

О. І. Бабаченко, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-7501-4173

Л. Г. Тубольцев, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-9540-3037

О. Є. Меркулов, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-7867-0659

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

ПЕРСПЕКТИВИ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ МЕТАЛУРГІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Анотація. У статті розглядаються можливості застосування технологій декарбонізації під час виробництва сталевих продукцій. Узагальнено світовий досвід використання перспективних технологій та представлено можливості їх застосування у металургійному виробництві, з урахуванням викидів вуглекислого газу, відповідального за парниковий ефект та глобальне потепління Землі. Представлено напрямки дослідницьких проєктів в металургійній галузі, результати та висновки, що з них випливають. Показано можливості застосування технологій декарбонізації в процесі підготовки шихтових матеріалів, виробництва чавуну та сталі. Відмічено, що тенденція декарбонізації сталі суттєво змінює традиційну металургію. У той же час, можливості сучасних технологій виробництва металопродукції не дозволяють у значній мірі відмовитися від використання природного газу і вуглецю (вугілля та коксу), як відновника та енергоносія у процесах металургійного виробництва. Показано можливості сучасних та перспективних металургійних процесів щодо виробництва продукції з мінімальним вуглецевим слідом. Висвітлені проблеми, що постають перед металургією України для зменшення викидів CO₂ і впровадження технологій декарбонізації виробництва металопродукції. Показано, що для впровадження процесів декарбонізації сталі необхідно враховувати наступне: необхідність структурної перебудови металургійної галузі; необхідність докорінної модернізації металургійної галузі за рахунок впровадження принципово нових енергозберігаючих технологій виробництва; обмеження неефективного експорту сировинних матеріалів та напівфабрикатів; впровадження технологій «зеленого» виробництва сталі; посилення ролі наукових досліджень у виробництві металургійної продукції з малим вуглецевим слідом; посилення взаємодії науки, підприємств та держави у реалізації глобальних проєктів виробництва маловуглецевої металургійної продукції.

Ключові слова: металургійне виробництво, декарбонізація сталі, технології, чавун, сталь, прокат.

Посилання для цитування: Бабаченко О. І., Тубольцев Л. Г., Меркулов О. Є. Перспективи декарбонізації металургійних технологій. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2021. Вип. 35. С. 4-33 (In Ukrainian, In English). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-4-33

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2021. – Випуск 35
«Fundamentalnye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2021. – Выпуск 35
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2021. – Collection 35

O. I. Babachenko, Dr. Sci., Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7501-4173

L. G. Tuboltsev, Ph.D., Senior Researcher, ORCID 0000-0001-9540-3037

O. Ye. Merkulov, Dr. Sci., Senior Researcher, ORCID 0000-0002-7867-0659

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

PROSPECTS OF DECARBONIZATION OF METALLURGICAL TECHNOLOGIES

Summary. The article considers the possibilities of using decarbonization technologies in the production of steel products. The world experience of using advanced technologies is generalized and the possibilities of their application in metallurgical production are presented, taking into account the emissions of carbon dioxide responsible for the greenhouse effect and global warming of the Earth. The directions of research projects in the metallurgical industry, the results and the conclusions that follow from them are presented. Possibilities of application of decarbonization technologies in the process of preparation of charge materials, production of cast iron and steel are shown. It is noted that the trend of decarbonization of steel significantly changes traditional metallurgy. At the same time, the possibilities of modern technologies of metal production do not allow to significantly abandon the use of natural gas and carbon (coal and coke) as a reducing agent and energy source in metallurgical production processes. Possibilities of modern and perspective metallurgical processes concerning production of products with the minimum carbon trace are shown. The problems facing the metallurgy of Ukraine to reduce CO₂ emissions and the introduction of technologies for decarbonization of metal production are highlighted. It is shown that for the implementation of steel decarbonization processes it is necessary to take into account the following: the need for structural restructuring of the metallurgical industry; the need for radical modernization of the metallurgical industry through the introduction of fundamentally new energy-saving production technologies; limiting inefficient exports of raw materials and semi-finished products; introduction of "green" steel production technologies; strengthening the role of research in the production of metallurgical products with low carbon footprint; strengthening the interaction of science, enterprises and the state in the implementation of global projects for the production of low-carbon metallurgical products.

Keywords: metallurgical production, steel decarbonization, technologies, cast iron, steel, rolled metal.

For citation: *Babachenko O.I., Tuboltsev L.G. Merkulov O.Ye.* Perspektyvy dekarbonizatsiyi metalurhiynykh tekhnolohiy [Prospects for decarbonization of metallurgical technologies]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii. [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy]*, 2021, 35, 4-33. (In English, In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-4-33

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2021. – Випуск 35
«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2021. – Vypusk 35
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2021. – Collection 35

Вступ. У Глазго 13 листопада 2021 року завершилася конференція ООН про зміну клімату [1]. Однак підсумкова угода містить м'якші формулювання порівняно із запланованими. Так, спочатку планувалося, що буде зазначено необхідність поступово відмовлятися від використання вугілля. Ключовими противниками більш амбітних формулювань виступала передусім Індія. Росія, Китай та США виявили обережність у кліматичній перспективі. Підсумки конференції говорять про розбіжності щодо підходу до кліматичних проблем Землі. Основною проблемою потепління атмосфери Землі вважаються шкідливі викиди парникових газів, насамперед вуглекислого газу CO_2 . Доводи противників обмеження викидів зводяться до такого: зниження викидів парникових газів обходиться дуже дорого і не всі виробництва витримують такі витрати; зміна температури атмосфери спостерігалася і в минулому, коли промисловість не домінувала в економіці. Зокрема, в Антарктиді були пробурені свердловини на 3800 метрів та виїняти керни. По бульбашках повітря, що зберіглося в кернах, було визначено температуру, вік і вміст вуглекислого газу в атмосфері Землі приблизно за 800 тисяч років. Виявлено, що за цей період спостерігалися певні періоди похолодання, які чергувалися із періодами потепління. Наш час знаходиться в періоді потепління, причому воно йде з малого льодовикового періоду (XV – XVI століття). З XVI століття йде потепління на один градус у сторіччя. Звідси випливає, що нормальні коливання клімату пов'язані з коливаннями активності Сонця та орбіти Землі, але не з діяльністю сучасної людини. У той самий час всі чудово розуміють, що використання викопних сировинних ресурсів Землі, зокрема. вугілля, призводить до знаних викидів CO_2 і не має довгострокової перспективи [2]

Метою дослідження є виявлення сучасних та перспективних металургійних технологій, що дозволяють виробляти продукцію з мінімальним вуглецевим слідом.

Основні результат досліджень. При порівнянні фактичних даних зростання світового виробництва сталі та зміни температури біля поверхні Землі (рис. 1) звертає на себе увагу наступне:

до 1997 року, коли рівень щорічного світового виробництва сталі не перевищував одного мільярда тонн, істотної зміни середньої температури на поверхні Землі не спостерігалася;

з 1999 року і до теперішнього часу, коли Китай почав стрімко нарощувати виробництво сталі та світове виробництво сталі різко зросло, спостерігається підвищення середньої температури біля Землі;

Introduction. The UN Conference on Climate Change ended in Glasgow on November 13, 2021 [1]. However, the final agreement contains softer wording than planned. Thus, it was originally planned that the need to gradually abandon the use of coal would be noted. The key opponents of more ambitious formulations were primarily India, Russia, China and the United States have shown caution in the climate. The results of the conference show differences in the approach to the Earth's climate problems. Harmful emissions of greenhouse gases, primarily carbon dioxide, are considered to be the main problem of global warming. The arguments of opponents of limiting emissions are as follows: reducing greenhouse gas emissions is very expensive and not all industries can withstand such costs; changes in atmospheric temperature have been observed in the past, when industry did not dominate the economy. In particular, in Antarctica, 3,800 meters of wells were drilled and cores were removed. The air bubbles stored in the cores were used to determine the temperature, age, and carbon dioxide content of the Earth's atmosphere in about 800,000 years. It was found that during this period there were certain periods of cooling, which alternated with periods of warming. Our time is in the period of warming, and it comes from the small ice age (XV – XVI centuries). Since the XVI century there has been a warming of one degree per century. It follows that normal fluctuations in climate are associated with fluctuations in the activity of the Sun and the Earth's orbit, but not with the activities of modern man. At the same time, everyone is well aware that the use of fossil raw materials of the Earth, in particular, coal, leads to known CO₂ emissions and has no long-term perspective [2].

