

УДК 669.18.04:669.89

к.т.н. Куберский С. В.,
к.т.н. Проценко М. Ю.,
Воронько М. И.,
Проценко В. И.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ЭЛЕКТРОДНОЙ СМЕСИ НА ЕЁ УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ

Исследовано влияние химического и фракционного состава электродной смеси, используемой для комбинированного токопроводящего электрода процесса дугового глубинного восстановления, на её удельное электросопротивление.

Ключевые слова: комбинированный электрод, дуговое глубинное восстановление, внепечная обработка, удельное электросопротивление, электродная смесь, известь, шлак силикомарганца, доломитизированный известняк.

Проблема ресурсо- и энергосбережения в настоящее время достаточно актуальна для всех без исключения отраслей промышленности, а также оказывает существенное влияние на экологическую обстановку индустриально развитых регионов.

Особое место в этом вопросе занимает горно-металлургический комплекс и, в частности, сталеплавильное производство. Применение ферросплавов для традиционных схем раскисления и легирования железоуглеродистых сплавов сопряжено с достаточно большими затратами материальных и энергетических ресурсов. Поэтому перспективными являются технологии, в которых предусматривается использование различных промышленных отходов и вторичных сырьевых материалов взамен традиционных компонентов шихты, что позитивно сказывается на себестоимости обработки и её эффективности.

Технология дугового глубинного восстановления (ДГВ) является относительно новым технологическим процессом, позволяющим реализовать восстановление необходимых для внепечной обработки химических элементов непосредственно в железоуглеродистый расплав, минуя стадию получения ферросплавов, а также обеспечить его эффективный нагрев заглублённой электрической дугой, используя при этом различ-

ные техногенные отходы, что способствует ресурсо- и энергосбережению [1].

Основным конструктивным элементом технологии ДГВ является рудно-восстановительный блок, состоящий из комбинированного электрода (КЭ), в который входит электродная смесь (ЭС), и рудно-восстановительной смеси, набиваемой затем вокруг него. КЭ должен обладать максимальной электропроводимостью, чтобы минимизировать долю потерь электроэнергии на омический нагрев и максимальную её долю сконцентрировать в зоне горения дуги, что, в свою очередь, позитивно повлияет на эффективность процесса извлечения полезных элементов в расплав и технологию внепечной обработки в целом [1]. Удельное электросопротивление (ρ) ЭС зависит от множества факторов и в первую очередь от её физико-химических свойств, а также конструктивных особенностей КЭ.

Основная цель работы заключалась в оценке влияния фракционного и химического состава ЭС на её удельное электросопротивление. Поэтому в работе было исследовано влияние крупности и доли различных добавок в составе ЭС на этот физический параметр. В качестве добавок были использованы относительно недорогие и доступные материалы, такие как

шлак от производства силикомарганца (ШМнС), негашёная известь (НИ) и доломитизированный известняк (ДИ).

Выполненные в работе исследования (р) проводили с использованием методики двухфакторного планированного эксперимента с двумя звёздными точками [2]. Экспериментальные образцы изготавливали в соответствии матрицей планированного эксперимента (табл. 1). Содержание ШМнС, НИ и ДИ изменялось от 8,96 % до 16,04 %, а их фракция — от 0,05 мм до 2,5 мм. Рассев графита, полученного от дробления боя графитовых электродов, и связующего (каменноугольный пек) производили через сито с ячейкой 0,63 мм.

Таблица 1

Значения исследуемых в планированном эксперименте параметров

№	Значения переменных факторов	
	f (фракция добавки, мм)	Q (количество добавки, %)
1	0,40	10
2	0,40	15
3	2,00	10
4	2,00	15
5	0,05	12,5
6	2,5	12,5
7	1,0	8,96
8	1,0	16,04
9	1,0	12,5

Для определения (р) ЭС был выбран метод его измерения с помощью индикатора сопротивления МВ (точность $\pm 5,0$ %) по аналогии с исследованиями, проведёнными в работах [3, 4].

