

УДК 669.04:669.054.8

**Кухарев А. Л., \*Куберский С. В., Кононенко Г. И.**  
 Донбасский государственный технический университет  
 \*E-mail: Skuberskiy@yandex.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ДУГОВОМ ГЛУБИННОМ ВОССТАНОВЛЕНИИ

*Предложена математическая модель, позволяющая оценить параметры теплопереноса при дуговом глубинном восстановлении элементов из силикомарганцевого шлака в железоуглеродистый расплав. Показано, что при использованных граничных условиях не вся реакционная поверхность рудно-восстановительного блока прогревается до температуры начала карботермического восстановления марганца и кремния. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами опытно-промышленного опробования технологии. Предложены пути повышения эффективности процесса ДГВ, обеспечивающие увеличение степени извлечения элементов из оксидных рудно-восстановительных смесей.*

**Ключевые слова:** техногенные отходы, рециклинг, раскисление-легирование, железоуглеродистый расплав, электрическая дуга, восстановление, математическая модель, теплоперенос, распределение температур, степень извлечения.

Концепция технологического развития до 2030 года [1], Стратегия развития металлургической промышленности РФ на период до 2030 г. [2], а также Программа фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) [3] в качестве основных направлений, стратегических задач и приоритетных направлений исследований предусматривают стимулирование создания новых ресурсо- и энергосберегающих металлургических процессов, включая углубленную переработку бытовых и техногенных отходов для снижения их негативного воздействия на окружающую среду и зависимости металлургических предприятий России от импорта ферросплавов, сырья и материалов.

Одним из таких процессов является дуговое глубинное восстановление (ДГВ) элементов в железоуглеродистые расплавы для их раскисления-легирования, рафинирования, гомогенизации и нагрева [4]. В качестве основного рудного сырья в технологии ДГВ используются различные техногенные отходы (шлак, шлам, пыль, огнеупорный лом, бедные руды, отходы обогащения и т. д.), что обеспечивает их эффек-

тивный рециклинг, энерго- и ресурсосбережение, а также улучшение экологической обстановки за счет снижения негативного влияния на окружающую среду. Метод ДГВ был успешно реализован для насыщения железоуглеродистых расплавов магнием, кальцием, марганцем, кремнием, восстанавливаемыми из боя бывшего в употреблении огнеупорного кирпича, некондиционной извести и доломита, бедной марганцевой руды, передельного марганцевого шлака, шлама сухих ферросплавных газоочисток и отвального шлака производства товарного силикомарганца, а также обычного речного песка (взамен традиционного кварцита). Применение метода ДГВ для десульфурации чугуна и раскисления-легирования черных металлов в ковшах небольшой емкости (0,16–1,0 т), характерных литейным предприятиям и металлургическим микро-заводам, позволило обеспечить значительный экономический и экологический эффект.

Достаточно важным для технологии ДГВ вопросом является оптимизация энергетического баланса, обеспечивающая рациональное использование затрачиваемой на процесс электрической энергии. В рабо-

те [5] было показано, что основное влияние на степень извлечения раскисляющих, легирующих и рафинирующих элементов в железоуглеродистый расплав оказывают температура расходования рудно-восстановительного блока (РВБ) и толщина слоя рудно-восстановительной смеси (РВС), прогреваемого до температуры начала реакций их восстановления. Установленные в этой работе корреляционные зависимости позволяют утверждать, что для повышения эффективности обработки расплава по методу ДГВ необходимо иметь более высокую температуру расплава перед обработкой, а в составе РВС использовать компоненты с меньшими теплопроводностью, теплоемкостью и кажущейся плотностью. Причем теплопроводность выбрана как один из основных теплофизических параметров с увеличением, которого происходит рассеивание тепла по РВБ и, соответственно, меньшая его часть аккумулируется на реакционной поверхности, что затрудняет ее прогрев до температуры восстановления элементов и снижает степень их извлечения в расплав методом ДГВ.

Поэтому актуальными для метода ДГВ вопросами, которые не были изучены в ходе предыдущих исследований, являются перенос тепла в РВБ и распределение температуры по его высоте и сечению. Такая информация необходима для определения объема РВС, в которой могут возникать термодинамические условия для протекания реакций восстановления элементов.

В связи с этим *целью* настоящей работы явилась разработка математической модели и моделирование теплопереноса в процессе ДГВ.