The aim of the study is to identify modern and promising metallurgical technologies that allow to produce products with minimal carbon footprint.

The main result of research. When comparing the actual data on the growth of world steel production and changes in temperature near the Earth's surface (Fig. 1) draws attention to the following:

until 1997, when the annual world production of steel did not exceed one billion tons, no significant change in the average temperature on the Earth's surface was observed;

from 1999 to the present, when China has begun to increase steel production rapidly and world steel production has risen sharply, there has been an increase in the average temperature near Earth;

відзначається синхронне зниження середньої температури на поверхні Землі з періодами фінансових криз та падіння світової економіки [3]. У цьому кореляція між цими показниками досить висока (рис. 2).

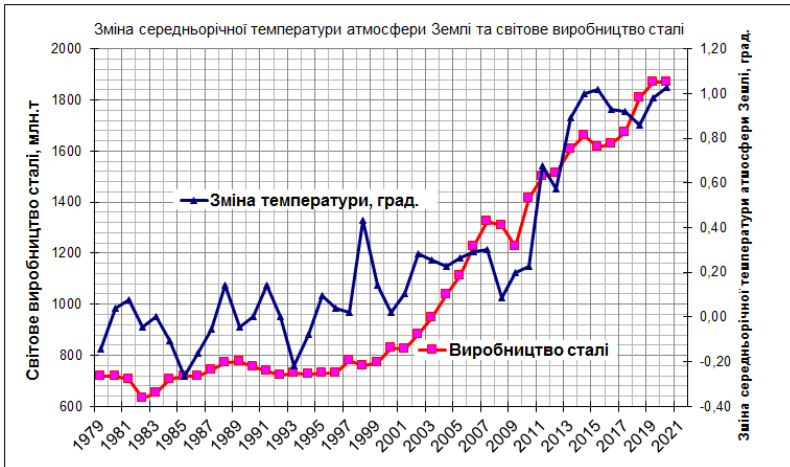


Рисунок 1 – Зміна середньорічної температури біля поверхні Землі та світове виробництво сталі в період 1979-2020 років.

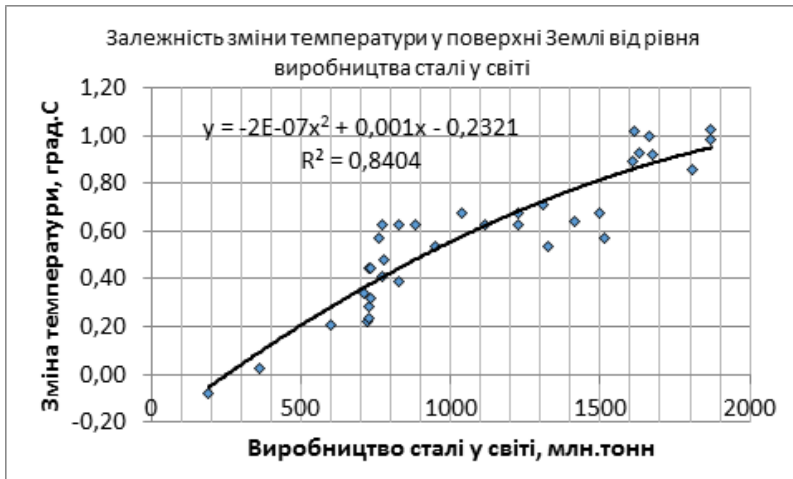


Рисунок 2 – Залежність зміни температури у поверхні Землі від рівня виробництва сталі у світі.

there is a simultaneous decrease in the average temperature on the Earth's surface with periods of financial crises and the fall of the world economy [3]. The correlation between these indicators is quite high (Fig. 2).

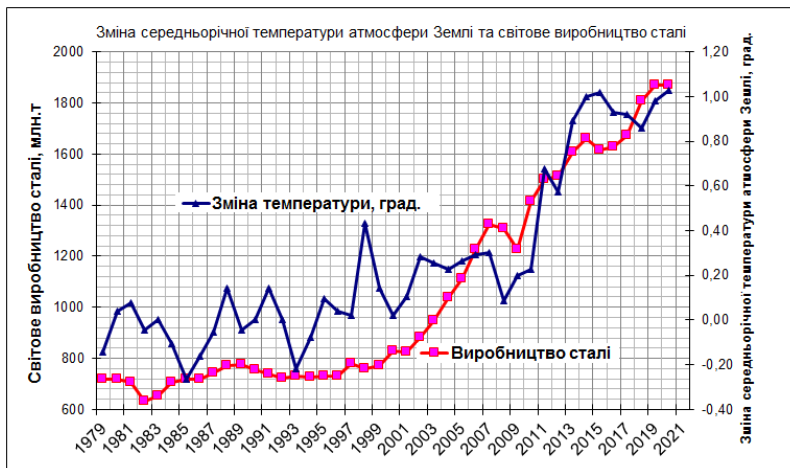


Figure 1 - Change in average annual temperature near the Earth's surface and world production of steel in the period 1979-2020.

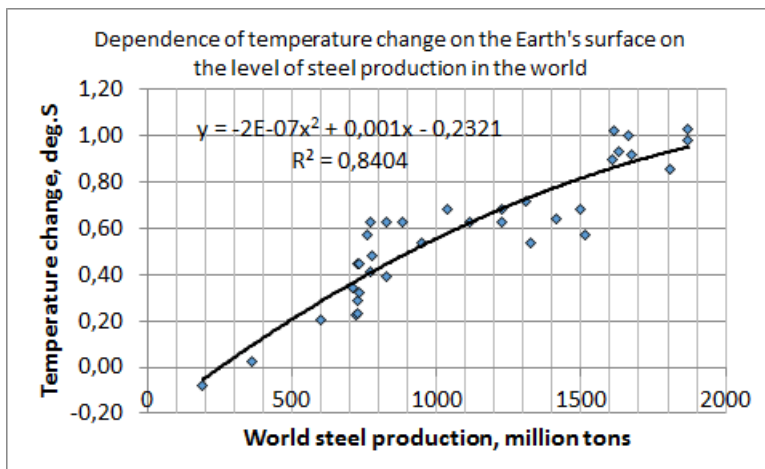


Figure 2 – The dependence of changes in temperature at the Earth's surface on the level of steel production in the world.

Слід одразу звернути увагу, що металургія є базовою галуззю економіки більшості промислово розвинених країн, однак у загальному обсязі світових викидів CO₂ частка металургії становить 6%, транспорту – 23%, електроенергетики – 39%. В Україні у 2019 році частка чорної металургії у викидах CO₂ від загальних склала 23% [4]. Середні питомі прями та непрямі викиди CO₂ у світовій металургії (даним World Steel Association) становлять 1,83 – 2,21 т/тонну сталі. Однак у світовому співтоваристві зменшенню шкідливих викидів у металургії надається велике значення, насамперед у ЄС.

В даний час спроби зниження шкідливих викидів призводять до збільшення собівартості та зниження конкурентоспроможності металопродукції. Проте обмеження щодо рівня використання вуглецю у виробництві, прийняті на найвищому законодавчому рівні в ЄС, найближчим часом вірогідно призведуть до закриття багатьох підприємств. ЄС планує запровадити спеціальний механізм (Carbon Border Adjustment Mechanism), відповідно до якого імпорт продукції, виробленої з вищими, ніж у ЄС, викидами CO₂, буде оподатковуватись додатковою платою [5]. Екологічне законодавство в ЄС одночасно має на меті захист своїх виробників від імпорту дешевої сталі з інших країн, що має безпосереднє відношення для українських експортерів металопродукції. Для України це призведе до неможливості експорту металопродукції. Таким чином, можна зробити однозначний висновок, що процес використання в Україні маловуглецевих технологій декарбонізації виробництва сталі (маловуглецевих технологій) та «зеленого виробництва сталі» є незворотнім. Використання технологій декарбонізації сталі має дозволити металургії України вистояти перед екологічними проблемами та тиском з боку законодавства і регулюючих органів.

На даний час сучасні технології декарбонізації сталі та зменшення шкідливих викидів при масовому виробництві сталі у світі спрямовані на:

покращення якості залізородної сировини, збільшення вмісту заліза в залізородній шихті;

підвищення енергоефективності існуючих технологій за рахунок використання сучасних відомих металургійних технологій (best available technology, BAT), що може заощадити до 20% енерговитрат;

часткову заміну коксу пиловугільним паливом та іншими енергоносіями, зокрема коксовим та синтез газом. В окремих регіонах замість коксу та ПВП використовуються деревне вугілля та деревні відходи в міні доменних печах, або відходи пластику;

It should be noted at once that metallurgy is the basic sector of the economy of most industrialized countries, but in the total global CO₂ emissions the share of metallurgy is 6%, transport - 23%, electricity - 39%. In Ukraine in 2019, the share of ferrous metallurgy in CO₂ emissions from the total was 23% [4]. The average specific direct and indirect CO₂ emissions in the world metallurgy (according to the World Steel Association) are 1.83 - 2.21 tons / ton of steel. However, in the world community, the reduction of harmful emissions in metallurgy is of great importance, especially in the EU.

