

обмеженні факторів: $-1 \leq x_i \leq 1$. Вирішення оптимізаційних завдань виконали з використанням методу невизначених множників Лагранжа:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial x_1} = -0,0086 - 0,0145x_2 + 0,0037x_3 + 0,0786x_1 + 2\lambda x_1 = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial x_2} = 0,0049 - 0,0145x_1 - 0,0077x_3 - 0,0012x_2 + 2\lambda x_2 = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial x_3} = 0,0073 + 0,0037x_1 - 0,0077x_2 + 0,0076x_3 + 2\lambda x_3 = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 - R^2 = 0. \end{cases}$$

(2)

Для вирішення системи рівнянь (2) та обчислення значень функції відгуку розробленої моделі використовували програмний пакет Mathematica 10, проводячи розрахунки за зміни радіусу сфери R від 0 до 1.

Отримані результати дозволили формулювати технологічні рекомендації для процесу виробництва двокомпонентних залізовуглецевмісних брикетів: найбільша ущільнюваність шихтової суміші може бути досягнута при максимальній крупності матеріалів і не менш ніж 80% вмісту одного з компонентів, а найменша ущільнюваність шихти - при мінімальній крупності матеріалів і приблизно рівному вмісту компонентів в суміші.

Список літератури

1. Khudyakov A. Yu. New method for predicting the compactability of charges made from fine materials of the mining and smelting industry / A.Yu. Khudyakov, S.V. Vashchenko, K.V. Baiul et al.// Metallurgist. – 2022- Vol. 65, Nos. 9-10–P.941-951.

УДК 330.34(477).669

В.І. Шатоха, М.В. Ягольник, М.О. Фурсов

Український державний університет науки і технологій (УДУНТ), м. Дніпро

СЦЕНАРІЙ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ

Чорна металургія є другою за обсягом споживання енергії та першою за рівнем викидів діоксиду вуглецю промисловою галуззю у світі [1]. Тому досягнення глобальних завдань зі скорочення викидів парникових газів з метою запобігання зміни клімату є неможливим без суттєвої технологічної трансформації даної галузі та припинення неконтрольованого зростання виробництва та споживання сталі у світі. Разом із тим

сталь залишається основою нашої цивілізації – за великим рахунком людство продовжує жити у залізній добі. У розвинутих країнах спостерігається стабілізація, а подекуди й скорочення споживання сталі.

Особливо цікава ситуація в Україні. З одного боку, виробництво сталі, а разом з тим і валові викиди парникових газів, тут скоротилися протягом останніх тридцять років майже втричі. З іншого боку більшість технологій та агрегатів є надто застарілими, тому питомі викиди парникових газів на одиницю сталевих продукції в Україні є найвищими у світі. Слід додати, що сьогодні ми експортуємо близько 85 відсотків виробленої сталі, разом із тим, відкладена потреба в модернізації транспортної, промислової та комунальної інфраструктури перевищує 300 мільйонів тон сталі [2], що відповідає приблизно п'ятнадцятирічному виробництву за умови максимально повного використання існуючих виробничих потужностей, а отже існує навіть певний потенціал для подальшого зростання (не кажучи про складно вимірювану потребу у сталі у разі відновлення зруйнованої інфраструктури Донбасу).

Окремої уваги заслуговує питання технологічної трансформації. У розвинутих країнах Європейського Союзу, в Японії, Південній Кореї та в деяких інших країнах енергетична ефективність металургійних агрегатів у багатьох випадках сягнула максимуму коли подальше зростання ефективності є неможливим, що зумовлюється термодинамічними обмеженнями. У той же час, більшість радикально нових технологій, розробники яких обіцяють суттєве скорочення викидів парникових газів при виробництві чавуну і сталі, вже надто тривалий час знаходиться на стадії пілотних, чи навіть лабораторних, випробувань, що не дозволяє сподіватися на їх швидку комерціалізацію.

Все більшого значення набувають питання циркулярної економіки та матеріальної ефективності. Дійсно, як буде показано нижче, ці питання мають бути невід'ємною частиною стратегій розвитку металургійної галузі.

Після тривалої стагнації виробництва сталі протягом 1970-х -1990-х років, за останні 20 років у річне світове виробництво сталі зросло більше ніж за всю попередню історію людства. Досі небачені темпи зростання забезпечувалися збільшенням виробництва у Китаї. Втім, з урахуванням поточної політики КНР щодо майбутнього розвитку, наступні тренди та динаміка зміни виробництва сталі потребують детального аналізу.

Найбільш фундаментальним є сценарій 2°C Scenario (2DS), розроблений Міжнародним енергетичним агентством та оприлюднений у 2014 році [3]. Цей сценарій описує енергетичну систему та траєкторії викидів CO₂ сумісні (з вірогідністю понад

50%) з утриманням глобального потепління у межах 2°C до 2100 року. На рис.1 проілюстровано траєкторії зміни виробництва чорної сталі за двома варіантами сценарію 2DS – з низькою (low demand) та високою (high demand) потребою на сталь.

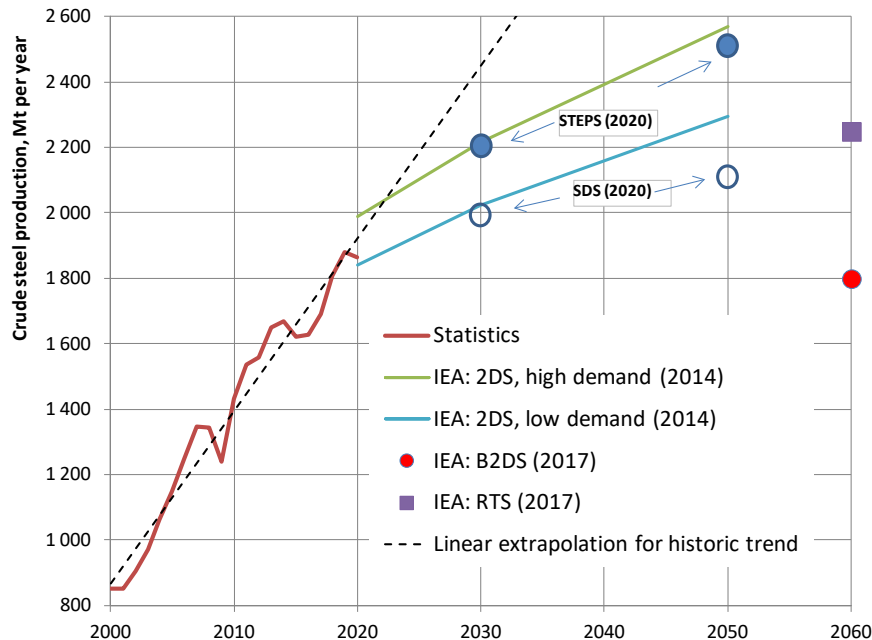


Рис.1 - Статистичні дані та сценарії розвитку світового виробництва сталі (розроблено авторами з використанням джерел [1,3,4]; аббревіатури – в тексті)

У 2017 році було розроблено Reference Technology Scenario (RTS) [5], який бере до уваги зобов'язання країн зі скорочення викидів та підвищення енергоефективності, включаючи ті, що прийняті в межах Паризької Угоди. Одночасно, у 2017 році було оприлюднено Beyond 2°C Scenario (B2DS) [5], який досліджує наскільки впровадження технологій, які вже наявні, або знаходяться у розробці, можуть призвести людство поза межами (beyond) сценарію 2DS. Як видно з рис.1, згідно із цим сценарієм світове виробництво сталі у 2060 році має бути меншим ніж у 2020 році.

Загалом, можна сказати, що, враховуючи поточний статистичний тренд, усі зазначені вище сценарії щодо майбутнього виробництва являють собою певний виклик, але не є такими, які можна було б назвати цілком неймовірними. Інше враження складають сценарії щодо викидів парникових газів. Так сценарій 2DS передбачає, що до 2050 року відносно 2011 року має відбутися скорочення викидів CO₂ у чорній металургії (включно з виробництвом коксу) на 28% одночасно зі збільшенням виробництва сталі на 51%. Більше того, сценарій B2DS передбачає, що до 2060 року відносно 2017 року річні викиди CO₂ мають скоротитися до 208 млн т CO₂/рік – тобто на 91% одночасно

сно зі збільшенням виробництва сталі на 10%. Як видно з рис.2 такі тренди є небаченими в історії – викиди CO₂ завжди змінювалися пропорційно виробництву, а зараз зростання виробництва має супроводжуватися скороченням викидів.

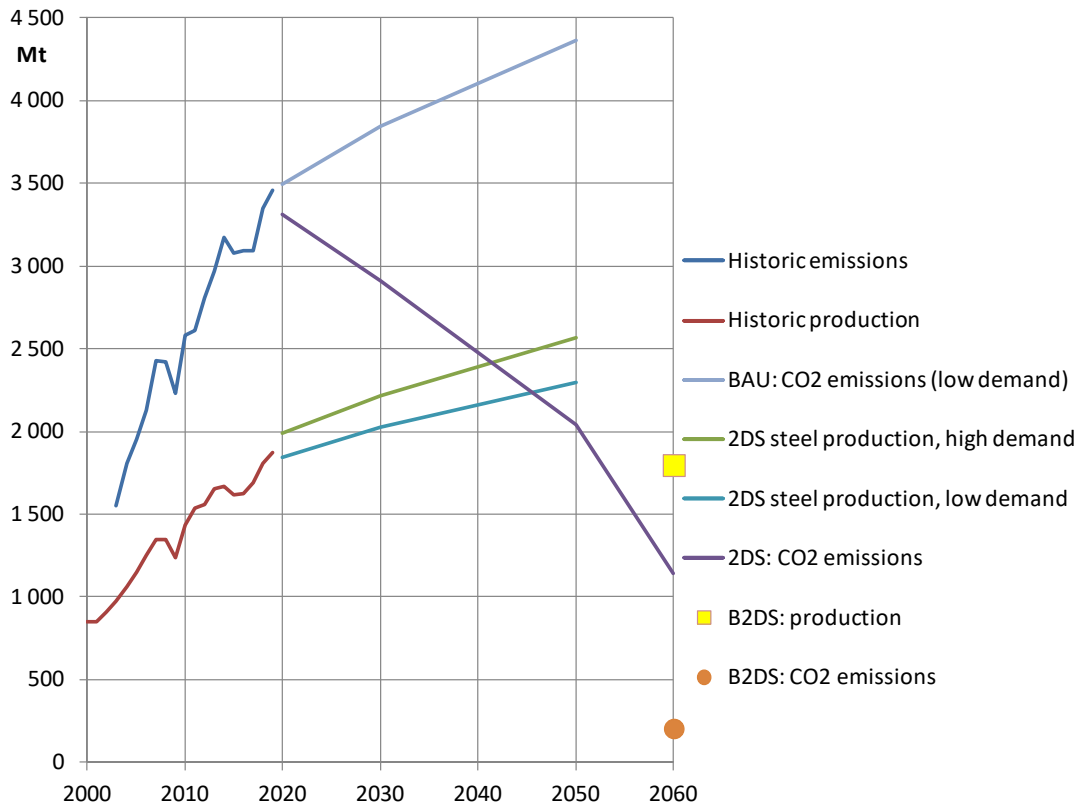


Рис. 2 - Статистичні дані та сценарії траєкторій викидів CO₂ (розроблено авторами з використанням джерел [1,3,4]; аббревіатури – в тексті)

Враховуючи рівні питомих викидів, притаманні для різних шляхів виробництва сталі, та частку окремих технологічних ланок у загальних викидах, суттєве скорочення викидів CO₂ можливе шляхом:

- 1) Збільшення частки вторинної металургії;
- 2) Підвищення енергоефективності шляхом впровадження найкращих доступних технологій (НДТ);
- 3) Підвищення частки виробництва металізованої сировини (DRI) з використанням природного газу та скорочення використання вугілля для виробництва DRI;
- 4) Впровадження інноваційних технологій: наприклад, виробництво чавуну шляхом рідкофазного відновлення, яке виключає потребу у оґрудкуванні сировини;
- 5) Впровадження технологій уловлювання та захоронення/використання діоксиду вуглецю (CCSU).

