

shenstvovanie tehnologii i oborudovanija proizvodstva zhelezorudnogo syr'ja dlja sovremennoj domennoj plavki [Improvement of technology and equipment for the production of iron ore for modern blast furnaces]. Krivoy Rog, Dionat Publ., 2017. 368 p. (Rus.)

Рецензент: О.Д. Учитель
д-р техн. наук, проф., КМІ НметАУ

Стаття надійшла 12.03.2018

УДК 669.162.1

doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142465

© Ожогин В.В.¹, Ковалевский И.А.², Тарасюк Л.И.³

МИКРОТЕХНОЛОГИИ В ПОДГОТОВКЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО СЫРЬЯ

Рассмотрена ситуация, сложившаяся в черной металлургии в сфере подготовки сырья, и выявлена ее взаимосвязь с интенсификацией производства, на основании чего сделан вывод о закономерности перехода от традиционных технологий окучкования сырья к микротехнологиям. Под этим углом зрения выполнен обзор важнейших достижений преимущественно украинских ученых в сфере подготовки сырья, на основании которого выявлены приоритетные направления в сфере окучкования, характерные для национальной металлургии. Представлена эффективность этих способов. Внедрение в производство рассмотренных разработок создает предпосылки для кардинального увеличения производительности металлургических агрегатов за счет интенсификации их процессов, что полностью соответствует направлениям совершенствования металлургии. Внедрение только части этих разработок способно повысить интенсивность аглодоменного производства в 1,2-1,5 раза без снижения качества выплавляемого чугуна. В практической части статьи исследованы возможность и выявлены условия, обеспечивающие глубокую подготовку исходного сырья, отвечающего требованиям повышения интенсивности производства и качества продукции. В качестве эффективного способа окучкования выбрано брикетирование, позволяющее осуществлять окучкование тонкоизмельченного исходного сырья и пылевидных отходов производства. При этом степень металлизации составляет более 99%. Получение из микрочастиц металлизированных брикетов по сравнению с традиционными способами восстановления агломерата и окатышей показывает, что в сфере подготовки сырья имеются значительные резервы, реализация которых позволит интенсифицировать процессы восстановления в 20 и более раз.

Ключевые слова: сырье, отходы, подготовка, измельчение, окучкование, агломерация, брикеты, окатыши, металлизация.

Ожогин В.В., Ковалевський І.А., Тарасюк Л.І. Мікротехнології в підготовці металургійної сировини. Розглянута ситуація, що склалася в чорній металургії у сфері підготовки сировини, і виявлен її взаємозв'язок з інтенсифікацією виробництва, на підставі чого зроблений висновок про закономірність переходу від традиційних технологій кускування сировини до мікротехнологій. Під цим кутом зору виконаний огляд найважливіших досягнень переважно українських учених у сфері під-

¹ канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, i_koval@ukr.net

³ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, sstts@list.ru

готовки сировини, на підставі якого виявлені пріоритетні напрями у сфері кускування, характерні для національної металургії. Представлена ефективність цих способів. Впровадження у виробництво розглянутих розробок створює передумови для кардинального збільшення продуктивності металургійних агрегатів за рахунок інтенсифікації їх процесів, що повністю відповідає напрямам вдосконалення металургії. Впровадження тільки частини цих розробок здатне підвищити інтенсивність аглодомного виробництва в 1,2-1,5 рази без зниження якості чавуну, що виплавляється. У практичній частині статті досліджені можливість і виявлені умови, що забезпечують глибоку підготовку сировини, що відповідає вимогам підвищення інтенсивності виробництва і якості продукції. В якості ефективного способу кускування вибрано брикетування, що дозволяє здійснювати кускування тонкоподрібненої сировини і пилоподібних відходів виробництва. При цьому ступінь металізації складає більше ніж 99%. Отримання з мікрочасток металізованих брикетів у порівнянні з традиційними способами відновлення агломерату і окатишів демонструє, що у сфері підготовки сировини є значні резерви, реалізація яких дозволить інтенсифікувати процеси відновлення в 20 і більше разів.

Ключові слова: сировина, відходи, підготовка, подрібнення, кускування, агломерація, брикети, окатиші, металізація.