At present, attempts to reduce harmful emissions lead to increased costs and reduced competitiveness of metal products. However, restrictions on the level of carbon use in production, adopted at the highest legislative level in the EU, are likely to lead to the closure of many businesses in the near future. The EU plans to introduce a special mechanism (Carbon Border Adjustment Mechanism), according to which imports of products produced with higher than EU emissions will be subject to additional fees [5]. At the same time, environmental legislation in the EU aims to protect its producers from imports of cheap steel from other countries, which is directly relevant for Ukrainian exporters of metal products. For Ukraine, this will make it impossible to export metal products. Thus, we can unequivocally conclude that the process of using low-carbon technologies in Ukraine to decarbonize steel production (low-carbon technologies) and "green steel production" is irreversible. The use of steel decarbonization technologies should allow Ukrainian metallurgy to withstand environmental problems and pressure from legislation and regulators.

Currently, modern technologies for decarbonization of steel and reduction of harmful emissions from mass production of steel in the world are aimed at:

- improving the quality of iron ore raw materials, increasing the iron content in the iron ore charge;

- improving the energy efficiency of existing technologies through the use of modern known metallurgical technologies (best available technology, BAT), which can save up to 20% of energy consumption;

- partial replacement of coke with pulverized coal and other energy sources, including coke and synthesis gas. In some regions, instead of coke and PVP, charcoal and wood waste are used in mini blast furnaces, or plastic waste;

збільшення частки металолому при виробництві сталі;

утилізація вторинного тепла металургійних процесів; використання відновлюваних джерел та зберігання енергії. Зокрема технологій, що дозволяють отримувати електроенергію із надлишкового тепла, встановлення турбін з рекуперацією верхнього тиску на колошнику ДП тощо;

уловлювання та використання CO_2 в сумісних технологічних процесах, зокрема, отримання з CO_2 синтез-газу з додаванням природного газу;

перехід на «зелене виробництво сталі», яке покликане зробити процес виробництва більш екологічним. Вуглецевий енергоносіє та відновники замінюється альтернативними джерелами різними способами.

Необхідно визнати, що металургія України базується на вуглецевих джерелах енергії і є однією з найбільш енергоємних галузей промисловості. Високий рівень енерговитрат при виробництві металопродукції ГМК істотно перевищує аналогічні показники зарубіжних підприємств (рис. 3).

В Україні виробництво сталі здійснюється переважно на великих інтегрованих металургійних підприємствах. Використання таких інтегрованих технологій супроводжується значною кількістю викидів CO_2 в атмосферу, що становить реальну загрозу екології та спричиняє стурбованість світового товариства. Обсяг питомих викидів залежить від технологій, що застосовуються в металургії. Структуру викидів CO_2 на інтегрованому металургійному підприємстві представлено на рис. 4.

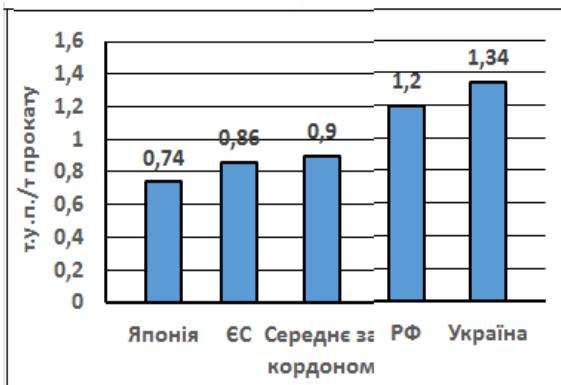


Рисунок 3 – Порівняння середніх питомих витрат енергоресурсів на виробництво прокату по країнах світу, т.у.п./т прокату.

increasing the share of scrap metal in steel production;

utilization of secondary heat of metallurgical processes; use of renewable sources and energy storage. In particular, technologies that allow to obtain electricity from excess heat, installation of turbines with recovery of upper pressure on the grate of the BF, etc.;

capture and use of CO₂ in compatible technological processes, in particular, production of CO₂ synthesis gas with the addition of natural gas;

the transition to "green steel production", which is designed to make the production process more environmentally friendly. Carbon energy and reducing agents are being replaced by alternative sources in various ways.

It should be recognized that Ukraine's metallurgy is based on carbon energy sources and is one of the most energy-intensive industries. The high level of energy consumption in the production of MMC metal products significantly exceeds similar indicators of foreign enterprises (Fig. 3).

In Ukraine, steel production is carried out mainly at large integrated metallurgical enterprises. The use of such integrated technologies is accompanied by a significant amount of CO₂ emissions into the atmosphere, which poses a real threat to the environment and is of concern to the world community. The amount of specific emissions depends on the technologies used in metallurgy. The structure of CO₂ emissions at the integrated metallurgical enterprise is presented in Fig. 4.

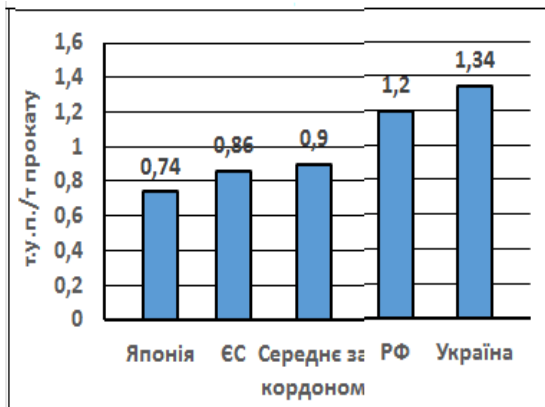


Figure 3 - Comparison of average specific energy costs for the production of rolled products in the world, t.p./t rolled.

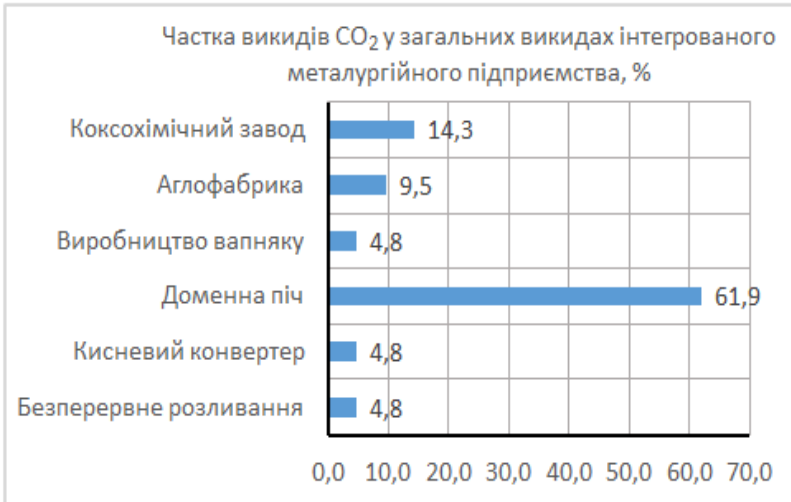


Рисунок 4 – Частка викидів CO₂ у загальних викидах інтегрованого металургійного підприємства, %.

У доменному виробництві, де відбувається безпосереднє відновлення заліза із залізняку, викидається основна кількість CO₂ на тону сталі. Викиди CO₂ коксохімічного заводу пов'язані з високотемпературним нагріванням коксівного вугілля, яке на 100% складається з вуглецю. Технологія конвертерного виплавляння не має значного потенціалу для зниження викидів через обмеженого застосування металевого лому.

При вирішенні проблеми декарбонізації виробництва сталі слід врахувати, що викиди парникових газів та CO₂ напряму пов'язані з використанням вугілля та коксу в технологічних процесах, без якого відновлювання оксидів заліза є неможливим. У той же час вуглець також є і головним енергоносієм у технологічних процесах, тому енергетичну функцію вуглецю можливо замінити іншими видами енергоносіїв. Однак, це свідчить також про те, що можливості щодо зниження викидів у металургійній галузі обмежені і необхідно створювати та впроваджувати нові технології декарбонізації сталі. Однак, крім необхідності розвитку нових технологій, традиційні теж не можна списувати з рахунків. Сучасні технології модернізуються і вдосконалюються з метою зменшення енерговитрат, підвищення якості продукції і забезпечення конкурентоспроможності на перенасиченому ринку.

