

УДК 669.054.82

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА. ЧАСТЬ II. РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ПРОЦЕССА*

*Дильдин А.Н.¹, к.т.н., доцент кафедры «Техника и технология
производства материалов (andildin@mail.ru)*

*Чуманов И.В.¹, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Общая
металлургия» (chumanoviv@susu.ac.ru)*

*Трофимов Е.А.¹, д.х.н., профессор кафедры «Техника и технология
производства материалов» (tea7510@gmail.com)*

Жеребцов Д.А.², к.х.н., инженер кафедры физической химии (zherebtsov_da@yahoo.com)

¹ Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте
(456217, Россия, Челябинская обл., Златоуст, ул. Тургенева, 16)

² Южно-Уральский государственный университет
(454080, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 76)

Аннотация. Цель настоящей работы – экспериментальное изучение возможности и целесообразности восстановительной обработки сталеплавильных шлаков для получения металлической и оксидной фаз, которые могут быть использованы в металлургической промышленности и индустрии строительных материалов. Объектом экспериментального исследования являлся шлак со шлаковых отвалов Златоустовского металлургического завода. Экспериментальные исследования включали в себя опыты по восстановлению образцов шлака углеродом. Состав экспериментальных образцов определялся посредством микрорентгеноспектрального анализа. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют утверждать, что масса металлической фазы, полученной в результате восстановления, может составлять до 20 % массы исходного шлака и даже несколько выше. При этом возможно практически полное восстановление железа, содержащегося в шлаке. Также в состав металла может перейти преобладающая или заметная часть таких элементов, как хром, никель, марганец, а также некоторые другие ценные компоненты. При этом жидкофазное восстановление шлака целесообразно проводить при температурах порядка 1500 °С и выше с целью более полного восстановления металлов и образования консолидированной металлической фазы. Показана целесообразность проведения предварительного твердофазного восстановления шлака при температурах порядка 1100 – 1200 °С. Этот процесс даст возможность перевести большую часть железа, находящегося в шлаке в форме оксидов, в форму, восприимчивую к магнитной сепарации. Последующая магнитная сепарация позволит отделить фракцию с повышенным содержанием ценных металлов от обедненной по ценным металлам оксидной фракции, которая может быть использована для производства строительных материалов. При проектировании агрегатов для реализации разрабатываемой технологии рекомендуется предусмотреть меры по утилизации больших объемов угарного газа и паров металлов, присутствующих в составе газовой фазы. Одним из путей утилизации СО может стать использование образующегося газа в качестве восстановителя для предварительного твердофазного восстановления шлака. Исследование позволило разработать схему глубокой переработки отвалов шлаков такого рода.

Ключевые слова: экспериментальное исследование, сталеплавильные шлаки, высокотемпературное восстановление, расплав.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-3-175-180

Проведенные ранее исследования процесса извлечения из оксидной составляющей отвалных шлаков железа и ряда легирующих элементов (Mn, Cr, V, Ti и т.п.) [1 – 3] и анализ существующих способов переработки техногенных отходов металлургического производства [4 – 13] позволяют предположить, что перед проведением жидкофазной стадии процесса восстановления может быть полезно проведение процесса твердофазного восстановления предварительно обогащенной составляющей шлаков. Согласно некоторым данным [14 – 17], этот вариант является менее энерго-

затратным по сравнению с процессами жидкофазного восстановления всего объема шлака без предварительных восстановительных процедур. В то же время анализ шлакового вещества, не поступающего в жидкофазную стадию, демонстрирует значительное содержание неизвлеченного железа [6, 17 – 19].

В ходе первого этапа настоящей работы [20] для создания наиболее эффективной схемы восстановления металлической составляющей шлаков в процессе термодинамического моделирования было теоретически изучено влияние параметров проведения этого процесса на его результаты.

Задачей данной части исследования стало экспериментальное изучение возможности и целесообразности

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57414X0090.