V.V. Ozhogin, I.A. Kovalevskiy, L.I. Tarasyuk. Microtechnologies in preparing metallurgical raw material. The situation in ferrous metallurgy in terms of raw materials preparation and its interrelation with production intensification has been revealed, on the strength of which the conclusion as to the necessity of transition from traditional technologies of raw material agglomeration to microtechnologies has been drawn. Taking into account the situation, the review of the major achievements of the Ukrainian scientists for the most part, has been executed in terms of raw materials preparation on the basis of which the priority directions in the field of agglomeration, characteristic of the national metallurgy have been shown. The efficiency of these methods is presented. Introduction these achievements in production makes it possible to create premises for crucial increase of the productivity increase of metallurgical units due to intensification of their processes, that is in line with perfection of metallurgy. Introduction of just some of these developments can result in 1,2-1,5 increase in the intensity of agglomeration and blast production; there being no decline in cast iron quality. The practical part of the article investigates possibility and terms, providing deep preparation of the raw materials meeting the requirements of production intensity increase and quality of products. Briquetting has been chosen as an effective method for it makes it possible to agglomerate fine-divided raw materials and pulverized production wastes, the degree of metallization being more than 99%. Getting metallized briquettes from microparticles as compared to traditional renewal of agglomerate and pellets shows that renewal processes can be intensified 20fold and more.

Keywords: raw material, wastes, preparation, agglomeration, briquettes, pellets, metallization.

Постановка проблеми. Современное развитие науки, техники и всех сфер жизнедеятельности человека предъявляет постоянно растущие и более разнообразные требования к качеству металла, удовлетворить которые традиционными методами становится всё сложнее. Успешно решают эти и подобные им вопросы призваны так называемые нанотехнологии. Вместе с тем, качество конечного продукта и эффективность его получения во многом определяется исходным сырьём и качеством его подготовки. Традиционные способы подготовки во многом исчерпали свои возможности. На смену им должны прийти новые технологии, обрабатывающие частицы микронных размеров.

Анализ последних исследований и публикаций. В силу специфики развития национальной металлургии, в сфере подготовки сырья, оперирующей огромными объёмами сырых материалов, ежегодно составляющими десятки миллионов тонн, прорывных разработок в по-

следнее время не реализовано. Традиционный 2-х передельный (аглодоменный – сталеплавильный) процесс получения металла не поколеблен, хотя и в некоторой степени потеснен. Так, агломерация уступила незначительные позиции окатыванию, а конкуренцию комплексу чугуна – сталь пытается составить метод прямого восстановления железа.

Однако в аглодоменном производстве можно достичь существенных успехов, если в сфере подготовки сырья применить последние разработки украинских учёных, предложивших применять вместо обычных – микротехнологии. Для этого в металлургии сложились определённые предпосылки. В частности, в силу объективных причин (выработка богатых месторождений) увеличилось производство концентратов глубокого обогащения, в которых более 60% частиц имеют размер менее 0,063 мм, т. е. 63 мкм. Тонко измельчённые сталеплавильные пыли и шламы, часть аглодоменных шламов и вся аспирационная пыль практически состоят из микрочастиц, более 80% которых составляют < 0,005 мм или 5 мкм. Потребность в тонко измельчённом углеродном восстановителе может быть удовлетворена резервом имеющихся дробильных мощностей, благодаря переходу некоторых передовых предприятий на пылевдувание топлива или отсева тонкой фракции антрацитового штыба, используемого в агломерации.

Из достижений в этой области, прежде всего, необходимо отметить украинских учёных, разработавших новые шихтовые материалы, способные существенно повысить эффективность аглодоменного и сталеплавильного производств. В сфере агломерации это принудительное гранулирование чрезмерно комкующейся тонкой части агломерационной шихты, в результате его применения можно увеличить производительность аглофабрик в 1,5 раза и выше [1]. Способы получения гранул также можно считать эффективными и достаточно хорошо отработанными [2, 3].

Для доменного производства получены материалы нового поколения – окатыши с углеродным ядром, сокращающие длительность их восстановления со 100 мин при содержании остаточного углерода 0,2% до 20-25 мин при содержании углерода 20%. При этом обеспечивают степень восстановления до 80% [4].

Удовлетворительные результаты может дать использование брикетов в доменном производстве [5]. Так, при расходе окалиносодержащих брикетов в количестве 35,2 кг/т чугуна производительность домы возросла на 4,06%, а экономия кокса составила 0,2% [6]. Перспективная разработка экструдированных брикетов (брэксов), выполненная для небольших печей, приближает то время, когда брикеты будут использовать и в доменных печах средней мощности [7]. Предпосылки для этого созданы расширением возможностей брикетирования, которое позволяет не только широко использовать брикеты без их предварительной металлизации в сталеплавильном производстве вместо железостального лома, но и в доменном производстве. Так, применение выявленных закономерностей повышает прочность брикетов в 1,7-2,4 раза, что соответствует требованиям, предъявляемым к брикетам по механической прочности [8].