**Объект исследования** — технология дугового глубинного восстановления.

**Предмет исследования** — теплоперенос от погруженной в объем расплава электрической дуги.

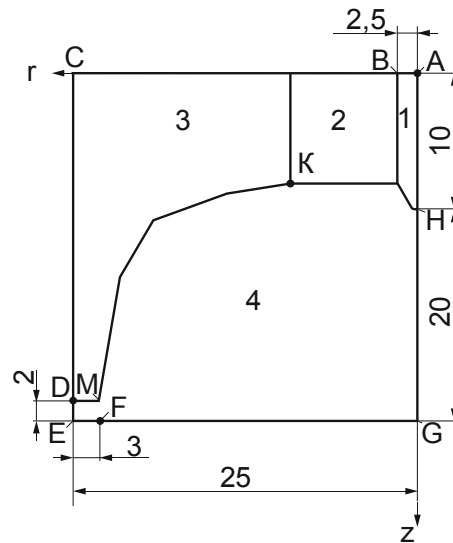
Основная задача настоящих исследований заключалась в математическом моделировании процесса ДГВ для определения величин температур, имеющих место на

реакционной поверхности каверны РВБ в результате дугового нагрева.

Для решения поставленной задачи было выполнено математическое моделирование процессов теплопереноса, имеющих место при карботермическом ДГВ марганца из силикомарганцевого шлака (ШМнС) с использованием лабораторной установки для обработки железоуглеродистых расплавов в ИСТ-0,06. Рабочие токи данной установки составляют порядка 300 А. Как показали предварительные электромагнитные расчеты, распределение тока в комбинированном электроде (КЭ) неравномерное: 93 % (280 А) его величины протекает по стенкам стальной трубки, а оставшаяся часть — через сердцевину, заполненную электродной смесью (ЭС) из графита с оксидом магния.

При разработке модели не учитывались процессы в катодной и анодной областях дуги, предполагалось, что дуга устойчива, плазма дуги находится в состоянии локального термодинамического равновесия, а распределение всех ее характеристик считается осесимметричным, принимается объемный характер излучения плазмы, не учитывается эффект Томсона. При моделировании были использованы термодинамические свойства воздушной плазмы атмосферного давления [6]. Предполагалось, что в плазме дуги будет содержаться достаточно большое количество легкоионизированных элементов (Fe, Mn, Mg, Ca, Al, Si и др. [7]), поэтому плазма считалась оптически тонкой. Также считалось, что при реализации процесса ДГВ температура стальной трубки КЭ на расстоянии 10–20 мм от ее нижнего торца близка к точке Кюри [1], в связи с этим магнитные свойства стали не учитывались. Аналогичное допущение принималось для всех металлов, входящих в состав РВБ.

Расчетная область моделирования с указанием основных геометрических размеров приведена на рисунке 1. Для обеспечения осевой симметрии стальная оболочка КЭ располагалась вдоль оси  $z$ .



1 — сталь; 2 — графит+MgO; 3 — ШМnC+C; 4 — газ

Рисунок 1— Схема расчетной области для моделирования процесса теплопереноса при ДГВ

Необходимо отметить, что заостренная форма стальной части КЭ с закруглением радиусом 0,5 мм обоснована в статье [8]. Там же приведены упрощения при использовании системы уравнений магнитной гидродинамики (МГД) для моделирования дуги при токах порядка  $10^2$  А.

При принятых допущениях и упрощениях базовые уравнения МГД модели стационарной дуги имеют вид:

– уравнение неразрывности потока:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0; \quad (1)$$

– уравнение движения:

$$\rho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla p - \frac{2}{3} \nabla (\eta \nabla \cdot \vec{v}) + 2 \nabla \cdot (\eta \dot{\epsilon}) + \vec{J} \cdot \vec{B}; \quad (2)$$

– уравнение энергии в газе:

$$\rho C_p (\vec{v} \cdot \nabla T) = \lambda \nabla^2 T + \frac{\vec{J}^2}{\sigma} - S_R, \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>,  $\eta$  — вязкость, Па·с;  $\lambda$  — теплопроводность, Вт/(м·К);  $p$  — давление, Па;  $T$  — температура, К;  $\vec{J}$  — плотность тока, А/м<sup>2</sup>;  $\vec{B}$  — магнитная индукция, Тл;  $S_R$  — объемная плотность потока излучения, Вт/м<sup>3</sup>.