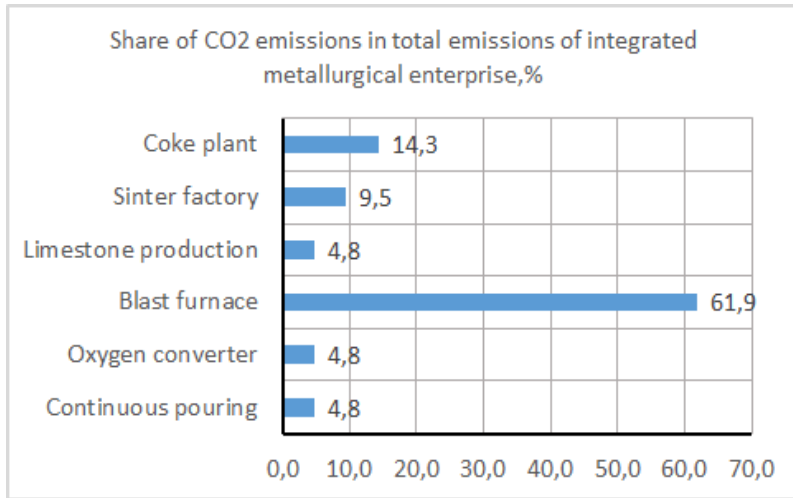


Figure 4 - Share of CO₂ emissions in total emissions of an integrated metallurgical enterprise, %.

In blast furnace production, where iron is directly recovered from iron ore, the main amount of CO₂ per ton of steel is emitted. The CO₂ emissions of the coke plant are related to the high-temperature heating of coking coal, which is 100% carbon. Converter smelting technology does not have significant potential to reduce emissions due to the limited use of scrap metal.

When solving the problem of decarbonization of steel production, it should be borne in mind that greenhouse gas and CO₂ emissions are directly related to the use of coal and coke in technological processes, without which the reduction of iron oxides is impossible. At the same time, carbon is also the main energy source in technological processes, so the energy function of carbon can be replaced by other types of energy. However, it also indicates that the opportunities to reduce emissions in the metallurgical industry are limited and it is necessary to create and implement new technologies for decarbonization of steel. However, in addition to the need to develop new technologies, traditional ones also cannot be written off. Modern technologies are being modernized and improved in order to reduce energy consumption, improve product quality and ensure competitiveness in a saturated market.

Якщо говорити про реконструкцію, то вона відбувається безперервно тією чи іншою мірою. На доменних печах з'являються системи очищення газів, на аглофабриках впроваджується система аспірації, модернізуються існуючі прокатні стани. Значно покращити якість готової продукції допомагає будівництво нових агрегатів на діючих підприємствах. Така тенденція спостерігається і на металургійних підприємствах України.

Проведений нами аналіз показує принципову можливість зменшити викиди парникового газу CO₂ при використанні вже відомих у світовій практиці технологій. Результати аналізу впливу відомих та перспективних технологій виробництва металопродукції на рівень викидів парникового газу CO₂ наведено на рис. 5. Наведемо розшифровку зазначених технологій.

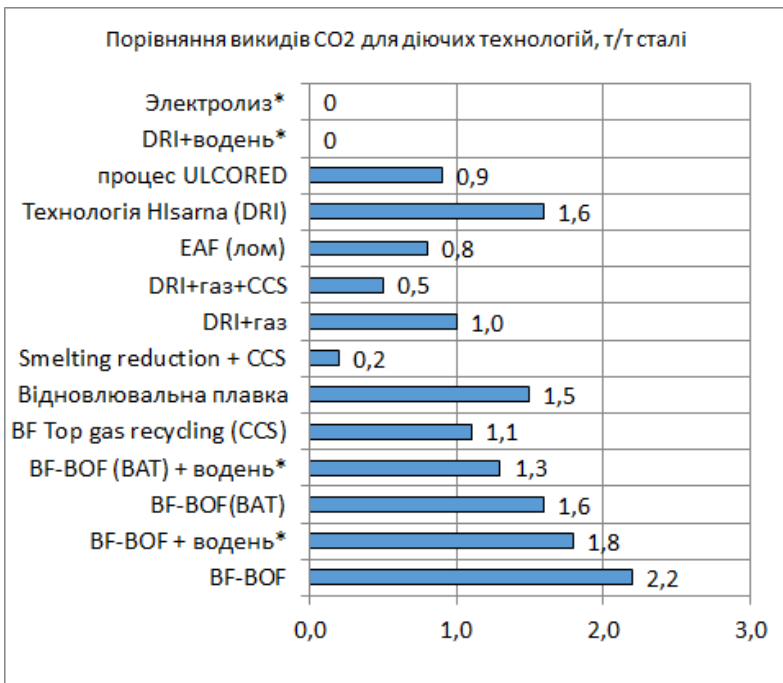


Рисунок 5 – Порівняння викидів CO₂ для діючих та перспективних технологій виробництва сталі.

If we talk about reconstruction, it is continuous to one degree or another. Gas purification systems are appearing on blast furnaces, aspiration systems are being introduced on sinter plants, and existing rolling mills are being modernized. The construction of new units at existing enterprises helps to significantly improve the quality of finished products. This trend is also observed at metallurgical enterprises of Ukraine.

Our analysis shows a fundamental opportunity to reduce CO₂ greenhouse gas emissions using technologies already known in world practice. The results of the analysis of the impact of known and promising technologies for the production of metal products on the level of greenhouse gas emissions of CO₂ are shown in Fig. 5. Here is a transcript of these technologies.

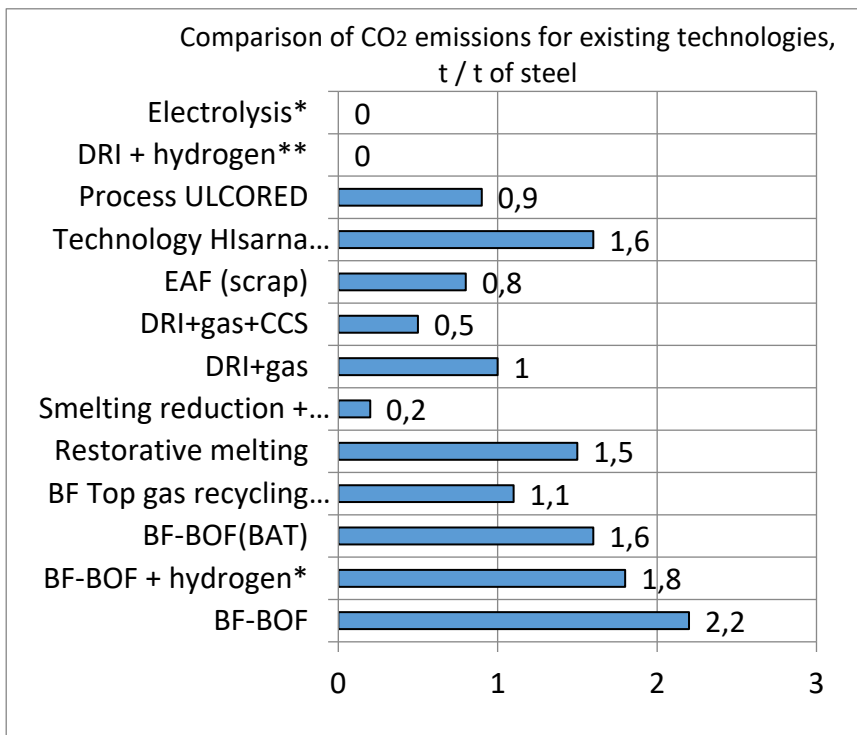


Рисунок 5 – Порівняння викидів CO₂ для діючих та перспективних технологій виробництва сталі.

BF-BOF – технологія виробництва сталі за схемою «доменна піч – кисневий конвертер» [6]. При використанні технології «доменна піч – кисневий конвертер» (BF-BOF process) питомі викиди CO_2 в середньому становлять близько 2,2 тонн $\text{CO}_2/\text{т}$ сталі. Причиною високих викидів за технології доменна піч – конвертер є використання вугілля (у вигляді коксу чи сировини для установок ПВП) та природного газу. Для прикладу – фірма Voestalpine передбачає часткову заміну існуючого доменного виробництва гібридно-електричною сталлю, що може до 2030 року скоротити викиди вуглецю на третину.