восстановительной обработки сталеплавильных шлаков с целью получения металлической и оксидной фаз, которые могут быть использованы в металлургической промышленности и индустрии строительных материалов.

В процессе экспериментального исследования изучены результаты жидкофазного восстановления углеродом шлаковых материалов, подготовленных по четырем различным схемам. Измельченный (в шаровой мельнице до фракции не более 3 мм) образец отвально-го сталеплавильного шлака, очищенный от королек металла, в ходе магнитной сепарации (с помощью магнитного сепаратора барабанного типа) был разделен на магнитную и немагнитную фракции. Состав фракций, определенный в ходе химического анализа, представлен в табл. 1.

Половина материала каждой фракции подвергалась твердофазному восстановлению (методика твердофазного восстановления описана в работе [2]), а затем жидкофазному. Другая часть образцов сразу подвергалась жидкофазному восстановлению. Все образцы шлака смешивались с коксом в массовом отношении 10:2 (100 г шлака на 20 г кокса). Полученная смесь подвергалась тщательному перемешиванию.

При жидкофазном восстановлении измельченные опытные образцы в графитовых тиглях нагревались в индукционной лабораторной печи УПИ-60-2 до температуры 1500 °С с выдержкой примерно на этом уровне в течение 20 мин. Визуальное наблюдение расплавленной шлаковой массы в процессе выдержки в печи позволило наблюдать процесс ее «кипения», интенсивность которого заметно снизилась к концу периода обработки. В общей сложности было проведено 20 опытных плавов, что позволило получить представительную серию образцов.

По окончании времени выдержки тигли с образцами извлекались из рабочего пространства печи, охлаждались на воздухе, после чего реакционная масса извлекалась из тигля и исследовалась.

Целью исследования было определение состава фаз, образовавшихся в ходе кристаллизации продуктов восстановления, а также определение доли металлического продукта, который получен в процессе восстановления.

Определение составов фаз, составляющих полученные плавни, проводилось посредством растровых электронных микроскопов JEOL JSM-7001 и JOEL

JSM-6460 LV, снабженных приставкой для проведения микрорентгеноспектрального анализа.

В ходе такого рода исследований получены многочисленные изображения поверхности образцов во вторичных и отраженных электронах, выполнен количественный и качественный элементный анализ точек поверхности и построены карты распределения химических элементов.

Образцы плавней, полученные в ходе экспериментов, измельчались и разделялись на шлаковую и металлическую части. В табл. 2 представлены результаты сопоставления масс металлической и шлаковой частей (а также газа, масса которого вычислялась как разность массы образца до восстановления и плавня, полученного в ходе этого процесса). В этой же таблице представлены некоторые усредненные данные химического анализа металлической и шлаковой фракций, позволяющие судить о глубине восстановления металла.

Следует отметить, что металлическая составляющая в большей части образцов была представлена в виде небольших (1 – 4 мм диаметром) королек металла, включенных в шлаковую массу. Только при восстановлении магнитной, предварительно восстановленной фракции металл образовывал консолидированную металлическую фазу (слиток).

Результаты электронно-микроскопического картирования шлифа такого слитка [2] показывают, что восстановившиеся элементы (Fe, Cr, Ni, Mn) равномерно распределены по всему объему образца.

Для выявления структурных особенностей полученных образцов металла производилось травление поверхности их шлифов 4 %-ным раствором азотной кислоты в спирте. Используя микроскоп C. Zeiss Observer D1m, получены фотографии, позволяющие судить о морфологии образца и о процессах кристаллизации металлического расплава при его охлаждении [2].

Полученный после жидкофазного восстановления металл характеризуется наличием большого количества пор и включений графита и шлака размером около 100 мкм. После травления на поверхности шлифа образца выявлена микроструктура, соответствующая структуре доэвтектического (ледебурит + перлит) и заэвтектического (ледебурит + цементит) чугуна. Одновременное возникновение до- и заэвтектического чугуна в изученных образцах вероятно связано с неравновесностью процесса кристаллизации металлического расплава.