В уравнении (2) тензор скоростей деформаций  $\dot{\epsilon}$  содержит компоненты:

$$\epsilon_{ik} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right), \quad (4)$$

где  $v_i, v_k$  — компоненты вектора скорости  $\vec{v}$ ;  $x_i, x_k$  — координаты,  $i, k = 1, 2, 3$ .

Уравнения электромагнитного поля с использованием скалярного электрического потенциала  $\varphi$  и векторного магнитного потенциала  $\vec{A}$  запишутся в виде:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = 0, \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \frac{1}{\mu_0} \nabla \cdot \vec{A} + \sigma \nabla \varphi = 0. \quad (6)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная,  $\sigma$  — электропроводность, См/м.

Подтверждение адекватности используемой МГД модели электрической дуги на основе уравнений (1–6) путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных приведено в работе [8].

Уравнение энергии для твердых тел можно записать в виде

$$\lambda \nabla^2 T + \frac{\vec{J}^2}{\sigma} = 0. \quad (7)$$

**МЕТАЛЛУРГИЯ**

Данные расчеты проводились с использованием основных граничных условий, приведенных в таблице 1.

Выбранные в таблице 1 граничные условия обусловлены следующими особенностями. Поверхности АВ, ВС, ЕF считались теплоизолированными. На поверхности CD задавалась постоянная температура, соответствующая температуре расплава перед обработкой вблизи боковой стенки РВБ (1800 К). Так как в данной работе уделено основное внимание передаче тепла в РВБ, на анодной поверхности FG температура также принималась постоянной (1900 К). На поверхности DE принято граничное условие типа outlet с заданием атмосферного давления на этой границе. Предполагалось, что через эту поверхность происходит выход газов, образующихся при ДГВ. На поверхностях HD, EF и GH налагалось условие прилипания. Также на поверхности HD для электрического потенциала и теплового потока использовались граничные условия четвертого рода, описанные в работе [8].

Моделирование данных процессов проводилось в пакете Star CCM+. При дискре-

тизации расчетной области (рис. 1) использовалась четырехугольная сетка с основным размером 0,1 мм. В области электрода, в анодной области и вдоль оси симметрии сетка дополнительно сгущалась до 0,01 мм. Общее количество элементов в сетке составило около 400000.

При моделировании термодинамические характеристики плазмы задавались в табличном виде [6]. Теплофизические параметры твердых тел считались постоянными и для стальной трубки, ЭС (графит + магнетит), а также РВС (ШМнС + графитовая стружка) приведены в таблице 2 на основании результатов работ [4, 5, 9–11].

Результаты моделирования распределения температуры, передаваемой от дуги на поверхность РВС, приведены на рисунке 2.

При силе рабочего тока 300 А с учетом отмеченного выше его распределения по КЭ (280 А — стальная трубка, 20 А — электродная смесь) плотности тока в стальной его части составляли  $2,3 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>, увеличиваясь вблизи катодного пятна дуги до значений  $\sim 1 \cdot 10^7$  А/м<sup>2</sup>.

Таблица 1

Граничные условия для различных участков расчетной области

Параметр	Участки расчетной области							
	AB	BC	CD	DE	EF	FG	GA	HD
$T$	$\partial T / \partial \vec{n} = 0$			1800 К	$\partial T / \partial \vec{n} = 0$	1900 К	$\partial T / \partial \vec{n} = 0$	–
$p$	–	–	–	0,1 МПа	–	–	$\partial p / \partial \vec{n} = 0$	–
$v$	–	–	–	$\partial \vec{v} / \partial \vec{n} = 0$	$\vec{v} = 0$		$\partial \vec{v} / \partial \vec{n} = 0$	$\vec{v} = 0$
$\varphi$	$\vec{J} \cdot \vec{n} = \frac{I}{S_m}$ $I = 280$ А		$\frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}} = 0$			$\varphi = 0$	$\frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}} = 0$	–
$A$	$\vec{A} \times \vec{n} = 0$						$\partial \vec{A} / \partial \vec{n} = 0$	–