BF-BOF + водень – технологія виробництва сталі за схемою «доменна піч – кисневий конвертер» з використанням відновлювальних та енергетичних можливостей водню [7]. Для процесів доменної плавки неможливо обійтися без використання вуглецю (коксу). У той же час подача водню в ДП дозволить частково замінити кокс та ПВП, що дозволить знизити викиди CO_2 на 20%. При цьому водяна пара, що утворюється, замінює викиди CO_2 .

BF-BOF(BAT) – технологія виробництва сталі за схемою «доменна піч – кисневий конвертер», що використовує найкращі відомі технології виробництва чавуну та сталі [8]. За даними провідної інжинірингової компанії Primetals, використання існуючих найкращих металургійних технологій дозволить знизити викиди не більше ніж на 25-30%. Цього недостатньо для того, щоб досягати необхідних цілей зниження викидів. Для безвуглецевого виробництва потрібні нові технології, які поки що знаходяться лише на етапі розробки.

BF Top gas recycling (CCS) – технологія доменної плавки з використанням технології уловлювання, зберігання та використання доменного газу (CCS) [9].

Відновлювальна плавка (Smelting reduction) [10]. Можливість досягнення вуглецевої нейтральності може надати технологія відновлювальної плавки. Технологія відновлювальної плавки теоретично дозволяє виключити з виробничого процесу коксохімічний завод, аглофабрику, доменну піч та замінити їх двома агрегатами – відновлювальним реактором та плавильною піччю-газифікатором. Передбачається зниження витрат енергії на 20%. Отриманий металевий продукт може бути перероблено в кисневому конвертері. Технологія дозволяє замінити кокс вугіллям, формувати одне джерело викидів CO_2 та вловлювати до 90% викидів вуглекислого газу. Однак, реалізація цього процесу може зіткнутися з технічними труднощами, насамперед під час передачі напівпродукту з одного агрегату до іншого. Крім того, використання кращих доступних технологій (BAT) дозволяє досягти практично тих же показників викидів CO_2 .

BF-BOF - technology of steel production according to the scheme "blast furnace - oxygen converter" [6]. When using the technology "blast furnace-oxygen converter" (BF-BOF process) specific emissions of CO₂ on average is about 2.2 tons of CO₂ / t of steel. The reason for high emissions from blast furnace-converter technology is the use of coal (in the form of coke or raw materials for PVP plants) and natural gas. For example, Voestalpine plans to partially replace existing blast furnace production with hybrid-electric steel, which could reduce carbon emissions by a third by 2030.

BF-BOF + hydrogen - steel production technology according to the scheme "blast furnace - oxygen converter" using the reduction and energy capabilities of hydrogen [7]. For blast furnace smelting processes it is impossible to do without the use of carbon (coke). At the same time, the supply of hydrogen to the BF will partially replace coke and PVP, which will reduce CO₂ emissions by 20%. The resulting water vapor replaces CO₂ emissions.

BF-BOF (BAT) is a blast furnace-oxygen converter steel technology using the best known cast iron and steel technologies [8]. According to the leading engineering company Primetals, the use of existing best metallurgical technologies will reduce emissions by no more than 25-30%. This is not enough to achieve the required emission reduction targets. Carbon-free production requires new technologies that are still under development.

BF Top gas recycling (CCS) is a blast furnace smelting technology using blast furnace gas capture, storage and use (CCS) technology [9].

Smelting reduction [10]. The ability to achieve carbon neutrality can provide recovery smelting technology. The technology of reducing smelting theoretically allows to exclude from the production process a coke plant, sinter plant, blast furnace and replace them with two units - a reduction reactor and a melting furnace-gasifier. It is expected to reduce energy consumption by 20%. The resulting metal product can be processed in an oxygen converter. The technology allows to replace coke with coal, to form one source of CO₂ emissions and to capture up to 90% of carbon dioxide emissions. However, the implementation of this process may face technical difficulties, especially during the transfer of the intermediate product from one unit to another. In addition, the use of best available techniques (BAT) allows to achieve almost the same CO₂ emissions.

В даний час Tata Steel, Rio Tinto, ArcelorMittal, ThyssenKrupp, Voestalpine та Paul Wurth займаються тестуванням та подальшим розвитком технології

Smelting reduction + CCS – технологія відновлювальної плавки з використанням технології уловлювання, зберігання та використання (CCS), що відходить від технологічних агрегатів. Застосування технології CCS дозволяє скоротити викиди парникових газів до рівня 0,2 т CO₂/т сталі.

DRI + газ – технологія використання заліза прямого відновлення (DRI) в електродугових печах (EAF) [11]. Дозволяє знизити питомі викиди CO₂ рівня близько однієї тонни CO₂/т сталі. Пряме відновлення заліза з високозалізистої сировини спеціальними технологіями (Midrex, Arex, Hyl і т.д.). На виході утворюється так звана металізована сировина – гарячебрикетоване залізо (HBI), металізовані окатиші DRI (Direct Reduced Iron), губчасте залізо. Це металевий продукт з високим вмістом заліза, аж до 99%, який може відразу використовуватися в сталеплавильному переділі для отримання сталі. Однак, така технологія вимагає наявності залізородної сировини з високим вмістом заліза та низьким вмістом домішок та наявності великих енергетичних потужностей, що обмежує можливості застосування. У той же час бразильська залізородна корпорація Vale підписала меморандум про взаєморозуміння з китайською групою Jiangsu Shagang щодо спільної розробки технологій виплавки сталі з меншим вуглецевим слідом.

DRI + газ + CCS – технологія використання заліза прямого відновлення (DRI) в електродугових печах (EAF) з застосуванням технології CCS дозволяє зменшити викиди CO₂ до рівня 0,5 т CO₂/т сталі.

EAF (лом) – технологія виробництва сталі в електropечах з використанням металевого лому. При переробці металобрухту в електropечах викиди CO₂ становлять близько 0,8 т CO₂/т сталі. Використання металевого лому для виробництва сталі в електropечах дає можливість до 60% знизити витрати енергії (порівняно з виробництвом сталі за технологією «доменна піч-конвертер»). Підвищення частки металобрухту в кисневому конвертері до 30% дозволяє додатково знизити викиди CO₂. Саме тому переробка металобрухту є однією з екологічних «зелених» технологій. Однак, доступність металобрухту обмежує розвиток електросталеплавильного виробництва; Фірма Voestalpine виробила першу партію декарбонізованої сталі преміум-класу.

Tata Steel, Rio Tinto, ArcelorMittal, ThyssenKrupp, Voestalpine and Paul Wurth are currently testing and further developing the technology.

Smelting reduction + CCS - recovery smelting technology using technology of capture, storage and use (CCS), departing from technological units. The use of CCS technology can reduce greenhouse gas emissions to 0.2 tons of CO₂ / tons of steel.

DRI + gas - technology for the use of direct reduction iron (DRI) in electric arc furnaces (EAF) [11]. Reduces specific CO₂ emissions of about one ton of CO₂ / t of steel. Direct recovery of iron. from high-iron raw materials by special technologies (Midrex, Arex, Hyl, etc.). The output produces so-called metallized raw materials - hot briquetted iron (HBI), metallized pellets DRI (Direct Reduced Iron), sponge iron. It is a metal product with a high iron content of up to 99%, which can be used immediately in the steelmaking section to produce steel. However, such technology requires the presence of iron ore raw materials with high iron content and low impurity content and the presence of high energy capacity, which limits the possibilities used. At the same time, the Brazilian iron ore corporation Vale signed a memorandum of understanding with the Chinese group Jiangsu Shagang on the joint development of technologies for smelting steel with a lower carbon footprint.

DRI + gas + CCS - technology for the use of direct reduction iron (DRI) in electric arc furnaces (EAF) with the use of CCS technology can reduce CO₂ emissions to 0.5 tons of CO₂ / tons of steel.

EAF (scrap) - a technology for the production of steel in electric furnaces using scrap metal. During the processing of scrap metal in electric furnaces, CO₂ emissions are about 0.8 tons of CO₂ / tons of steel. The use of scrap metal for the production of steel in electric furnaces makes it possible to reduce energy costs by up to 60% (compared to the production of steel technology "blast furnace converter"). Increasing the share of scrap metal in the oxygen converter to 30% can further reduce CO₂ emissions. That is why the processing of scrap metal is one of the ecological «green» technologies. However, the availability of scrap metal limits the development of electric steelmaking; Voestalpine has produced the first batch of premium decarbonized steel.