Таблица 1

Химический состав фракций шлака, полученных в ходе магнитной сепарации, % (по массе)

Table 1. Chemical composition of slag fractions obtained during magnetic separation, wt. %

Фракция	SiO ₂	CaO	P	S	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	FeO
Магнитная	25,6	31,6	0,2	0,34	11,9	10,6	3,20	2,00	0,80	0,10	14,5
Немагнитная	26,2	33,2	0,2	0,21	11,9	10,0	3,30	2,10	0,84	0,10	9,80

**Баланс распределения масс образцов между фазами после жидкофазного восстановления
и некоторые данные о среднем составе полученных фаз**

*Table 2. Distribution balance of the sample masses between phases after the liquid-phase recovery
and some data on average composition of the obtained phases*

Вид материала, подвергнутого восстановлению	Среднее содержание Fe в металле, % (по массе)	Среднее содержание Cr в металле, % (по массе)	Среднее содержание Fe в шлаке, % (по массе)	Средние массовые доли фаз, образовавшихся в процессе восстановления, %		
				металл	шлак	газ
Немагнитный без твердофазного восстановления	87,68	7,56	0,64	2,62	93,70	3,68
Магнитный без твердофазного восстановления	89,39	5,22	1,64	8,16	85,91	5,93
Немагнитный с твердофазным восстановлением при 1100 °С	88,95	4,84	0,57	5,00	89,17	5,83
Магнитный с твердофазным восстановлением при 1100 °С	89,09	5,91	0,89	12,08	81,25	6,67

Сопоставление результатов термодинамического моделирования [20] с результатами экспериментального исследования свидетельствует о качественном их совпадении и в тоже время позволяет предположить, что в экспериментах по жидкофазному восстановлению процесс был проведен не до конца. В пользу последнего свидетельствует несколько заниженный выход металлической фазы, завышенное содержание железа в металле и соответственно более низкое, чем предполагают результаты моделирования, содержание в металле других элементов (в частности хрома). Можно предположить, что увеличение времени восстановления повлияет на увеличение выхода металла и степень его обособленности по отношению к основной массе шлака.

Полученные экспериментальные данные указывают на низкую эффективность использования немагнитной фракции шлака в процессе жидкофазного восстановления. Возможно, повышению такой эффективности способствовало бы предварительное проведение дополнительных операций по разделению исходной немагнитной составляющей на пустую породу и металло-содержащие компоненты.

Проведенные исследования, некоторые результаты которых представлены выше, позволяют прийти к следующим заключениям.

- Масса металлической фазы, полученной в результате восстановления, может составлять до 20 % массы исходного шлака и даже несколько выше. При этом железо, содержащееся в шлаке, может быть восстановлено практически полностью. Также в состав металла может перейти преобладающая или заметная часть таких элементов, как хром, никель, марганец, а также некоторые другие ценные компоненты.

- Жидкофазное восстановление шлака целесообразно проводить при температурах порядка 1500 °С и выше с целью более полного восстановления металлов и образования консолидированной металлической фазы. Полезными продуктами процесса при этой температуре станут жидкий металл и обедненный по тяжелым металлам оксидный расплав, состоящий главным образом из оксидов кальция, кремния, магния и алюминия, который может быть использован в производстве цемента. Совмещение процесса переработки шлака с цементным производством позволит в значительной степени окупить энергетические издержки рассматриваемого процесса.

- Помимо уменьшения вязкости оксидной составляющей, с ростом температуры образованию консолидированной металлической фазы (объединению капель восстановленного металла) будет способствовать повышение доли металлической составляющей в объеме печи. Соотношение между оксидами и металлом может быть улучшено за счет введения в реакционную массу корольков металла, находящихся в составе отвальных шлаков и извлеченных из них в процессе подготовки к восстановлению.

- С целью минимизации расходов энергии целесообразно проведение предварительного твердофазного восстановления шлака при температурах порядка 1100 – 1200 °С. Этот процесс позволит перевести большую часть железа, находящегося в шлаке в форме оксидов, в форму, восприимчивую к магнитной сепарации. Последующая магнитная сепарация позволит отделить фракцию с повышенным содержанием ценных металлов, которая будет направлена на жидкофазную переработку от обедненной по ценным металлам

оксидной фракции, которая может быть использована для производства строительных материалов. Использование в ходе жидкофазного восстановления только обогащенной фракции, помимо снижения энергетических издержек, позволит существенно улучшить соотношение между количествами оксидной и металлической составляющей в объеме печи.

• Использование восстановителя (углерода) массой порядка 10 % массы восстанавливаемого шлака должно быть достаточно для проведения процедуры. При проектировании агрегатов для реализации разрабатываемой технологии следует предусмотреть меры по утилизации больших объемов угарного газа и паров металлов, присутствующих в составе газовой фазы. Одним из путей утилизации CO может стать использование образующегося газа в качестве восстановителя для предварительного твердофазного восстановления шлака. Предварительные результаты термодинамического моделирования свидетельствуют в пользу такой возможности.

Данный подход позволит получить существенную экономию твердого восстановителя (предотвратить его безвозвратные потери с немагнитной частью шлака), а также использовать тепло газовой смеси, полученной в процессе жидкофазного восстановления, для подогрева шлака, подвергаемого твердофазному восстановлению. Разумеется, угарный газ может быть использован и в качестве топлива для подогрева восстанавливаемого шлака. Таким образом, анализ полученных результатов позволяет рекомендовать схему переработки отвальных шлаков сталеплавильного производства, которая представлена на рисунке.

Выводы. Результаты большого количества лабораторных экспериментов позволили определить ряд условий, выполнение которых будет способствовать созданию технологий глубокой переработки содержимого шлаковых отвалов.

В частности, совокупность результатов экспериментальных исследований позволила продемонстрировать, что применение стадии твердофазного восстановления с последующим разделением на немагнитную и магнитную фракцию позволяет значительно снизить расход восстановителя и энергозатраты в ходе последующей стадии жидкофазного восстановления.

Результаты работы позволили разработать принципиальную схему переработки отвальных шлаков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дильдин А.Н., Чуманов И.В., Еремяшев В.Е., Жеребцов Д.А. Об использовании отвальных шлаков Златоустовского металлургического завода // *Электromеталлургия*. 2015. № 4. С. 28 – 33.
2. Dil'din A.N., Chumanov I.V., Chumanov V.I. etc. Liquid-Phase Reduction of Steelmaking Wastes // *Metallurgist*. 2016. Vol. 59. P. 1024 – 1029.
3. Dil'din A.N., Chumanov V.I., Chumanov I.V. Systematic use of wastes from steel production // *Metallurgist*. 2011. Vol. 54. No. 11 – 12. P. 737 – 759.

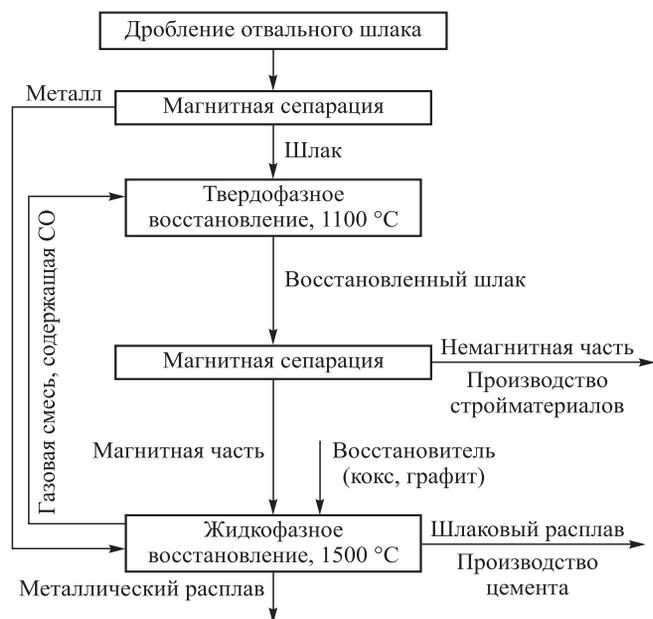


Схема переработки сталеплавильных отвальных шлаков

Scheme of processing of steel-smelting dump slags

4. Гельманова З.С., Филатов А.В. Проекты эффективного применения отходов промышленных предприятий, снижающие нагрузку на окружающую среду // *Металлург*. 2015. № 9. С. 16 – 19.
5. Косырев К.Л., Фоменко А.П., Паршин В.М. и др. Предпосылки и концепция создания энергометаллургических комплексов для переработки техногенных отходов // *Экология и промышленность России*. 2013. № 7. С. 2 – 11.
6. Гладских В.И., Гостенин В.А., Бочкарев А.В. и др. Переработка сталеплавильных шлаков на установке «АМСОМ» // *Сталь*. 2009. № 10. С.107 – 109.
7. Гудим Ю.А., Голубев А.А., Овчинников С.Г., Зинуров И.Ю. Современные способы безотходной утилизации сталеплавильных шлаков // *Сталь*. 2009. № 7. С. 93 – 95.
8. Полях О.А., Руднева В.В., Якушевич Н.Ф. и др. Применение техногенных отходов металлургических предприятий для производства карбида кремния // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2014. Т. 57. № 8. С. 5 – 12.
9. Роменец В.А., Валавин В.С., Похвиснев Ю.В. и др. Применение инновационной технологии Ромелт для переработки железосодержащих отходов горно-металлургических предприятий // *Металлург*. 2010. № 5. С. 34 – 37.
10. Гладских В.И., Бочкарев А.В., Сукинова Н.В. и др. Совершенствование технологии переработки шлаков на установках ОАО «ММК» // *Сталь*. 2011. № 6. С. 81 – 83.
11. Никитин Л. Д., Долинский В. А., Кудашкина С. А. и др. Технология утилизации металлургических отходов в доменной плавке // *Сталь*. 2007. № 10. С. 94 – 97.
12. Журавлев В.В. Восстановление железа из жидких шлаков сталеплавильного производства // *Электromеталлургия*. 2014. № 8. С. 27 – 30.
13. Крутянский М.М., Нехамин С.М., Ребиков Е.М. О переработке шлаковых отвалов в дуговых печах постоянного тока // *Электromеталлургия*. 2015. № 2. С. 32 – 36.
14. Тлеугабулов С.М., Кiekбаев Е.Е., Койшина Г.М., Алдангаров Е.М. Прямое восстановление металлов – высокотехнологичное производство (в порядке обсуждения) // *Сталь*. 2010. № 2. С. 4 – 8.
15. Вольнкина Е.П., Зоря В.Н. Исследование способов обогащения отходов шламонакопителя ОАО «Западно-Сибирский металлургический комбинат» // *Изв. вуз. Черная металлургия*, 2012. Т. 55. № 4. С. 60 – 64.

16. Тараканов А.К., Иващенко В.П., Паниотов Ю.С., Бобровицкий С.В. Оценка возможностей совершенствования технологии жидкофазного восстановления железа // *Металлург.* 2009. № 3. С. 34 – 39.
17. Сидоров Е.В., Валуев А.Г., Босьякова Н.А., Степанова Э.В. Подготовка железосодержащих отходов для использования в качестве сырья // *Сталь.* 2009. № 10. С. 105 – 106.
18. Черноусов П.И. Рециклинг. Технология переработки и утилизации техногенных образований и отходов в черной металлургии. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – 428 с.
19. Леонтьев Л.И., Шешуков О.Ю., Михеенков М.А. и др. Технологические особенности переработки шлаков ДСП и АКП в строительные материалы и опыт утилизации рафинировочного шлака в ОАО «СТЗ» // *Сталь.* 2014. № 6. С. 106 – 109.
20. Дильдин А.Н., Трофимов Е.А., Чуманов И.В. Совершенствование методики глубокой переработки отходов сталеплавильного производства. Часть I. Термодинамический анализ // *Изв. вуз. Черная металлургия.* 2017. № 1. С. 5 – 12.

Поступила 21 мая 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 3, PP. 175–180.

IMPROVEMENT OF DEEP PROCESSING TECHNIQUES FOR WASTE IN STEEL-MELTING PRODUCTION. PART 2. DEVELOPMENT OF PROCESS FLOW DIAGRAM

A.N. Dil'din¹, I.V. Chumanov¹, E.A. Trofimov¹, D.A. Zherebtsov²

¹ Zlatoust branch of the South Ural State University, Zlatoust, Chelyabinsk Region, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The aim of this work is the experimental study of the feasibility and advisability of reducing processing of steel slags in order to obtain the metal and oxide phases, which can be used in the metallurgical industry and in the industry of structural materials. The slag from slag dumps of Zlatoust Metallurgical Works (the Russian Federation) has become the object of the experimental study. These studies have included some experiments on the recovery of slag samples with carbon. The composition of the experimental samples was determined by electron microscope analysis. The carried out theoretical and experimental studies suggested that the mass of the metallic phase obtained during recovering can be up to 20 % by weight of the initial slag and even slightly higher. At the same time, the iron, which is contained in slag, can be recovered almost completely. Besides, some prevailing or significant part of such elements as chrome, nickel, manganese, and some other valuable components can transmit into the composition of metal. It is expedient to carry out the liquid-phase recovery of slag at temperatures about 1500 °C or higher to obtain more complete recovery of metals and formation of the consolidated metal phase. This study shows the expediency of the prior solid-phase reduction of the slag at temperatures of 1100 – 1200 °C. This process will enable the most part of the iron included in slag as oxides to convert them into the form, which will be susceptible to magnetic separation. The subsequent magnetic separation enables to separate the fraction with a high content of valuable metals from the oxide fraction depleted by valuable metals; this fraction can be used for production of building materials. When designing units for implementation of the developed technology, it is recommended to provide some measures for the utilization of large volumes of carbon monoxide and vapors of the metals presented in the gas phase. The use of the received gas as a reducing agent for preliminary solid-phase slag recovery can become the way of CO utilization. The research allowed developing the scheme of deep processing of slag dumps of this kind.

Keywords: pilot study, steel-smelting slags, high-temperature recovery, melt.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-3-175-180