Таблица 2

Теплофизические параметры элементов РВБ

Материал	Теплофизические свойства			
	Удельная проводимость	Теплопроводность	Плотность	Теплоемкость
	См/м	Вт/(м·К)	кг/м <sup>3</sup>	Дж/(кг·К)
Стальная трубка	$7 \cdot 10^5$	30	7000	700
ЭС	$0,5 \cdot 10^5$	60	1500	2000
РВС	10	2,4	2700	2302

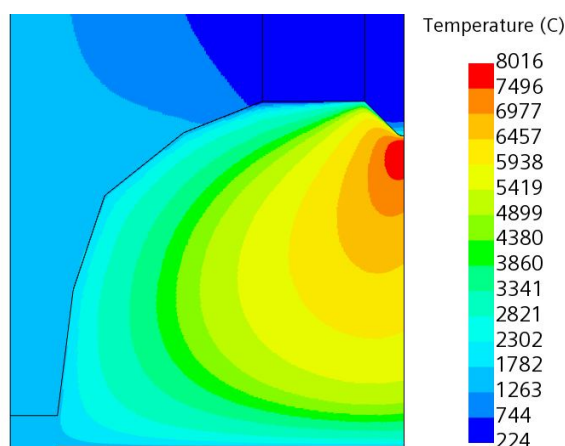


Рисунок 2 — График распределения температуры

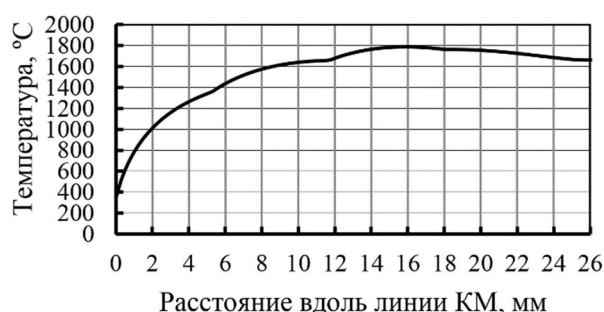
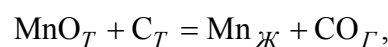


Рисунок 3 — График распределения температуры вдоль линии КМ (рис. 1)

При этом максимальная температура дуги составила около 8000 °С (рис. 2). По всей видимости, при таких значениях температуры будет наблюдаться неустойчивый режим горения дуги. Как и для большей части свободно горящих дуговых разрядов, полученное распределение температуры имеет «грушевидную» форму со стягиванием изотерм вблизи катода и с их расширением в области анода. Такое неравномерное распределение температур в столбе дуги также приводит к неравномерному нагреву РВБ. Так как основные восстановительные химические реакции протекают на границе между внутренней поверхностью каверны РВБ и газом (ломаная линия КМ на рис. 1), то целесообразно проанализировать распределение температуры вдоль этой линии (рис. 3) и сравнить ее с температурами начала восстановления извлекаемых в расплав элементов. Также

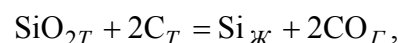
необходимо отметить, что представленный на рисунке 3 график распределения температуры имеет экстремумы при  $L = 5,3$  мм,  $L = 11,8$  мм  $L = 17,3$  мм. Это обусловлено тем, что полусферическая поверхность каверны РВБ задана в модели в виде ломаной линии КМ (рис. 1).

Расчетные температуры начала восстановления марганца и кремния из их оксидов и силиката твердым углеродом с использованием методики, приведенной в работе [12], составят:



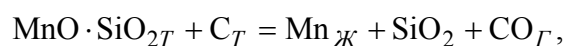
$$\Delta G^\circ = -578532 + 346,524 \cdot T,$$

$$T_{\text{н.в.}} = 1673 \text{ К (1400 }^\circ\text{C)},$$



$$\Delta G^\circ = -748972 + 391,979 \cdot T,$$

$$T_{\text{н.в.}} = 1913 \text{ К (1640 }^\circ\text{C)},$$



$$\Delta G^\circ = -705396 + 397,903 \cdot T,$$

$$T_{\text{н.в.}} = 1773 \text{ К (1500 }^\circ\text{C)}.$$

Отличительной особенностью РВС на базе ШМнС является присутствие в ней марганца в виде силиката.

Поэтому на основании данных, иллюстрируемых рисунком 3, можно отметить, что на участке от 0 до 6 мм температура РВБ не достигает значений температуры начала реакций восстановления марганца из силиката, а на участке от 0 до 12 мм — кремния из кремнезема. Поэтому можно выдвинуть гипотезу, что в этих объемах РВБ восстановление отмеченных элементов практически невозможно и невосстановившаяся РВС в результате механического разрушения (расплавления) будет переходить в покровный шлак.