В результаті кількох років роботи і сотень мільйонів євро інвестицій декарбонізувати сталь вдалося лише на 10%, в основному за рахунок збільшення частки металобрухту в шихті та купівлі зеленої е/енергії.

Технологія HIsarna (DRI) – одна з технологій прямого відновлення заліза [12]. Технологія є одним з напрямків «зеленого» виробництва сталі, який вже давно використовується в металургії. Пряме відновлення напівфабрикатів для виготовлення сталі відбувається з високовуглецевої сировини з використанням спеціальних технологій (Midrex, Arex, Hyl та ін.). Так звана металізована сировина - гарячебрикетоване залізо (HBI), металізовані гранули з DRI (пряме відновлене залізо) та губчасте залізо - виробляються таким чином. Це металеві вироби з високим вмістом заліза (до 99%), які можуть бути безпосередньо використані в процесі виробництва сталі. Таке пряме залізо є основним матеріалом для виробництва електросталі і використовується для заміни брухту та інших залізовмісних компонентів. Ця технологія розробляється вже більше 30 років. Його ефективність певною мірою доведена, але ця технологія спочатку вимагає наявності високочистих рудних матеріалів - залізовмісної сировини з високим вмістом Fe та низьким вмістом домішок - або наявності великих генеруючих потужностей. Проте, викиди парникового газу CO₂ становлять біля 1,6 т CO₂/т сталі.

Процес ULCORED – процес прямого відновлення Fastmelt з застосуванням технології CCS дозволяє знизити викиди CO₂ на 55% до рівня 0,9 т CO₂/т сталі [13].

DRI+водень – технологія застосування водню при виробництві відновленого заліза, теоретично дозволяє мати викиди CO₂ близькі до нуля та практично виключити вуглецевий слід при виробництві заліза.. Використання водню для прямого відновлення теоретично дозволяє безпосередньо використовувати будь-які види залізної руди. Цю технологію частково вже застосовують при збагаченні руди, але вводити її на комбінатах не поспішають через надмірну дорожнечу. Розпочали розвивати цю технологію такі металургійні гіганти, як ArcelorMittal, VoestAlpine, SSAB, Dillinger та низка інших виробників. Японський Nippon Steel заявляв про свої наміри до 2025 року відмовитися від технології використання вуглецю на користь водню.

As a result of several years of operation and hundreds of millions of euros of investment, only 10% of steel was decarbonized, mainly due to an increase in the share of scrap metal in the charge and the purchase of green electricity.

HIsarna (DRI) technology is one of the technologies of direct iron reduction [12]. The technology is one of the areas of «green» steel production, which has long been used in metallurgy. Direct recovery of semi-finished products for steel production is made of high-carbon raw materials using special technologies (Midrex, Arex, Hyl, etc.). The so-called metallized raw materials - hot briquetted iron (HBI), metallized granules of DRI (direct reduced iron) and sponge iron - are produced in this way. These are metal products with a high iron content (up to 99%), which can be used directly in the steel production process. Such direct iron is the main material for the production of electrical steel and is used to replace scrap and other iron-containing components. This technology has been developed for more than 30 years. Its effectiveness has been proven to some extent, but this technology initially requires the presence of high-purity ore materials - iron-containing raw materials with high Fe content and low impurity content - or the presence of large generating capacity. However, greenhouse gas emissions of CO₂ are about 1.6 tons of CO₂ / tons of steel.

ULCORED process - Fastmelt direct recovery process using CCS technology reduces CO₂ emissions by 55% to 0.9 tons of CO₂ / tons of steel [13].

DRI + hydrogen is a technology of using hydrogen in the production of reduced iron, theoretically allows to have CO₂ emissions close to zero and virtually eliminate the carbon footprint in the production of iron. The use of hydrogen for direct reduction theoretically allows the direct use of any type of iron ore. This technology is already partially used in ore beneficiation, but it is not in a hurry to introduce it at the plants due to excessive cost. Metallurgical giants such as ArcelorMittal, VoestAlpine, SSAB, Dillinger and a number of other manufacturers have begun to develop this technology. Japan's Nippon Steel has announced its intention to abandon carbon technology by 2025 in favour of hydrogen.

Voestalpine досліджує проривні технології використання водню в процесі виробництва сталі, щоб до 2050 року досягти виробництва сталі з нейтральним вуглецем. Було проведено випробування дослідної установки HYFOR для одержання відновленого заліза за допомогою водню. А шведська металургійна компанія SSAB виробила для компанії Volvo першу партію листового прокату з «безвуглецевої» сталі. Сировиною для цієї сталі було відновлене залізо, вироблене на експериментальній установці HYBRIT з використанням «зеленого» водню, отриманого електролізом. Для забезпечення процесу електролізу застосовувалася відновлювальна енергія гідроелектростанцій.

Електроліз – дещо екзотичний для масової металургії процес досягнення вуглецевої нейтральності. Такі процеси доцільно використовувати для кольорової металургії та спеціальних видів виробництва. Технологія знаходиться на стадії ранніх лабораторних досліджень і поки що немає можливості замінити масові технології виробництва сталі. Крім того, процес потребує стабільних джерел електроенергії, що в умовах високої ціни «зеленої» електроенергії не дозволяє розраховувати на широке його використання найближчим часом. Дослідженнями у цьому напрямі займаються Siderwin (ArcelorMittal), Boston Metal.

У металургійних колах давно обговорюють принципово нову технологію застосування водню для виробництва залізорудної сировини і, власне, металу [14]. Основною перевагою від застосування водню в металургії є можливість відмовитися від використання вуглецевмісних видів палива (вугілля, кокс, природний газ). Передусім, водень може бути використаний як паливо для металургійних агрегатів. Однак водень поки обходиться дорожче, ніж паливо, що містить вуглець. Реального зниження емісії CO₂ можна досягти тільки при використанні «зеленої» енергії з відновлюваних джерел для виробництва водню. Тому орієнтація на проекти водневої металургії стає довгостроковим трендом.

Використання водню в агрегатах прямого відновлення та агломерації може відновлювати до 50% заліза. Водень, як енергетичний замітник може бути використаний практично у всіх технологіях металургійного виробництва. Однак поки що масове виробництво водню потребує великих затрат електроенергії і такі технології тільки почали розвиватися. Крім того, необхідно вирішити безліч наукових, технічних та організаційних проблем з безпекою застосування водню, що відсуває застосування водню у металургії на перспективу. Дослідження у напрямку практичної реалізації технології використання водню ведуть провідні металургійні фірми SSAB, Voestalpine, ArcelorMittal та низка інших.

Voestalpine is exploring breakthrough technologies in the production of hydrogen in the steel production process to achieve neutral carbon steel production by 2050. In particular, a test of the HYFOR experimental plant for the production of reduced iron with hydrogen was performed. And the Swedish metallurgical company SSAB produced the first batch of "carbon-free" steel sheet for Volvo. The raw material for this steel was reduced iron produced at the HYBRIT experimental plant using "green" hydrogen obtained by electrolysis. Renewable energy of hydroelectric power plants was used to ensure the electrolysis process.

Electrolysis is a somewhat exotic process for mass metallurgy to achieve carbon neutrality. Such processes should be used for non-ferrous metallurgy and special types of production. The technology is at the stage of early laboratory research and so far there is no possibility to replace mass technologies of steel production. In addition, the process requires stable sources of electricity, which in the face of high prices for «green» electricity does not allow to count on its widespread use in the near future. Siderwin (ArcelorMittal), Boston Metal are engaged in research in this direction.

Metallurgical circles have long been discussing a fundamentally new technology for the use of hydrogen for the production of iron ore and, in fact, metal [14]. The main advantage of using hydrogen in metallurgy is the ability to abandon the use of carbonaceous fuels (coal, coke, natural gas). First of all, hydrogen can be used as a fuel for metallurgical units. However, hydrogen is still more expensive than fuel containing carbon. A real reduction in CO₂ emissions can only be achieved by using «green» energy from renewable sources for hydrogen production. Therefore, the focus on hydrogen metallurgy projects is becoming a long-term trend.

The use of hydrogen in direct reduction and agglomeration units can reduce up to 50% of iron. Hydrogen as an energy substitute can be used in almost all technologies of metallurgical production. However, so far mass production of hydrogen requires high energy costs and such technologies have only just begun to develop. In addition, it is necessary to solve many scientific, technical and organizational problems with the safety of hydrogen, which pushes the use of hydrogen in metallurgy in the future. Leading metallurgical companies SSAB, Voestalpine, ArcelorMittal and a number of others are conducting research in the field of practical implementation of hydrogen technology.

