

УДК 656.259.2

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА УКРАЇНИ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

ВЕРГУН О. О.<sup>1\*</sup>, к. т. н., доц.,  
ПУШКАРЕНКО М. В.<sup>2</sup>, бак.,  
ОЛЕКСЄНКО О. Р.<sup>3</sup>, бак.

<sup>1\*</sup> Кафедра екології та охорони навколишнього середовища, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 756-33-71, e-mail: [vergun.oxana@yandex.ru](mailto:vergun.oxana@yandex.ru), ORCID ID: 0000-0003-4842-1069

<sup>2</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 47-39-50, e-mail: [nvpushkarenko@yandex.ru](mailto:nvpushkarenko@yandex.ru), ORCID ID: 0000-0002-6253-8637

<sup>3</sup> Кафедра екології та охорони навколишнього середовища, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 756-33-71, e-mail: [keko@pgasa.dp.ua](mailto:keko@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-7070-8109

**Анотація. Постановка проблеми.** Сталеплавильна промисловість чинить активний згубний вплив на навколишнє середовище, що пов'язано зі споживанням великої кількості енергетичних ресурсів, видобуток та використання яких мають незворотні наслідки, різних сировинних матеріалів металорудного походження і утворенням великих кількостей найрізноманітніших відходів. На частку підприємств чорної та кольорової металургії припадає близько 18 % усіх промислових викидів в атмосферу пилу, 8...10 % викидів діоксиду сірки, 35...40 % – монооксиду вуглецю, близько 15 % – оксидів азоту, 10...15 % загального обсягу споживання промисловістю свіжої води і приблизно стільки ж скидання у стічні води. **Предмет дослідження** – вплив типу сталеплавильного виробництва на навколишнє середовище. **Мета публікації** – аналіз проблем металургійного забруднення міст та території України в цілому, дослідження методів їх вирішення. Розглянуто основні види сталеплавильного виробництва України та етапи. Враховуючи, що сталеплавильне виробництво – один із найнесприятливіших фізичних чинників навколишнього середовища, питання набуває великого соціального, санітарного, екологічного значення, особливо в умовах інтенсивної урбанізації. Розглянуто проблему забруднення літосфери, гідросфери, атмосфери. **Висновки.** Аналіз та оцінка впливу сталеплавильного виробництва на навколишнє середовище показали, що металургія – одне з основних джерел забруднення, зокрема, в Україні вона посідає друге місце разом із групою переробних підприємств. Основні чинники забруднення – технологічні процеси, що є невід'ємною частиною галузі та оснащення підприємств, які потребують модернізації. Та навіть після тотальної модернізації галузь не стане бездоганно безпечною, адже залишаться проблеми раціонального використання енергоресурсів та утворення побічних продуктів виробництва. Необхідно безперервно досліджувати це питання для впровадження передових технологій та досліджень для забезпечення екологічно безпечного виробництва.

*Ключові слова:* вентилятор, промисловість, аераційні ліхтарі, плавка сталі, відвали

## АНАЛІЗ ВЛИЯНИЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА В УКРАИНЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

ВЕРГУН О. А.<sup>1\*</sup>, к. т. н., доц.,  
ПУШКАРЕНКО М. В.<sup>2</sup>, бак.,  
АЛЕКСЕЕНКО А. Р.<sup>3</sup>, бак.

<sup>1\*</sup> Кафедра экологии и охраны окружающей среды, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 756-33-71, e-mail: [vergun.oxana@yandex.ru](mailto:vergun.oxana@yandex.ru), ORCID ID: 0000-0003-4842-1069

<sup>2</sup> Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 47-39-50, [nvpushkarenko@yandex.ru](mailto:nvpushkarenko@yandex.ru), ORCID ID: 0000-0002-6253-8637

<sup>3</sup> Кафедра экологии и охраны окружающей среды, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 756-33-71, e-mail: [keko@pgasa.dp.ua](mailto:keko@pgasa.dp.ua) 0000-0001-7070-8109

**Аннотация. Постановка проблемы.** Сталеплавильное производство оказывает активное губительное воздействие на окружающую среду, что связано с потреблением большого количества энергетических ресурсов, добыча и использование которых имеют необратимые последствия, разных сырьевых материалов металлорудного происхождения и с образованием большого количества разнообразных отходов. На часть предприятий черной и цветной металлургии приходится около 18 %