Более глубокая подготовка железоуглеродистых материалов позволит получить металлизированные материалы (окатыши и брикеты) с содержанием в них свыше 70% железа [9, 10].

Разработки в сфере использования брикетированных материалов в сталеплавильном производстве тоже могут дать существенную экономию, в т. ч. и на снижении зависимости от металлолома [11]. Так, брикеты обеспечивают снижение расхода металлолома и жидкого чугуна, улучшают процессы шлакообразования, способствуя повышению стойкости футеровки конвертеров на 20%, сокращению длительности продувки на 0,53 мин и экономии кислорода на 90-100 м³ на плавку. С июня 2003 г. конвертерный цех ОАО «ДМЗ им. Петровского» перешёл к промышленному использованию железосодержащих брикетов [12].

Анализ современных разработок и достигнутых в ходе них результатов в сфере подготовки сырья на предмет оценки возможности их применения в реальном производстве позволил установить, что вышеуказанные разработки создают предпосылки для кардинального увеличения производительности металлургических агрегатов за счёт интенсификации их процессов, что полностью соответствует парадигме развития металлургии. По оценке, только часть этих разработок способна повысить интенсивность аглодоменного производства в 1,2-1,5 раза без снижения качества выплавляемого чугуна.

Проведенный краткий обзор публикаций также показал, что технологии типа «хай-тек» начинают занимать ведущие позиции в подготовке сырья к металлургическому переделу. Од-

нако объём их внедрения пока ещё невелик или носит в основном опытно-промышленный характер. Там же, где производство достигает массовых величин, сохраняются традиционные технологии, которые условно относят к технологиям нано, например [13]. И это естественно, так как вся металлургия формально относится к нанотехнологиям: от превращения каждой молекулы оксидов железа в атомы металлического железа до легирования стали, при котором атомы железа в кристаллической решётке связывают атомами легирующих элементов.

Цель статьи. Целью настоящего исследования является выявление резервов в подготовке сырья его измельчением до микрочастиц для выведения части восстановительных процессов из доменной печи, а также интенсификации её работы.

Изложение основного материала. Для выявления особенностей восстановления тонких железоуглеродистых смесей вне рамок выполненной НИР [11] изучены особенности восстановления тонких железосодержащих рудных порошков. Известно, что активность кусковых материалов после их измельчения многократно возрастает за счёт роста поверхности контакта. Так, железо, измельчённое до наночастиц, на воздухе в результате окисления быстро разогревается и сгорает. Считается, что смеси микрочастиц железосодержащих шламов с углём такого же измельчения, которым обеспечен тесный контакт, сокращают длительность металлизации.

Железосодержащий компонент был выбран в виде отсеянных на сите с размером ячейки 0,5 мм тонких сталеплавильных шламов текущего выхода с содержанием фракции < 0,005 мм в количестве более 80%. Отделение балластных частиц промывкой или отмагничиванием не осуществляли, т. к. они содержат активную известь, связывающую серу.

В качестве восстановителя взят антрацитовый штыб, мелкие частицы которого отсеивали и отделяли промывкой. Образовавшуюся пульпу сливали и осаждали. По крупности размер частиц соответствовал размерам частиц сталеплавильных шламов.

В качестве связующего и дополнительного флюса выбран бишофит в виде раствора $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ в воде, хорошо удаляющий цинк, содержащийся в шламах. Кроме того, бишофит положительно сказывается на брикетированности смесей. Влияние других связующих, таких как жидкое стекло, алюминаты кальция, на восстановление на данном этапе исследования не выявляли. Для связывания серы, содержащейся в сталеплавильном шламе, использовали известь, содержащуюся в железосодержащем компоненте.

Состав исходных компонентов и обожжённых брикетов представлен в таблице.

Таблица

Химический состав исходных материалов и связующих

Материал	Содержание компонентов, %								
	Fe _{общ}	Fe _{мет}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	п.п.п. ¹
1. Шлам сталеплавильный	54,3	-	11,2	7,3	0,8	7,0	1,0	0,5	5,1
2. Зола антрацитового штыба ²	11,7	-	-	47,3	18,9	4,6	1,4	0,8	-
3. Известь гашёная	0,4	-	-	1,3	0,3	65,7	1,1	-	30,6
4. Бишофит	-	-	-	0,3	-	0,4	26,5	0,4	71,5
5. Металлизированный брикет	67,8	67,2	0,8	6,9	1,4	13,7	4,0	0,6	-

Примечания к табл.: 1 – потери при прокаливании; 2 – содержание летучих веществ в антрацитовом штыбе – 4,4%, углерода C_{гор} – 86,2%.

Тонкие частицы шлама и угля в расчётном соотношении 85:15 (без учёта углерода, содержащегося в шламе) тщательно перемешивали, чтобы обеспечить равномерный и тесный контакт реагентов, затем вводили жидкий бишофит в количестве 10% от массы смеси, т. е. сверх 100%. Смесь брикетировали под давлением 50 МПа, развиваемым большинством современных высокопроизводительных вальцовых прессов. Брикеты цилиндрической формы имели следующие размеры: диаметр 30 мм, высота 20 мм, масса 32-45 г. Их сушили при 250°C в течение 0,5 ч, чтобы обеспечить требуемую прочность при перегрузке и металлизации.

Затем брикеты, уложенные в стопу в закрытом стакане, подвергали нагреву в термической печи до температуры не выше 1200°C. Разогрев осуществляли в течение 5 мин, длительность восстановления, определяемая по прекращению выхода горящего СО из-под крышки,

составляло 10 мин. Стакан извлекали и быстро охлаждали путём установки его на массивную металлическую плиту, чтобы исключить повторное окисление брикетов. Химический анализ, выполненный в заводской лаборатории, показал, что степень металлизации обожжённых брикетов составила 99,1%, при общем содержании железа в брикете 67,8%.

Внешний вид брикетов на различных стадиях испытаний представлен на рисунке.

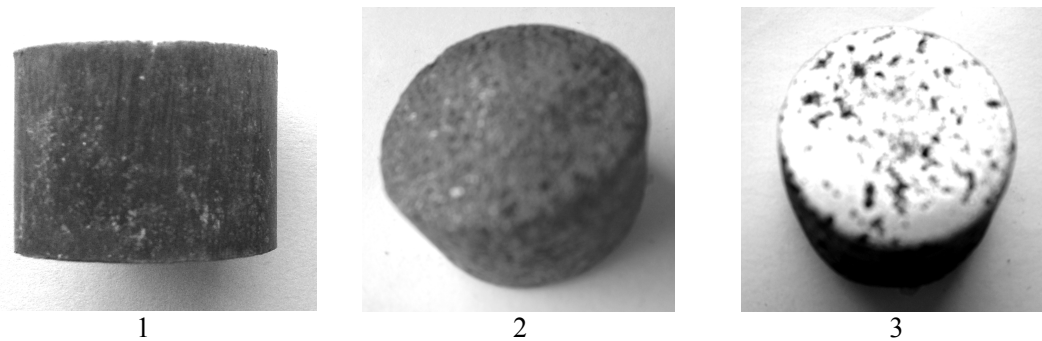


Рисунок – Внешний вид брикетов: 1 – брикет до восстановления, высушенный 0,5 ч при 250°C; 2 – то же, восстановленный в течение 15 мин при 1200°C; 3 – то же, аншлиф

Сопоставление известных показателей (восстановление офлюсованного агломерата, содержащего частицы аглоруды величиной до 10 мм, в доменной печи осуществляют за несколько часов, обычных железорудных окатышей – в пределах 2-х часов, окатыш с угольным ядром восстанавливают примерно 0,5 часа) с достигнутым в опыте уровнем (брикеты из измельчённых до микроуровня частиц восстановлены вместе с их нагревом за 15 минут) показывает, что в сфере подготовки сырья имеются значительные резервы, реализация которых позволит интенсифицировать процессы восстановления не менее чем в 20 раз.

Несложность реализации процесса окускования и металлизации таких брикетов в конвейерных или кольцевых печах [8] позволит с их помощью интенсифицировать доменный процесс или использовать их непосредственно в сталеплавильных агрегатах.

Выводы

Полученные результаты позволяют предположить, что микротехнологии будут всё шире проникать в металлургию. Поэтому уже сейчас следует уделять повышенное внимание разработке новых, эффективных технологий, прежде всего, в сфере подготовки сырья, а также в сопутствующих им сферах, таких как охрана окружающей природной среды и утилизация пылевидных отходов, что само по себе способно дать значительный экономический эффект.

Дальнейшие исследования следует вести в направлении решения вопросов измельчения и разработки эффективных составов и недорогой мобильной установки, работающей в автономном режиме и позволяющей снять проблемы с утилизацией пылевидных железосодержащих отходов на тех предприятиях, где отсутствуют мощности для их переработки.

Список использованных источников:

1. Совершенствование способов подготовки агломерационной шихты к спеканию / В.П. Русских [и др.] // Актуальные проблемы современной металлургии. – Мариуполь : ПГТУ, 2012. – С. 361-367.
2. Пат. 104116 Україна, МПК С 22 В 1/14. Спосіб одержання гранул / В.В. Ожогін, І. А. Ковалевський, О.М. Кіпчарська, О.В. Тараніна, Т.М. Дяченко, В.П. Кіпчарський. – № u201506999; заявл. 14.07.15; опубл. 12.01.16, Бюл. 1. – 6 с.
3. Пат. 116525 Україна, МПК С 22 В 1/14. Спосіб одержання гранул / В.В. Ожогін, І.А. Ковалевський, Л.І. Тарасюк, О.В. Тараніна, О.М. Кіпчарська. – № u201612255; заявл. 02.12.16; опубл. 25.05.17, Бюл. 10. – 8 с.
4. Ванюкова Н.Д. Физико-химические основы процессов восстановления окускованных угле-

- родсодержащих железорудных материалов, используемых в доменной плавке с целью экономии топлива : автореф. дис. ...канд. техн. наук : 05.16.02 / Н.Д. Ванюкова; НМетАУ. – Днепропетровск, 1995. – 23 с.
5. Пат. 108562 Україна, МПК С 22 В 1/24. Залізівуглецевий брикет / Л.Ю. Назюта, В.В. Ожогін, М.П. Орліченко, О.С. Кучерявенко. – № а201314320; заявл. 10.06.14; опубл. 12.05.15, Бюл. 9. – 8 с.
 6. Бычков С.В. Опыт использования брикетов на основе прокатной окалины в доменной печи / С.В. Бычков, Н.Д. Ванюкова, О.В. Носоченко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. – № 1. – С. 14-16.
 7. Курунов И.Ф. Жёсткая вакуумная экструзия Steele – перспективный способ окускования металлургического сырья и отходов / И.Ф. Курунов, А.М. Бижанов // *Черная металлургия*. – 2012. – № 4 – С. 46-49.
 8. Ожогин В.В. Основы теории и технологии брикетирования измельчённого металлургического сырья : монография / В.В. Ожогин. – Мариуполь : ПГТУ, 2010. – 442 с.
 9. Чупринов Є.В. Удосконалення процесу виробництва огрудкованої залізорудної сировини з підвищенням змісту заліза та залишковим вуглецем для доменної плавки : дис. ...канд. техн. наук : 05.16.02 / Чупринов Євген Валерійович. – Дніпро, НМетАУ, 2017. – 206 с.
 10. Ванюкова Н.Д. Поліпшення металургійних властивостей залізорудних окускованих матеріалів для підвищення ефективності виплавки металу : автореф. дис. ...д-ра техн. наук : 05.16.02 / Н.Д. Ванюкова; НМетАУ. – Дніпропетровськ, 2003. – 33 с.
 11. Разработка способов замены металлолома в мартеновской плавке : отчёт о НИР / Приазов. гос. техн. ун-т; рук. Томаш А.А. – Мариуполь, 2005. – 170 с. – № ГР 0104U005371.
 12. Опыт и перспективы использования брикетированных отходов металлургического производства при выплавке стали в 60-тонных конвертерах / В.И. Пищида [и др.] // *Металл и литьё Украины*. – 2006. – № 5. – С. 29-32.
 13. Колпаков С.В. Нанотехнологии в металлургии стали / С.В. Колпаков, В.А. Паршин, А.Н. Чеховой // *Сталь*. – 2007. – № 8. – С. 101-106.

