

Cast iron smelting in blast furnaces with the conical charging equipment in terms of minimal coke losses

Anatoliy Golovchenko¹, Roman Dychkovskiy^{1*}, Maria Dupliak¹, Vasyl Shyshko¹, Iaroslav Shavarskiy², Edgar Cabana³

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

²JARAD Recycling Technology Sp. z o.o., Sosnica, Poland

³Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Peru

*Corresponding author: dychkovskiy.r.o@nmu.one

Abstract. The paper represents the analysis, which has helped determine the experience and trends in cast iron smelting in blast furnaces. Basing on the analysis of thermodynamic processes and practical operation of the furnaces during cast iron smelting, it can be concluded that such an environment is quite complicated for physical putting of sensors that could take into account the geometric shape of the charge. Thus, the article proposes to use the developed special devices for determining the geometrical parameters of iron smelting material in the furnace. The use of a gamma locator allows fixing the fluidized state of the charge on the furnace top bell. That makes it possible to keep almost horizontal surface on the charge after the next supply of the corresponding portion of material. The paper represents real values of parameterization of blast furnace operation. On this basis, it is proposed to adapt different ways of feeding the charge into the blast furnace to ensure more efficiently the smelting process. The economic indicators of the proposed technological solutions are given. The proposed tendencies make it possible to outline further issues to be highlighted in the following authors' studies.

Keywords: iron ore, smelting, blast furnace, conical charging, coke, economic indices

Виплавка чавуну в домнах з конусним засипним апаратом при мінімальних втратах коксу

Анатолій Головченко¹, Роман Дичковський^{1*}, Марія Дупляк¹, Василь Шишко¹, Ярослав Шаварський², Едгар Кабана³

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

²JARAD Recycling Technology Sp. z o.o., Сосніца, Польща

³Університет Св. Августина м. Арекіпи, Арекіпа, Перу

*Відповідальний автор: dychkovskiy.r.o@nmu.one

Анотація. У статті представлений аналіз наявного наукового потенціалу, досвіду та тенденцій виплавки чавуну у доменних печах. Виходячи із аналізу термодинамічних процесів та практичної роботи печей при виплавці чавуну можна зробити висновок, що фізично закласти датчики, які могли б враховувати геометричну форму залізородної маси, в таких умовах дуже важко. Так, у статті пропонується використовувати розроблені спеціальні пристрої для визначення геометричних параметрів вхідного матеріалу для виплавки чавуну у домні. Використання гамма-локатора дозволяє фіксувати псевдозрідений стан суміші на конусі доменної печі. Це дозволяє витримувати майже горизонтальну поверхню шихти після чергової подачі відповідної порції матеріалу. У роботі наведено реальні значення параметризації роботи домни. На цій основі запропоновано адаптувати різні способи подачі шихти у домну для більш ефективного забезпечення процесу плавки. Наведено економічні показники запропонованих технологічних рішень. Наведені наукові та практичні викладки дозволяють окреслити подальші дослідження, які будуть висвітлені у подальших роботах авторів.

Ключові слова: залізна руда, виплавка, доменна піч, конічна засипка, кокс, економічні показники

1. Вступ

Нині доменне виробництво чавуну та сталі є однією із складових загальносвітових тенденцій, що протікають у єдиній системі паливно-енергетичного та металургійного комплексів [1]. Воно направлено на зниження енергетичного навантаження складних технологічних процесів [2], підвищення економічної ефективності виробництва [3] та зниження екологічного забруднення від виконання технологічних процесів [4].

Важливою умовою зниження енерговитрат в доменній процесі є створення деякої нерівномірності радіального розподілу газового потоку на колоснику домни [5]. Найбільш раціональною з точки зору ефективності використання енергії газу і продуктивності домни [6]. Тут спостерігається така нерівномірність, яка характеризується більш інтенсивним газовим потоком в невеликих за площею центральній і периферійній зонах колосника [7]. Вона чітко фіксується гамма-локатором профілю поверхні шихти безпосередньо під час протікання процесу виплавки [8].

Наявність розвинутих центрального і периферійного газових потоків сприяє стабільності газодинамічного режиму домни [6]. В той же час, надмірний розвиток цих газових потоків призведе до зниження ефективності використання енергії газу [9] і, як наслідок цього, до підвищення питомих енерговитрат [10]. Найбільшу газопроникність має кокс, і тому управління радіальним розподілом газового потоку здійснюється в основному шляхом управління радіальним розподілом коксу по відношенню до рудної частини шихти (рудного навантаження на кокс Р/К) з допомогою завантажувального обладнання домни [11].

2. Методика проведення досліджень

У роботі передбачається проведення заходів, направлених на запровадження системи гамма-локації для контролю геометричних параметрів профілю шихти [12]. Для цього було виконано низку практичних досліджень, які дали можливість створити спеціальну апаратуру (гамма-локатор) та отримати авторське право щодо новизни її конструкції та технологічного виконання [13]. Їхній технічний склад та способи застосування викладено у різних друкованих працях, аналіз яких досить повно наведено у роботі [14].

Для вибору математичної моделі опису процесів у доменній печі слід враховувати весь комплекс геомеханічних, термічних та технологічних факторів, що протікають під час трансформації залізорудної сировини [6]. Температурні залежності фізико-механічної зміни температурного поля в зоні виплавки чавуну призводить до утворення області, де ці характеристики зазнають неоднорідного розподілу [15]. Крім цього, термічні деформації виникнуть внаслідок теплового розширення, що досить ґрунтовно описано у багатьох згаданих у цій статті роботах. Крім цього дані динамічні процеси вивчені та підтверджені при виконанні досліджень за допомогою спеціального приладу розроблено міжнародним авторським колективом [16]. У сукупності усі ці фактори стають основою при формуванні термонапруженого стану в межах шихти в доменній печі [6]. Аналіз попередніх досліджень показав, що перераховані особливості геомеханічних процесів можна розглядати адекватно лише в межах постійної моделі неоднорідної маси [17]. Таким чином, для досліджень використано просторову континуальну нелінійну модель [19]. Відповідно до цієї моделі, шихта моделюється як еластично-пластичне середовище із порожниною, що має обплавлену оболонку [20]. Стан напруження та га параметри оболонки описаний за допомогою теорії пластичних деформацій. Автор пропонують виважати дані процеси через закон Дюамеля-Неймана [21].

3. Результати та обговорення

3.1. Управління радіальним розподілом шихтових матеріалів

Проблема управління радіальним розподілом шихтових матеріалів за даними радіального газорозподілу полягає в значному запізненні регулюючих дій через поступове формування відповідної структури стовпа шихти як вирішального чинника процесу формування газового потоку. Це запізнення може бути причиною недостатньої ефективності управління радіальним розподілом шихти при нестабільному газодинамічному режимі домни. Тому забезпечення високої ефективності управління радіальним розподілом шихти можливе за рахунок використання упереджувальних регулюючих дій. Потреба в такому управлінні зростає в міру зменшення питомих витрат коксу як важливого фактору впливу на газопроникливість шихти і стабільність газодинамічного режиму домни.

3.1.1. Використання гама-локатора для формування профіля поверхні шихти на колоснику домни

На основі проведеного аналізу щодо моделювання термодинамічних процесів та практичної роботи домен під час виплавки чавуну можна зробити висновок, що дуже складно у такому середовищі фізично закласти датчики, котрі могли б враховувати геометричну форму шихти. Саме тому, автором було розроблено спеціальні пристрої які на основі радіаційної проникності дають можливість встановлювати точки геолокації тіл різного агрегатного стану. Оперативні можливості гама-локації поверхні в дозволяють зафіксувати на колоснику домни псевдозріджений стан шихти – виникнення практично горизонтальні поверхні на колоснику після чергової подачі відповідної порції шихти.

Дослідження показали, що під час керованості роботи домни найбільшим важливим практичним результатом стало зменшення питомих витрат коксу до 10 % та збільшення виробництва чавуну в приблизно в такій же мірі. Крім цього, такий підхід має суттєве соціальне значення оскільки вирішує питання мотивації персоналу, підвищення ефективності праці, забезпечення норм охорони праці та промислової санітарії.

Як було зазначено, автор даної роботи має безпосереднє відношення до створення і експлуатації гама-локатора профілю і рівня поверхні шихтових матеріалів на колоснику домен об'ємами 1386 м³ і 2002 м³. Дані роботи проводилися починаючи з кінця 80-х початку 90-х років минулого сторіччя. Кінцевою метою використання гама-локатора був пошук умов існування ефекту самостабілізації воронки на поверхні шихти і центрального газового потоку при використанні в системі завантаження домни максимально можливої кількості так званих прямих подач по типу ААКК↓ або РРКК↓ (А – ківш агломерату, Р – ківш рудних матеріалів, К – ківш коксу).