Одним з напрямків досягнення вуглецевої нейтральності у металургії є уловлювання, збереження та використання CO_2 в суміжних технологічних процесах (Carbon capture and storage, CCS; Carbon capture and use, CCU) [Улавливание и хранение углерода (CCS, CCU)] [15]. Недоліком такої технології є те, що після використання газу в інших технологічних операціях, він все одно потрапляє в атмосферу. Виключити цей недолік можна при використанні замкнутих циклів виробництва. У металургії використання цих технологій ускладнено наявністю кількох розкиданих джерел викидів, що дозволяє вловлювати понад 60% викидів. Для реалізації цього напрямку необхідно сконцентрувати виробництво в обмеженій кількості агрегатів для уловлювання шкідливих викидів.

Експертні оцінки показують, що на даний час використання вуглецю як відновника та як джерела енергії в металургійному виробництві в даний час є необхідним. Досягти суттєвого зменшення використання вугілля та коксу у металургійному виробництві можливо лише у довгостроковій перспективі. На цьому шляху є ціла низка технічних та фінансових проблем, у тому числі:

- велика кількість джерел викидів на інтегрованих металургійних підприємствах, що суттєво ускладнює збирання та утилізацію парникових газів CO_2 ;

- джерелом викидів є також використовувана сировина (ЗРС, кокс), яку у металургії неможливо замінити;

- необхідність кардинальної зміни діючих процесів виробництва сталі;

- необхідність великих інвестицій, які можна порівняти з будівництвом нових заводів;

- вища (порівняно з традиційними) собівартість виробництва при використанні маловуглецевих технологій (вище на 20-70%);

- залежність металургійного виробництва від держави, від якої залежатимуть участь у фінансуванні проектів декарбонізації, застосування нових технологій, вирівнювання умов конкуренції, нейтралізації соціальних ризиків.

Нині для зменшення викидів CO_2 і впровадження технологій декарбонізації виробництва металопродукції перед Україною постають наступні проблеми:

1. Необхідність структурної перебудови металургійної галузі. В останні 10-15 років внутрішнє споживання металопродукції не перевищує 4-5 млн. тон. Такий внутрішній попит свідчить про занепад у металоспоживаючих галузях економіки країни та застарілий сортамент металургійної продукції.

One of the ways to achieve carbon neutrality in metallurgy is the capture, storage and use of CO₂ in related processes (Carbon capture and storage, CCS; Carbon capture and use, CCU) [Carbon capture and storage (CCU) [15]. This technology is such that after the use of gas in other technological operations, it still enters the atmosphere. This disadvantage can be eliminated by using closed production cycles. In metallurgy, the use of these technologies is complicated by the presence of several scattered emission sources, which can capture more than 60% of emissions. To implement this direction, it is necessary to concentrate production in a limited number of units to capture harmful emissions.

Expert assessments show that the use of carbon as a reducing agent and as a source of energy in metallurgical production is currently necessary. Achieving a significant reduction in the use of coal and coke in metallurgical production is possible only in the long run. There are a number of technical and financial issues along the way, including:

- a large number of emission sources at integrated metallurgical enterprises, which significantly complicates the collection and disposal of CO₂ greenhouse gases;

- the source of emissions is also the used raw materials (ZRS, coke), which cannot be replaced in metallurgy;

- the need for a radical change in the existing processes of steel production;

- the need for large investments, which can be compared with the construction of new plants;

- higher (compared to traditional) production costs using low-carbon technologies (20-70% higher);

- dependence of metallurgical production on the state, on which participation in financing of decarbonisation projects, application of new technologies, leveling of competition conditions, neutralization of social risks will depend.

Currently, Ukraine faces the following problems in reducing CO₂ emissions and introducing technologies for decarbonization of metal products:

1. The need for structural adjustment of the metallurgical industry. In the last 10-15 years, domestic consumption of metal products does not exceed 4-5 million tons. Such domestic demand indicates a decline in the metal-consuming sectors of the economy and an outdated range of metallurgical products. It should be recognized that the trend of decarbonization of steel significantly changes traditional metallurgy.

Слід визнати, що тенденція декарбонізації сталі суттєво змінює традиційну металургію. Можна припустити, що багато якісні виробы та якісні матеріали можуть змінити свою форму існування.

2. Вирішення питання з неефективним експортом сировинних матеріалів та напівфабрикатів. Нині біля 85% металопродукції, що виробляється в Україні іде на експорт, з яких більше половини складає експорт залізної руди та напівфабрикатів. На виробництво напівфабрикатів приходить більше 70% шкідливих викидів, у тому числі CO₂.

3. Вирішення питання докорінної модернізації металургійної галузі за рахунок впровадження енергозберігаючих та принципово нових технологій виробництва сталевих продукції. Затримка з розробленням та впровадженням ефективних технологій декарбонізації сталі становить загрозу для металургійної галузі внаслідок можливого зменшення конкурентної спроможності української металопродукції на світових ринках.

4. Головний акцент розвитку металургії у світі сьогодні робиться на «зелене виробництво сталі». Це дозволить галузі вистояти перед обличчям екологічних проблем і тиском з боку регулюючих органів. Тому в процесах декарбонізації сталі важлива роль належить науковим дослідженням, які у напрямку оптимального співвідношення відновлювальних та енергетичних показників вуглецю поки що проводилися недостатньо. Металургійні технології, що забезпечують докорінне зниження викидів парникових газів, у тому числі CO₂, в даний час представлені переважно окремими науковими розробками.

5. Окрім науково-технічних завдань розроблення вуглецевої нейтральності металургійних технологій, головною проблемою є фінансування використання маловуглецевих технологій. Зниження викидів у металургії потребує значного збільшення капітальних інвестицій та експлуатаційних витрат для металургійних підприємств. Досягнення цілей зниження викидів можливе лише за взаємодії науки, підприємств та держави. Без державної підтримки реалізація таких глобальних проєктів неможлива.

Таким чином, для створення процесів декарбонізації сталі необхідно значим чином розширити наукові дослідження як традиційних, так і перспективних технологій металургійного виробництва.

В той же час у 2019-му році витрати української промисловості на науково-дослідну діяльність та розробки в середньому в 3-4 рази менше навіть від центральноєвропейських країн (Польща, Угорщина, Чехія, Словаччина) [16].

It can be assumed that many high-quality products and quality materials can change their form of existence.

2. Resolving the issue of inefficient export of raw materials and semi-finished products. Currently, about 85% of metal products produced in Ukraine are exported, of which more than half are exports of iron ore and semi-finished products. Semi-finished products account for more than 70% of harmful emissions, including CO₂.

3. Solving the issue of radical modernization of the metallurgical industry through the introduction of energy-saving and fundamentally new technologies for steel production. Delays in the development and implementation of efficient steel decarbonization technologies pose a threat to the metallurgical industry due to a possible reduction in the competitiveness of Ukrainian metal products on world markets.

4. The main emphasis of metallurgy development in the world today is on "green steel production". This will allow the industry to withstand environmental problems and pressure from regulators. Therefore, in the processes of decarbonization of steel an important role belongs to scientific research, which in the direction of the optimal ratio of renewable and energy performance of carbon has not been conducted enough. Metallurgical technologies that provide a radical reduction in greenhouse gas emissions, including CO₂, are currently represented mainly by separate scientific developments.

5. In addition to scientific and technical tasks of developing carbon neutrality of metallurgical technologies, the main problem is the financing of the use of low-carbon technologies. Reducing emissions in metallurgy requires a significant increase in capital investment and operating costs for metallurgical enterprises. Achieving emission reduction targets is possible only through the interaction of science, enterprises and the state. Without state support, the implementation of such global projects is impossible.

Thus, in order to create the processes of decarbonization of steel, it is necessary to significantly expand research into both traditional and promising technologies of metallurgical production.

At the same time, in 2019, the costs of Ukrainian industry for research and development on average 3-4 times less even than Central European countries (Poland, Hungary, Czech Republic, Slovakia) [16].

Низький рівень інвестицій в наукомісткі виробництва поступово, але неухильно зменшує конкурентоздатність українських виробництв. При цьому у галузі металургії державної підтримка, у тому числі наукової практично не було.

Висновки

Показано, що тенденція декарбонізації сталі суттєво змінює традиційну металургію. Відмічено можливості застосування технологій декарбонізації в процесі підготовки шихтових матеріалів, виробництва чавуну та сталі. У той же час, сучасні технології виробництва металопродукції не дозволяють у значній мірі відмовитися від використання вуглецю (вугілля та коксу) як відновника та енергоносія у технологічних процесах.

