

DOI: 10.15593/2223-9877/2017.3.08

УДК 669.054.82

Е.В. Гимуранова, А.А. Омельчук

Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет), филиал, Златоуст, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЖИДКОФАЗНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ШЛАКОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Объектом исследования являются отвальные шлаки сталеплавильного производства, необходимость утилизации и переработки которых предопределена их пагубным воздействием на окружающую природную среду и ухудшением экологической обстановки. Цель работы – исследование процессов жидкофазного восстановления отвальных шлаков сталеплавильного производства ОАО «Златоустовский электрометаллургический завод» в лабораторных условиях с использованием установки индукционного нагрева.

В работе предложена и опробована схема переработки шлаков сталеплавильного производства, отличительной особенностью которой является реализация двухстадийного метода по типу восстановления – плавление. Метод основан на поэтапном разделении исходных шлаков на магнитную и немагнитную составляющие с промежуточным восстановлением шлаков перед их жидкофазным восстановлением для повышения степени металлизации продукта переработки. В итоге возможно получение металлического полупродукта, используемого в качестве шихтового материала при выплавке низколегированных сталей.

Опыты с исходным шлаковым материалом проводились в лабораторных условиях (филиал ЮУрГУ в г. Златоусте), химический, структурный и фазовый анализ изучали с использованием растровых электронных микроскопов JEOL JSM-7001 и JOEL JSM-6460 LV. Магнитную сепарацию шлака проводили с помощью магнитного сепаратора, спроектированного и созданного на кафедре техники и технологии производства материалов филиала ЮУрГУ в г. Златоусте. Отсепарированная магнитная составляющая шлака составила примерно 40 % от исходного материала. Для проведения операции жидкофазного восстановления металла из образцов подготовленного шлака использовали лабораторную индукционную печь УПИ-60-2, помещая в нее приготовленную смесь из кокса и шлака. Было проведено 12 опытных плавов. Оптимальное время восстановления исходного материала составляет не более 30 мин.

Образцы полученного металла и остаточного шлака были исследованы на химический и фазовый состав. Установлено, что высокоотмагниченные шлаки возможно восстанавливать углеродом кокса без предварительного твердофазного восстановления до получения металлической фазы, соответствующей по составу легированному чугуна. При этом выход годного металла от исходного количества шлакового материала может достигать 40 % и выше. Данный процесс жидкофазного восстановления целесообразно производить при температуре (1450 ± 20) °С.

Ключевые слова: сталеплавильные шлаки, высокотемпературные процессы, жидкофазное восстановление, экспериментальное исследование, химический состав, измельчение, активация, восстановительный процесс, температурный режим, технология восстановления, физико-химический анализ.

E.V. Gimuranova, A.A. Omelchuk

South Ural State University (national research university),
Branch, Zlatoust, Russian Federation

INVESTIGATION OF LIQUID-PHASE REDUCTION OF STEELMAKING SLAG IN THE LABORATORY

The object of the study is the dump slag of steelmaking, the need for recycling and processing is predetermined by their harmful impact on the environment and the deterioration of the ecological situation. The aim of the work is to study the processes of liquid-phase recovery of the dump slag of the steelmaking plant of JSC "Zlatoust Electrometallurgical Plant" under laboratory conditions using an induction heating plant.

In this paper, we propose and test a scheme for the processing of slags in steelmaking, a distinctive feature of which is the realization of a two-stage "recovery-melting" method. The method is based on a phased separation of the initial slags into magnetic and non-magnetic components with intermediate reduction of slags before their liquid-phase reduction to increase the degree of metallization of the processed product. As a result, it is possible to obtain a metallic intermediate, used as a charge material in the smelting of low-alloy steels.

