

<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-02>

УДК 669.162.12:669.162.21.25

О. С. Нестеров¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-0183-0327**Л. І. Гармаш**^{1,*}, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-6873-6685**К. П. Лопатенко**¹, н.с.**М. Г. Болденко**¹, м.н.с.**О. Л. Чайка**¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-1678-2580**М. Г. Іванча**¹, с.н.с., ORCID 0000-0002-5366-9328**М. Г. Джигота**¹, м.н.с., ORCID 0000-0003-3062-5127¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України* Автор для листування: larysagar@gmail.com

ВПЛИВ ВОДНЕВМІСНИХ ГАЗІВ НА ПРОЦЕСИ РОЗМ'ЯКШЕННЯ ТА ПЛАВЛЕННЯ РІЗНИХ ТИПІВ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ

Анотація. Необхідною умовою ефективної і стабільної роботи доменних печей є розуміння закономірностей процесів розм'якшення-плавлення різних типів залізорудної сировини. Ці процеси дуже специфічні для різних типів сировини і різних умов, а додавання водню до сумішей відновлювальних газів суттєво впливає на їхні параметри. Основними перевагами використання водню у відновлювальних газах є його значний потенціал для заміни викопного палива та скорочення викидів CO₂, який виражається в позитивному впливі на процеси відновлення і процеси розм'якшення-плавлення та можливостей оптимізації роботи доменної печі за рахунок покращення проникності шару шихти. Серед основних недоліків і проблем – нижча ефективність використання водню в промислових умовах, висока вартість його виробництва і ендотермічна поведінка, що потребує більш високотемпературного середовища для досягнення прийнятної ефективності. Складність і багатофакторність процесів, які відбуваються в пластичній зоні доменної печі, може призводити до суперечливих наслідків при використанні водневмісних газів. В лабораторних умовах ІЧМ було проведено серію дослідів по вивченню впливу вмісту водню на властивості зони когезії (температури розм'якшення, початку плавлення і крапання та діапазони розм'якшення-плавлення) агломератів і окатишів українського виробництва. Результати досліджень показали, що для цих типів ЗРС помірно збагачення відновних газів воднем (приблизно до 10-15%) може призвести до значних покращень у роботі доменної печі. Зокрема, зі збільшенням вмісту H₂ підвищуються температури розм'якшення та плавлення. Додавання водню

© О. С. Нестеров, Л. І. Гармаш, К. П. Лопатенко, М. Г. Болденко, О. Л. Чайка,
М. Г. Іванча, М. Г. Джигота, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

позитивно впливає на високотемпературні властивості всіх досліджених видів ЗРС українського виробництва, покращуючи проникність, звужуючи когезійну зону та змінюючи характеристики розм'якшення-плавлення, що сприяє більш стабільній та ефективній роботі доменної печі, але високотемпературна поведінка різних типів ЗРС має суттєві відмінності, що необхідно враховувати при розробці рекомендацій по використанню водню в доменній печі.

Ключові слова: процеси відновлення, водень, залізородна сировина, когезійна зона, доменна піч.

Посилання для цитування: Вплив водневмісних газів на процеси розм'якшення та плавлення різних типів залізородної сировини в доменній печі/ О. С. Нестеров, Л. І. Гармаш, К. П. Лопатенко, М. Г. Болденко, О. Л. Чайка, М. Г. Іванча, М. Г. Джигота // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2025. Вип. 39. С. 20-33. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-02>.

Використання водню у доменному виробництві є стратегічно важливим кроком для модернізації металургійної промисловості в напрямку декарбонізації та підвищення ефективності виробництва. Цей технологічний напрямок має хороші перспективи, але одночасно стикається з певними викликами та недоліками [1].

Основні переваги, які дає додавання водню до відновлювальних газів в доменній печі:

- Значний потенціал для заміни викопного палива та скорочення викидів CO_2 , оскільки продуктом відновлення воднем є вода.
- Вища швидкість відновлення порівняно з CO за рахунок того, що водень більш схильний до утворення ядер заліза та має кращу ефективність дифузії завдяки меншому розміру молекул і в'язкості.
- Позитивний вплив на процеси відновлення оксидів заліза:
 - зменшення розпаду та набухання. Відновлення за допомогою H_2 запобігає утворенню значної кількості дрібних тріщин, які з'являються при використанні CO , та послаблює набухання.
 - зниження злипання за рахунок обмеження росту залізних «вусиків», зміни морфології міжфазних поверхонь і трансформації морфології заліза з волокнистої на щільну.
 - поліпшення газопроникності за рахунок зменшення кількості утвореного розплаву, зниження його щільності і в'язкості та запобігання подальшому руйнуванню коксу.
- Вплив на процеси розм'якшення та плавлення. Додавання водню впливає на температури розм'якшення, плавлення та краплеутворення, змінюючи параметри зони розм'якшення-плавлення.
- Оптимізація роботи доменної печі за рахунок покращення проникності шару шихти, що сприяє більш стабільній та ефективній

роботи.

Основні недоліки та проблеми використання водню в процесах виробництва заліза:

- Нижча ефективність використання в промислових умовах. Через більшу швидкість реакції доля використання H_2 обмежується 41%.

- Ендотермічна поведінка водню та суворіші енергетичні вимоги вимагають більш високотемпературного середовища для досягнення прийнятної ефективності.

- Уповільнення плавлення та карбонізації заліза через зворотню реакцію Будуара призводить до зміщення подальшого плавлення заліза до вищих температур і потребує більших енергетичних витрат.

- Висока вартість виробництва H_2 , яка призводить до того, що ефективним рішенням на сучасному етапі залишається змішування водню з викопним паливом.

Додавання водню призводить до значних змін в енергетичному і масовому балансі доменної печі (ДП), механізмах відновлення залізовмісної шихти, процесах деформації коксу та формуванні так званої «пластичної зони» або зони когезії (КЗ), яка характеризується значною втратою проникності шихти і є критично важливою областю в доменній печі. Зменшення її товщини є позитивним фактором для доменного процесу [2]. КЗ складається з шарів твердого коксу, пустої породи, флосу і заліза, які розм'якшилися та плавляться. Властивості КЗ безпосередньо впливають на проникність шихти та ефективний розподіл газового потоку в ДП через те, що процес розм'якшення шихти супроводжується її деформацією, а в процесі плавлення шматки породи злипаються і газ може проходити переважно через шари коксу.

Внутрішня морфологія пластичної зони визначається властивостями та поведінкою залізної шихти під час розм'якшення-плавлення. Основними факторами, які впливають на розм'якшення та плавлення різних типів ЗРС, є температура, основність, вміст оксидів лужних металів, MgO та Al_2O_3 , FeO в шлаку, ступінь відновлення та морфологія мінеральних фаз. При цьому різні фактори по-різному впливають на поведінку різних типів ЗРС [3-4]:

- агломерат зазвичай демонструє кращі властивості розм'якшення-відновлення порівняно з кислими або офлюсованими окатишами. Він витримує вищі температури і досягає вищого ступеня відновлення порівняно з окатишами до утворення газонепроникної структури;

- агломерат краще ніж окатиші зберігає свою макропористість, тим самим забезпечуючи шляхи для відновлювальних газів;

- агломерат виробляє меншу кількість шлакового розплаву;

- агломерат зазвичай має більшу частку магнетиту ніж окатиші та руда, який при низьких температурах відновлюється важче ніж гематит.

Слід враховувати, що результати значної частини різноманітних досліджень отримані на «чистих» матеріалах, але співіснування в ДП різних типів сировини з різним складом і властивостями та взаємодія між ними призводить до поведінки, відмінної від поведінки розм'якшення-плавлення окремих типів сировини. Суміші залізної руди, агломератів та окатишів поведуться як нові типи ЗРС [5]. Наприклад, деякі дослідження показали, що властивості розм'якшення та плавлення змішаних шихт з кускової руди та агломерату значно покращуються завдяки високотемпературній взаємодії між ними, яка включає хімічні реакції між компонентами шлаку (CaO , Al_2O_3 , SiO_2 , MgO та FeO) та призводить до утворення різних фаз шлаку в когезійній зоні [6]. Збільшення ступеня змішування агломерата і окатишів посилює взаємодію між ними, змушує шихту виробляти рідку фазу в когезійній зоні і погіршує її проникність [7].

Вплив водню на властивості пластичної зони є складним і, згідно з різними джерелами, може мати суперечливі наслідки, що свідчить про складність і багатофакторність процесів, які відбуваються в доменній печі при його додаванні до відновлювальних газів. Незважаючи на велику кількість досліджень, єдиної думки по цьому питанню немає і досі. Деякі автори стверджують, що збагачення воднем може знизити початкову температуру розм'якшення шихти, звузити діапазон плавлення та змістити його до вищих температур, що покращить проникність шихти, інші ж дотримуються протилежної точки зору. Одна з спроб розв'язати це протиріччя була здійснена в дослідженні [8], результати якого показали, що коли концентрація H_2 в відновному газі становить менше 16%, збільшення кількості H_2 знижує початкову температуру розм'якшення, а коли концентрація перевищує 16%, температура поступово підвищується. Менший об'єм і нижча в'язкість H_2 зменшують щільність і в'язкість газу в дутьовій суміші, тобто водень значно покращує проникність шару через зменшення кількості утвореного розплаву. Однак H_2 явно збільшує початкові температури плавлення та крапання, що звужує зону плавлення. Швидкість відновлення оксидів заліза воднем значно швидша, ніж швидкість карбюризації, яка визначає поведінку крапання залізних матеріалів.

Підсумовуючи результати аналізу великої кількості літературних джерел, можна зазначити, що більшість дослідників на сучасному етапі схилиються до таких основних висновків стосовно впливу водню на процеси в високотемпературній зоні доменної печі [9]:

- температура розм'якшення підвищується;
- діапазон розм'якшення розширюється;

- температура початку плавлення зростає;
- температура крапання підвищується;
- діапазон плавлення зменшується;
- зона плавлення звужується і зміщується до вищих температур.

Ці зміни в температурах розм'якшення та плавлення, зокрема підвищення початкової температури плавлення та температури крапання, а також звуження та зміщення зони плавлення до вищих температур, значно покращують проникність шихти та підвищують ефективність плавки в доменній печі. Однак рівень збагачення воднем не повинен бути надмірно високим, оскільки це може призвести до занадто високої точки плавлення шлаку, що буде перешкоджати його крапання. Було визначено, що оптимальний рівень збагачення воднем становить 10-15% [10].

Загалом, вивчення поведінки розплавів в умовах діючої доменної печі характеризується складністю експериментів і поганою відтворюваністю результатів, тому велику роль тут відіграють лабораторні дослідження та використання різних типів моделювання, які більшою чи меншою мірою відтворюють умови працюючої ДП [11]. В ІЧМ розроблена і багато років використовується комплексна методика досліджень, яка включає моделювання поведінки залізородних матеріалів в сухій зоні доменної печі, в зоні розм'якшення-плавлення і краплинної течії та розрахунково-аналітичний експеримент. Дослідження проводяться на установці, яка реєструє усадку шихтового матеріалу в процесі нагрівання, дозволяє спостерігати характер витікання розплаву, фіксувати і досліджувати його склад і властивості.

Для вивчення впливу водню на високотемпературні властивості різних типів ЗРС в лабораторних умовах ІЧМ було проведено серію дослідів з агломератами і окатишами українського виробництва, хімічний склад яких наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад агломерату і окатишів.

Матеріал	Хімічний склад, %					Осн., од.
	Fe _{заг}	FeO	SiO ₂	CaO	MgO	
Агломерат	58,90	6,95	5,29	8,34	0,78	1,58
Окатиші 1	65,40	0,79	3,50	0,35	0,15	0,10
Окатиші 2	67,00	1,00	2,70	2,75	0,65	1,02

Склад відновлювально-окислювальних газів (табл. 2) komponували на основі результатів досліджень, проведених під час зондування горнів комбінату «Криворіжсталь» з урахуванням складу колошникових газів на доменних печах, що працювали на комбінованому дутті з різними витратами природного та коксового газів.

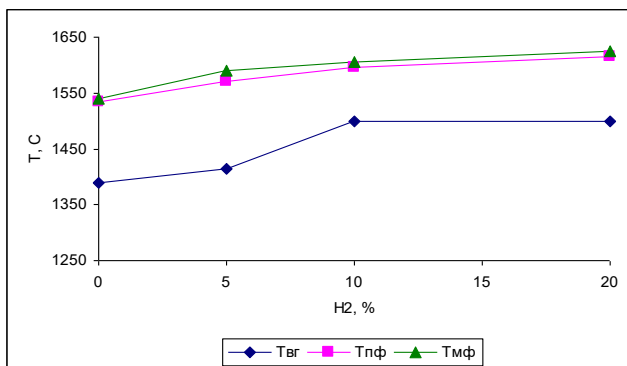
Таблиця 2 – Склад відновлювальних газів.

1	23% CO ₂ + 23% CO + 67% N ₂ + 0% H ₂
2	21,8% CO ₂ + 21,8% CO + 51,4% N ₂ + 5% H ₂
3	20,7% CO ₂ + 20,7% CO + 53,6% N ₂ + 10% H ₂
4	18,4% CO ₂ + 18,4% CO + 43,2% N ₂ + 20% H ₂

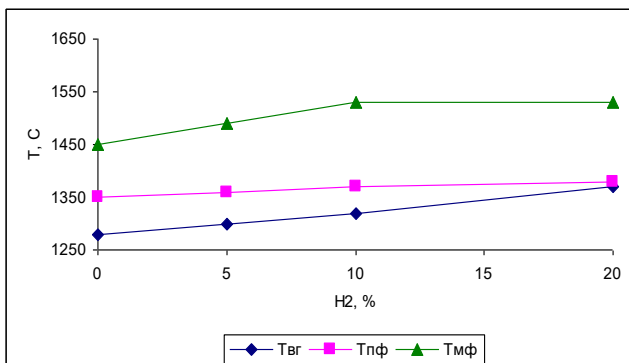
Результати експериментів (рис. 1-2), показують характер змін температур втрати газопроникності ($T_{\text{вг}}$), початку фільтрації ($T_{\text{пф}}$), максимальної фільтрації ($T_{\text{мф}}$) та ширину температурних інтервалів розм'якшення-плавлення в залежності від вмісту водню в складі відновного газу. Як видно, додавання водню підвищує температуру втрати газопроникності (початку розм'якшення) та розширює діапазон розм'якшення, що пояснюється тим, що водень покращує газову відновлювальну здатність, прискорюючи швидкість відновлення.

Виявлено, що високотемпературна поведінка агломерату і окатишів відрізняється. Зі збільшенням вмісту водню в відновному газі агломерат втрачає газопроникність при більш високих температурах ніж окатиші. Для нього температурний інтервал між втратою газопроникності і початком фільтрації найширший при вмісті H₂ у відновному газі ~5%, а найменший при 10-20% H₂. Для неофлюсованих окатишів найвища $T_{\text{вг}}$ спостерігається приблизно при 10% H₂, зона $T_{\text{пф}}-T_{\text{вг}}$ зі збільшення вмісту H₂ суттєво скорочується і майже зникає при 20% H₂, а максимальна зона фільтрації спостерігається при 10% H₂. Для офлюсованих окатишів найвища температура втрати газопроникності спостерігається в інтервалі 5-10% H₂, а найширший інтервал фільтрації при 10% H₂. Для агломерату маса первинного шлаку, який витікає з коксової насадки, співставна з залишком розплаву, в окатишах значно більше розплаву витікає ніж залишається (рис. 3).

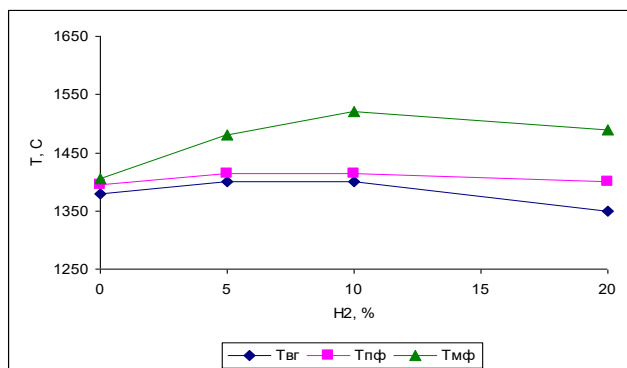
Таким чином, результати дослідження в лабораторних умовах впливу водню на поведінку різних типів ЗРС показали, що зі збільшенням вмісту H₂ в газовій суміші температури розм'якшення та плавлення підвищуються як для агломерату, так і для окатишів. Найкращі властивості з цих матеріалів має агломерат, витримуючи температуру до ~1390°C до утворення газонепроникної структури. Зі збільшенням долі H₂ в відновному газі до 10% вона підвищується до ~1500°C, а надалі майже не змінюється. Неофлюсовані окатиші втрачають проникність при ~1280°C, зі збільшенням долі H₂ до 20% вона поступово підвищується до ~1370°C. Офлюсовані окатиші мають проміжні властивості розм'якшення-плавлення.



а)

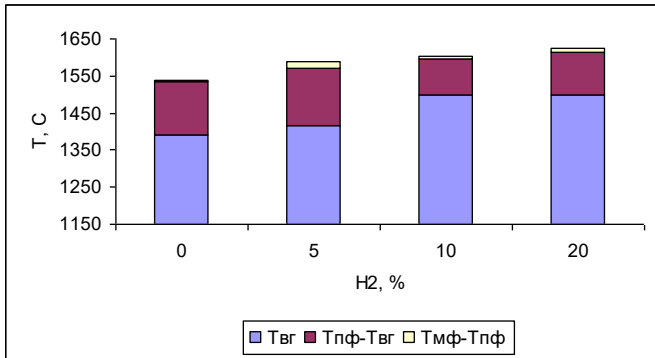


б)

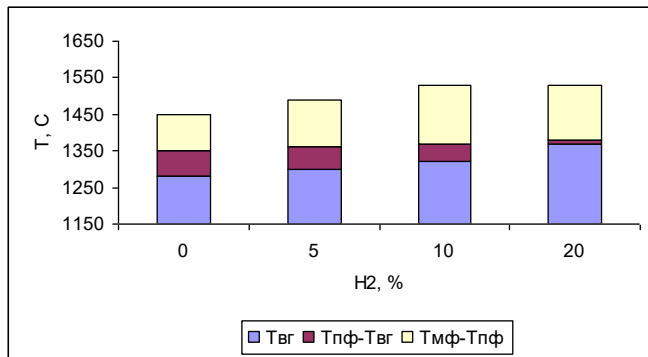


в)

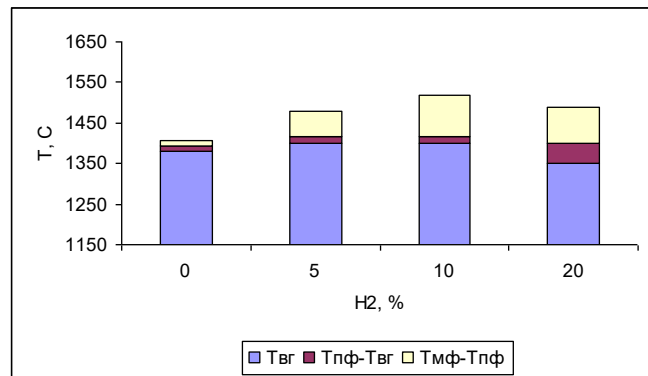
Рисунок 1 – Залежність температур розм'якшення-плавлення від вмісту водню для різних типів ЗРС: а) агломерат; б) окатиші 1; в) окатиші 2.



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Залежність температурних інтервалів розм'якшення-плавлення від вмісту водню для різних типів ЗРС: а) агломерат; б) окатиші 1; в) окатиші 2