Выдвинутая гипотеза подтверждается результатами ДГВ марганца и кремния из ШМнС для обработки чугуна и стали [13]. В соответствии с рисунком 3 доля поверхности, на которой обеспечиваются термодинамические условия восстановления марганца, составляет около 70 %, а крем-

ния — 50 %. Следовательно, степень восстановления марганца и кремния должна быть в пределах этих величин. Средние фактические степени восстановления марганца и кремния, полученные при проведении лабораторных исследований и в ходе опытно-промышленного опробования технологии ДГВ, составили 73 % и 27 % соответственно. Причем более низкая степень восстановления кремния может быть связана с относительно низкой температурой металла перед обработкой, которая для условий восстановления марганца должна быть не менее 1500 °С, а для эффективного восстановления кремния ее значение должно быть не менее 1640 °С.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для обеспечения необходимой температуры на реакционной поверхности РВБ необходимо увеличивать мощность дуги. Однако для использованной лабораторной установки этот параметр был ограничен характеристиками применяемого оборудования. В этом случае можно предложить использование в непрогриваемой зоне балластной набивки, что приведет к увеличению количества образующегося шлака и удельных затрат электроэнергии на процесс. Второй путь предполагает изготовление двухслойного РВБ, в котором менее прогреваемый дугой центральный объем, граничащий с КЭ, будет набиваться РВС, рассчитанной на карботермическое извлечение элементов, имеющих более низкую температуру восстановления (хром, ванадий, титан (до карбида) и другие) [14].

В качестве основных выводов по результатам проведенных исследований можно отметить следующее:

– математическое моделирование теплопереноса в процессе ДГВ показало, что при использованных в модели граничных условиях не вся РВС прогревается до температуры начала карботермического восстановления марганца и кремния из ШМnC;

– ожидаемая степень извлечения марганца и кремния по результатам математического моделирования должна быть на уровне 70 % и 50 % соответственно, что близко к результатам средней степени восстановления марганца, полученной на опытных плавках (73 %) и практически в 2 раза превышает фактическую степень восстановления кремния. Более низкая степень извлечения кремния может быть связана с низкой температурой начала обработки расплава по методу ДГВ, которая была ориентирована на эффективное извлечение марганца и составляла около 1500 °С, а для извлечения кремния этот параметр должен быть не менее 1640 °С;

– для повышения эффективности процесса ДГВ необходимо рекомендовать увеличение мощности дуги или использование двухслойных РВБ, в которых промежуточный слой между КЭ и основной РВС может состоять из РВС, включающей оксиды элементов, требующих меньшую в сравнении с силикатом марганца температуру начала карботермического восстановления.

В ходе дальнейших исследований предполагается усовершенствование используемой математической модели с целью изучения особенностей теплообмена в процессе ДГВ, в том числе при различных режимах горения электрической дуги.

#### **Список источников**

1. Концепция технологического развития на период до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 20 мая 2023 г. № 1315-р. URL: <https://rospatent.gov.ru/content/uploadfiles/technological-2023.pdf> (дата обращения: 14.10.2023).

2. Об утверждении Стратегии развития металлургической промышленности РФ на период до 2030 г. : распоряжение Правительства РФ от 28 декабря 2022 г. № 4260-р. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405963845/> (дата обращения: 14.10.2023).

3. Программа фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) : утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 31 декабря 2020 г. № 3684-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/skzO0DEууFOIBtXobzPA3zTyC71cRAOi.pdf> (дата обращения: 14.10.2023).

4. Электродуговая и электромагнитная обработка расплавов : монография / А. Н. Смирнов [и др.]. Алчевск : ДонГТУ, 2013. 320 с.

5. Куберский С. В. Оценка влияния теплофизических параметров рудно-восстановительных блоков на эффективность процесса дугового глубинного восстановления // Новые технологии и проблемы технических наук : сборник научных трудов по итогам междунар. науч.-практ. конф., г. Красноярск, 10 ноября 2015 г. Красноярск : ИЦРОН, 2015. № 2. С. 50–58.

6. Boulos M., Fauchais P., Pfender E. Thermal plasmas: fundamentals and applications. Vol. 1. New York: Plenum press, 1994. 452 p.

7. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга. М. : Машиностроение, 1970. 336 с.

8. Кухарев А. Л. Моделирование электрической дуги на базе уравнений магнитной гидродинамики // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2023. Вып. 30 (73). С. 37–46.

9. Исследование влияния состава электродной смеси на её удельное электросопротивление / С. В. Куберский, М. Ю. Проценко, М. И. Воронько, В. И. Проценко // Сборник научных трудов ДонГТУ. 2018. Вып. 10 (53). С. 70–75.

10. Галяпа А. Г., Проценко М. Ю. Исследование электросопротивления рудно-восстановительной смеси для дугового глубинного восстановления элементов // Тезисы докладов XII науч.-техн. конф. молодых специалистов ОАО «АМК», г. Алчевск, 25 мая 2012 г. Алчевск : ОАО «АМК», 2012. С. 15–16.

11. Bowman V., Kruger K. Arc furnace physics. Dusseldorf : Stahleisen communications, 2009. 245 p.

12. Казачков Е. А. Расчеты по теории металлургических процессов : учеб. пособ. для вузов. М. : Металлургия, 1988. 288 с.

13. Куберский С. В. Анализ параметров метода дугового глубинного восстановления при одновременной обработке расплава двумя рудно-восстановительными блоками // Сборник научных трудов ДонГТУ. 2017. Вып. 7 (50). С. 79–85.

14. Гасик М. И., Лякишев Н. П. Физикохимия и технология электроферросплавов : учебник для вузов. Днепрпетровск : ГНПП «Системные технологии», 2008. 453 с.

© Кухарев А. Л., Куберский С. В., Кононенко Г. И.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. МТ ДонГТУ Денищенко П. Н.,  
ведущим инженером технического отдела управления ООО «ЮГМК» Великоцкий Р. Е.**

Статья поступила в редакцию 18.10.2023.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Кухарев Алексей Леонидович**, д-р техн. наук, профессор каф. металлургических технологий Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

**Куберский Сергей Владимирович**, канд. техн. наук, профессор каф. металлургических технологий Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия, e-mail: Skuberskiy@yandex.ru

**Кононенко Геннадий Иосифович**, аспирант каф. металлургических технологий Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

**Kukharev A. L., \*Kuberskiy S. V., Kononenko G. I.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, \*e-mail: Skuberskiy@yandex.ru)

### MODELING OF THE HEAT TRANSFER PROCESS DURING ARC DEEP RECOVERY

A mathematical model is developed to estimate heat transfer parameters at the arc deep recovering of elements from the silico-manganese slag into iron-carbon liquid-alloy. It is shown that under the used boundary conditions not all reactive surface of the ore-reduction unit is warmed up to the onset temperature of carbothermic recovery of manganese and silicon. The results were well consistent with the results of the pilot-industrial technology testing. Ways for increasing the efficiency of the ADR process, by increasing the degree of elements extraction from the oxide ore-reduction mixtures have been proposed.

**Key words:** technogenic waste, recycling, deoxidation-alloying, iron-carbon liquid-alloy, electric arc, recovery, mathematical model, heat transfer, temperature distribution, degree of extraction.

