.12.2011 г.