REFERENCES

1. Dil'din A.N., Chumanov I.V., Eremyashev V.E., Zherebtsov D.A. On the use of dump slags of the Zlatoust steel works. *Elektrometallurgiya.* 2015, no. 4, pp. 28–33. (In Russ.).
2. Dil'din 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, vol. 59, pp. 1024–1029.
3. Dil'din A.N., Chumanov V.I., Chumanov I.V. Systematic use of wastes from steel production. *Metallurgist.* 2011, vol. 54, no. 11–12, pp. 737–759.
4. Gel'manova Z.S., Filatov A.V. Projects of efficient application of the production enterprises waste, reducing burden on environment. *Metallurg.* 2015, no. 9, pp. 16–19. (In Russ.).
5. Kosyrev K.L., Fomenko A.P., Parshin V.M., Kostin A.S., Zhikhariev P.Yu. Prerequisites and concept of creation of energy metallurgical complexes for processing of technogenic wastage. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii.* 2013, no. 7, pp. 2–11. (In Russ.).
6. Gladskikh V.I., Gostenin V.A., Bochkarev A.V., Sukinova N.V., Murzina Z.N. Processing of steel-melting slags on the AMCOM unit. *Stal'.* 2009, no. 10, pp. 107–109. (In Russ.).
7. Gudim Yu.A., Golubev A.A., Ovchinnikov S.G., Zinurov I.Yu. Waste-free processing of steel-smelting slag. *Steel in Translation.* 2009, vol. 39, no. 7, pp. 612–614.
8. Polyakh O.A., Rudneva V.V., Yakushevich N.F., Galevskii G.V., Anikin A.E. Application of technogenic waste of metallurgical plants for the production of silicon carbide. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2014, vol. 57, no. 8, pp. 5–12. (In Russ.).
9. Romanets V.A., Valavin V.S., Pokhvisnev Yu.V., Makeev S.A., Gimmel'farb A.I. Use of the innovative Romelt technology to process iron-bearing wastes from mines and metallurgical plants. *Metallurgist.* 2010, vol. 54, no. 5, pp. 273–277.
10. Gladskikh V.I., Bochkarev A.V., Sukinova N.V., Murzina Z.N., Frolova I.P. Improving slag processing at ОАО MMK. *Steel in Translation.* 2011, vol. 41, no. 6, pp. 541–543.
11. Nikitin L.D., Dolinskii V.A., Kudashkina S.A., Portnov L.V., Bugaev S.F. Recycling metallurgical waste in blast-furnace smelting. *Steel in Translation.* 2007, vol. 37, no. 10, pp. 898–899.
12. Zhuravlev V.V. Recovery of iron from fluid slags of steel-melting production. *Elektrometallurgiya.* 2014, no. 8, pp. 27–30. (In Russ.).
13. Krutyanskiy M.M., Nekhamin S.M., Rebikov E.M. On processing of slag dumps in arc furnaces of direct current. *Elektrometallurgiya.* 2015, no. 2, pp. 32–36. (In Russ.).
14. Tleugabulov S.M., Kiekbaev E.E., Koishina G.M., Aldangarov E.M. Direct recovery of metals as a hi-tech production (discussion). *Stal'.* 2010, no. 2, pp. 4–8. (In Russ.).
15. Volynkina E.P., Zorya V.N. The investigation of enriching waste methods of sludge tank at “West-Siberian metallurgical plant”. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2012, vol. 55, no. 4, pp. 60–64. (In Russ.).
16. Tarakanov A.K., Ivashchenko V.P., Paniotov Yu.S., Bobrovitskii S.V. Evaluating the possibilities for improving the technology used for the liquid-phase reduction of iron. *Metallurgist.* 2009, vol. 53, no. 3, pp. 123–131.
17. Sidorov E.V., Valuev A.G., Bosyakova N.A., Stepanova E.V. Preparation of iron-bearing wastes for industrial use. *Steel in Translation.* 2009, vol. 39, no. 10, pp. 955–956.

18. Chernousov P.I. *Retsikling. Tekhnologiya pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh obrazovaniy i otkhodov v chernoi metallurgii: monogr.* [Processing and utilization technology of technogenic formations and waste in ferrous metallurgy: Monograph]. Moscow: Izd. Dom MISiS, 2011, 428 p. (In Russ.).
19. Leont'ev L.I., Sheshukov O.Yu., Mikheenkov M.A., Stepanov A.I., Zuev M.V., Stepanov I.A. Conversion technology of particle board and aluminium composite board slags to construction materials and utilization of refined slag in Severk Pipe Factory. *Stal'*. 2014, no. 6, pp. 106–109. (In Russ.).
20. Dil'din A.N., Trofimov E.A., Chumanov I.V. Improvement of deep processing techniques for waste of steel-melting production. Part 1. Thermodynamic analysis. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 1, pp. 5–12. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation. The unique identifier of applied research is RFMEFI57414X0090.

Information about the authors:

A.N. Dil'din, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Technique and Technology of Materials Production"* (andildin@mail.ru)

I.V. Chumanov, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of the General Metallurgy* (chumanoviv@susu.ac.ru)

E.A. Trofimov, *Dr. Sci. (Chem.), Professor of the Chair "Technique and Technology of Materials Production"* (tea7510@gmail.com)

D.A. Zherebtsov, *Cand. Sci. (Chem.), Engineer of the Chair of Physical Chemistry* (zherebtsov_da@yahoo.com)

Received May 21, 2016