### References

1. Concept of technological development for the period up to 2030: adopt. by Order of the Government of the Russian Federation dated May 20, 2023. No 1315-p. [Konceptsiya tekhnologicheskogo razvitiya na period do 2030 goda: utv. rasporyazheniem Pravitel'stva Ros. Federacii ot 20 maya 2023 g. № 1315-r]. URL: <https://rospatent.gov.ru/content/uploadfiles/technological-2023.pdf> (date of treatment: 14.10.2023).
2. On approval of the Strategy for the development of metallurgical industry of the Russian Federation for the period up to 2030: Order of the Government of the Russian Federation dated December 28, 2022. No 4260-p [Ob utverzhdenii Strategii razvitiya metallurgicheskoy promyshlennosti RF na period do 2030 g.: rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 28 dekabrya 2022 g. № 4260-r]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405963845/> (date of treatment: 14.10.2023).
3. The Russian Federation's long-term scientific research program (2021–2030): adopt. by Order of the Government of the Russian Federation dated December 31, 2020. No 3684-p. [Programma fundamental'nyh nauchnyh issledovaniy v Rossijskoj Federacii na dolgosrochnyj period (2021–2030 gody): utv. rasporyazheniem Pravitel'stva Ros. Federacii ot 31 dekabrya 2020 g. № 3684-r]. URL: <http://static.government.ru/media/files/skzO0DEvyFOIBtXobzPA3zTyC71cRAOi.pdf> (date of treatment: 14.10.2023).
4. Smirnov A. N. [et.al] Electric arc and electromagnetic melt treatment: monograph [Elektrodugovaya i elektromagnitnaya obrabotka rasplavov: monografiya]. Alchevsk: DonSTU. 2013. 320 p. (rus)
5. Kuberskiy S. V. Assessing the influence of thermal parameters of ore reduction blocks on the efficiency of the arc depth reduction process [Ocenka vliyaniya teplofizicheskikh parametrov rudno-vosstanovite'nyh blokov na effektivnost' processa dugovogo glubinnogo vosstanovleniya]. Novye tekhnologii i problemy tekhnicheskikh nauk: sbornik nauchnyh trudov po itogam mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Krasnoyarsk. 10 noyabrya 2015. Krasnoyarsk: IDCES, 2015. No 2. Pp. 50–58. (rus)
6. Boulos M., Fauchais P., Pfender E. Thermal plasmas: fundamentals and applications. New York: Plenum press, 1994. Vol. 1. 452 p.
7. Leskov G. I. Electric welding arc [Elektricheskaya svarochnaya duga]. M.: Mechanical Engineering, 1970. 336 p. (rus)
8. Kukharev A. L. Electrical arc simulation based on magnetic hydrodynamics equations [Modelirovanie elektricheskoy dugi na baze uravnenij magnitnoj gidrodinamiki]. Scientific works collection of DonSTU. 2023. Iss. 30 (73). Pp. 37–46. (rus)
9. Kuberskiy S. V., Protsenko M. Yu., Voron'ko M. I., Protsenko V. I. Studying the influence of the electrode mixture's composition on its specific electrical resistance [Issledovanie vliyaniya sostava elektrodnoj smesi na eyo udel'noe elektrosoprotivlenie]. Scientific works collection of DonSTU. 2018. Iss.10 (53). Pp. 70–75. (rus)
10. Galyapa A. G., Protsenko M. Yu. Studying the electroresistance of the ore-reducing mixture for arc depth recovery of elements [Issledovanie elektrosoprotivleniya rudno-vosstanovitel'noj smesi dlya dugovogo glubinnogo vosstanovleniya elementov]. Tezisy dokladov XII nauch.-tekhn. konf. molodyh



specialistov OAO "Alchevsk Iron-and-Steel Works". Alchevsk. 25 May 2012. Alchevsk: OAO "Alchevsk Iron-and-Steel Works". 2012. Pp. 15–16. (rus)

11. Bowman B., Kruger K. *Arc furnace physics*. Dusseldorf: Stahleisen communications, 2009. 245 p.

12. Kazachkov E. A. *Calculations on the theory of metallurgical processes: study letter for universities [Raschety po teorii metallurgicheskikh processov: ucheb. posob. dlya vuzov]*. M.: Metalurgija, 1988. 288 p. (rus)

13. Kuberskiy S. V. *Analyzing the parameters of the arc deep recovery method by melt processing with two ore-reducing blocks simultaneously [Analiz parametrov metoda dugovogo glubinnogo vosstanovleniya pri odnovremennoj obrabotke rasplava dvumya rudno-vosstanovitel'nymi blokami]*. Scientific works collection of DonSTU. 2017. Iss. 7 (50). Pp. 79–85. (rus)

14. Gasik M. I., Lyakishev N. P. *Physics and Technology of Electroferroalloys: textbook for universities [Fizikohimiya i tekhnologiya elektroferrosplavov: uchebnyk dlya vuzov]*. Dnepropetrovsk: SRDE "System Technologies", 2008. 453 p. (rus)

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Kukharev Alexei Leonidovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metallurgical Technologies  
Donbas State Technical University,  
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

**Kuberskiy Sergei Vladimirovich**, PhD in Engineering, Professor of the Department of Metallurgical Technologies  
Donbas State Technical University,  
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia  
e-mail: Skuberskiy@yandex.ru

**Kononenko Gennady Iosiphovich**, Postgraduate of the Department of Metallurgical Technologies  
Donbas State Technical University,  
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia