

Мамешин В.С., Журавльова С.В.

## СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА ЧОРНИХ МЕТАЛІВ

Mameshin V., Zhuravlova S.

### MODERN CONDITION AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF ALTERNATIVE PROCESSES OF THE FERROUS METALLURGY

До теперішнього часу розроблена значна кількість альтернативних процесів одержання чорних металів, які різняться як за принципами дії, так і конструктивною компоновкою агрегатів.

У загальному вигляді «альтернативні» процеси виробництва чорних металів можна поділити на 4 групи.

Процеси першої групи (виробництво заліза прямого відновлення в агрегатах твердофазного відновлення з переробкою його в електродугових печах), базуються на використанні для відновлення різних газів (CO, H<sub>2</sub> або їх суміші) або твердого вугілля й у залежності від цього вони мають різні принципи роботи й конструктивне оформлення. Домінуючі позиції у світовому виробництві металізованої сировини займають шахтні процеси твердофазного відновлення які базуються на використанні відновних газів. Це пов'язано з простотою конструкції цих установок, надійністю їх роботи та низьким вмістом шкідливих домішок (S,P) у металізованій продукції, оскільки відсутній контакт між окатишами та вугіллям. Сутність процесів другої групи (виробництво вуглецевого напівпродукту в агрегатах рідкофазного відновлення з переробкою його в кисневих конверторах) полягає у відновленні залізистих матеріалів енергетичним вугіллям при температурах 1400-1600°C з одержанням рідкого вуглецевого напівпродукту близького по хімічному складу до передільного чавуну. У якості шихти процеси цієї групи можуть використовувати, як частково відновлені залізородні матеріали (процеси Corex, Finex Tecnoled та ін.) так і сиру залізну руду ( процеси Hismelt, Romelt, Ausiron).

Розробки процесів прямого одержання сталі з руди (3-я група) у цей час спрямовані на переробку залізистих відходів (шламів, окалина, руда) у сталь. Прикладами можуть слугувати: процес струйно-емulsionної рафінування, одержання високовуглецевої сталі в ротаційних похилих печах або перспективні процеси прямого електролізу залізної руди МОЕ розробка яких перебуває на початкових етапах лабораторних досліджень. Безперервні процеси виробництва сталі з рідкого чавуну (4-а група) внаслідок складностей у керуванні безперервним технологічним процесом, високої витрати вогнетривів, низьких економічних показників і, найголовніше, появи й бурхливого росту процесів позапальної обробки сталі, безперервні процеси не змогли скласти конкуренцію киснево-конверторним процесом і в цей час практично не застосовуються. Ключові слова: ПРЯМЕ ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗА, ТВЕРДОФАЗНЕ ВІДНОВЛЕННЯ, РІДКОФАЗНЕ ВІДНОВЛЕННЯ, ПРЯМЕ ОДЕРЖАННЯ СТАЛІ, БЕЗПЕРЕРВНІ ПРОЦЕСИ ВИРОБНИЦТВА СТАЛІ

Nowadays a significant number of alternative processes of ferrous metals production have been developed, it differs in the principles of operation, as well as the design arrangement of the aggregates. In general, "alternative" processes of ferrous metals production can be divided into 4 groups. The processes of the first group (the production of sponge iron in direct reduction units with remelting in electric arc furnaces) are based on the use of reduction gases (CO, H<sub>2</sub> or a mixture of them) or coal for the reduction. Depending on this, they have different principles of work and design. Shaft processes of direct reduction, based on the use of reduction gases, have the dominant positions in the global production of HBI. This is due to the design simplicity of these units, the reliability of their work and the low content of harmful impurities (S, P) in the products. The principle of the processes of the second group (production of carbon semi-products in smelting reduction units with blowing in BOF) involves the reduction of iron ore with power-generating coal at temperatures of 1400-1600 °C and obtaining hot metal. The processes of this group can use as a charge partially reduced iron ore materials (Corex processes, Finex, Tecnoled, etc.), as well as raw iron ore (processes Hismelt, Romelt, Ausiron). More than forty processes in various countries have been developed and tested to substitute blast furnace process. Currently, there are 7 Corex units in the world (2 - China, 4 - India, 1 - South Africa) with a total annual productivity of about 7 million tons; 3 Finex units (2 in Korea, 1 in India) with an annual productivity of about 3.5 million tons. The development of processes for the direct production of steel from iron ore (the third group) is currently focused on the processing of iron-containing waste (sludge, scale, dust iron ore) to crude steel. Examples include: the process of jet-emulsion refining, production of high carbon steel in rotary inclined furnaces or perspective direct electrolysis processes of iron ore (MOE), the development of which is at the initial stages of laboratory research. Continuous processes for the production of crude steel from hot metal (the fourth group), due to difficulties in controlling a continuous process, high consumption of refractories, low economic indexes and, most importantly, the rapid growth of ladle treatment of steel, could not compete with the LD-process and are currently hardly used. It should be said about the prospects of the considered alternative processes for the ferrous metals production. The processes of direct reduction have proven their competitiveness, the prospects of their development is determined by the need of electric steelmaking in high-quality metal charge. At the moment smelting reduction processes of ferrous metals production are not the real competitors to BF process and so far they should be considered only as an addition to it. However, if the price of metallurgical coke continues to grow, then the further spread of smelting reduction processes is possible. The processes of the third group are directed to the utilization of iron-containing metallurgical wastes and dust iron ores, but the development of majority of these processes is on its initial stages, their prospects will be determined by economic efficiency. Continuous steelmaking processes with use of hot metal as a charge could not clearly prove their superiority to the well-known steelmaking processes, at this stage their prospects are rather doubtful.

Keywords: DIRECT REDUCTION, SMELTING REDUCTION, DIRECT PRODUCTION OF STEEL, CONTINUOUS STEELMAKING PROCESSES

У сучасній світовій практиці виробництві рідкої сталі загальноприйнятими є дві основні технологічні схеми, які можна назвати «класичними». Перша з них, базується на виробництві рідкого чавуну

в доменній печі з подальшою переробкою його в сталь у конвертері, а друга - виробництві сталі з твердої металошихти (брухту) в електропечі.

Ці схеми пройшли більш ніж 150 річний шлях розвитку від перших патентів до добре технологічно відпрацьованих, сучасних промислових агрегатів. Введення у виробництво нових промислових потужностей та безперервна оптимізація існуючих дозволяє нарощувати обсяги виробництва чавуну й сталі: так, згідно даним Світової Асоціації сталеплавильників, [1] виробництво чавуну в 2017 році склало 1 млрд. 180 млн т, а сталі 1 млрд. 689 млн т., при цьому у 2000 вони, відповідно, склали 577 млн т та 847.6 млн т [2], таким чином збільшення обсягів виробництва як чавуну так й сталі склало приблизно 100 %.

Однак наявність непереборних обмежень у цих технологічних схемах таких, як: неможливість повної відмови від коксу в доменному процесі, значні втрати заліза в киснево-конвертерному процесі, проблеми з кумулятивним зростанням концентрації домішок кольорових металів в брухті електросталеплавильного виробництва призвело до відновлення інтересу металургів до, так званих, «альтернативних» процесів виробництва чорних металів, які дозволяють оминати або зменшити шкідливий вплив цих обмежень.

Якщо відкинути історичний аспект розвитку процесів прямого відновлення заліза (час коли залізни та сталеві вироби виготовляли сиродутним способом) то початок розробки альтернативних процесів відносять до XIX сторіччя (патенти проф.

Чернова Д.К). Однак у той час вони не викликали практичного інтересу й перша промислова установка, що працювала за способом Віберга, була побудована у Швеції, лише в 1932 р. [3].

Більш інтенсивно альтернативні процеси почали розроблятися в 60-х роках XX сторіччя у зв'язку з енергетичною кризою і більш жорсткими екологічними вимогами. Крім цього, істотну роль зіграв перехід на концепцію металургійних міні-заводів, які вимагають чисту по кольоровим металам металошихту.

До теперішнього часу розроблена значна кількість альтернативних процесів одержання чорних металів, які різняться як за принципами дії, так і конструктивною компоновкою агрегатів. У загальному вигляді «альтернативні» процеси виробництва чорних металів можна поділити на 4 групи (рис. 1.):

Процеси першої групи, базуються на використанні для відновлення різних газів (CO, H<sub>2</sub> або їх суміші) або твердого вугілля й у залежності від цього вони мають різні принципи роботи й конструктивне оформлення.

Станом на 2017 рік світовий обсяг виробництва заліза прямого відновлення різними способами склав 87.1 млн. т.[4]. У таблиці наведені основні процеси, що використовують для виробництва металізованої сировини (металізовані окатиші, металевий порошок або губка), види відновлювача, що використовують, й частка цих процесів у світовому виробництві [4].

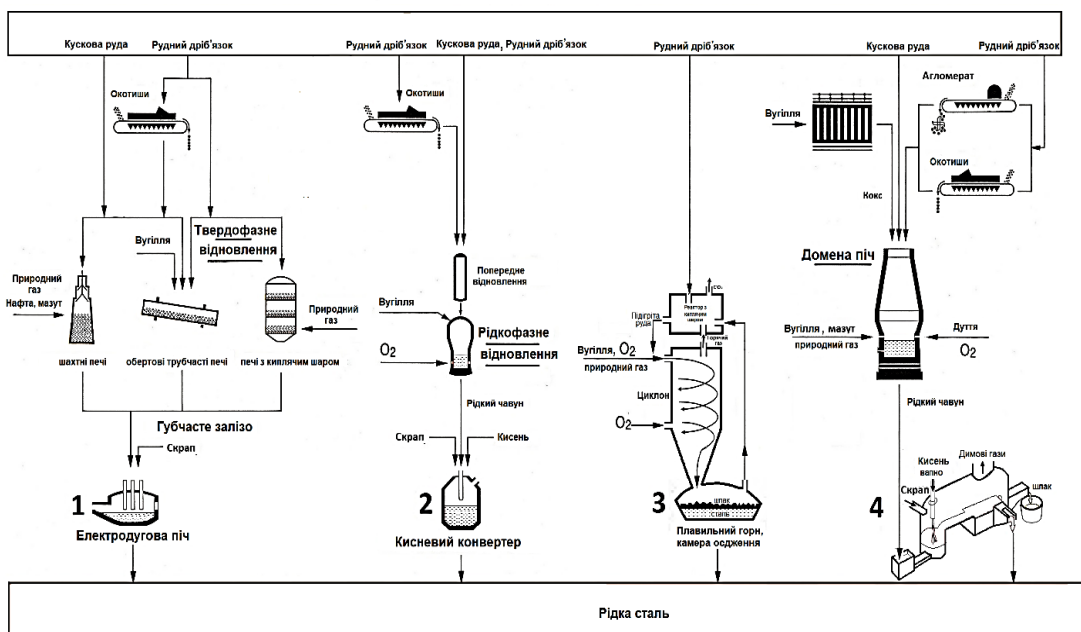


Рисунок 1. Альтернативні схеми виробництва чорних металів

1 - виробництво заліза прямого відновлення в агрегатах твердофазного відновлення з переробкою його в електродугових печах; 2 - виробництво вуглецевого напівпродукту в агрегатах рідкофазного відновлення з переробкою його в кисневих конверторах; 3 - пряме одержання сталі, з руди; 4 - переробка рідкого чавуну в сталеплавильних агрегатах безперервної дії.

Таблиця 1 Основні процеси твердофазного відновлення заліза

Відновлювач	Відновлення газом			Відновлення вугіллям
	Шахтні печі		Печі з киплячим шаром	Обертові трубні печі й печі з обертовим подом
Тип агрегату	Midrex	HYL, Energron	Fior, Finemet, Cirored і ін.	SL/RN, DRC, Iron Dynamics, Fastmet і ін.
Назва процесу				
Установки всього	93	27	6	28
- діючі	76	18	4	24
- у стадії спорудження	7	1	0	0
- законсервовані	10	8	2	4
Частка процесу у світовому виробництві металізованого сировини, %	64,81	16,85	0,72	17,62

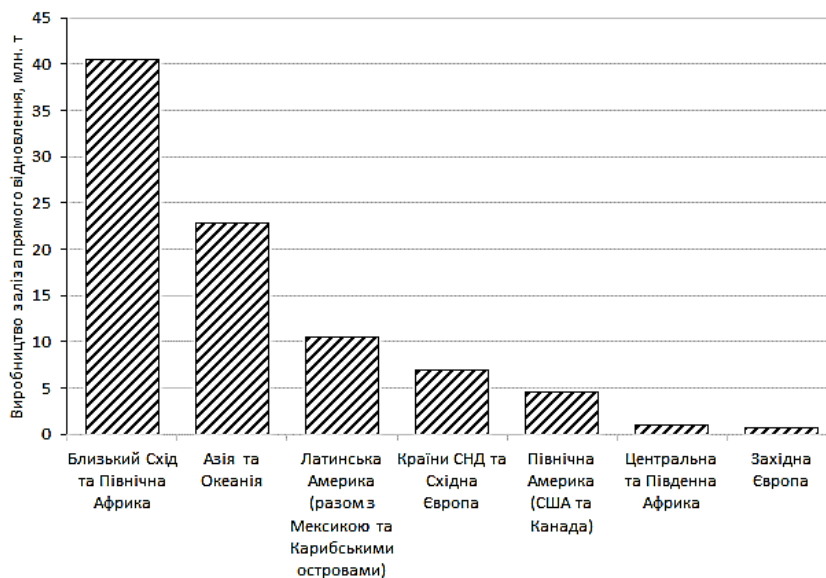


Рисунок 2. Виробництво заліза прямого відновлення по регіонах світу у 2017 р.

Як бачимо з таблиці 1 домінуючі позиції у світовому виробництві металізованої сировини займають шахтні процеси твердофазного відновлення які базуються на використанні відновних газів. Це пов'язано з простотою конструкції цих установок, надійністю їх роботи та низьким вмістом шкідливих домішок (S,P) у металізованій продукції, оскільки відсутній контакт між окатишами та вугіллям.

Найбільше поширення процеси прямого відновлення одержали в країнах, що володіють, у першу чергу, дешевими енергоресурсами.

Необхідно відзначити, що за останні 50 років виробництво заліза прямого відновлення зросло більш ніж у 100 разів, а з 2000 року воно збільшилося в 1,98 раз. У першу чергу це пов'язане з ростом частки електросталеплавильного виробництва й нестачею якісного металобрухту, що використовують в якості сировини в електродугових печах.

Сутність процесів другої групи полягає у відновленні залізовмісних матеріалів енергетичним вугіллям при температурах 1400-1600°C з одержанням рідкого вуглецевого напівпродукту близького по хімічному складу до передільного чавуну.

У якості шихти процеси цієї групи можуть використовувати, як частково відновлені залізородні

матеріали (процеси Corex, Finex TecnoRed та ін.) так і сирі залізну руду ( процеси Hismelt, Romelt, Ausiron).

Загалом, у різних країнах світу було розроблено й випробувано більш сорока процесів, призначених для заміни доменної плавки. У таблиці 2 [5,6] наведені процеси рідкофазного відновлення втілені у вигляді демонстраційних установок або знайшли промислове застосування.

У теперішній час у світі діє 7 установок Corex ( 2 - Китай, 4 - Індія, 1 - ПАР) сумарною річною продуктивністю близько 7 млн т, 3 установки Finex (2 у Кореї 1 в Індії) річною продуктивністю близько 3,5 млн т.

Ранні розробки процесів прямого одержання сталі з руди (3-я група) проходили в 60-80 роки минулого століття. До них відносяться процеси Циклосталь, киплячого шлакового шару (КШС), Руда-Сталь і деякі інші. Однак жоден з них не дійшов до стадій промислового впровадження. Це було пов'язане із проблемами як зі стійкістю футеровки, так і недостатніми техніко-економічними показниками процесів.

Таблиця 2. Основні процеси рідкофазного відновлення

Процес	Руда	Відновнийий агент	Вид газифікатора	Продуктивність	Статус установки
Corex	Кускова	Кусковий	O <sub>2</sub>	До 1,5 млн. т/рік	Промислова
Finex	Дрібна	Кусковий	O <sub>2</sub>	До 1,5 млн. т/рік	Промислова
Hismelt	Дрібна	Вугільний дріб'язок	Повітря	0,8 млн. т/рік	Демонстраційна
Dios Process	Дрібна	Вугільний дріб'язок	O <sub>2</sub>	500 т/сут	Демонстраційна
Romelt	Дрібна	Вугільний дріб'язок	O <sub>2</sub>	45 т/ч	Демонстраційна
Ausiron	Дрібна	Вугільний дріб'язок	O <sub>2</sub>	2 т/ч	Демонстраційна
Tecnored	Окатиші	Кокс, вугілля	O <sub>2</sub>	75000 т/рік	Демонстраційна

Незважаючи на це, розробка процесів прямого одержання сталі не припиняється. У цей час вони спрямовані на переробку залізвмісних матеріалів (шламів, окалина, руда) у сталь.

Прикладами можуть слугувати: процес струйно-емульсійного рафінування (СЕР) [7-9] або одержання високовуглецевої сталі в ротаційних похилих печах [10-12].

Також до процесів даної групи можна віднести перспективні процеси прямого електролізу залізної руди МОЕ [13,14] розробка яких перебуває на початкових етапах лабораторних досліджень.

Безперервні процеси виробництва сталі з рідкого чавуну базуються на ідеї поділу технологічного процесу на окремі ланки й створення оптимальних умов протікання в кожній з ланок. Вони були випробувані, у тому числі й вигляді промислових установок з різним конструктивним й технологічним оформленням. Це були багатостадійні агрегати з пошаровим розташуванням металу й шлаків (САНД конструкції MICiC), емульсійні процеси (агрегат IRSID, ДМетI), агрегати струминного рафінування (агрегат BISRA) і т.п. [15].

Однак, внаслідок складностей у керуванні безперервним технологічним процесом, високої витрати вогнетривів, низьких економічних показників і, найголовніше, появи й бурхливого росту процесів позапічної обробки сталі, безперервні процеси не

зміogli скласти конкуренцію киснево-конверторним процесом і в цей час практично не застосовуються.

У якості висновків слід сказати про перспективність розглянутих «альтернативних» процесів виробництва чорних металів. Процесів твердофазного відновлення довели свою конкурентоспроможність і перспективність їх розвитку визначається потребою електросталеплавильного виробництва у високоякісній первородної металошихті.

Рідкофазні процеси виробництва чорних металів, на даний момент, складно вважати реальними конкурентами доменному процесу й поки їх варто розглядати лише як доповнення до неї. Однак якщо тенденція росту ціни на металургійний кокс збережеться, то можливо більш широке поширення рідкофазних процесів

Процеси третьої групи, зараз, являють інтерес, як спрямовані на утилізацію залізвмісних металургійних відходів і пиловатих руд, однак розробка більшості таких процесів перебуває на початкових стадіях, їх перспектива будуть визначатися економічною ефективністю.

Безперервні процеси виробництва сталі з рідкого чавуну не зміogli явно довести свої переваги перед «класичними» сталеплавильними агрегатами й на даному етапі їх перспективи досить сумнівні.

#### Бібліографічний список

1. World steel in figures 2018 - World Steel Association, Brussels, Belgium 2017 - 30.p.
2. World steel in figures 2002 - World Steel Association, Brussels, Belgium 2003 - 24.p.
3. Безкоксва металурія заліза / В. П. Іващенко, О. Г. Величко, В. С. Терещенко, В. А. Чеченєв//. - Д. : РВА "Дніпро-ВАЛ", 2003. - 338 с.
4. World direct reduction statistics 2017 - Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A. May, 2018 - 16.p.
5. Х.-Б. Люнген, К. Кноп, Р. Стеффен Современное состояние процессов прямого и жидкофазного восстановления железа // Черные металлы. – 2007. - № 2. С.13-26.
6. В.-П. Кепплингер Современное состояние процессов жидкофазного восстановления железа // Черные металлы. – 2010. - № 1. С.19-29.
7. В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, А.А. Оленников, А.М. Огнев Мини-металлургия полного цикла на основе процесса СЭР – от руды до стали // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2014. - № 2(8). С.6-13.
8. Цымбал В. П., Мочалов С. П., Калашников С. Н. Модели и механизмы самоорганизации в технике и технологиях. В 3 ч.: Ч. III: Примеры реализации идей и принципов синергетики: учеб. пособие / под редакцией В. П. Цымбала. – Новокузнецк: СибГИУ, 2005. –264 с.
9. Процесс СЭР - металлургический струйно-емульсионный реактор /под ред. В. П. Цимбала; - Москва : Металлургияиздат, 2014. - 487 с.
10. С. Л. Ровин Исследование работы ротационных наклоняющихся плавильных печей //Наука и техника. – 2016. - № 1. Т. . С.18-28.
11. Восстановление оксидов железа в ротационных печах / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин, Т. М. Заяц // Литье и металлургия. - 2011. № 1. С. 38–45.