всех промышленных выбросов в атмосферу пыли, 8...10 % выбросов диоксида серы, 35...40 % монооксида углерода, 15 % оксида азота, 10...15 % общего объема потребления промышленностью свежей воды, сбросы сточных вод. **Предмет исследования** – влияние типа сталеплавильного производства на окружающую среду. **Цель работы** – анализ проблемы загрязнения городов Украины выбросами сталеплавильного производства; рекомендация способов решения проблемы. Рассмотрены основные виды сталеплавильного производства Украины и этапы. Учитывая, что сталеплавильное производство является одним из наиболее неблагоприятных факторов окружающей среды, вопрос приобретает большое социальное, санитарное, экологическое значение. Рассмотрена проблема загрязнения атмосферы, литосферы, гидросферы. **Выводы.** Анализ и оценка влияния сталеплавильного производства на окружающую среду показал, что металлургия является одним из основных источников загрязнения, в частности, в Украине занимает второе место вместе с группой перерабатывающих предприятий. Основные факторы загрязнения – это технологические процессы, которые являются неотъемлемой частью отрасли, и оснащение предприятий, нуждающихся в модернизации. Но даже после полной модернизации отрасль не станет безупречно безопасной, ведь останутся проблемы рационального использования энергоресурсов и образования побочных продуктов производства. Необходимо непрерывно исследовать этот вопрос для внедрения передовых технологий и исследований для обеспечения экологически безопасного производства.

*Ключевые слова:* вентилятор, промышленность, аэрационные фонари, плавка стали, отвалы

## ANALYSIS OF STEEL-SMELTING IN UKRAINE ON THE ENVIRONMENT

VERHUN O. O.<sup>1\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech), Ass. of Prof.*,  
 PUSHKARENKO M. V.<sup>2</sup>, *bach.*,  
 ALEKSEENKO A. R.<sup>3</sup>, *bach.*

<sup>1\*</sup> Department of ecology, State Higher Education Establishment Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskogo Str., 24-a, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-71, e-mail: [vergun.oxana@yandex.ru](mailto:vergun.oxana@yandex.ru), ORCID ID: 0000-0003-4842-1069

<sup>2</sup> Department of applied science of materials, State Higher Education Establishment Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskogo Str., 24-a, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 47-39-50, e-mail: [nvpushkarenko@yandex.ru](mailto:nvpushkarenko@yandex.ru), ORCID ID: 0000-0002-6253-8637

<sup>3</sup> Department of ecology, State Higher Education Establishment Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskogo Str., 24-a, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-71, e-mail: [keko@pgasa.dp.ua](mailto:keko@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-7070-8109

**Abstract. Raising of problem.** Steel-melting production has active and destructive influence upon the environment, what is connected with big amount of power recourses, which extraction and using has irreversible consequences, different raw materials metal-ore origin and education big amount different waste products. About 18 % of all industry emissions of dust, 8...10 % of sulfur dioxide emissions, 35...40 % of carbon monoxide emissions, 15 % of nitrogen oxide emissions fall on part of black and color metallurgy plants, 10...15 % of using fresh water by the industry, the emission of waste water. **The subject of research** – the influence upon the environment the steel-melting type. **The aim of article** – the analysis of problem of pollution places and territories of Ukraine, the recommendation to find the ways of the decision of the problem. The basic types of steels melting production of Ukraine are considered in the article, in particular his types and stages technologies of that are evidently shown on the basic metallurgical enterprises of Ukraine. Taking into account, that steels melting a production is one of the most widespread unfavorable physical factors of environment, that acquire important socially, sanitary, ecologically important value, especially in the consequence of intensive urbanization. The problem of contamination of hydrosphere, atmosphere is considered in the consequence of work and development of this industry. **Conclusions.** Analysis and valuation of influence steel-melting production upon the environment displayed, that metallurgy is one of the main pollution producer. The main causes of pollution- technological processes, which are integral part of the branch, and the plant equipment, which needs development. It is necessary to research this problem for improvement technologies and to provide the environmentally friendly industry.