References:

1. Russkikh V.P., Ozhogin V.V., Semakova V.B. Sovershenstvovanie sposobov podgotovki aglomeratsionnoi shikhty k spekaniyu [Perfection of methods of preparation of sintering mixture to spekaniyu]. *Aktual'nye problemy sovremennoi metallurgii – Actual problems of modern metallurgy*, 2012, pp. 361-367. (Rus.)
2. Ozhogin V.V., Kovalevs'kii I.A., Kipchars'ka O.M., Taranina O.V., Diachenko T.M., Kipchar-sky V.P. *Sposib oderzhannia granul* [Method of receipt of granules]. Patent UA, no.104116, 2016. (Ukr.)
3. Ozhogin V.V., Kovalevs'kii I.A., Tarasiuk L.I., Taranina O.V., Kipchars'ka O.M. *Sposib oderzhannia granul* [Method of receipt of granules]. Patent UA, no. 116525, 2017. (Ukr.)
4. Vaniukova N.D. *Fiziko-khimicheskie osnovy protsessov vosstanovleniia okuskovannykh uglerod-soderzhashchikh zhelezorudnykh materialov, ispol'zuemykh v domennoi plavke s tsel'iu ekonomii topliva*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Physicochemical bases of the processes of reduction of agglomerated carbon-containing iron ore materials used in blast furnace smelting in order to save fuel. Thesis of cand. tech. sci. diss.]. Dnepropetrovsk, 1995. 23 p. (Rus.)
5. Naziuta L.Iu., Ozhogin V.V., Orlichenko M.P., Kucheriavenko O.S. *Zalizovugletseviy briket* [Iron-carbon perform]. Patent UA, no. 108562, 2015. (Ukr.)
6. Bychkov S.V., Vaniukova N.D., Nosochenko O.V. Opyt ispol'zovaniia briketov na osnove prokatnoi okaliny v domennoi pechi [Experience of using briquettes on the basis of mill scale in a blast furnace]. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost' – Metallurgical and Mining Industry*, 2006, no. 1, pp. 14-16. (Rus.)
7. Kurunov I.F., Bizhanov A.M. Zhestkaia vakuumnaia ekstruziia Steele – perspektivnyi sposob okuskovaniia metallurgicheskogo syr'ia i otkhodov [Steele rigid vacuum extrusion Steele is a promising way of agglomeration of metallurgical raw materials and waste]. *Chernaia metallurgiiia – Ferrous Metallurgy*, 2012, no.4, pp. 46-49. (Rus.)
8. Ozhogin V.V. Osnovy teorii i tekhnologii briketirovaniia izmel'chennogo metallurgicheskogo

- syria: monografiia [The fundamentals of the theory and technology of briquetting of crushed metallurgical raw materials: monograph]. Mariupol', PGTU Publ., 2010. 442 p. (Ukr.)
9. Chuprinov E.V. *Udoskonalennia protsesu virobnytstva ogridkovanoi zalizorudnoi sirovini z pidvishchenniam zmistu zaliza ta zalishkovim vugletsem dlia domennoi plavki*. Diss. kand. techn. nauk [Improvement of the process of production of chopped iron ore raw materials with the increase of iron content and residual carbon for blast-furnace smelting. Cand. tech. sci. diss.]. Dnipro, 2017. 206 p. (Ukr.)
 10. Vaniukova N.D. *Polipshennia metalurgiiinikh vlastivostei zalizorudnikh okuskovanikh materialiv dlia pidvishchennia efektyvnosti viplavki metalu*. Avtoref. diss. dokt. techn. nauk [Improvement of metallurgical properties of iron-ore-cooled materials for increasing the efficiency of smelting of metal. Thesis of doct. tech. sci. diss.]. Dnipropetrovs'k, 2003. 33 p. (Ukr.)
 11. Otchet o NIR. № GR 0104U005371. *Razrabotka sposobov zameny metalloloma v martenovskoi plavke* [Development of ways to replace scrap metal in open-hearth melting]. Mariupol', PGTU Publ., 2005. 170 p. (Rus.)
 12. Pishchida V.I., Shibko A.V., Shpak V.I., Kotliarov V.V., Chmyrkov K.F. Opyt i perspektivy ispol'zovaniia briketirovannykh otkhodov metallurgicheskogo proizvodstva pri vyplavke stali v 60-tonnykh konverterakh [Experience and prospects for the use of briquetted steel waste in steelmaking in 60-tonne converters]. *Metall i lit'e Ukrainy – Metal and casting of Ukraine*, 2006, № 5, pp. 29-32. (Rus.)
 13. Kolpakov S.V., Parshin V.A., Chekhovoi A.N. Nanotekhnologii v metallurgii stali [Nanotechnologies in steel metallurgy]. *Stal' – Steel*, 2007, № 8, pp. 101-106. (Rus.)

Рецензент: С.Л. Макуров
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 20.03.2018