12. Ровин С. Л. Использование ротационных печей для рециклинга железосодержащих отходов // Литье и металлургия. - 2014. № 1. С. 56–61.

13. Dihua Wang, Andrew J. Gmitter, Donald R. Sadoway Production of Oxygen Gas and Liquid Metal by Electrochemical Decomposition of Molten Iron Oxide// Journal of The Electrochemical Society, - 2011. № 6 (158). С. 51–64. DOI: 10.1149/1.3560477

14. Antoine Allanore Features and Challenges of Molten Oxide Electrolytes for Metal Extraction //Journal of The Electrochemical Society, - 2015. № 1 (162). С. 13–22. DOI: 10.1149/2.0451501jes

15. Технология и установки непрерывного способа производства стали. / В. И. Баптизманский, И. В. Лысенко, Ю.С. Паниотов, Ю.Н. Яковлев, Л.Ф. Мазов // К.: Техніка, 1978. – 192с.

#### Reference

1. World steel in figures 2018 - World Steel Association, Brussels, Belgium 2017 - 30.p.
2. World steel in figures 2002 - World Steel Association, Brussels, Belgium 2003 - 24.p.
3. Bezkoksova metalurgiya zaliza / V. P. Ivashenko, O. G. Velichko, V. S. Tereshenko, V. A. Chechenyev// - D. : RVA "Dnipro-VAL", 2003. - 338 с.
4. World direct reduction statistics 2017 - Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A. May, 2018 - 16.p.
5. H.-B. Lyungen, K. Knop, R. Steffen Sovremennoe sostoyanie processov pryamogo i zhidkofaznogo vosstanovleniya zheleza // Chernye metally. – 2007. - № 2. S.13-26.
6. V.-P. Kepplinger Sovremennoe sostoyanie processov zhidkofaznogo vosstanovleniya zheleza // Chernye metally. – 2010. - № 1. S.19-29.
7. V.P. Cymbal, S.P. Mochalov, A.A. Olennikov, A.M. Ognev Mini-metallurgiya polnogo cikla na osnove processa SER – ot rudy do stali // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrialnogo universiteta. – 2014. - № 2(8). S.6-13.
8. Cymbal V. P., Mochalov S. P., Kalashnikov S. N. Modeli i mehanizmy samoorganizacii v tehnikе i tehnologiyah. V 3 ch.: Ch. III: Primery realizacii idej i principov sinergetiki: ucheb. posobie / pod redakciej V. P. Cymbala. – Novokuzneck: SibGIU, 2005. –264 s.
9. Process SER - metallurgicheskij strujno-emulsionnyj reaktor /pod red. V. P. Cimbala; - Moskva : Metallurgizdat, 2014. - 487 s.
10. S. L. Rovin Issledovanie raboty rotacionnyh naklonyayushihnya plavilnyh pechej //Nauka i tehnika. – 2016. - № 1. T. . S.18-28.
11. Vosstanovlenie oksidov zheleza v rotacionnyh pechah / S. L. Rovin, L. E. Rovin, T. M. Zayac // Lite i metallurgiya. - 2011. № 1. S. 38–45.
12. Rovin S. L. Ispolzovanie rotacionnyh pechej dlya reciklinga zhelezosoderzhashih othodov // Lite i metallurgiya. - 2014. № 1. S. 56–61.
13. Dihua Wang, Andrew J. Gmitter, Donald R. Sadoway Production of Oxygen Gas and Liquid Metal by Electrochemical Decomposition of Molten Iron Oxide// Journal of The Electrochemical Society, - 2011. № 6 (158). С. 51–64. DOI: 10.1149/1.3560477
14. Antoine Allanore Features and Challenges of Molten Oxide Electrolytes for Metal Extraction //Journal of The Electrochemical Society, - 2015. № 1 (162). С. 13–22. DOI: 10.1149/2.0451501jes
15. Tehnologiya i ustanovki nepreryvnogo sposoba proizvodstva stali. / V. I. Baptizmanskiy, I. V. Lysenko, Yu.S. Paniotov, Yu.N. Yakovlev, L.F. Mazov // K.: Tehnika, 1978. – 192s.

*Стаття поступила 2.11.2018*