3.1.2. Використання гама-локатора для формування профіля поверхні шихти на колоснику домни

Слід відзначити, що використання гама-локатора профілю поверхні шихти при виплавці чавуну не було постійним. Через декілька років інтенсивних досліджень автори даної статті припинили використовувати цей прилад. Але при цьому слід відзначити, що перед цим вдалось встановити досить важливі взаємозалежності процесу накопичення продуктів плавки та процесу формування рельєфу поверхні шихти на колоснику домни.

Найбільш складним етапом використання цієї взаємозалежності співпадав часі з дуже низькими техніко-економічними показниками роботи домни. Основним механізмом технологічного процесу в таких випадках було використання найбільш раціональної

комбінації ковпів агломерату і коксу на кожному етапі завантаження. В ідеалі, найбільш економічно вигідними є завантаження домни прямими подачами типу ААКК↓. В таких випадках витрати теплової енергії коксу мінімальні, і тому питомі витрати коксу також мінімальні. Але завантаження такими подачами, як правило, досить ризиковане, якщо це відбувається без дуже відповідального використання раніше виявленої закономірності.

Економічно не вигідним зазвичай є завантаження домни зворотними подачами типу ККАА↓, коли відбувається доволі інтенсивний процес охолодження стовпа шихти та відповідне збільшення питомих витрат коксу. Ще гірша ситуація відбувається, коли через технічні причини чи поломки на домні доводиться завантажувати подачі типу КА↓ або АК↓.

В реальності, коли поставлена задача суттєво скоротити витрати коксу, зазвичай намагаються використовувати максимально можливу кількість прямих подач ААКК↓ в комбінації з нейтральними подачами КААК↓. Співвідношення цих подач вибирають в залежності від процесу формування стовпа шихти в домні і обов'язково в залежності від часу випуску чавуну. При цьому розподіл шихтових матеріалів на колоснику домни, у тому числі в процесі опускання шихтових матеріалів у стовпі шихти, суттєво залежить від ступеню накопичення чавуну).

3.2. Наукові та практичні результати при формуванні поверхні шихти

Наукова проблема енергозберігаючого управління радіальним розподілом шихти в домні полягала у необхідності врахування значної динамічності змін параметрів рельєфу поверхні шихти як найбільш важливих факторів впливу на цей розподіл. Це обумовлювало обмежені можливості формування упереджувальних дій в разі відсутності засобів контролю рельєфу поверхні коксорудної суміші [22].

Вирішення зазначеної наукової проблеми пов'язано із функціонуванням складних техніко-технологічних систем, що передбачають створення надійних засобів контролю рельєфу поверхні шихти в умовах діючої домни. Це вимагає проведення експериментальних досліджень та встановлення основних закономірностей процесів формування стовпа шихти і газового потоку у термічному тілі домни Далі, на цих підходах та дослідженнях необхідно обґрунтувати принципи автоматичного управління радіальним розподілом шихти.

Основна ідея роботи полягає в запропонованій концепції формування попереджувальних регулюючих дій на радіальний розподіл шихтових матеріалів і газового потоку з використанням параметрів рельєфу поверхні цих матеріалів, як важливого проміжного фактору доменного процесу, що одночасно характеризує цей процес і суттєво впливає на нього. Основне наукове положення даної роботи – енергозберігаюча технологія доменної плавки на основі попереджувального управління радіальним розподілом шихти і газового потоку.

У результаті автором було отримано наступні найбільш важливі наукові результати цих досліджень:

- вперше обґрунтовані радіоізотопні методи оперативного контролю розподілу шихти на колоснику домни, які забезпечують своєчасне формування управляючих дій в напрямку стабілізації газового потоку.

- виявлена невідома раніше закономірність формування поверхні шихти на колоснику діючої домни, яка полягає в тому, що глибина воронки на цій поверхні змінюється головним чином в процесі завантаження цих матеріалів, а не в процесі опускання стовпа матеріалів після їх завантаження;

- виявлена невідома раніше закономірність формування поверхні шихти на колоснику діючої домни, яка полягає в тому, що глибина воронки на цій поверхні

змінюється головним чином в процесі завантаження цих матеріалів, а не в процесі опускання стовпа матеріалів після їх завантаження;

– вперше експериментально підтверджена можливість існування ефекту самостабілізації рельєфу поверхні шихти і газового потоку в діючій домні при використанні енергозберігаючої системи завантаження і визначені причини порушення цього ефекту, головною з яких є зниження газопроникності стовпа шихтових матеріалів.

У фізичному вираженні це передбачало розробку та впровадження технологічної схеми, котра досить детально описано у роботах [6]. Удосконалену модель процесу завантаження шихти та радіального розподілу потоку газу наведено на рис. 1.