Experiments with the original slag material were carried out under laboratory conditions (a branch of SUSU in Zlatoust), chemical, structural and phase analysis was studied using scanning electron microscopes JEOL JSM-7001 and JOEL JSM-6460 LV. Magnetic separation of slag was carried out with the help of a magnetic separator, designed and created at the Department of Engineering and Technology of Materials of the branch of SUSU in Zlatoust. The separated magnetic component of the slag was approximately 40%, from the starting material. To carry out the operation of liquid-phase reduction of metal from samples of prepared slag, the laboratory induction furnace UPI-60-2 was used by placing a prepared mixture of coke and slag in it. 12 experienced swimming trunks were conducted. The optimum recovery time of the starting material is not more than 30 minutes.

Samples of the resulting metal and residual slag were examined for chemical and phase composition. It is established that highly magnetized slags can be reduced with carbon of coke without preliminary solid-phase reduction until a metal phase corresponding to the composition of the alloyed cast iron is obtained. At the same time, the yield of the usable metal from the initial amount of slag material can reach 40% or more. This process of liquid-phase reduction is expedient to be carried out at a temperature of 1450 ± 20 °C.

Keywords: steel slag, high-temperature processes, liquid phase reduction, experimental research, chemical composition, grinding, activation, recovery process, temperature, technology recovery, physico-chemical analysis.

Техногенные отходы промышленного производства содержат достаточно большое количество токсичных элементов, которые оказывают негативное влияние на окружающую экологическую систему [1–7].

В связи с этим одной из актуальных проблем металлургии является утилизация отвальных шлаков и извлечение из них металлических компонентов с последующим использованием их в качестве вторичного сырья. Существует несколько основных аспектов этой проблемы.

Как известно, металл, извлеченный из металлургического шлака, значительно дешевле металла, извлеченного из руды в результате целого ряда технологических переделов. Общепринято, что после извлечения металлов из шлака последний может быть полезно утилизирован.

Окончательная переработка шлаковых отвалов позволяет освободить территорию, занимаемую отвалами, либо ограничить ее расширение. Это улучшает экологическую обстановку в отвальной зоне и вовлукруг нее [8–10].

На сегодняшний день существует достаточно много способов переработки отходов металлургического производства, в том числе применительно к отвальным сталеплавильным шлакам. Проанализированные в работах [11–13] имеющиеся варианты позволили разработать оптимальную схему переработки шлаков, представленную на рис. 1 [14].

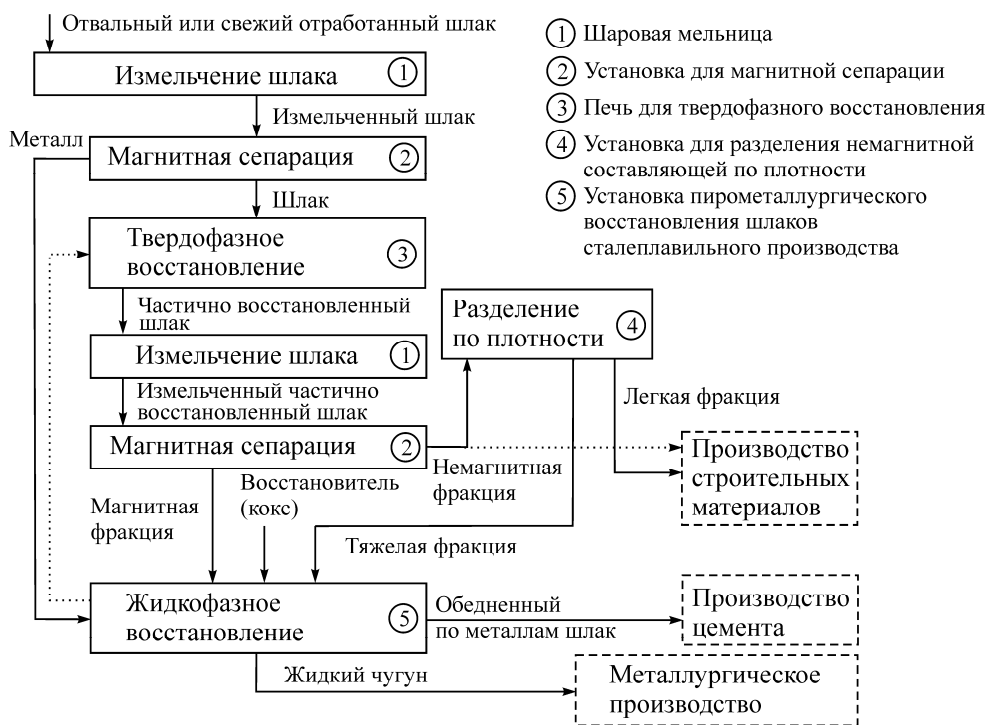


Рис. 1. Схема переработки шлаков сталеплавильного производства [14]

Отличительной особенностью данной технологии является двух-стадийный метод восстановления – плавление, позволяющий в итоге получить металлический полупродукт.

