

С.А. Воденников⁽¹⁾, зав. кафедрой, к.т.н., профессор

Г.И. Слынько⁽²⁾, зав. кафедрой, д.т.н., профессор

О.С. Воденникова⁽¹⁾, ассистент

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГРАФИТИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЕДНЫМ ПОКРЫТИЕМ

⁽¹⁾Запорожская государственная инженерная академия,

⁽²⁾Запорожский национальный технический университет

За допомогою фрактографічного аналізу досліджено мікроструктурне руйнування за умов механічних навантажень матеріалів, що містять вуглець, з композиційними покриттями на основі «мідь-вуглець».

С помощью фрактографического анализа исследовано микроструктурное разрушение в условиях механических нагрузок углеродсодержащих материалов с композиционными покрытиями на основе «медь-углерод».

Введение. Анализ состояния проблемы снижения энергоемкости металлургического производства в современных условиях показывает, что основные потери электроэнергии связаны с низким качеством графитсодержащей продукции (графитированных электродов, ниппелей) вследствие высокой пористости и низких показателей электропроводности. Одним из направлений решения данной проблемы является формирование беспористого электропроводного слоя на основе композиционного покрытия «медь-углерод» на места ниппельного соединения, а также в местах электроконтактов «электрод-электрододержатель» путем электроосаждения меди из ионных расплавов солей [1].

Постановка задачи. Исследование механических свойств и микроструктурного разрушения углеродсодержащих материалов с композиционными покрытиями на основе «медь-углерод» позволит оптимизировать технологические параметры электроосаждения, обеспечивающие заданные эксплуатационные характеристики графитированных материалов с низкими показателями энергозатрат.

Методика исследований. Исследование микроструктурного разрушения графитированных материалов проводили с помощью фрактографического анализа на растровом электронном микроскопе фирмы YEOL «YSMT 300» при ускоряющем потенциале 15 кВ и диаметре электронного зонда 100 нм. Механическую прочность графитированных образцов с покрытиями определяли испытаниями на сжатие и изгиб [2]. Твердость образцов определяли на приборе Бринелля при нагрузке 1,84 кН и диаметре шарика 2,5 мм [3].

Основная часть исследований. Известно, что в ниппельном соединении секций электродов из-за плохого поверхностного контакта возникают микродуги тока, вызывающие местное выгорание электрода или их прожиг (рис. 1). При дальнейшей эксплуатации такого электрода возрастают потери электроэнергии в местах навинчивания секций электродов, что приводит к повышению расходных показателей работы электросталеплавильной печи. Снижение поверхностного контакта вызвано как высокой пористостью графита (до 30%), так и истиранием поверхности резьбы ниппельного соединения в процессе навинчивания, приводящими к формированию пылевидной прослойки из графитированного материала. Наличие такой прослойки сопровождается возникновением дополнительного электросопротивления в электроде.



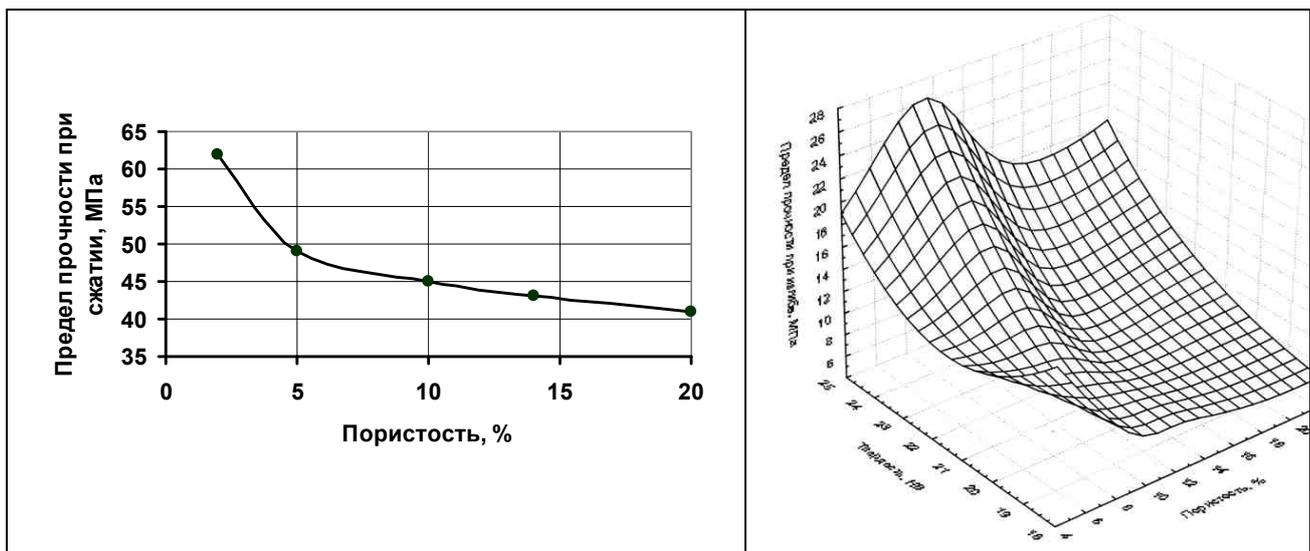
1

2

1 - прожиг электрода; 2 - выгорание электрода

Рисунок 1 - Электроконтактные разрушения электродов:

Экспериментальные исследования механической прочности графитированных образцов марки ЭГСП с медным покрытием показали, что предел прочности при сжатии увеличился на 40% (рис. 2,а) с одновременным уплотнением поверхностного слоя образцов. Уплотнение поверхностных слоев связано со структурными изменениями, снижением пористости (до 2,5%) и размера пор (до 1,2 мкм).



а

б

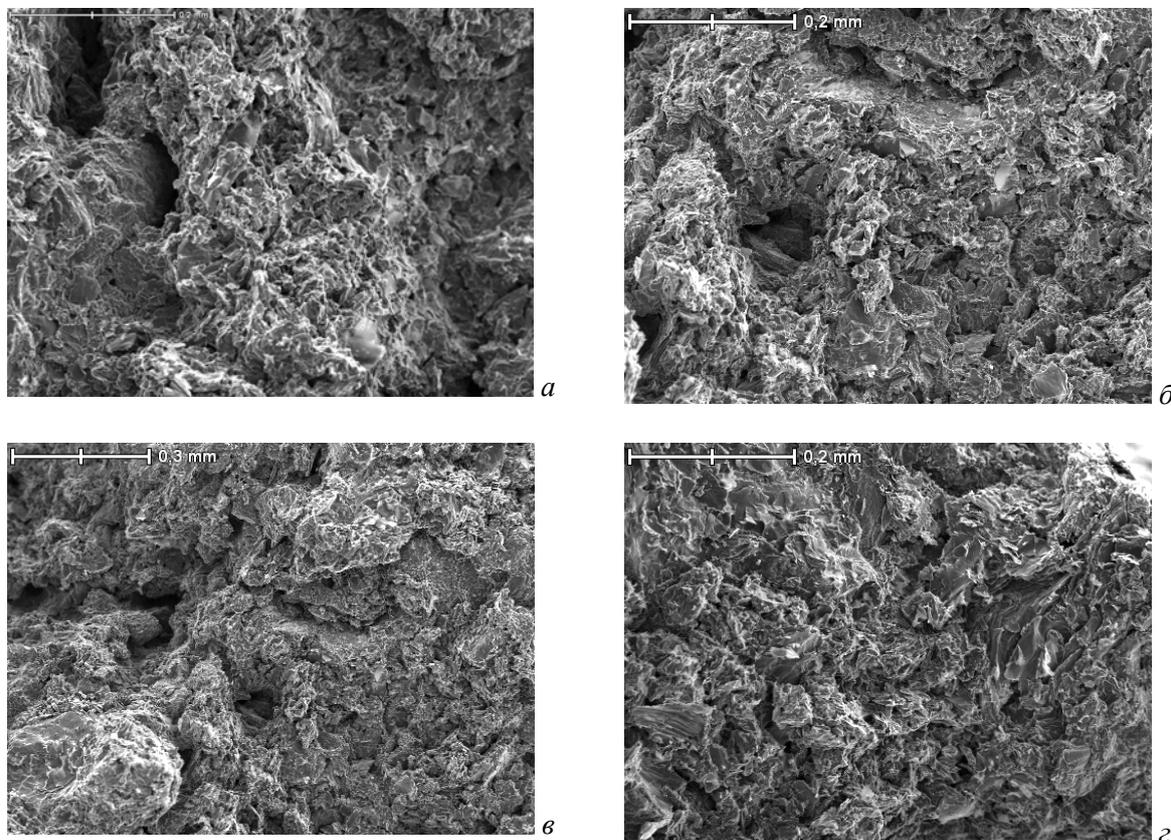
а – на предел прочности при сжатии;
б - на предел прочности при изгибе.

Рисунок 2 - Влияние пористости графитированного материала с медным покрытием:

Формирование более плотной структуры поверхностного слоя способствовало повышению твердости графитированных образцов с 18,4 НВ (исходное состояние) до 24,0 НВ (состояние максимального уплотнения). На следующем этапе исследований изучали предел прочности при изгибе ($\sigma_{\text{в}}^{\text{изг}}$) графитированных образцов с медным покрытием. Установлено, что величина данного показателя возрастает с 7,2 МПа (графит в исходном состоянии) до 14,8 МПа (графит с диффузионным слоем меди до 700 мкм) (рис. 2,б). Такие изменения предела прочности связаны, в первую очередь, со структурными изменениями в поверхностных слоях и формированием упрочняющего каркаса на основе электролитической меди между зернами графита. Внешнее медное покрытие (до 200 мкм) повышает прочностные характеристики и снижает

удельное электросопротивление графитированного материала.

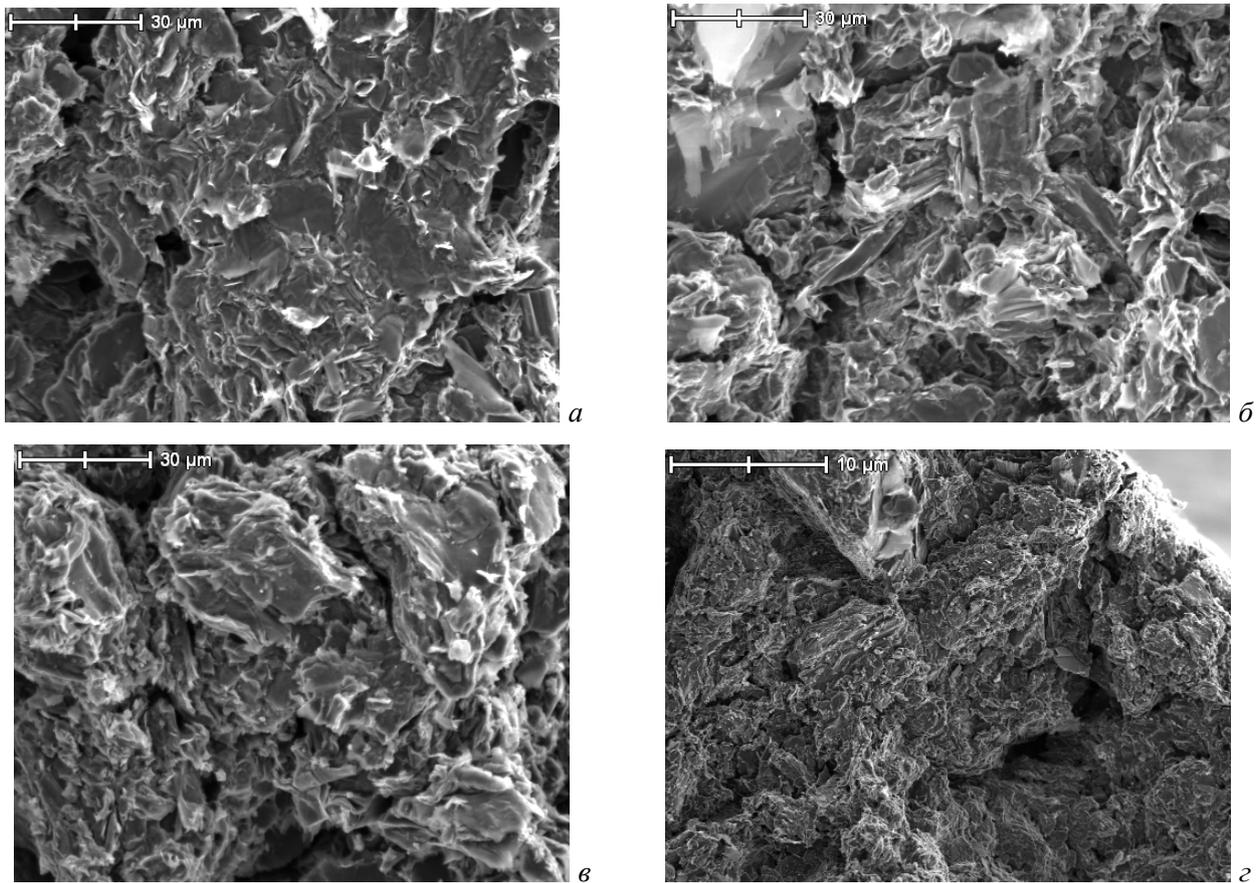
Фрактографические исследования образцов с покрытиями позволили установить микроструктурное разрушение и объяснить характер повышения механических свойств графитированных материалов. Характерные изменения наблюдали по сечению образцов в виде структурного состояния изломов (рис. 3).