*Keywords:* fan, industry, aeration lanterns, smelting steel, piles

### Вступ

Після початку епохи індустріалізації металургійне виробництво почало набирати оберти не тільки в світовому масштабі, а й на території України зокрема, що було пов'язано насамперед із географічним розташуванням та наявністю залізорудних порід. З плином часу методи виробництва сталі змінювали і разом із тим змінювались не тільки темпи виробництва, якість продукції та дослідження цієї галузі, а й вплив на

навколишнє середовище. Сталеплавильна промисловість чинить активний згубний вплив на навколишнє середовище, що, в першу чергу, пов'язано зі споживанням великої кількості енергетичних ресурсів, видобуток та використання яких має своє незворотні наслідки, різних сировинних матеріалів металорудного походження, із утворенням великих кількостей найрізноманітніших відходів. На частку підприємств чорної та кольорової металургії припадає близько 18 % всіх промислових викидів в атмосферу пилу, 8...10 % викидів діоксиду сірки, 35...40 % – монооксиду вуглецю, близько

15 % – оксидів азоту, 10...15 % загального обсягу споживання промисловістю свіжої води і приблизно стільки ж – скидання стічних вод.

**Предмет дослідження** – тип сталеплавильного виробництва та його вплив на навколишнє середовище.

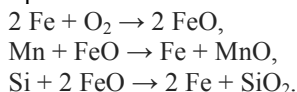
**Мета публікації** – розкриття проблем металургійного забруднення міст та території України в цілому, дослідження методів їх вирішення шляхом удосконалення технологій виробництва та обробки.

### Основна частина

Враховуючи основні економічні показники експортної діяльності України, можна оцінити сталеплавильне виробництво як один із найпотужніших напрямків роботи, а звідси для вивчення ефективності та впливу даного процесу виникає потреба у дослідженні методів виробництва продукції сталеплавильного сектору.

Існують три основні способи сталеплавильної переробки.

**Киснево-конверторний спосіб.** Основою його є продування розплавленого чавуну киснем, який окиснює домішки, що містяться в чавуні. Основний агрегат — кисневий конвертор – сталава посудина грушоподібної форми, футерована вогнетривкою цеглою. Подача кисню під тиском 0,8...1,2 МПа здійснюється через фурму, що охолоджується водою. Хімія киснево-конверторного процесу чітко відображена в таких хімічних реакціях:



На 2014 рік в Україні близько 50 % усього обсягу продукції було виготовлено саме киснево-конверторним способом.

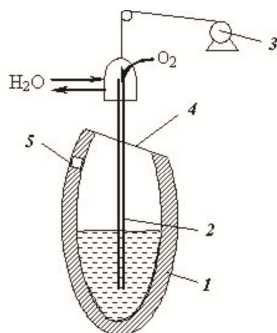


Рис. 1. Схема кисневого конвертора:  
1 – конвертор; 2 – фурма; 3 – лебідка;

4 – горловина; 5 – лютка /

Fig. 1. Oxygen convection:

1 – converter; 2 – form; 3 – winch;

4 – neck; 5 – tap-hole

**Мартенівський спосіб.** Виник у зв'язку з необхідністю переробки великої кількості металобрухту, масова переробка якого в конверторах неможлива. Цю проблему було вирішено шляхом створення полуменевої (мартенівської) печі.

Мартенівська піч являє собою споруду з вогнетривкої цегли, стягнуту рядом металевих балок, що утворюють зовнішній каркас. Робочий простір печі обмежений зверху склепінням, знизу – подом, спереду і ззаду – стінками, з боків – головками. Головки необхідні для подачі палива і повітря в робочий простір печі, а також для відведення продуктів згоряння з печі. Піч має вигляд овальної чаші, в ній відбувається процес плавки. Передня стінка має ряд завалочних вікон для завантаження шихтових матеріалів, а задня стінка – лютку для випуску металу. Понад 80 % всієї виплавленої сталі ХХ сторіччя одержували саме мартенівським способом. Поширеність способу пояснюється його універсальністю. Хімія даного процесу відображена рівняннями:

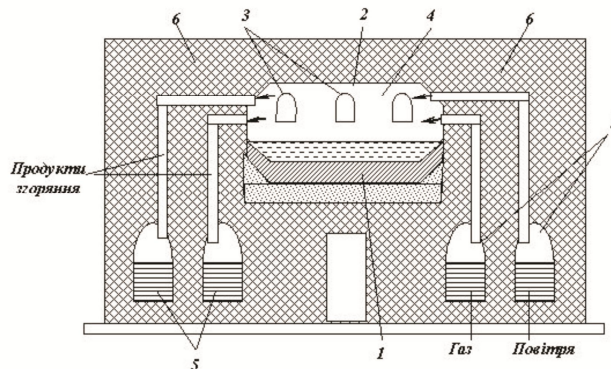
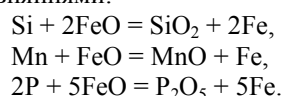


Рис. 2. Схема мартенівської печі:

1 – під; 2 – склепіння; 3 – завантажувальні вікна;

4 – робочий простір; 5 – регенератори; 6 – головки /

Fig. 2. Circuit OHF:

1 – pod; 2 – vault; 3 – boot windows;

4 – working zone; 5 – regenerators; 6 – head

**Електрично-індукційний спосіб.** Плавка сталі в індукційній печі, здійснювана в основному методом переплавки, зводиться, як правило, до розплавлення шихти, розкислювання металу і випуску. Це зумовлює високі вимоги до шихтових матеріалів щодо змісту шкідливих домішок (P, S). Вибір тигля (основний або кислий) визначається властивостями металу. Щоб кремнезем футеровки не відновлювався в процесі плавки, сталі і сплави з підвищеним вмістом Mn, Ti, Al виплавляють в основному тиглі. Істотний недолік індукційної плавки — холодні шлаки, які нагріваються тільки від металу. У ряді конструкцій цей недолік усувається шляхом плазмового нагріву поверхні метал-шлак, що дозволяє також значно прискорити розплавлення шихти.

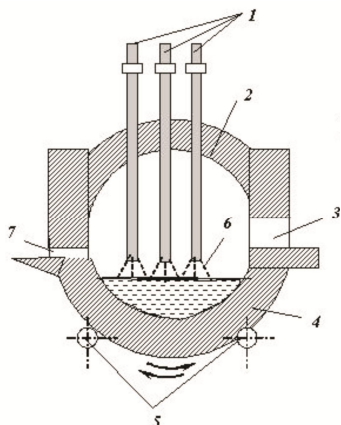


Рис. 3. Схема електродугової печі:

- 1 – електроди; 2 – склепіння;  
 3 – завантажувальне вікно; 4 – корпус;  
 5 – механізм нахилу печі; 6 – електрична дуга;  
 7 – лійка / Fig. 3. Circuit electric arc furnace:  
 1 – electrodes; 2 – vault;  
 3 – load window; 4 – building;  
 5 – tilt mechanism furnace; 6 – the electric;  
 7 – tap-hole

У вакуумних індукційних печах виплавляють чисті метали, сталі і сплави відповідального призначення (вакуумна плавка). Ємність існуючих печей – від декількох кілограмів до десятків тонн. Вакуумну індукційну плавку інтенсифікують продуванням інертними (Ar, He) і активними (CO, CH<sub>4</sub>) газами, електромагнітним перемішуванням металу в тиглі, продуванням металу шлакоутвірними порошками.

Незалежно від способу переробки технологічний процес виробництва сталі складається з таких основних операцій:

- підготовка шихти;
- завантаження шихти в плавильний агрегат;
- плавка і розкиснення сталі;
- розливання сталі і вивантаження злитків.

**Загальна характеристика впливу сталеплавильного виробництва України на навколишнє середовище.** Металургія – одна з найбільш забруднювальних галузей промисловості. На металургію припадає 35 % викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря. Первинні викиди підлягають мокрому очищенню й у деяких випадках сухому очищенню за допомогою електрофільтрів або рукавних фільтрів. Вторинні пиловидні викиди не уловлюються та не очищуються. Також металургійні підприємства дуже забруднюють водойми. Важкі метали, радіонукліди, інші тверді відходи не підлягають утилізації чи повторній обробці й тим самим спричиняють шкідливий вплив на навколишнє середовище.

**Причини забруднення.** Технології, що застосовуються на деяких підприємствах галузі, застаріли й мають низький коефіцієнт корисної дії. Майже 60 % продукції припадає на мартенівські печі, експлуатація яких постійно дорожчає, ефективність

скорочується, а викиди забруднювальних речовин збільшуються порівняно із сучасними кисневими конверторами. Тільки 4 % продукції припадає на дугові електропечі й 10 % на безперервне розливання сталі – ефективні технології, що дають змогу зберігати значну кількість енергії та інших ресурсів.

Причини забруднення водних ресурсів – це недостатнє очищення стічних вод перед їх скиданням у річки чи каналізаційні системи. Особливо небезпечні стічні води коксохімічних підприємств, що містять феноли й ароматичні сполуки. Джерелом забруднення навколишнього середовища є також агломераційні цехи на металургійних підприємствах, що пояснюється низькою якістю залізної руди, конструктивними недоліками технологічного обладнання, систем пилогазоочищення й охолодження агломерату. Агломераційні установки – головне джерело забруднення, у тому числі через шкідливі викиди, що здійснюються не через димові труби. Зменшення викидів забруднювальних речовин потребує застосування потужних вентиляторів із повітряною камерою, які уловлюють та очищують гази до їх надходження в димову трубу.

Загалом згубний вплив від металургійних підприємств можна поділити на такі рівні:

1-й рівень – порушення ландшафту, забруднення ґрунтів і вод внаслідок видобування гірської породи;

2-й рівень – викиди теплової та електромагнітної енергії, забруднення атмосфери й водоймищ фенолами та ароматичними сполуками, коксовим газом, важкими металами та радіонуклідами;

3-й рівень – забруднення водних, земельних ресурсів, атмосфери від виробництва металургії та викидів шкідливих речовин і твердих відходів.

**Основні джерела забруднення навколишнього середовища на металургійних підприємствах:**

- вивідна труба (для відведення диму та пилових часток);
- аераційні ліхтарі;
- вентилятори;
- витяжні шафи;
- відкриті ділянки складів, відвали.

Серед методів економії води заслуговують на увагу:

- застосування випарувального охолодження металургійних печей і кристалізаторів машин для безперервного лиття заготовок;
- заміна охолодження прокатного устаткування й металу за допомогою перфорованих труб форсуноковим охолодженням;
- застосування електроприводів до повітряозадувних машин і компресорів, унаслідок чого вода конденсується на парових турбінах;
- застосування для деяких агрегатів повітряного охолодження;
- впровадження сухих методів очищення газів, пневмотранспортування пилу, вихрових пиловловлювачів, рукавних і шарових фільтрів, електрофільтрів, перехід на контейнерну шихтоподачу.

**Висновки**

Аналіз та оцінка впливу сталеплавильного виробництва на навколишнє середовище показали, що металургія – одне з основних джерел забруднення, зокрема, в Україні посідає друге місце разом із групою переробних підприємств. Основні чинники забруднення – це технологічні процеси, що є невід’ємною частиною галузі, та оснащення

підприємств, які потребують модернізації. Та навіть після тотальної модернізації галузь не стане бездоганно безпечною, адже залишаться проблеми раціонального використання енергоресурсів та утворення побічних продуктів виробництва. Необхідно безперервно досліджувати це питання, впроваджувати передові технології, щоб забезпечити екологічно безпечне виробництво.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ  
/ REFERENCES**