Для случая, когда шлаковый материал после магнитной сепарации обладает высокими магнитными свойствами по сравнению с исходным шлаком, возможно прямое жидкофазное восстановление без твердофазного восстановления.

В ходе жидкофазного восстановления шлаков были проведены физико-химические исследования образцов материала, взятых с отвала ОАО «Златоустовский электрометаллургический завод». Опыты по начальной подготовке к исследованиям проводились в лаборатории кафедры техники и технологии производства материалов ЮУрГУ в г. Златоусте с применением растровых электронных микроскопов JEOL JSM-7001 и JOEL JSM-6460 LV.

Установлено, что в состав шлака входят сложные минералы: энстатит $MgSiO_3$; ильменит $FeTiO_3$; авгит $Ca(Fe,Mg) \cdot Si_2O_6$; плагиоклаз $(Na,Ca) \cdot (Si,Al)_4O_8$; магнетит $Fe(Fe_2O_4)$; фаялит $(Fe,Mg) \cdot 2SiO_4$; гематит Fe_2O_3 , что подтверждает проводимые ранее исследования шлаков ОАО «Златоустовский электрометаллургический завод» [15].

Результаты химического анализа состава отвальных шлаков представлены ниже.

Химический состав*, мас. %

| SiO_2 | CaO | MgO | Al_2O_3 | MnO | Cr_2O_3 | TiO_2 | V_2O_5 | FeO | NiO |
|---------------|---------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| 17,7– 40,0 | 21,9– 47,4 | 6,2– 16,5 | 7,2– 10,1 | 1,2– 5,3 | 1,7– 11,3 | 0,3– 1,5 | 0,1– 0,3 | 3,7– 25,0 | 0,1– 0,4 |

*Химический состав шлака в пересчете на простые оксиды.

Дробление исходного шлакового материала проводили до фракции 2–4 мм. Далее шлак полученной фракции подвергался магнитной сепарации на установке, изображенной на рис. 2.

Спроектированный и созданный магнитный сепаратор предназначен для разделения сухих материалов на магнитную и немагнитную части. Сепарация осуществлялась с помощью ферритовых постоянных магнитов. Отсепарированная магнитная составляющая шлака составила примерно 40 % от исходного материала.

В качестве восстановителя при жидкофазном восстановлении использовали кокс в количестве 5 г на 50 г магнитной части шлака. Приготовленную смесь кокса и шлака в указанных пропорциях насыпали в графитовый тигель и помещали в рабочее пространство индукционной печи УПИ-60-2 для проведения операции жидкофазного восстановления металла. Исследованиям подвергли смеси, идентичные по составу. Образцы находились в печи от 10 до 30 мин при температуре 1400–1500 °С. Всего было проведено 12 опытных плавов.