а - необработанный образец; б, в - образцы после упрочнения: глубина слоя 200 мкм; г - поверхность образца

Рисунок 3 - Микрофрактограммы графитированных образцов после упрочнения медью при плотности тока $0,7 \text{ A/cm}^2$ и времени электролиза - 15 мин, $\times 100$:

Анализ структурного состояния изломов показал, что для исходного образца характерно внутризеренное и межзеренное разрушение. При диффузионном насыщении медью графитированного образца на глубину до 300 мкм наблюдали как уменьшение количества пор (до 14%) и снижение их среднего размера (до 3,3 мкм), так и появление участков вязкого излома по включениям меди в графите, расположенным преимущественно в порах (рис. 4,б). Более глубокое насыщение медью (до 500 мкм) способствует не только снижению пористости образцов и уменьшению размера их пор, но, прежде всего, армированию графитированного материала вязкими включениями меди. Такое формирование структуры способствует переводу изломов из хрупкого в, преимущественно, вязкое состояние (рис. 4,в). Прочно связанный с диффузионным слоем поверхностный слой электролитической меди толщиной до 200 мкм разрушался по вязкому механизму с переходом в вязкохрупкое разрушение по мере углубления диффузионного слоя (рис. 4,г) [4,5]. Таким образом, установлены микро-механизмы разрушения пористого материала, объясняющие причины повышения прочностных характеристик графитированного материала.



а - образец без диффузионного покрытия; б - образец с диффузионным покрытием до 300 мкм; в - образец с диффузионным покрытием 500 мкм; г - образец с диффузионным покрытием 700 мкм, включая поверхностный слой меди до 200 мкм

Рисунок 4 - Микрофрактограммы упрочненных медью графитированных образцов после испытаний на изгиб:

Выводы. Установлено микроструктурное разрушение пористых графитсодержащих материалов, позволяющие объяснить повышение прочностных характеристик образцов с композиционным покрытием на основе меди. Структурные изменения поверхностных слоев способствовали повышению механических свойств за счет перевода изломов от хрупкого внутризеренного по зернам графита и межзеренного до вязкохрупкого и вязкого внутризеренного изломов по включениям электролитической меди и по ее объему на поверхности графитированных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тарасов В. К.* Повышение стойкости графитированных электродов руднотермических печей / В. К. Тарасов, А. Я. Жук // Состояние, проблемы и направления развития производства цветных металлов в Украине: сб. науч. тр. – Запорожье: ЗГИА, 1997. – С. 387-390.
2. Машины для испытания материалов на растяжения, сжатия, изгиб. Методы механических испытаний: ГОСТ 7855-84. – [Действительный от 1988-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 10 с.
3. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю: ГОСТ 9012-59. – [Действительный от 1960-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 40 с.
4. *Воденніков С. А.* Мікромеханізми руйнування пористих матеріалів з композиційними покриттями / С. А. Воденніков, Г. І. Слинько // 9-й міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків (20–22 травня 2009 р., Львів): праці. – Львів: КІНПАТРІ ЛТД, 2009. – С. 13-14.

5. *Воденніков С. А.* Особливості мікромеханізмів райнування вуглецьвміщуючих матеріалів з композиційними покриттями / С. А. Воденніков, Г. І. Слинько // *Машинознавство*. – 2009. – № 6. – С. 45– 47.

Стаття надійшла до редакції 25.12..2009 р.
Рецензент, проф. Ю.Ф. Терновий