

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.785.51.067.5

### Выбор углеродсодержащей порошковой среды для микродуговой цементации металлических изделий<sup>1</sup>

**Ю. М. Домбровский, М. С. Степанов**

(Донской государственный технический университет)

*Целью исследования являлся выбор вида и дисперсности порошковой среды, используемой при цементации металлических изделий с помощью пропускания электрического тока и образования микродуговых разрядов. Использовалась лабораторная установка, состоящая из двух контейнеров — наружного, содержащего электропроводную среду, и внутреннего, в который помещался образец вместе с порошком диффузанта. Исследовалось применение порошков графита, древесного угля, каменноугольного кокса и каменного угля (антрацита). Установлено, что наилучшей порошковой средой является порошок каменного угля, который обеспечивает ускоренный нагрев диффузанта и стального изделия, а также генерацию оксида углерода, который интенсифицирует процесс науглероживания. Изучено влияние размера частиц каменного угля и кокса на удельное электрическое сопротивление порошковой среды и результаты процесса диффузионного насыщения. С уменьшением размера частиц электрическое сопротивление порошков каменного угля и кокса резко возрастает, что объясняется увеличением переходного сопротивления в связи с ростом числа межчастичных контактов, при этом, независимо от размера фракции, удельное электрическое сопротивление каменного угля на два порядка выше, чем у кокса. Для микродуговой цементации предпочтительна порошковая среда с размером частиц в интервале 0,3—0,6 мм. Полученные результаты могут быть использованы для интенсификации процесса цементации металлических изделий.*

**Ключевые слова:** цементация металлических изделий, порошковая среда для диффузионного насыщения.

**Введение.** Эффективным способом поверхностного упрочнения металлических изделий является химико-термическая обработка (ХТО), сочетающая термическое и химическое воздействие на материал, в результате чего изменяются химический и фазовый состав поверхностного слоя [1—3]. В настоящее время широко распространена цементация в твёрдом карбюризаторе. Насыщение углеродом осуществляется в герметизируемых контейнерах с использованием традиционного печного нагрева, а продолжительность процесса достигает нескольких десятков часов, что является недостатком этого способа.

Предложены способы сокращения продолжительности цементации. Один из них заключается в применении ускоренного электронагрева изделий токами высокой частоты. Скорость процесса увеличилась в 3—4 раза, однако он приводил к неравномерному нагреву изделия и оплавлению в местах контакта изделия и карбюризатора [2]. Другой способ основан на нагреве изделия при пропускании электрического тока через порошок графита, находящийся в виброожиженном состоянии [3, 4]. Это позволяет дополнительно сократить продолжительность цементации, но способ обладает такими недостатками, как вынос из рабочего пространства частиц порошковой среды, ухудшающий условия труда, и дополнительный расход энергии на поддержание порошковой среды в виброожиженном состоянии. Недостатки упомянутых способов ограничивают их практическое применение. Однако принцип ускоренного нагрева порошковой углеродсодержащей насыщающей среды и упрочняемого изделия за счёт образования микродуговых разрядов, на

<sup>1</sup> Работа выполнена по теме № 2.14.13 в рамках темплана ДГТУ.

взгляд авторов, заслуживает внимания и требует проведения комплекса дополнительных исследований.

**Постановка задачи исследования.** Задача исследования была сформулирована как выбор вида порошковой углеродсодержащей среды и её дисперсности, способных обеспечить дальнейшую интенсификацию цементации стальных изделий при нагреве насыщающей среды и упрочняемого изделия за счёт образования микродуговых разрядов, а также как поиск способа перемешивания порошковой среды без дополнительного внешнего воздействия.

**Методика исследования.** При проведении исследований использовалась специально разработанная установка (рисунок 1), состоящая из двух соосно расположенных стальных электрических контейнеров: наружного, обозначенного на рисунке цифрой 1, диаметром 115 мм и высотой 110 мм, заполненного порошковой электропроводной средой, и внутреннего, обозначенного на рисунке цифрой 2, диаметром 22 мм и высотой 30 мм, выполняющего роль рабочей ячейки для диффузионного насыщения. Ячейка заполнена порошковым карбюризатором, в который, до половины своей высоты, погружён цилиндрический образец, обозначенный на рисунке цифрой 3, длиной 35 мм и диаметром 12 мм, из низкоуглеродистой (0,1—0,2 % С) стали. Дно ячейки, выполненное из термостойкого изолятора, имеет выемку, диаметром 12 мм и глубиной 1,5 мм, предназначенную для центрирования образца в ячейке и предотвращения возможного перегрева торца и кромок образца.

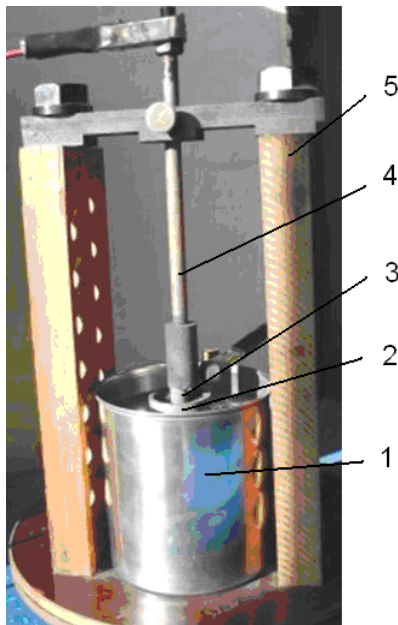


Рис. 1. Установка для проведения лабораторных исследований: 1 — наружный контейнер; 2 — внутренний контейнер; 3 — образец; 4 — металлический стержень; 5 — траверса

Образец закреплён в зажиме на конце металлического стержня, обозначенного на рисунке цифрой 4, с возможностью вертикального перемещения и фиксации. Опорой установки является траверса, обозначенная на рисунке цифрой 5, выполненная из электротехнического текстолита типа 241, марки ЛТ по ГОСТ 2910-74. Электрическое питание от источника тока подаётся на металлический стержень и наружный контейнер. Этот контейнер выполняет функцию дополнительного сопротивления в электрической цепи: «источник питания — контейнер с порошковой средой — ячейка с порошком диффузанта — образец». Это сопротивление существенно больше, чем сопротивление порошковой среды в самой ячейке, что позволяет компенсировать несоосность размещения образца относительно оси ячейки, приводящую к неравномерному нагреву образца.

При выборе способа заполнения рабочей ячейки порошком диффузанта учитывалось следующее. Электрическая проводимость отдельных частиц углеродных материалов зависит только от их физической природы и структурной организации, в то время как для порошковой среды большое значение имеет контактное межзёрненное сопротивление. На эту составляющую проводимости оказывают влияние не только морфология углеродных частиц (размер, форма), но и давление их прессования, с ростом которого улучшается контакт между частицами, что повышает проводимость порошковой массы в целом [5, 6]. Для предотвращения влияния этого явления и обеспечения стабильности электрических свойств порошковой среды ячейка заполнялась порошком диффузанта свободным насыпом, без приложения внешнего давления или утрамбовывания. Использование ячейки с небольшим рабочим объёмом позволило снизить расход порошка диффузанта, что особенно ценно при исследовании вариантов многокомпонентного легирования.

В качестве насыщающей среды применяли порошки следующих углеродных материалов: графита ГК-1 ГОСТ 17022-81, угля древесного А ГОСТ 7657-84, кокса литейного каменноугольного КЛ-1 ГОСТ 3340-88, каменного угля (антрацита) А ГОСТ 25543-88.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Экспериментальное исследование цементации с использованием порошка графита показало, что при включении питающего напряжения электрический ток в цепи резко возрастает. Электрическое сопротивление цепи близко к нулю, что свидетельствует о протекании процесса в режиме, близком к короткому замыканию. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к возникновению микродугоуги в порошковой среде между образцом и корпусом ячейки, приводящей к местному оплавлению поверхности образца. Полученные результаты свидетельствуют о существенном отличии электрических свойств порошковой графитовой среды, находящейся в статичном состоянии, от свойств порошка графита, находящегося в виброкипящем (виброожиженном) состоянии, которое, как известно [4], способно обеспечивать микродугообразование. Это обусловлено тем, что виброкипящее состояние графитовой среды характеризуется непрерывным перемешиванием графитовых частиц, и, как следствие, замыканием и размыканием электропроводящих цепочек с возникновением микродуг. Порошок графита в статичном насыпном состоянии такими свойствами не обладает, поэтому сделан вывод о нецелесообразности использования графитового порошка в дальнейших исследованиях.

Применение порошка древесного угля выявило противоположную крайность: повышение питающего напряжения до максимального значения источника питания (до 300 В) не приводило к появлению электрического тока в цепи вследствие низкой электрической проводимости порошка древесного угля и не позволило произвести нагрев образца до температуры цементации, на основании чего сделан вывод о непригодности порошка древесного угля для этих целей.

Изучение процесса диффузионного науглероживания в порошке каменноугольного кокса показало, что протекание электрического тока через порошковую среду сопровождается образованием микродуг по всей поверхности порошка, с последующей их локализацией вокруг образца в виде светящегося ореола. Дальнейшая выдержка приводит к нагреву и воспламенению порошка и быстрому нагреву образца до температуры цементации. Изучение микроструктуры образцов, обработанных по этой схеме, показало, что в них формируется науглероженный слой глубиной до 0,3 мм при продолжительности процесса насыщения 5—7 мин. Таким образом, использование порошка кокса в качестве насыщающей среды приводит к существенной интенсификации процесса диффузионной цементации при условии микродугообразования.

При проведении цементации в среде порошкового каменного угля основные этапы процесса диффузионного насыщения аналогичны приведённым выше этапам для каменноугольного кокса и связаны с микродугообразованием. Методом замедленного воспроизведения видеосъёмки выполнена оценка времени возникновения и продолжительности существования отдельных микродуг — она составила величину порядка 0,1—0,2 сек. Выявлены отличия процесса нагрева в порошках угля от процесса нагрева в порошках кокса. Нагрев угольного порошка сопровождается более интенсивным газовыделением оксида углерода (СО), воспламенение и горение которого, очевидно, оказывает интенсифицирующее воздействие на процесс цементации. С помощью метода металлографического анализа установлено образование науглероженного слоя глубиной до 0,3 мм при продолжительности процесса насыщения 2—3 мин. Выделяющийся углеродсодержащий газ (СО) выполняет три функции: источника атомарного углерода в результате его диссоциации, источника тепловой энергии при его горении, а также средства, обеспечивающего интенсивное перемешивание порошковой среды без применения вибрации или принудительной подачи газа от внешнего источника. Суммарное действие указанных факторов приводит к повышению эффективности процесса диффузионного насыщения.

Следует отметить, что в отличие от угольного порошка, порошок кокса не характеризуется интенсивным газовыделением при нагреве и горении, что обусловлено технологией его производства [7], и поэтому эффективного перемешивания порошковой среды его применение не обеспечивает.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что из исследованных углеродных материалов порошок каменного угля является наилучшей порошковой средой при цементации по указанной технологической схеме.

Предполагая, что размер частиц порошка является одним из факторов, влияющих на электрические свойства порошковой среды, а, следовательно, на результаты цементации, дальнейшее исследование было посвящено изучению влияния размера частиц каменного угля и кокса на удельное электрическое сопротивление порошковой среды и результаты процесса диффузионного насыщения. С этой целью порошок был рассеян на фракции: 0,1—0,2 мм; 0,2—0,3 мм; 0,3—0,4 мм; 0,4—0,6 мм; 0,6—1,0 мм.

Измерение удельного электрического сопротивления порошков различных фракций осуществлялось следующим образом. Порошки засыпали в канавки длиной 100 мм, шириной 5 мм и глубиной 6,5 мм, вырезанные в листе электротехнического текстолита типа 241, марки ЛТ по ГОСТ 2910-74. Медные контактные электроды закрепляли в отверстиях, просверлённых по краям канавок. После заполнения порошком измерялось электрическое сопротивление между электродами с помощью цифрового мультиметра АРРА-305. Полученные результаты позволили рассчитать удельное электрическое сопротивление порошков каменного угля и кокса, которое представлено на рисунке 2.

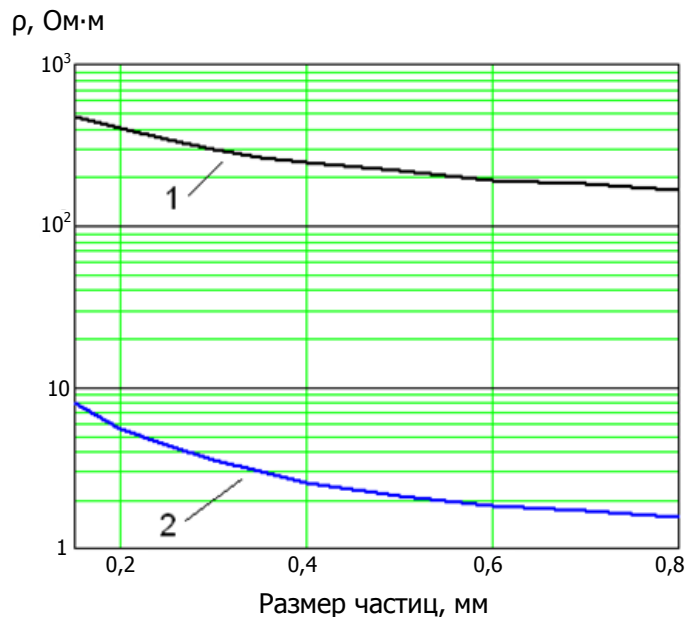


Рис. 2. Зависимость удельного электрического сопротивления  $\rho$  порошков угля (1) и кокса (2) от размера их частиц

Как и следовало ожидать, уменьшение размера частиц повышает удельное электрическое сопротивление порошков как каменного угля, так и кокса, что объясняется увеличением числа межчастичных контактов, а, следовательно, и переходного межзёрненного сопротивления. Как видно из рисунка 2, удельное сопротивление каменного угля на два порядка превышает этот параметр кокса, что, вероятно, является положительным фактором при использовании порошка каменного угля в качестве диффузанта при микродуговой цементации.

Учитывая влияние размеров частиц на электрические свойства порошковой среды, дальнейшее исследование было посвящено изучению влияния размеров частиц порошка каменного угля на протекание процесса цементации.

Нагрев в порошке с размером частиц 0,1—0,2 мм приводил к выдуванию мелких фракций из зоны контакта порошка с образцом в результате воздействия интенсивного потока оксида углерода. В меньшей степени этот эффект проявлялся при нагреве в порошке с размером частиц 0,2—0,3 мм. При нагреве в порошках с размером частиц 0,3—0,4 мм и 0,4—0,6 мм выдувание частиц из зоны нагрева практически не наблюдалось и быстрый микродуговой нагрев порошковой среды и образца сочетался со стабильным выделением оксида углерода и интенсивным перемешиванием порошковой среды в зоне контакта «образец — порошок».

Использование порошка с размером частиц более 0,6—1,0 мм приводило к увеличению размера и интенсивности образующихся микродуг, что сопровождалось выбросом некоторого количества частиц диффузанта из зоны нагрева. Кроме того, наблюдалось возрастание тока в цепи источника питания вследствие уменьшения сопротивления порошковой среды.

Таким образом, установлено, что для реализации микродуговой цементации наилучшие результаты получены на порошке каменного угля с размером частиц в интервале 0,3—0,6 мм.

#### **Выводы.**

1. Оптимальной средой для цементации с использованием микродугообразования, из числа исследованных углеродных материалов, является порошок каменного угля, обеспечивающий ускоренный нагрев диффузанта и стального изделия, а также генерацию оксида углерода, который интенсифицирует процесс науглероживания.

2. С уменьшением размера частиц электрическое сопротивление порошков каменного угля и кокса резко возрастает, что объясняется увеличением переходного сопротивления в связи с ростом числа межчастичных контактов. Независимо от размера фракции удельное электрическое сопротивление каменного угля на два порядка превышает этот показатель кокса.

3. Для микродуговой цементации предпочтительна порошковая среда с размером частиц в интервале 0,3—0,6 мм.

#### **Библиографический список**

1. Лахтин, Ю. М. Химико-термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. — Москва : Металлургия, 1985. — 256 с.
2. Борисёнок, Г. В. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / Г. В. Борисёнок, Л. А. Васильев, Л. Г. Ворошнин. — Москва : Металлургия, 1981. — 424 с.
3. Ворошнин, Л. Г. Теория и технология химико-термической обработки / Л. Г. Ворошнин, О. Л. Менделеева, В. А. Сметкин. — Москва : Новое знание, 2010. — 304 с.
4. Заваров, А. С. Химико-термическая обработка в кипящем слое / А. С. Заваров, А. П. Баскаков, С. В. Грачёв. — Москва : Машиностроение, 1985. — 160 с.
5. Шорникова, О. Н. Связующие для полимерных композиционных материалов : учеб. пособие / О. Н. Шорникова, Н. В. Максимова, В. В. Авдеев. — Москва : МГУ, 2010. — 52 с.
6. Домбровский, Ю. М. Оценка электропроводности порошковых углеродных карбюризаторов / Ю. М. Домбровский, М. С. Степанов, Г. И. Бровер // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11. — № 10 (61). — С. 1780—1784.
7. Глущенко, И. М. Теоретические основы технологии горючих ископаемых / И. М. Глущенко. — Москва : Металлургия, 1990. — 296 с.

Материал поступил в редакцию 04.12.12.

## References

1. Lakhtin, Y. M., Arzamasov, B. N. *Ximiko-termicheskaya obrabotka metallov*. [Surface impregnation.] Moscow : Metallurgiya, 1985, 256 p. (in Russian).
2. Borisenok, G. V., Vasilyev, L. A., Voroshnin, L. G. *Ximiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov*. [Surface impregnation of metals and alloys.] Moscow : Metallurgiya, 1981, 424 p. (in Russian).
3. Voroshnin, L. G., Mendeleyeva, O. L., Smetkin, V. A. *Teoriya i texnologiya ximiko-termicheskoy obrabotki*. [Theory and technology of surface impregnation.] Moscow : Novoe znanie, 2010, 304 p. (in Russian).
4. Zavarov, A. S., Baskakov, A. P., Grachev, S. V. *Ximiko-termicheskaya obrabotka v kipyashhem sloe*. [Surface impregnation in fluosolid.] Moscow : Mashinostroenie, 1985, 160 p. (in Russian).
5. Shornikova, O. N., Maksimova, N. V., Avdeyev, V. V. *Svyazuyushhie dlya polimerny`x kompozicionny`x materialov : ucheb. posobie*. [PCM bindings : manual.] Moscow : MGU, 2010, 52 p. (in Russian).
6. Dombrovskiy, Y. M., Stepanov, M. S., Brover, G. I. *Ocenka e`lektroprovodnosti poroshkovy`x uglerodny`x karbyurizatorov*. [Evaluation of electric conductivity of carbon powder carburizers.] *Vestnik of DSTU*, 2011, vol. 11, no. 10 (61), pp. 1780–1784 (in Russian).
7. Glushchenko, I. M. *Teoreticheskie osnovy` texnologii goryuchix iskopaemy`x*. [Theoretical basics of fossil fuel technology.] Moscow : Metallurgiya, 1990, 296 p. (in Russian).

## **CHOICE OF CARBON POWDERY ENVIRONMENT FOR MICROARC CARBURIZING OF METALWARE<sup>1</sup>**

**Y. M. Dombrovskiy, M. S. Stepanov**

(Don State Technical University)

*The aim of the research is the choice of the powder environment kind and dispersion used for carburizing metalware through the electric current transmission and microarc discharge forming. The laboratory unit made-up of two containers — an external one including the electroconductive environment, and an internal one where a sample with the carburized powder is placed — is used. The application of the graphite, charcoal, coal coke, and coal (anthracite) powders is investigated. It is found that the best powder environment is the coal powder which provides both speeded heating of the diffusant and a steelwork, and the carbon oxide generation which intensifies the carburizing process. The effect of the coal and coke particle size on the specific electric resistance of powder environment, and the cementation process results are studied. With the particle size reduction, the electrical resistance of coal and coke powders rises sharply that is explained by the transient resistance increase because of the growth of the interparticle contacts number. In addition, the specific electric resistance of coal is by two orders of magnitude more than that of coke, irrespective of the fraction size. For the microarc carburizing, the powder environment with the particle size within the range of 0.3–0.6 mm is preferable. The obtained results can be used for the intensification of the metalware carburizing.*

**Keywords:** metalware carburizing, powdered environment for cementation.

---

<sup>1</sup> The research is done on 2.14.13 theme of DSTU thematic research plan.