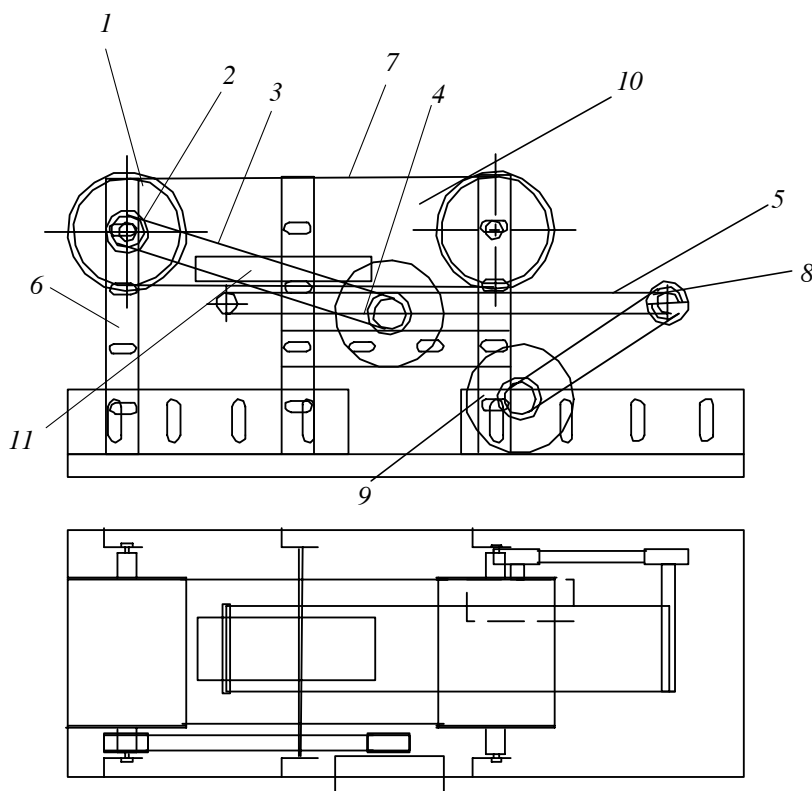


Рис. 2. Эскиз магнитного сепаратора: 1 – приводной барабан верхнего конвейера; 2 – шкив; 3 – ремень; 4 – верхний реверсивный двигатель РД-09; 5 – нижний конвейер; 6 – оцинкованные пластины; 7 – лента; 8 – приводной барабан нижнего конвейера; 9 – нижний реверсивный двигатель РД-09; 10 – верхний конвейер; 11 – короб с магнитами

В табл. 1 представлены параметры опытных плавов (режимы жидкофазного восстановления шлакового материала). Оптимальное время восстановления исходного материала составляет 20 мин.

Таблица 1

Основные параметры, характеризующие результаты полученных экспериментов

| Номер плавки | Время выдержки, мин | Исходная смесь, г | | Получено, г | | | Выход металла, % (от массы исходного шлака) |
|--------------|---------------------|-------------------|------|-------------|-------|-------|---|
| | | шлак | кокс | металл | шлак | газ* | |
| 1 | 30 | 50 | 5 | 22,38 | 17,33 | 15,29 | 44,76 |
| 2 | 20 | 50 | 5 | 22,56 | 17,78 | 14,66 | 45,12 |
| 3 | 10 | 50 | 5 | 21,81 | 18,11 | 15,08 | 43,62 |
| 4 | 18 | 50 | 5 | 22,00 | 17,64 | 15,36 | 44,00 |

* – результат расчета.

Образцы полученного металла и остаточного шлака были исследованы на химический и фазовый состав.

Установлено, что в составе отвального шлака содержится некоторое количество карбонатов, которые в значительной степени распадаются после высокотемпературной обработки. В процессе обработки в шлак вносится значительное количество углерода. Для удобства сопоставления состава исходного шлака и составов образцов обедненного шлака в табл. 2 эти составы представлены без учета наличия в них углерода (общее содержание углерода колебалось в исследованных образцах в пределах 3,5–8 мас. %).

Таблица 2

Составы исходного шлака и полученных после восстановления шлаковых фаз по данным РСМА (за вычетом углерода), мас. %

| Образцы | Fe | Cr | Mn | O | Ca | Mg | Al | Si | S | Другие элементы |
|-----------------------|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|------|-----------------|
| Исходный шлак | 28,49 | 1,19 | 1,73 | 37,76 | 16,13 | 4,40 | 2,38 | 7,61 | 0,12 | 0,18 |
| Шлак после 1-й плавки | 0,35 | – | 0,77 | 44,67 | 28,10 | 8,83 | 4,14 | 12,31 | 0,22 | 0,62 |
| Шлак после 2-й плавки | 0,24 | – | 1,19 | 45,82 | 25,92 | 9,26 | 4,29 | 12,68 | 0,16 | 0,44 |

Окончание табл. 2

| Образцы | Fe | Cr | Mn | O | Ca | Mg | Al | Si | S | Другие элементы |
|-----------------------|------|----|------|-------|-------|------|------|-------|------|-----------------|
| Шлак после 3-й плавки | 0,38 | – | 2,45 | 43,71 | 27,17 | 9,22 | 4,08 | 12,26 | 0,15 | 0,58 |
| Шлак после 4-й плавки | – | – | 1,15 | 43,20 | 27,93 | 9,54 | 4,75 | 12,67 | 0,15 | 0,61 |

На рис. 3 представлены фотографии поверхностей шлифов полученного металла. Результаты сканирования микрорентгеноспектрального анализа площади образцов представлены в табл. 3.

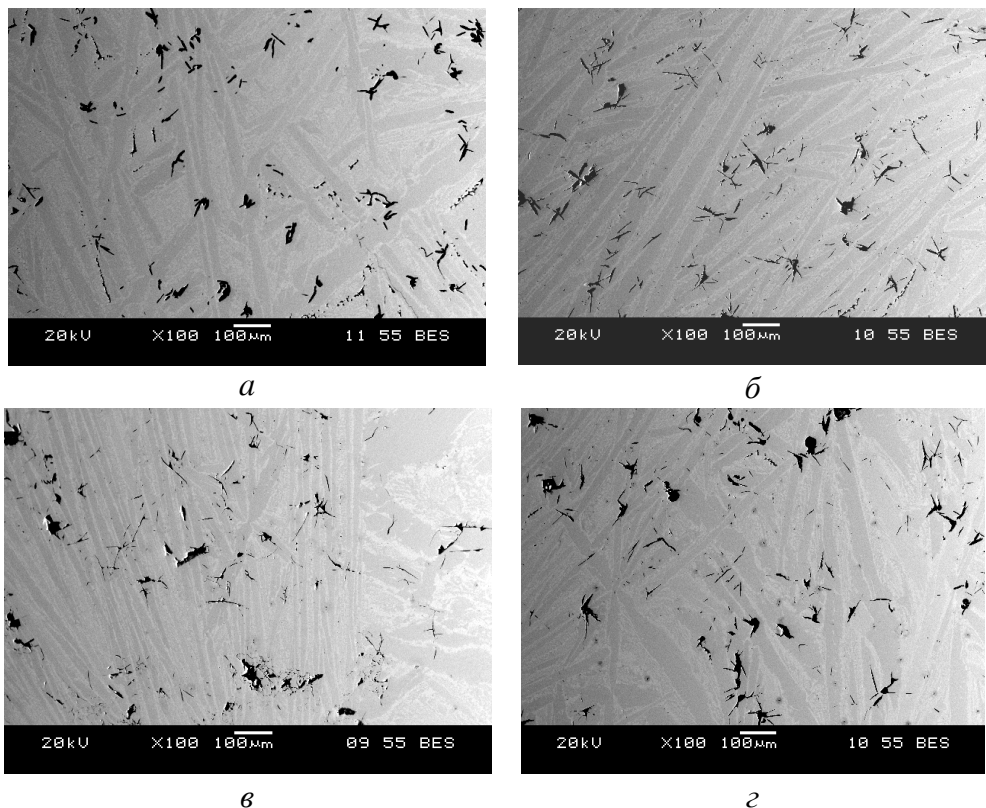


Рис. 3. Микроструктуры поверхностей шлифов образцов металла плавки № 1–4 (соответственно а–г)

Таблица 3

Составы металла по данным РСМА. Результаты сканирования всей площади изображения, мас. %

| Рисунок | Fe | C | Mn | Cr | Ni |
|----------|-------|------|------|------|------|
| <i>a</i> | 84,79 | 8,84 | 3,19 | 2,79 | 0,38 |
| <i>б</i> | 85,07 | 8,52 | 2,89 | 3,09 | 0,43 |
| <i>в</i> | 87,06 | 7,20 | 2,26 | 2,95 | 0,54 |
| <i>г</i> | 84,85 | 8,73 | 3,12 | 2,86 | 0,43 |

Химический анализ исследуемых образцов металла свидетельствует о том, что полученный материал соответствует по составу легированному чугуну, который содержит такие компоненты, как Cr, Mn, Ni.