Показано, що для зменшення викидів CO₂ металургією України і впровадження технологій декарбонізації виробництва металопродукції необхідно враховувати такі питання: необхідність структурної перебудови металургійної галузі, докорінної модернізації металургійної галузі за рахунок впровадження енергозберігаючих та впровадження принципово нових технологій виробництва сталевих продукції; обмеження неефективного експорту сировинних матеріалів та напівфабрикатів; впровадження технологій «зеленого» виробництва сталі; посилення ролі наукових досліджень у виробництві металургійної продукції з малим вуглецевим слідом; посилення взаємодії науки, підприємств та держави у реалізації глобальних проєктів виробництва маловуглецевої металургійної продукції.

Представлено можливості сучасних та перспективних металургійних процесів щодо виробництва продукції з мінімальним вуглецевим слідом.

Перелік посилань

1. Україна об'язалась відмовитися від вугля до 2040 року. *reporter.ua* : веб-сайт. URL: <https://dp.reporter.ua/articles/ukraina-objazalas-otkazatsja-ot-uglja-k-2040-godu>
2. Обеспечение климатически нейтральной экономики. *European Commission* : веб-сайт. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1259
3. За даними аналізу NASA, 2020 рік став найтеплішим за всю історію. *Climate.nasa.gov* : веб-сайт. URL: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature>
4. Дорожная карта технологий черной металлургии. *International Energy Agency* : веб-сайт. URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
5. Механізм регулювання вуглецевих кордонів. *European Commission* : веб-сайт. https://ec.europa.eu/taxation_customs/green-taxation-0/carbon-border-adjustment-mechanism_en
6. Найпоширенішою технологією виготовлення сталі є Bf-Bof Route. *sail.co.in* : веб-сайт. URL <https://sail.co.in/en/learning-center/coke-ovens-sinter-bf-bof-route>

The low level of investment in knowledge-intensive industries is gradually but steadily reducing the competitiveness of Ukrainian industries. In the field of metallurgy, there was almost no state support, including scientific support.

Conclusions

It is shown that the tendency of decarbonization of steel significantly changes traditional metallurgy. Possibilities of application of decarbonization technologies in the process of preparation of charge materials, production of cast iron and steel are noted. At the same time, modern technologies for the production of metal products do not allow to significantly abandon the use of carbon (coal and coke) as a reducing agent and energy source in technological processes.

It is shown that in order to reduce CO₂ emissions by metallurgy of Ukraine and introduce technologies for decarbonization of metal production it is necessary to take into account the following issues: the need for structural restructuring of the metallurgical industry, radical modernization of the metallurgical industry; limiting inefficient exports of raw materials and semi-finished products; introduction of "green" steel production technologies; strengthening the role of research in the production of metallurgical products with low carbon footprint; strengthening the interaction of science, enterprises and the state in the implementation of global projects for the production of low-carbon metallurgical products.

Possibilities of modern and promising metallurgical processes for the production of products with minimal carbon footprint are presented.

References

1. Ukraina obyazalas' otkazat'sya ot uglja k 2040 godu [Ukraine pledged to phase out coal by 2040]. *dp.reporter.ua*. Retrieved from <https://dp.reporter.ua/articles/ukraina-objazalas-otkazatsja-ot-uglja-k-2040-godu>
2. Powering a climate-neutral economy. *ec.europa.eu*. Retrieved from https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1259
3. 2020 Tied for Warmest Year on Record, NASA Analysis Shows. *climate.nasa.gov*. Retrieved from <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature>
4. Iron and Steel Technology Roadmap. *www.iea.org*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
5. Carbon Border Adjustment Mechanism. *ec.europa.eu*. Retrieved from https://ec.europa.eu/taxation_customs/green-taxation-0/carbon-border-adjustment-mechanism_en
6. The most common steel making technology is the Bf-Bof Route. *sail.co.in* Retrieved from <https://sail.co.in/en/learning-center/coke-ovens-sinter-bf-bof-route>

7. Красавцев Н. И. Некоторые теоретические вопросы, связанные с вдуванием в доменную печь восстановительных газов. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1961. № 112. С. 31-39.
8. Довідковий документ про найкращі доступні технології (BAT) для виробництва чавуну та сталі. Директива про промислові викиди 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and Control. 2013 : веб-сайт. URL: <http://eippcb.jrc.es>
9. Jan van der, Louwerse G., Sert D. D., Hirsch A., Eklund N., Pettersson M. Top gas recycling blast furnace developments for 'green' and sustainable ironmaking. *Ironmaking & Steelmaking*. 2013. 40 (7). 483-489. <https://doi.org/10.1179/0301923313Z.000000000221>
10. Відновлювальна плавка. *sail.co.in* : веб-сайт. URL <https://sail.co.in/en/learning-center/smelting-reduction-technologies>
11. Виробники сталі звернулися до іберійських обіцянок зеленого водню для проєктів DRI. *spglobal.com* : веб-сайт. URL <https://www.spglobal.com/platts/ru/market-insights/latest-news/energy-transition/120221>
12. Процес HISARNA. *totalmateria.com* : веб-сайт. URL <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=RU&NM=482>
13. Процес прямого відновлення. *steel-360.com* : веб-сайт. URL <https://www.steel-360.com/technology-next/ulcored-process>
14. Минэнерго разработало три документа для подготовки Водородной стратегии Украины. *Uaprom. info* : веб-сайт. URL: <http://uaprom.info/news/179101-minenergo-razrabotalo-tri-dokumenta-podgotovki-vodorodnoj-strategii-ukrainy.html>.
15. Улавливание и хранение углерода (CCS, CCU). *exxonmobil.ru* : веб-сайт. URL <https://www.exxonmobil.ru/ru-ru/Research-and-innovation/Carbon-capture-and-storage>
16. Витрати української промисловості на науково-дослідну діяльність. *ubta.com.ua* : веб-сайт. URL https://ubta.com.ua/files/20210713/Annex_1.pdf

*Стаття надійшла до редакції збірника 19 жовтня 2021 р.
Пройшла внутрішнє та зовнішнє рецензування.
(Протокол засідання редакційної колегії
збірника № 4 від 22 грудня 2021 року)*

7. Krasavtsev N.I. (1961). Nekotorye teoreticheskie voprosy, svyazannye s vduvaniem v domennuyu pech' vosstanovitel'nyh gazov [Some theoretical issues related to the injection into the blast furnace of reducing gases]. *Izv. VUZov. Chernaya metallurgiya [Izvestiya. Ferrous metallurgy]*, 1961, 112, 31-39. [In Russian].
8. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. (2010). Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and Control. 2013. Retrieved from <http://eippcb.jrc.eu>
9. Jan van der Louwse G., Sert D.D., Hirsch A., Eklund N., Pettersson M. Top gas recycling blast furnace developments for 'green' and sustainable ironmaking. *Ironmaking & Steelmaking*. 2013. 40 (7). 483-489. <https://doi.org/10.1179/0301923313Z.000000000221>
10. Smelting reduction. *sail.co.in*. Retrieved from <https://sail.co.in/en/learning-center/smelting-reduction-technologies>
11. Steelmakers drawn to Iberian promise of green hydrogen for DRI projects. *spglobal.com* Retrieved from <https://www.spglobal.com/platts/ru/market-insights/latest-news/energy-transition/120221>
12. The HISARNA Process. *totalmateria.com*. Retrieved from <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=RU&N M=482>
13. Direct recovery process. *steel-360.com*. Retrieved from <https://www.steel-360.com/technology-next/ulcored-process>
14. Minenergo razrabotalo tri dokumenta dlya podgotovki Vodorodnoj strategii Ukrainy [The Ministry of Energy has developed three documents for the preparation of the Hydrogen Strategy of Ukraine]. *uaprom.info*. Retrieved from <http://uaprom.info/news/179101-minenergo-razrabotalo-tri-dokumenta-podgotovki-vodorodnoj-strategii-ukrainy.html>
15. Carbon capture and storage (CCS; CCU). *exxonmobil.ru*. Retrieved from <https://www.exxonmobil.ru/ru-ru/Research-and-innovation/Carbon-capture-and-storage>
16. Costs of Ukrainian industry for research activities. *ubta.com.ua*. Retrieved from https://ubta.com.ua/files/20210713/Annex_1.pdf

*The article was received by the editors of the collection
on October 19, 2021, passed internal and external review.
(Record of the meeting of the editorial board of collection
No. 4 dated December 22, 2020)*