Для изготовления образцов все исследуемые добавки сначала были подроблены в металлической ступке и просеяны через сита с ячейками соответствующего размера. ЭС формировали из 80 % графита и 20 % каменноугольного пека, которые имели фракцию «–0,63» мм. Кроме отмеченных компонентов ЭС в неё сверх 100 % добавляли определённое количество балластных добавок, и тщательно перемешивали смесь до получения однородной мас-

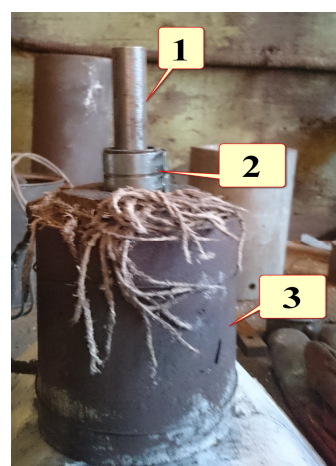
сы. В качестве пресс-формы использовалась разрезанная вдоль оси стальная трубка, которая стягивалась двумя гибкими стальными хомутами (рис. 1).

Пресс-форму устанавливали во внутреннее пространство нагревательной электропечи сопротивления (рис. 2).

Готовая смесь подавалась порциями (5–8 г) в пресс-форму и при достижении температуры 100–120 °С при постоянном усилии уплотнялась стальным прутком. Данная температура соответствует температуре плавления каменноугольного пека и в этих условиях он способен хорошо обволакивать все частицы связываемых материалов.



Рисунок 1 Пресс-форма для набивки образцов

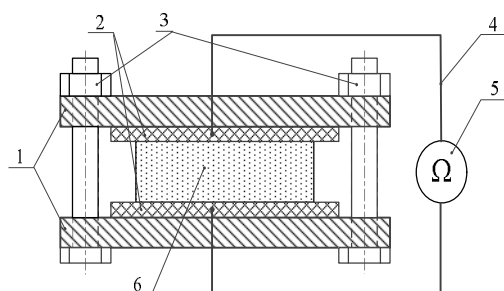


1 — стальной прут; 2 — пресс-форма;
3 — малая шахтная электропечь сопротивления

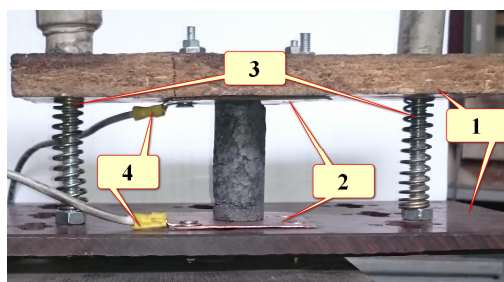
Рисунок 2 Пресс-форма в нагревательной электропечи сопротивления

После того как пресс-форма была полностью набита смесью, она вынималась из печи, и после полного её остывания производилось извлечение опытного образца. Конечное коксование опытных образцов производили с помощью шахтной электропечи СШОЛ-1.1,6/12, в которую помещали специальный стальной стакан с образцами. Внутри стакана опытные образцы засыпались измельчённым коксом для предотвращения их контакта с печной атмосферой. Процесс коксования производили в течение 7–8 ч при температуре 800–900 °С.

При коксовании опытных образцов из электродной смеси удалялись влага и летучие. После завершения коксования образцы извлекали из стального стакана и выполняли зачистку параллельных плоскостей, которые будут соприкасаться с медными пластинами установки для измерения электросопротивления, схема и общий вид которой представлены на рисунке 3 [3, 4].



а)



б)

1 — несущие пластины опытной установки (диэлектрик); 2 — медные пластины; 3 — прижимные болты; 4 — соединительные провода; 5 — омметр марки ММВ; 6 — опытный образец

Рисунок 3 Схема установки для измерения ρ (а) и её общий вид (б)

С целью минимизации погрешности измерений (ρ) для каждого образца исследуемый параметр определяли три раза и рассчитывали среднее значение. Результаты проведенных измерений представлены в таблице 2.