Анализ полученных образцов металла показывает, что они состоят главным образом из металлических фаз двух типов – с высоким и низким содержанием хрома. В составе металла в значительном количестве присутствуют включения графита и в относительно небольших количествах включения карбидов, фосфидов и включения на основе сульфида марганца. Это подтверждается выводами работы [16].

Анализ образцов шлака (табл. 3) свидетельствует о высокой степени восстановления железа и хрома (эти элементы восстанавливаются практически полностью). Согласно полученным данным, в состав металла полностью переходит никель, а также (учитывая соотношение масс полученных фаз) более половины всего марганца.

Во всех экспериментальных плавках изотермическая выдержка длительностью 10 мин и выше позволила достичь удовлетворительной степени восстановления металлической составляющей. При этом просматривается некоторая зависимость массы полученного металла от времени выдержки, а также зависимость увеличения степени восстановления марганца от времени изотермической выдержки металлического расплава.

В результате жидкофазного восстановления магнитной составляющей шлакового материала количество полученной металлической фазы может достигать 40 % и выше от массы исходного шлака. Возможно практически полное восстановление содержащихся в шлаке железа, хрома и никеля. В металлический расплав переходит большая часть марганца, а также некоторые другие компоненты, включая такие ценные, как вольфрам, молибден, титан и ванадий.

Оптимальной температурой процесса жидкофазного восстановления шлака следует принимать $(1450 \pm 20) ^\circ\text{C}$. Время восстановления шлака (после нагрева смеси до рабочей температуры) должно быть не более 30 мин. С целью более полного восстановления ценных металлов в качестве индикатора окончания периода изотермической выдержки можно использовать момент завершения периода «кипения» (интенсивного выделения газовой фазы, состоящей из оксидов углерода). Полезными продуктами процесса восстановления станут жидкий металл и обедненный по тяжелым металлам оксидный расплав, состоящий главным образом из оксидов кальция, кремния, магния и алюминия, который может быть использован при производстве цемента.

Статья выполнена при поддержке Правительства РФ (Постановление № 211 от 16.03.2013 г.), соглашение № 02.А03.21.0011.

Список литературы

1. Дильдин А.Н., Чуманов В.И., Чуманов И.В. Комплексное использование отходов сталеплавильного производства // *Металлург.* – 2010. – № 11. – С. 42–44.
2. Твердофазное восстановление отходов сталеплавильного производства / А.Н. Дильдин, В.И. Чуманов, И.В. Чуманов, В.Е. Еремяшев // *Металлург.* – 2012. – № 2. – С. 36–40.
3. К вопросу о комплексной переработке сталеплавильных шлаков и их использовании в строительстве / В.И. Чуманов, И.В. Чуманов, А.А. Кирсанова, Ю.Е. Амосова // *Вестник Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер.: Metallurgiya.* – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 56–60.
4. Об использовании отвальных шлаков Златоустовского металлургического завода / А.Н. Дильдин, И.В. Чуманов, В.Е. Еремяшев, Д.А. Жеребцов // *Электрометаллургия.* – 2015. – № 4. – С. 28–33.
5. Dildin A.N., Chumanov V.I., Chumanov I.V. Systematic use of wastes from steel production // *Metallurgist.* – 2011. – Т. 54, № 11–12. – P. 737–739.
6. Chumanov I.V., Trofimov E.A., Dildin A.N. Improving the process of high-temperature processing steel – smelting dump slag by means of experimental and theoretical research. *Materials Science Forum.* – 2016. – Т. 843. – С. 203–207.
7. Solid – phase reduction of waste products from steelmaking / A.N. Dildin, V.I. Chumanov, I.V. Chumanov, V.E. Eremyashev // *Metallurgist.* – 2012. – Т. 56, № 1–2. – С. 91–96.
8. Дильдин А.Н., Гарифулин Р.Р. Особенности технологии утилизации отходов сталеплавильного производства // *Наука ЮУрГУ: материалы 66-й науч. конф. / отв. за вып. С.Д. Ваулин.* – Челябинск, 2014. – С. 1440–1442.