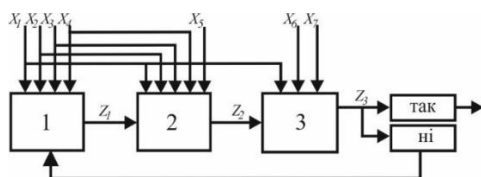


Рисунок 1. Модель процесу завантаження шихти у домні та радіального розподілу потоку газу

За основу досліджень взято наступні вхідні та вихідні дані:

- X_1 – рівень заповнення домни (м);
- X_2 – маса подачі шихти при кожному опусканні великого конуса (т);
- X_3 – відносна кількість гранул в шихті (%), і/чи рудне навантаження (т руди/т коксу, середній вміст в шихті);
- X_4 – показник заповнення з присвоєнням йому відповідного порядкового номера системи;
- X_5 – рудне навантаження в процесі спуску шихти у домну (маса руди на тону чавуну);
- X_6 – ступінь незаповнення доменної печі (%);
- X_7 – кінетична енергія при виплавці (кгс·м/с);
- Z_1 – об'ємний рівень центрального газового потоку (м³);
- Z_2 – рудне навантаження коксу в центральній зоні колосникової решітки;
- Z_3 – ступінь центрального газового потоку в доменній печі.

Узагальнені величини основних технологічних параметрів для формування колони навантаження представлено в таблиці 1.

Таблиця 1. Основні досліджувані параметри технологічного циклу формування колони навантаження

№ п/п	Параметри	Величина
1.	Z_1 , м ³	2,39
2.	Z_2 , (рудне навантаження, т руда/т коксу, у центральній зоні колосника)	4,01
3.	Z_3 , (безрозмірна величина)	0,95
4.	X_1 , м	0,72
5.	X_2 , т	114
6.	X_3 , % (рудне навантаження, т руда/т коксу, усереднені значення)	47,1 (3,81)
7.	X_4 , (безрозмірна величина)	12-19
8.	X_5 (маса руди/тонна заліза)	0,83
9.	X_6 , %	0,89
10.	X_7 , кгс·м/с	3100

4. Висновки

Проектування ефективної роботи доменних печей в технологічному циклі завантаження шихти з урахуванням радіального розподілу газу неможливе без становлення термічних напружень та деформаційних характеристик що протікають у високотемпературному киплячому шарі. Проведений аналіз літературних та патентних джерел показує, що нині немає достатньо ефективних способів формування необхідної форми геометричної поверхні залізородного шару. Також не достатньо опрацьовані питання застосування різнотипних датчиків для фіксації геометричних точок поверхні завантаженої суміші.

Для цього було створено спеціальний геолокатор, який за допомогою радіоактивної проникності дає можливість проходити через доменні стіни та досягати безпосередньо тіла шихти. Це дало можливість обґрунтувати методику та параметри термодинамічних моделей для дослідження напруженого стану киплячого шару залізokokсової суміші при виплавці чавуну.

У рамках укладених договорів з металургійними заводами та виконаними роботами із ведення доменної плавки за умови стабілізації газодинамічного режиму домни підтверджено правильність теоретичних викладок. Практичними дослідженнями, встановлено, що при системах подачі, які жорстко прив'язані у часі з накопиченням та випуском чавуну на основі математичного моделювання процесів формування стовпа шихти і газового потоку є можливість за допомогою гамма локації суттєво підвищити ефективність роботи домни. Такі роботи були проведено в основному для комбінації максимальної кількості прямих подач ААКК↓ з нейтральними подачами КААК↓, що є основою самостабілізації глибини воронки і газового потоку і мінімізації втрат теплової енергії.

In memoriam of *Anatoliy Golovchenko* / Світлої пам'яті *Анатолія Головченка*

Робота містить дослідження, які було проведено у рамках гранту No 0117U001127 (фінансується МОН України) та Dubrovnik International ESEE Mining School (проект у рамках європейської програми EIT Raw Materials).