Слід також додати, що електрифікація виробництва сталі не має сенсу без декарбонізації генерування електроенергії. Сценарій B2DS [5] припускає наступне:

- що світова генерація електрики буде повністю декарбонізована до 2050 року;
- що частка електроенергії з відновлювальних джерел сягне 74% у 2060 році, причому виробництво електроенергії без застосування CCS припиняється до 2040 року;
- що середньосвітовий показник питомих викидів CO₂ при виробництві електроенергії стане від'ємним після 2050 року і сягне -10 г CO₂/кВт·г у 2060 році.

Існуючі сценарії розвитку світової чорної металургії, спрямовані на прогноз майбутніх обсягів промислового виробництва і споживання сталі у світі та моделювання траєкторії зміни викидів парникових газів, потребують дуже суттєвої технологічної трансформації при виробництві та споживанні сталі. Навіть реалізація найбільш амбітних сценаріїв в комплексі інших заходів з декарбонізації електроенергії не забезпечує вихід на траєкторію викидів, сумісну з обмеженням глобального потепління в межах 1,5°C.

Реалізація сценаріїв сталого розвитку буде неможливою, якщо не буде забезпечено відокремлення викидів CO₂ від зростання виробництва. Суттєве скорочення викидів CO₂ можливе шляхом: збільшення частки вторинної металургії; підвищення енергоефективності шляхом впровадження НДТ; підвищення частки виробництва металізованої сировини; впровадження інноваційних технологій виробництва чавуну, впровадження технологій уловлювання та захоронення/використання діоксиду вуглецю.

Металургійний сектор України не модернізований належним чином, тоді як для вибору стратегії розвитку з урахуванням кліматичних зобов'язань бракує належного наукового підґрунтя. Надмірна експортна орієнтація металургійної галузі України робить її дуже вразливою до проблем глобальної економіки. Зокрема, застосування механізму вуглецевого корегування імпорту може становити загрозу конкурентоспроможності, що вимагає швидкої модернізації галузі.

Виконаний аналіз дає підставу для висновку про те, що виконання кліматичних завдань потребує додаткових зусиль не лише наукової та промислової спільноти. Сьогодні потрібні переконливі політичні рішення щодо механізмів фінансової підтримки для розробки та впровадження інноваційних технологій, а також трансферу найкращих доступних технологій, що має забезпечити швидку технологічну трансформацію на

усіх ланках металургійного виробництва з урахуванням як короткотермінових соціально-економічних завдань так і довготермінових стратегій.

Список літератури

1. Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking/ International Energy Agency, OECD/IEA, Paris, 2020. 190 p.
2. Украинская металлургия: современные вызовы и перспективы развития/ А.И. Амоша, В.И. Большаков, А.А. Минаев, Ю.С. Залознова, Л.А. Збаразская, Ю.В. Макогон и др. Донецк: НАН Украины, Ин-т экономики пром-сти, 2013, 114 с.
3. Energy technology perspectives: harnessing electricity's potential. OECD/IEA, Paris, 2014, 382 p.
4. World Steel Association. Statistical reports. <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook.html> (дата звернення: 02.12.2021).
5. Energy Technology Perspectives: Catalysing energy technology transformations. OECD/IEA, Paris, 2017, 33 p.

УДК 69.14.018.298:621.789

В. Ж. Шемет¹, А. Ю. Семенко², М. М. Ворон², А. М. Тимошенко²

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

²Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

e-mail: semenko.au@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ Fe-Mn-Al-C СТАЛЕЙ

Fe-Mn-Al-C сталі отримали велику увагу щодо застосування в конструкціях автомобілів завдяки чудовому поєднанню низької густини, високого рівня механічних властивостей та стійкості до корозії. Загальновідомо, що хімічний склад, особливо вміст вуглецю, який підвищує міцність і зменшує густину сталей, відіграє важливу роль у контролі мікроструктури та характеристик металу [1-4]. Проаналізувавши результати роботи інших фахівців у даній області відносно впливу вуглецю у сплаві з високим вмістом марганцю, можна стверджувати наступне: при не надто високому вмісті алюмінію, зі збільшенням вмісту вуглецю кількість аустеніту поступово збільшується і двофазна