9. Твердофазное восстановление отходов сталеплавильного производства / А.Н. Дильдин, В.И. Чуманов, И.В. Чуманов, В.Е. Еремяшев // *Металлург.* – 2014. – № 2. – С. 36.

10. Жидкофазное восстановление отходов сталеплавильного производства / А.Н. Дильдин, И.В. Чуманов, В.И. Чуманов, В.Е. Еремяшев, Е.А. Трофимов, А.А. Кирсанова // *Металлург.* – 2015. – № 11. – С. 34–38.

11. К вопросу об использовании отвальных шлаков сталеплавильного производства / А.Н. Дильдин, И.В. Чуманов, В.Е. Еремяшев, Д.А. Жеребцов // *Электроталлургия.* – 2015. – № 4. – С. 42.

12. Дильдин А.Н., Трофимов Е.А., Чуманов И.В. Изучение возможности восстановления металлов из отвальных шлаков сталеплавильного производства // *Современные проблемы электроталлургии стали: материалы XVI Междунар. конф.: в 2 ч.* – Челябинск, 2015. – С. 249–250.

13. Liquid-phase reduction of steelmaking wastes / A.N. Dildin, I.V. Chumanov, V.I. Chumanov, V.E. Eremyashev, E.A. Trofimov, A.A. Kirsanova // *Metallurgist.* – 2016. – С. 1–6.

14. Dildin A.N., Trofimov E.A., Chumanov I.V. Process improvement for liquid-phase metal reduction from steelmaking dump slags // *Indian Journal of Science and Technology.* – 2016. – Vol. 9, iss. 47. – P. 132–141.

15. Дильдин А.Н., Чуманов В.И., Бендера Т.А. Утилизация шлаков сталеплавильного производства // *Вестник Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер.: Metallurgia.* – 2007. – № 13(85). – С. 15–16.

16. On expediency of the preliminary heat treatment for liquid-phase reduction of waste steelmaking slag / E. Trofimov, I. Chumanov, A. Dildin, O. Samoylova // *American Journal of Applied Sciences.* – 2015. – Vol. 12, № 12. – С. 952–961.

References

1. Dil'din A.N., Chumanov V.I., Chumanov I.V. Kompleksnoe ispol'zovanie otkhodov staleplavil'nogo proizvodstva [Complex use of waste of steel-smelting production] *Metallurg*, 2010, no. 11, pp. 42–44.

2. Dil'din A.N., Chumanov V.I., Chumanov I.V., Eremyashev V.E. Tverdogfaznoe vosstanovlenie otkhodov staleplavil'nogo proizvodstva [Solid-phase restoration of waste of steel-smelting production]. *Metallurg*, 2012, no. 2, pp. 36–40.

3. Chumanov V.I., Chumanov I.V., Kirsanova A.A., Amosova Iu.E. K voprosu o kompleksnoi pererabotke staleplavil'nykh shlakov i ikh ispol'zovanii v stroitel'stve. [To a question of complex processing of steel-smelting slags and their use in construction]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 56–60.

4. Dil'din A.N., Chumanov I.V., Eremyashev V.E., Zherebtsov D.A. Ob ispol'zovanii otval'nykh shlakov Zlatoustovskogo metallurgicheskogo zavoda [About use of dump slags of the Zlatoust steel works]. *Elektrotallogiya*, 2015, no. 4, pp. 28–33.

5. Dildin A.N., Chumanov V.I., Chumanov I.V. Systematic use of wastes from steel production. *Metallurgist*, 2011, vol. 54, no. 11–12, pp. 737–739.