- Смирнов В. О. Фізичні та хімічні основи виробництва / В. О. Смирнов, В. С. Білецький. – 2005. – С. 45–48.  
Smirnov V. A., Beletsky V. S. *Fizichni ta himichni osnovi virobництва* [Physical and chemical production bases]. 2005. Pp. 45–48. (in Ukrainian).  
<http://www.lib.znate.ru>
- Мовчан В. П. Основи металургії / В. П. Мовчан, М. М. Бережний. – 2001. – 336 с.  
Movchan V. P., Berezhniy M. M. *Osnovi metalurgiyi* [Fundamentals of Metallurgy]. 2001. 336 p. (in Ukrainian).
- Беляев А. И. Металлургия легких металлов / А. И. Беляев. – Москва, 1970. – 28 с.  
Belyaev A. I. *Metallurgiya legkih metallov* [Metallurgy light metals]. 1970. Moscow. 28 p. (in Russian).
- Зеликман А. Н. Металлургия редких металлов / А. Н. Зеликман, Г. А. Меерсон. – Москва, 1973. – С. 29–34.  
Zelykman A. N., Meyerson G. A. *Metallurgiya redkih metallov* [Metallurgy light metals]. Moscow, 1973. Pp. 29–34. (in Russian).  
<http://www.razym.ru>
- Еднерал Ф. П. Электрометаллургия стали и ферросплавов / Ф. П. Еднерал. – Москва, 1977. – С. 57–59.  
Edneral F. P. *Elektrometallurgiya stali i ferrosplavov* [Ferroalloy metallurgy and steel]. Moscow, 1977. Pp. 57–59.  
<http://www.twipx.com>
- Борнацкий И. И. Производство стали / И. И. Борнацкий, В. Ф. Михневич, С. А. Яргин. – Москва, 1991. – 401 с.  
Bornatsky I. I., Mihnevich V. F., Yargin S. A. *Proizvodstvo stali* [Steel production]. Moscow, 1991. 401 p. (in Russian).
- Воскобойников В. Г. Общая металлургия / В. Г. Воскобойников, Ф. П. Еднерал, В. А. Кудрин и др. – Москва, 1973. – 463 с.  
Voskoboynikov V. G., Edneral F. P., Kudrin V. P. & oth. *Obschaya metallurgiya* [General Metals]. Moscow, 1973. 463 p. (in Russian).
- Якушев А. М. Справочник конвертерщика. – Челябинск, 1990. – 448 с.  
Yakushev A. M. *Spravochnik konverterschika* [Directory konverterschika]. Chelyabinsk, 1990. 448 p.
- Бойченко Б. М. Конвертерное производство стали / Бойченко Б. М., Охотский В. Б., Харлашин П. С. – Днепропетровск : РИА «Днепр-ВАЛ», 2004. – 454 с.  
Boychenko B.M., Okhotsk V. B., Kharlashin P. S. *Konvertornoe proizvodstvo stali* [Converter steel production]. Dnepropetrovsk : RIA "Dnepr-VAL" Publ., 2004. 454 p. (in Russian).
- Металлургия стали : учебник / Под ред. В. И. Явойского и Ю. В. Кряковского. – Москва: Металлургия, 1983. – 583 с.  
*Metallurgiya stali* [Steel Metallurgy]: Textbook / Ed. by V. I. Yavoyskiy and Yu. V. Kryakovskiy. Moscow : Metallurgy Publ., 1983. 583 p. (in Russian).
- Кудрин В. А. Металлургия стали: Учебник / В. А. Кудрин. – Москва : Металлургия, 1989. – 559 с.  
Kudrin V. A. *Metallurgiya stali* [Steel Metallurgy]: textbook. Moscow : Metallurgy Publ., 1989. 559 p. (in Russian).
- Баптизманский В. И. Теория кислородно-конвертерного процесса / В. И. Баптизманский. – Москва: Металлургия, 1975. – 375 с.  
Baptizmansky V. I. *Teoriya kislorodno-konvertornogo protsesssa* [Theory BOF process]. Moscow : Metallurgy Publ., 1975. 375 p. (in Russian).
- Металлургия стали : учебник / Под ред. В. И. Явойского. – Москва : Металлургия, 1973. – 816 с.  
*Metallurgiya stali* [Steel Metallurgy]: textbook. Ed. by V. I. Yavorskiy. Moscow : Metallurgy Publ., 1973. 816 p. (in Russian).
- Баптизманский В. И. Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса / В. И. Баптизманский, В. Б. Охотский. – Киев–Донецк : Вища школа, 1981. – 183 с.  
Baptizmansky V. I., Okhotskiy V. B. *Fiziko-himicheskie osnovyi kislorodno-konvertornogo protsesssa* [Physico-chemical basis of the BOF process]. Kiev-Donetsk : High School Publ., 1981. 183 p. (in Russian).

Стаття рекомендована до друку д-ром техн. наук, проф. А. Г. Чернятевичем (Україна); д-ром техн. наук, проф. А. Ф. Шевченком (Україна).

Надійшла до редколегії 11.12.2015.

Прийнята до друку 14.12.2015