Література

1. Pivnyak, G., Razumny, Y., & Zaika, V. (2009). The problems of power supply and power saving in the mining industry of Ukraine. *Archives of Mining Sciences*, (54), 5-12.
2. Buzylo, V., Pavlychenko, A., Savelieva, T., & Borysovska, O. (2018). Ecological aspects of managing the stressed-deformed state of the mountain massif during the development of multiple coal layers. *E3S Web of Conferences*, 60, 00013. <https://doi:10.1051/e3sconf/20186000013>
3. Malanchuk, Z., Moshynskyi, V., Malanchuk, Y., & Korniienko, V. (2018). Physico-Mechanical and Chemical Characteristics of Amber. *Solid State Phenomena*, (277), 80-89. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.277.80>
4. Pedchenko, L., Nyemchenko, K., Pedchenko, N., & Pedchenko, M. (2018). Use of alternative energy sources to improve the efficiency of natural gas hydrate technology for gas offshore deposits transportation. *Mining of Mineral Deposits*, 12(2), 122-131. <https://doi.org/10.15407/mining12.02.122>
5. Thomas, H. R., Hosking, L. J., Sandford, R. J., Zagorščak, R., Chen, M., & An, N. (2019). Deep Ground and Energy: Carbon Sequestration and Coal Gasification. *Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics*, (1), 38-60. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2221-1_2
6. Golovchenko, A. (2020). Some aspects of the control for the radial distribution of burden material and gas flow in the blast furnace. *Energies*, 13(4), 923-926 <https://doi.org/10.3390/en13040923>
7. Golovchenko A.S. (2000). Declarative patent of Ukraine # 31478. The Way of Blast Furnace Melting Conducting. *Bulletin of Inventions*, # 7-11

8. Golovchenko, A., Pazynich, Yu., Potempa, M. (2018). Automated Monitoring of Physical Processes of Formation of Burden Material Surface and Gas Flow in Blast Furnace. *Solid State Phenomena*, (277), 54-65. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.54>
9. Golovchenko A.S. Declarative patent of Ukraine (2000). # 31479. The Device for Determination of Level and Profile of Materials Surface. *Bulletin of Inventions*, # 7-11
10. Dychkovskiy, R.O. (2015). Determination of the rock subsidence spacing in the well underground coal gasification. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 30-36.
11. Mallett, C., Zhang, J. (2017). Gasifier face advance in underground coal gasification. *Coal-Energy, Environment and Sustainable Development*, PCC.
12. Pivnyak, G., Dychkovskiy, R., Bobyliov, O., Cabana, E. C., & Smoliński, A. (2018). Mathematical and Geomechanical Model in Physical and Chemical Processes of Underground Coal Gasification. *Solid State Phenomena*, (277), 1-16. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.277.1>
13. Perkins, G., du Toit, E., Cochrane, G., & Bollaert, G. (2016). Overview of underground coal gasification operations at Chinchilla, Australia. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(24), 3639-3646. <https://doi.org/10.1080/15567036.2016.1188184>
14. Smoliński, A., Howaniec, N., & Bąk, A. (2018). Utilization of Energy Crops and Sewage Sludge in the Process of Co-Gasification for Sustainable Hydrogen Production. *Energies*, 11(4), 809. <https://doi.org/10.3390/en11040809>
15. Ge, S. (2017). Chemical mining technology for deep coal resources. *Zhongguo Kuangye Daxue Xuebao/Journal of China University of Mining and Technology*, 46(4), 679-691
16. Chernai, A.V., Sobolev, V.V., Chernai, V.A., Ilyushin, M.A., Dlugashek, A. (2003). Laser ignition of explosive compositions based on di-(3-hydrazino-4-amino-1,2,3-triazole)-copper(II) perchlorate. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 39(3), 335-339
17. Dychkovskiy, R.O. (2015). Forming the bilayer artificial shell of georeactor in underground coal gasification. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 37-42.
18. Pivnyak, G., Dychkovskiy, R., Bobyliov, O., Cabana, C.E., Smoliński, A. (2018). Mathematical and Geomechanical Model in Physical and Chemical Processes of Underground Coal Gasification. *Solid State Phenomena*, (277), 1-16. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277>
19. Falshtynskiy, V.S. (2017). Formation of thermal fields by the energy-chemical complex of coal gasification. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 36-42.
20. Tabachenko, M. (2016). Features of setting up a complex, combined and zero-waste gasifier plant. *Min. Miner. Depos.*, 10(3), 37-45. <https://doi.org/10.15407/mining10.03.037>
21. Pazynich, Y., Kolb, A., & Potempa, M. (2017). Implementation of Energy Safety Policy in Ukraine by Means of Energy Saving in Electric Drive Systems. *Advanced Engineering Forum*, (25), 96-105. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/aef.25.96>
22. Golovchenko A.S. (2000). Declarative patent of Ukraine # 37426. The method of determining the distribution of materials in the blast furnace. *Bulletin of Inventions*, # 7-21