Результаты опытных данных были статистически обработаны с помощью стандартных пакетов программ Microsoft Excel и Statistica 64 Version 10. Полученные зависимости представлены в таблице 3 и на рисунке 4.

Таблица 2

Результаты измерения электросопротивления электродной смеси с различными добавками

№	Величина удельного электросопротивления образца (ρ), (Ом·м)·10 ⁻⁴		
	ШМнС	ДИ	НИ
1	6,779	9,623	11,870
2	6,459	9,073	9,884
3	12,331	7,119	9,073
4	6,321	6,059	14,029
5	6,637	5,941	12,994
6	5,610	5,505	8,981
7	4,565	5,531	8,302
8	5,007	6,598	12,322
9	4,704	6,392	10,145

Таблица 3

Уравнения регрессии, описывающие связь между (ρ) ЭС и её составом

Добавка*	Уравнение регрессии
1	$\rho = 6,6603 + 8,281 \cdot f - 0,6476 \cdot Q + 0,9336 \cdot f^2 - 0,7951 \cdot f \cdot Q + 0,0495 \cdot Q^2$
2	$\rho = 13,3905 - 0,0676 \cdot f - 1,0106 \cdot Q + 0,2424 \cdot f^2 - 0,1091 \cdot f \cdot Q + 0,045 \cdot Q^2$
3	$\rho = 18,8619 - 11,9045 \cdot f - 0,6502 \cdot Q + 0,504 \cdot f^2 + 0,8004 \cdot f \cdot Q + 0,0081 \cdot Q^2$

*1 — ШМнС; 2 — ДИ; 3 — НИ

Для удобства анализа представленных на рисунке 4 данных были построены парные зависимости исследуемых параметров при постоянном значении третьего (рис. 5). На рисунке 5,а показано влияние крупности и доли ШМнС в ЭС. Анализ рисунка 5,а показывает, что при уве-

личении содержания добавки в ЭС с 7 % до 17 % для фракций «-1,0»÷«-2,6» (ρ) снижается с $8,0 \div 18,0 \cdot 10^{-4}$ Ом·м до $2,7 \div 5,7 \cdot 10^{-4}$ Ом·м. Для фракции «-0,6» при увеличении содержания добавки до 13 % (ρ) незначительно снижается, а при большем количестве добавки начинает расти.

Однако изменение (ρ) для этой фракции во всём исследованном диапазоне находится в достаточно узких пределах ($6,5 \div 7,2 \cdot 10^{-4}$ Ом·м), т. е. повышается всего на $0,7 \cdot 10^{-4}$ Ом·м, что не превышает 10 %.

При использовании добавки ШМnC фракцией «-0,2» отмечается повышение (ρ) от $5,2 \cdot 10^{-4}$ Ом·м при 7 % добавки

до $9,0 \cdot 10^{-4}$ Ом·м при 17 % её содержания, т. е. в 1,7 раза.

Влияние на исследуемый параметр добавки ДИ в ЭС представлено на рисунке 5,б и свидетельствует о том, что величина (ρ) для всех значений крупности добавки снижается при повышении её доли в ЭС до 12,5÷14,5 % и принимает минимальные значения для фракций «-0,2» и «-0,6» при доле добавки в ЭС 12,5 %, для фракций «-1,0» и «-1,4» при доле добавки в ЭС 13,5 %, для фракций «-1,8»÷«-2,6» при доле добавки в ЭС 14,5 %, а превышение отмеченных концентраций в этих диапазонах крупности ДИ приводит к повышению (ρ).

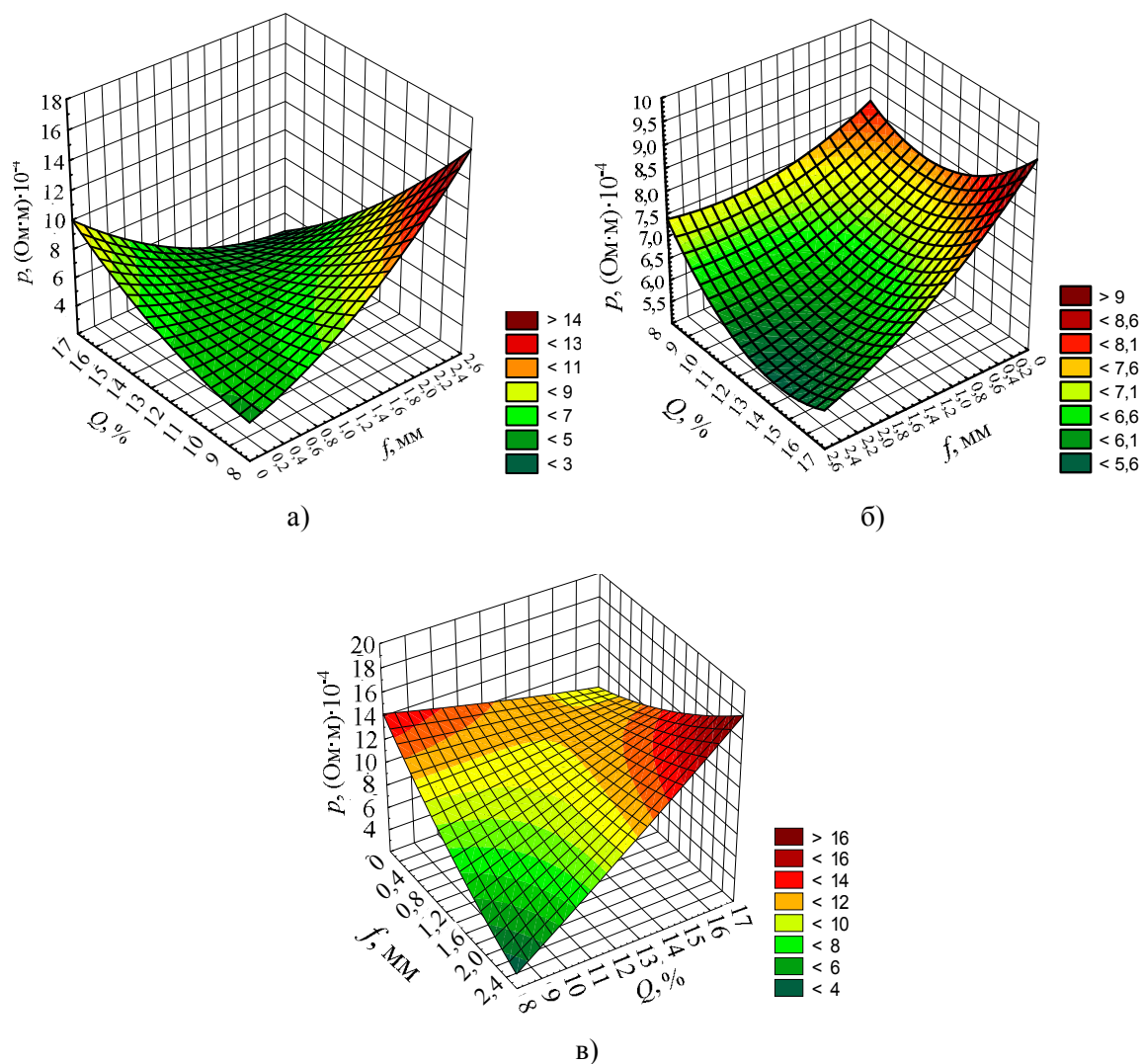


Рисунок 4 Зависимости (ρ) ЭС от фракционного состава и количества добавок:

а — ШМnC; б — ДИ; в — НИ

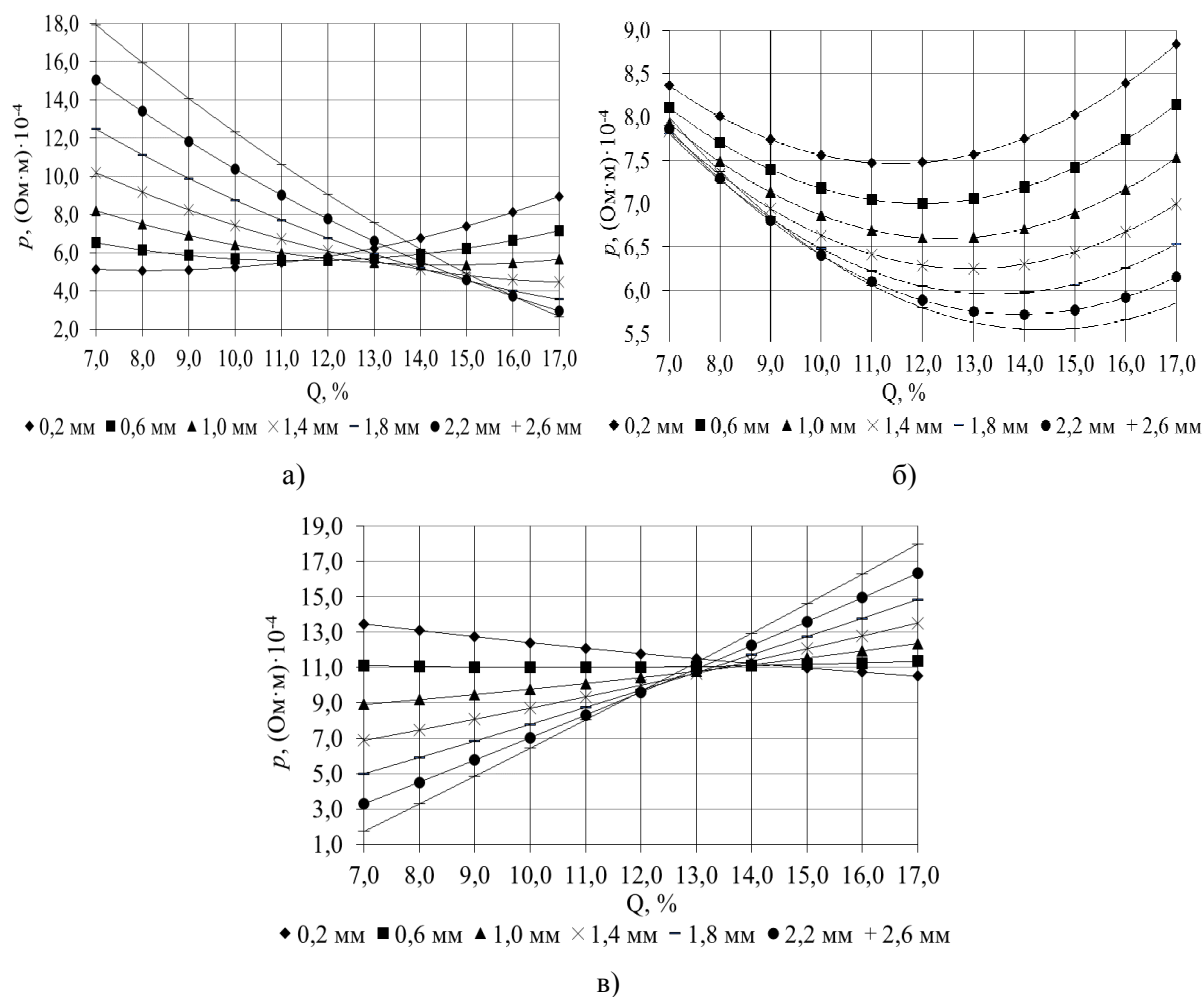


Рисунок 5 Влияние фракции и количества добавки в ЭС на (ρ) :
а — ШМнС; б — ДИ; в — НИ

На рисунке 5,в показано влияние на (ρ) крупности и доли НИ в составе ЭС. Представленные на рисунке 5,в данные свидетельствуют о том, что для фракций НИ «-1,0»÷«-2,6» (ρ) увеличивается с $1,7 \div 8,9 \cdot 10^{-4}$ Ом·м при доле добавки 7 % до $12,4 \div 18,0 \cdot 10^{-4}$ Ом·м при 17 % НИ в ЭС, что является негативным фактором.

Добавка НИ фракцией «-0,6» в ЭС практически не влияет на (ρ) , а при использовании фракции «-0,2» исследуемый параметр уменьшается с $13,5 \cdot 10^{-4}$ Ом·м при 7 % добавки до $10,5 \cdot 10^{-4}$ Ом·м при её содержании 17 %, что составляет около 29 %.

На основании проведённых исследований можно утверждать, что низкие

значения (ρ) обеспечиваются добавкой в состав ЭС 13–14 % ШМнС и 12–12,5 % ДИ фракций «-0,2» и «-0,6». Кроме того, низкие значения обеспечиваются добавкой в состав ЭС 13–14 % ДИ и более 14 % НИ фракций «-1,8»÷«-2,6». Однако такая крупность добавки непригодна для набивки КЭ, так как уплотняемая ЭС будет иметь высокую пористость и возможно её высыпание в процессе горения электрода.

В ходе дальнейших исследований предполагается проанализировать влияние рассмотренных добавок в ЭС на скорость расходования КЭ и энергетические параметры процесса.

Библиографический список

1. Электродуговая и электромагнитная обработка расплавов [Текст] : монография / А. Н. Смирнов и др. — Алчевск : ДонГТУ, 2013. — 320 с.
2. Воронько, М. И. Разработка методики для оценки влияния состава электродной смеси на её электропроводность [Текст] / М. И. Воронько, В. О. Десятников, М. Ю. Проценко // *Металлургия XXI столетия глазами молодых [Электронный ресурс] : материалы IV Международной научно-практической конференции молодых учёных и студентов.* — Донецк : ГОУ ВПО «ДНТУ», 2018. — С. 39–42. — (CD-ROM).
3. Галяпа, А. Г. Исследование электросопротивления рудно-восстановительной смеси для дугового глубинного восстановления элементов [Текст] / А. Г. Галяпа, М. Ю. Проценко // *Тезисы доклада на XII научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «АМК».* — Алчевск : ОАО «АМК», 2012. — С. 15–16.
4. Чернобровин, В. П. Электропроводность хромоугольных брикетов и их компонентов для производства феррохрома [Текст] / В. П. Чернобровин, В. Б. Шмыга, Р. А. Хидиятов, Г. Г. Михайлов, И. Ю. Пашикев, А. В. Сенин // *Вестник ЮУрГУ.* — Челябинск : Металлургия, 2005. — № 3, Вып. 5. — С. 66–69.

© Куберский С. В.
 © Проценко М. Ю.
 © Воронько М. И.
 © Проценко В. И.

*Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н.,
 зам. нач. ЦЛК филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» Тарасовым В. Н.*

Статья поступила в редакцию 04.06.18.

к.т.н. Куберский С. В., к.т.н. Проценко М. Ю., Воронько М. И., Проценко В. И. (ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СКЛАДУ ЕЛЕКТРОДНОЇ СУМІШІ НА ЇЇ ПИТОМИЙ ЕЛЕКТРООПІР

Досліджено вплив хімічного і фракційного складу електродної суміші, що використовується для комбінованого струмопровідного електроду процесу дугового глибинного відновлення, на її питомий електроопір.

Ключові слова: комбінований електрод, дугове глибинне відновлення, позапічна обробка, питомий електроопір, електродна суміш, вапно, шлак силікомарганцю, доломітизований вапняк.

Ph.D. Kuberskiy S. V., Ph.D. Protsenko M. Yu., Voron'ko M. I., Protsenko V. I. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

INVESTIGATING THE EFFECT OF ELECTRODE MIXTURE COMPOSITION ON ITS SPECIFIC ELECTRICAL RESISTANCE

The influence of the chemical and fractional composition of the electrode mixture used for the combined conductive electrode of the arc depth reduction process on its electrical resistivity is studied.

Key words: combined electrode, arc depth reduction, out-of-furnace treatment, resistivity, electrode mixture, lime, silicomanganese slag, dolomitized limestone.