

УДК 669.168.054

ВЛИЯНИЕ УДАРНЫХ НАГРУЗОК НА ПРОЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ*

Тимофеева А.С., к.т.н., доцент кафедры металлургии и металловедения (dakatuli@bk.ru)

Никитченко Т.В., к.т.н., доцент кафедры металлургии

и металловедения (nikitchenko_t_v@lebgok.ru)

Федина В.В., к.т.н., доцент кафедры металлургии и металловедения (fedinavv@mail.ru)

Елисеева К.А., магистрант кафедры металлургии и металловедения (blond_7067@mail.ru)

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова, филиал НИТУ МИСиС
(309516, Россия, Белгородская обл., г. Старый Оскол, Микрорайон Макаренко, 42)

Аннотация. При производстве окатышей к ним предъявляются определенные требования, в том числе и по прочности. Окатыши подвергаются дополнительным ударным нагрузкам в перегрузочных узлах, в портах, в результате чего происходит не только их частичное разрушение, но и снижение прочностных свойств в целом. В работе представлены исследования по разупрочнению окатышей по классам в зависимости от ударных нагрузок. При производстве окатышей следует учитывать вероятность их разупрочнения в результате погрузо-разгрузочных операций в процессе транспортировки. При этом, чем больше число перегрузок и их высота, тем выше должен быть запас прочности. Например, при наличии от 5 до 10 перегрузок прочность производимых окатышей должна составлять не менее 285 кг/окатыш, чтобы при поступлении к потребителю их прочность была не менее 200 кг/окатыш. При воздействии ударных нагрузок прочность окатышей на сжатие снижается в результате образования внутренних трещин. Начальная прочность окатышей должна быть выше значения, гарантированного техническими или договорными условиями.

Ключевые слова: окатыши, класс, прочность, разупрочнение, удар, нагрузки, трещины, запас прочности, транспортировка.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-847-851

Одним из основных способов достижения устойчиво высоких результатов в металлургическом производстве является правильно подготовленное сырье. Окатыши железорудные служат сырьем для доменных печей и установок прямого восстановления железа из оксидов. Согласно последним данным в производстве губчатого железа переработано 56,2 млн. т железорудного сырья, из них 79 % приходится на окатыши, 19 % – на кусковую руду и 2 % – на рудную мелочь [1]. Металлургами железорудные окатыши рассматриваются с позиций перспективности сырья, которое будет транспортироваться на любые расстояния без потерь ими металлургических свойств, поэтому прочностным свойствам железорудных обожженных окатышей уделяется большое внимание. Ввиду того, что окатыши подвергаются дополнительным ударным нагрузкам в перегрузочных узлах, в портах, происходит не только их частичное разрушение, но и снижение прочностных свойств в целом [2].

Прочность на сжатие – это максимальная нагрузка, которую способен выдержать окатыш до разрушения; разупрочнение – процесс накопления повреждений в окатыше под действием переменных, либо циклических нагрузок, которые впоследствии приводят к изменению прочностных свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению [3].

* Исследование выполнено в рамках государственного задания №11.63.2014/к.

В лаборатории Старооскольского филиала СТИ НИТУ «МИСиС» начаты работы по исследованию изменений прочности железорудных обожженных окатышей в результате воздействия на них ударных нагрузок [4]. Целью настоящей работы является определение необходимого запаса прочности, чтобы после транспортировки окатышей от производителя до потребителя их показатель прочности сохранялся в рамках технических или договорных условий [5].

С механической точки зрения явление удара характеризуется тем, что скорости точек механической системы, а следовательно, и количество движения этой системы изменяются за весьма малый промежуток времени, измеряемый в тысячных и меньших долях секунды, в течение которого происходит удар, т.е. изменяются на конечную величину. Так, например, при падении тела на неподвижную плиту, как показывает опыт, за весьма малый промежуток времени, в течение которого тело соприкасается с плитой, его скорость изменяется на конечную величину. Это явление удара [6 – 8].

Сотрудники НИТУ «МИСиС» А.В. Смагина, В.В. Коровушкин и другие исследовали механизм разрушения железорудных зональных окатышей, состоящих из магнетитового ядра и гематитовой оболочки [9 – 11]. С помощью экспериментов и расчетов пришли к выводу, что при сжатии разрушение окатышей начинается в центре под действием растягивающих напряжений от

сжимающей нагрузки, направленной вдоль оси приложения силы.

Проведенное сравнение микротвердости ядра и оболочки в зональном окатыше показало, что микротвердость оболочки в 1,5 раза выше микротвердости ядра, при этом экспериментально установлено, что магнетит более подвержен трещинообразованию, чем гематит. Образование трещин в магнетитовом ядре наступает при меньшей нагрузке.

В дальнейшем пришли к выводу, что разрушение окатышей начинается с появлением трещины в оболочке в точках приложения нагрузки на поверхности, где большие значения напряжений и деформаций окатыша, в соответствии с их эпюрами. Это происходит несмотря на первичное образование микротрещин в ядре окатыша магнетитового состава вследствие распирающих горизонтальных сил в ядре, большую его пористость и меньшую твердость. При этом на разрушающие напряжения будет влиять и диаметр ядра, поскольку с его увеличением прочность окатыша уменьшается. Сначала образуются микротрещины в ядре окатыша с одновременным увеличением пористости ядра, что ослабляет прочность магнетитового ядра в целом, а затем, при достижении предела прочности оболочки, в ней появляются трещины, и она раскалывается. Результаты исследования позволяют понять механизм разрушения окатышей.

В настоящей работе проводились эксперименты по выявлению степени разупрочнения окатышей в результате ударных нагрузок, имитирующих различные перегрузки при их транспортировке от поставщика потребителю [5].

Для этого отбирались окатыши с конвейера обжиговой машины из одной партии и классифицировались по следующим размерам: 8 – 10 мм; 10 – 12 мм; 12 – 14 мм; 14 – 16 мм и более 16 мм. Затем определялось значение прочности на сжатие окатышей каждой фракции до воздействия ударных нагрузок (рис. 1). Начальная

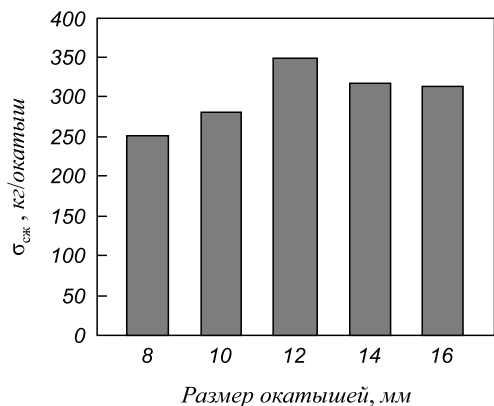


Рис. 1. Прочность окатышей на сжатие до воздействия ударных нагрузок

Fig. 1. Pellet durability on compression up to the influence of impact loads

прочность исследуемой фракции определялась по 15 окатышам и усреднялась. Измерения прочности на сжатие выполняли с помощью пресса [12].

Также проводились серии сбросов – по 28 сбрасываний для каждой фракции. Окатыши сбрасывались с высоты 1 м [13] в лабораторной установке (рис. 2). После очередного сбрасывания изымались пять окатышей и измерялась их прочность на прессе. Каждая серия сбросов была выполнена по 7 – 8 раз. После того, как все эксперименты были проведены, показания прочности окатышей усреднялись по всем сериям сбрасываний для каждого числа сбросов.

В качестве показателя разупрочнения применили относительное снижение прочности окатыша по отношению к начальной прочности:

$$R = \frac{P_i - P_0}{P_0} \cdot 100, \%$$

здесь P_i – средняя прочность для i -го сбрасывания по всем сериям определенной фракции окатышей, кг/окатыш; P_0 – начальная прочность окатышей данной фракции, усредненная для всей серии испытаний, кг/окатыш.

Результаты испытаний представлены на рис. 3.

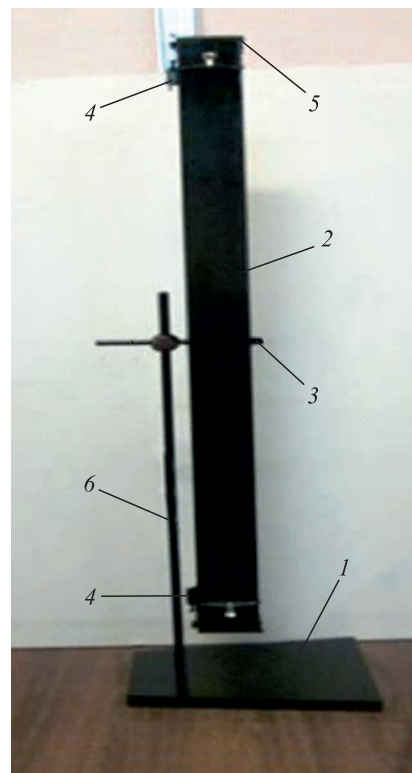


Рис. 2. Лабораторная установка для определения прочности на удар: 1 – подставка; 2 – емкость, в которой падают окатыши; 3 – ось вращения емкости; 4 – заслонки; 5 – крышка емкости с замком; 6 – стойка

Fig. 2. Laboratory unit for the determination of impact strength: 1 – lug; 2 – holding tank, in which the pellets are given; 3 – hinge axis of the holding tank; 4 – leaf; 5 – head of holding tank with the lock; 6 – pillar stand

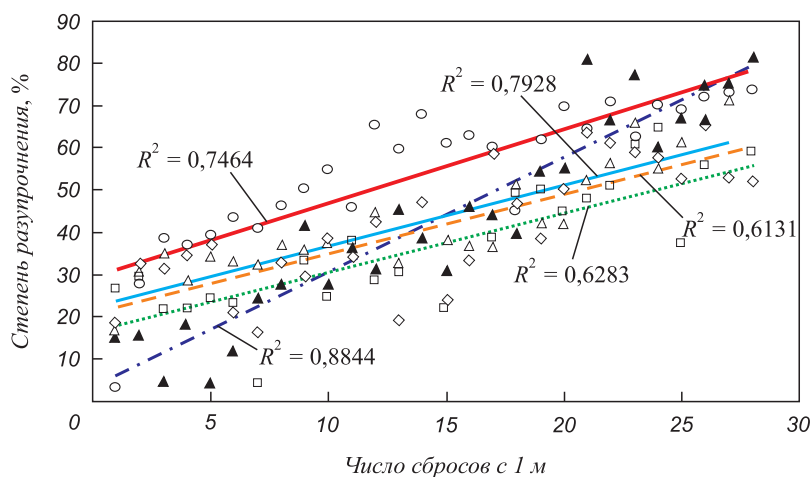


Рис. 3. Разупрочнение окатышей в зависимости от числа сбросов:

□, --- 10 мм; ○, — 8 мм; ▲, - - - 12 мм; △, — 16 мм; ◆, - - - 14 мм

Fig. 3. Softening of pellets depending on the number of outlets:

□, --- 10 mm; ○, — 8 mm; ▲, - - - 12 mm; △, — 16 mm; ◆, - - - 14 mm

Когда напряжение прикладывают к телу, оно деформируется сначала упруго, затем пластически, причем около структурных неоднородностей, имевшихся в исходном состоянии или возникающих при пластической деформации, возникают большие локальные напряжения (например, в кристаллах в результате скопления дислокаций). В этих местах зарождаются микротрещины [8, 14, 15]. Их концентрация может быть очень высокой. Однако их размеры, определяемые масштабом структурных неоднородностей, значительно меньше критического расстояния, при котором образуются трещины. Под постоянным напряжением размеры и концентрация трещин растут медленно, и тело не разрушается пока случайно, например благодаря последовательному слиянию близко расположенных трещин, одна из них не дорастет до критического размера.

Анализ представленных на рис. 3 зависимостей показывает, что наибольшая склонность к разупрочнению от воздействия ударных нагрузок характерна для самых мелких окатышей (8 мм). Для окатышей 16 и 14 мм степень разупрочнения почти одинаковая. До 10 ударов наименьшая степень разупрочнения характерна для окатышей размером 12,5 мм, но затем степень разупрочнения возрастает. Для окатышей размером 10 мм степень разупрочнения меняется так же, как и для окатышей 14 и 16 мм, но ее значения ниже на 5 – 6 %.

Выполненный химический анализ обожженных окатышей различного размера показал, что чем меньше диаметр окатыша, тем выше полнота окисления, т.е. меньше магнетитовое ядро (рис. 4).

Окатыши размером 8 мм характеризуются меньшей прочностью на сжатие в силу своего размера, кроме того, эти окатыши более пористые, поэтому их разупрочнение наиболее высокое. Наиболее высокая прочность характерна для 12-мм окатышей. По мере увеличения размера окатыша повышается размер вну-

треннего магнетитового ядра, поэтому возрастает показатель разупрочнения.

Случайное распределение структурных неоднородностей по объему образца по размерам и по степени прочности и случайный характер термических флуктуаций приводят к высокому разбросу значений прочности при испытаниях одинаковых образцов. Изменение скорости разупрочнения окатышей размером от 12 до 14 мм вероятнее всего обусловлено наличием внутренних трещин.

Анализ прочностных свойств обожженных окатышей после воздействия ударных нагрузок показал, что при сбрасываниях с высоты 1 м до 10 раз прочность практически всех окатышей снижается примерно на 30 % (рис. 5). При сбрасываниях от 15 до 20 раз этот показатель снижается почти в два раза.

Таким образом, при производстве окатышей следует учитывать вероятность их разупрочнения в результате погрузо-разгрузочных операций в процессе транспор-

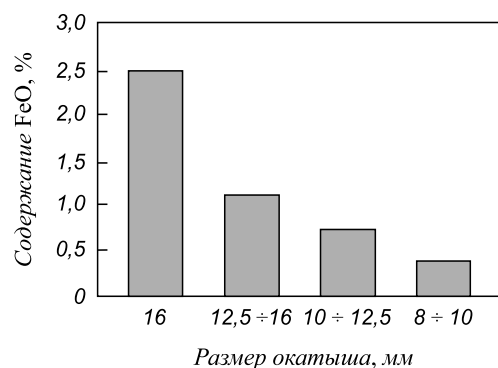


Рис. 4. Зависимость содержания остаточного магнетита в обожженных окатышах от их размера

Fig. 4. Dependence of the content of residual magnetite in burnt pellets on their size

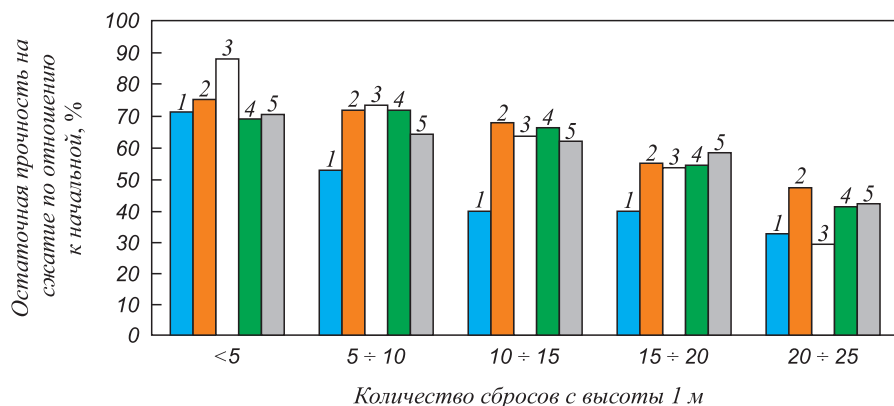


Рис. 5. Изменение остаточной прочности окатышей в зависимости от воздействия ударных нагрузок: 1 – 8 мм; 2 – 10 мм; 3 – 12 мм; 4 – 14 мм; 5 – 16 мм

Fig. 5. Change of residual strength of pellets in dependence on the influence of shock loads: 1 – 8 mm; 2 – 10 mm; 3 – 12 mm; 4 – 14 mm; 5 – 16 mm

тировки. Чем больше число перегрузок и их высота, тем выше должен быть запас прочности, например, при наличии от 5 до 10 перегрузок прочность производимых окатышей должна составлять не менее 285 кг/окатыш, чтобы при поступлении к потребителю их прочность была не менее 200 кг/окатыш.

Выводы. При воздействии ударных нагрузок прочность окатышей на сжатие снижается в результате образования внутренних трещин, поэтому начальная их прочность (при производстве) должна быть выше гарантированного значения по техническим или договорным условиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карабасов Ю.С. Сталь на рубеже столетий. – М.: МИСиС, 2001. – 664 с.
2. Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Чичварин А.В., Федина В.В., Тимофеева Е.М. Целесообразность покрытия неофлюсованных окатышей с целью уменьшения истирания при транспортировке // Сб. научных и научно-практических докладов всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов. Т. 1. – Старый Оскол: изд. СТИ НИТУ МИСиС, 2013. С. 296 – 300.
3. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: изд. МИСиС, 2005. – 432 с.
4. Тимофеева А.С., Федина В.В., Крахт Л.Н., Никитченко Т.В. Влияние количества сбрасываний на прочностные свойства окатышей // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. № 8. С. 64 – 66.
5. Тимофеева А.С., Федина В.В., Крахт Л.Н., Семин П.В., Корсун Н.А. Влияние количества перегрузок обожженных неофлюсованных окатышей на их прочность и истирание // Современные наукоемкие технологии. 2007. № 12. С. 113, 114.

6. Манжосов В.К., Новикова О.Д., Новиков А.А. Теоретическая механика. Ч. II. Динамика. Аналитическая механика: Учебное пособие. – Ульяновск: изд. УлГТУ. 2011. – 194 с.
7. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов: Учебник для вузов; Под ред. А.В. Александрова. 3-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2003. – 560 с.
8. Трофимова Т.И. Курс физики: Учебное пособие для вузов. – М.: Академия, 2006. – 560 с.
9. Смагина А.В., Коровушкин В.В., Подгородецкий Г.С., Бижапов А.М., Нуштаев Д.В. Исследование механизма разрушения окатышей под действием внешних нагрузок // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 7. С. 9 – 14.
10. Смагина А.В., Коровушкин В.В., Шипко М.Н., Староверов Б.А., Подгородецкий Г.С. Повышение прочности окисленных окатышей с помощью магнитоимпульсной обработки // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. № 10. С. 31 – 35.
11. Пат. 2476607 РФ. Способ обработки железорудных окатышей / В.В. Коровушкин, М.Н. Шипко, Г.С. Подгородецкий, Б.А. Староверов, Н.М. Дуров, А.В. Смагина. заявл. 14.09.11; опубл. 27.02.13. Бюл. №6.
12. ГОСТ 24765 – 81 Окатыши железорудные. Метод определения прочности на сжатие. – Изм. 2009-23-06. – М.: ИПК Изд-во стандартов. 2009. – 7 с.
13. ГОСТ 25471 – 82. Руды железные, агломераты и окатыши. Метод определения прочности на сбрасывание. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 5 с.
14. Абзалов В.М., Горбачев В.А., Клейн В.И., Мальцева В.Е., Шаврин С.В. Соотношение процессов упрочнения и разупрочнения при обжиге железорудных окатышей // Изв. вузов Черная металлургия. 2001. № 1. С. 64, 65.
15. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды. – М.: Наука, 1979. – 384 с.

Поступила 25 августа 2016 г.

EFFECT OF SHOCK LOADS ON THE STRENGTH OF IRON ORE PELLETS

A.S. Timofeeva, T.V. Nikitchenko, V.V. Fedina, K.A. Eliseeva

Stary Oskol Technological Institute of National University of Science and Technology “MISiS”, Stary Oskol, Belgorod Region, Russia

Abstract. At production of pellets one makes special demands on them, including the strength requirements. Pellets are subjected to the additional impact stresses in transfer units and ports; as a result there is not only their partial destruction but the decrease of strength properties in tota-

lity. The paper presents the research results on the destruction of pellets according to the classes, depending on the impact stress. When producing the pellets, it should be taken into consideration the probability of their softening in the results of loading and unloading operations during the transportation. Thereby, the safety factor increases with the increase of the number of loads and their height. For example, in the case from 5 to 10 loads the strength of the produced pellets should be not less than 285 kg/pellet; and when they are received by the consumers their strength should be not less than 200 kg/pellet. At the impact of stresses the compression strength of pellets decreases as the result of inner fractions formation. The primary strength of pellets should be more than the value, guaranteed by technical or contractual conditions.

Keywords: pellets, class, strength, softening, stroke, loads, cracks, safety factor, transportation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-847-851

REFERENCES

1. Karabasov Yu.S. *Stal' na rubezhe stoletii* [Steel at the turn of the century]. Moscow: MISiS, 2001, 664 p. (In Russ.).
2. Timofeeva A.S., Nikitchenko T.V., Chichvarin A.V., Fedina V.V., Timofeeva E.M. Feasibility of the coating of non-fluxed pellets in order to decrease the wear when transporting. In: *Sb. nauchnykh i nauchno-prakticheskikh dokladov vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov i aspirantov. T. 1.* [Coll. of scientific and practical reports of the All-Russian Scientific-Practical Conference of Students and Graduate Students. Vol. 1]. Stary Oskol: STI NITU MISiS, 2013, pp. 296–300. (In Russ.).
3. Gorelik S.S., Dobatkin S.V., Kaputkina L.M. *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys]. Moscow: MISiS, 2005, 432 p. (In Russ.).
4. Timofeeva A.S., Fedina V.V., Krakht L.N., Nikitchenko T.V. Influence of the number of droppings on the strength properties of pellets. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2008, no. 8, pp. 64–66. (In Russ.).
5. Timofeeva A.S., Fedina V.V., Krakht L.N., Semin P.V., Korsun N.A. Influence of the number of overloads of burnt non-fluxed pellets on their strength and wear. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii.* 2007, no. 12, pp. 113, 114. (In Russ.).
6. Manzhosov V.K., Novikova O.D., Novikov A.A. *Teoreticheskaya mekhanika. Ch. II. Dinamika. Analiticheskaya mekhanika: uchebnoe posobie* [Theoretical mechanics. Part II. Dynamics. Analytical mechanics: Tutorial]. Ulyanovsk: UIGTU. 2011, 194 p. (In Russ.).
7. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. *Soprotivlenie materialov: uchebnik dlya vuzov* [Strength of materials: Textbook for universities]. Aleksandrov A.V. ed. Moscow: Vysshaya shkola, 2003, 560 p. (In Russ.).
8. Trofimova T.I. *Kurs fiziki: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Course of physics: Tutorial for universities]. Moscow: Akademiya, 2006, 560 p. (In Russ.).
9. Smagina A.V., Korovushkin V.V., Podgorodetskii G.S., Bizhanov A.M., Nushtaev D.V. Investigation of destruction process of the double phased iron ore pellets under external loads. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2013, no. 7, pp. 9–14. (In Russ.).
10. Smagina A.V., Korovushkin V.V., Shipko M.N., Staroverov B.A., Podgorodetskii G.S. Strength increase of oxidized pellets with the aid of magnetic-pulse treatment. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov.* 2014, no. 10, pp. 31–35. (In Russ.).
11. Korovushkin V.V., Shipko M.N., Podgorodetskii G.S., Staroverov B.A., Durov N.M., Smagina A.V. *Sposob obrabotki zhelezorudnykh okatyshei* [The treatment of iron-ore pellets]. Patent RF no. 2476607, *Byulleten' izobretenii.* 2013, no. 6. (In Russ.).
12. *GOST 24765–81. Okatyshei zhelezorudnye. Metod opredeleniya prochnosti na szhatie* [Iron-ore pellets. Definition of compression strength]. Moscow: IPK Izd-vo standartov. 2009, 7 p. (In Russ.).
13. *GOST 25471–82. Rudy zheleznye, aglomeraty i okatyshei. Metod opredeleniya prochnosti na sbrasyvanie* [Iron ores, agglomerates and pellets. Definition of drop strength]. Moscow: IPK Izd-vo standartov, 2004, 5 p. (In Russ.).
14. Abzalov V.M., Gorbachev V.A., Klein V.I., Mal'tseva V.E., Shavrin S.V. Correlation of the hardening and softening processes at burning of iron-ore pellets. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2001, no. 1, pp. 64, 65. (In Russ.).
15. Rebinder P.A. *Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh. Fiziko-khimicheskaya mekhanika. Izbrannye Trudy* [Surface conditions in dispersed systems. Physical-chemical mechanics. Selected papers]. Moscow: Nauka, 1979, 384 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The study was performed within the framework of the state task no.11.63.2014/a.

Information about the authors:

A.S. Timofeeva, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metallurgy and Metallography” (dakatulibk.ru)

T.V. Nikitchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallurgy and Metallography” (nikitchenko_t_v@lebgok.ru)

V.V. Fedina, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallurgy and Metallography” (fedinavv@mail.ru)

K.A. Eliseeva, MA Student of the Chair “Metallurgy and Metallography” (blond_7067@mail.ru)

Received August 25, 2016