6. Chumanov I.V., Trofimov E.A., Dildin A.N. Improving the process of high-temperature processing steel – smelting dump slag by means of experimental and theoretical research. *Materials Science Forum*, 2016, vol. 843, pp. 203–207.

7. Solid – phase reduction of waste products from steelmaking / A.N. Dildin, V.I. Chumanov, I.V. Chumanov, V.E. Eremyashev. *Metallurgist*, 2012, vol. 56, no. 1–2, pp. 91–96.

8. Dil'din A.N., Garifulin R.R. Osobennosti tekhnologii utilizatsii otkhodov staleplavil'nogo proizvodstva [Features of technology of recycling of steel-smelting production]. Nauka Iuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta: materialy 66-i nauchnoi konferentsii. Cheliabinsk, 2014, pp. 1440–1442.

9. Dil'din A.N., Chumanov V.I., Chumanov I.V., Eremiashev V.E. Tverdogaznoe vosstanovlenie otkhodov staleplavil'nogo proizvodstva [Solid-phase restoration of waste of steel-smelting production]. *Metallurg*, 2014, no. 2, pp. 36.

10. Dil'din A.N., Chumanov I.V., Chumanov V.I., Eremiashev V.E., Trofimov E.A., Kirsanova A.A. Zhidkofaznoe vosstanovlenie otkhodov staleplavil'nogo proizvodstva [Liquid-phase restoration of waste of steel-smelting production]. *Metallurg*, 2015, no. 11, pp. 34–38.

11. Dil'din A.N., Chumanov I.V., Eremiashev V.E., Zharebtsov D.A. K voprosu ob ispol'zovanii otval'nykh shlakov staleplavil'nogo proizvodstva [To a question of use of dump slags steel-smelting productions]. *Elektrometallurgiya*, 2015, no. 4, pp. 42.

12. Dil'din A.N., Trofimov E.A., Chumanov I.V. Izuchenie vozmozhnosti vosstanovleniia metallov iz otval'nykh shlakov staleplavil'nogo proizvodstva [Studying of a possibility of restoration of metals from dump slags of steel-smelting production]. Sovremennye problemy elektrometallurgii stali: materialy XVI Mezhdunarnoi konferentsii. Cheliabinsk, 2015, pp. 249–250.

13. Dildin A.N., Chumanov I.V., Chumanov V.I., Eremyashev V.E., Trofimov E.A., Kirsanova A.A. Liquid-phase reduction of steelmaking wastes. *Metallurgist*, 2016, pp. 1–6.

14. Dildin A.N., Trofimov E.A., Chumanov I.V. Process improvement for liquid-phase metal reduction from steelmaking dump slags. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, vol. 9, iss. 47, pp. 132–141.

15. Dil'din A.N., Chumanov V.I., Bendera T.A. Utilizatsiia shlakov staleplavil'nogo proizvodstva [Utilization of slags of steel-smelting production]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*, 2007, no. 13(85), pp. 15–16.

16. Trofimov E., Chumanov I., Dildin A., Samoylova O. On expediency of the preliminary heat treatment for liquid-phase reduction of waste steelmaking slag. *American Journal of Applied Sciences*, 2015, vol. 12, no. 12, pp. 952–961.

Получено 10.05.2017

Об авторах

Гимуранова Елена Викторовна (Златоуст, Россия) – магистрант кафедры техники и технологии производства материалов Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), филиала в г. Златоусте; e-mail: lena.gimuranova@mail.ru.

Омельчук Алена Александровна (Златоуст, Россия) – магистрант кафедры техники и технологии производства материалов Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), филиала в г. Златоусте; e-mail: omelchuk_a_a@mail.ru.

About the authors

Elena V. Gimuranova (Zlatoust, Russian Federation) – Master Student, Department of Engineering and Technology of Materials, South Ural State University (National Research University), Branch in Zlatoust; e-mail: lena.gimuranova@mail.ru.

Alena A. Omelchuk (Zlatoust, Russian Federation) – Master Student, Department of Engineering and Technology of Materials, South Ural State University (National Research University), Branch in Zlatoust; e-mail: omelchuk_a_a@mail.ru.