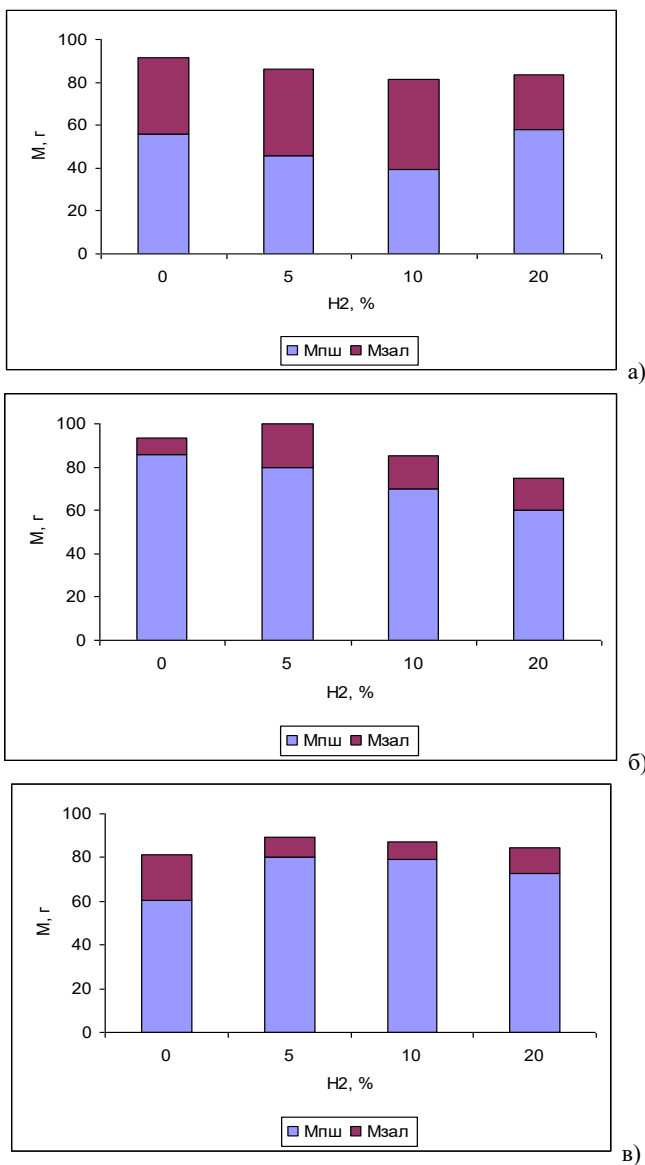


Рисунок 3 – Залежність маси первинного шлаку і залишившегося розплаву від вмісту водню для різних типів ЗПС: а) агломерат; б) окатиші 1; в) окатиші 2.

Агломерат порівняно з окатишами значно краще зберігає свою макропористість, забезпечуючи шляхи для відновлювальних газів. Те, що для агломерату температура втрати газопроникності найвища з усіх цих матеріалів, а різниця між початком фільтрації через коксову насадку та максимальною фільтрацією найменша, можна пояснити його морфологічними особливостями – відсутністю фаяліту (який замінюється дикальційсилікатом Ca_2SiO_4) та розчиненням MgO у фазі вюститу, що підвищує температуру плавлення. Неофлюсовані окатиші втрачають газопроникність при нижчій температурі і мають дещо нижчі високотемпературні властивості через високий вміст SiO_2 та утворення фаялітового шлаку. Офлюсовані окатиші демонструють проміжні властивості розм'якшення-плавлення, що пояснюється низьким вмістом SiO_2 та сприятливим впливом флюсів (MgO , CaO), що запобігають розчиненню вюститу.

Додавання водню до ~10% підвищує температури втрати газопроникності та плавлення для усіх типів ЗРС, але для агломерату ширшою є зона розм'якшення, а для окатишів зона плавлення. При подальшому збільшенні вмісту водню температурний інтервал зони плавлення змінюється не суттєво, тобто для таких типів ЗРС українського виробництва вміст ~10% H_2 в відновних газах можна вважати «оптимальним», що співпадає з висновками більшості дослідників, які вважають 10-15% H_2 оптимальним рівнем, який призводить до покращення газопроникності доменної речі.

Взагалі, позитивний вплив водню на протікання процесів розм'якшення-плавлення може пояснюватися зокрема тим, що молекули H_2 менші за розміром і мають більш високий коефіцієнт дифузії, що підвищує відновлювальну здатність газу, тим самим прискорюючи швидкість відновлення шихти і підвищуючи температуру втрати газопроникності. Зростання температур початку плавлення і краплепадіння шихти зі збільшенням вмісту водню в відновлювальних газах призводить до звуження інтервалу плавлення та зміщення його у бік більш високих температур, що покращує проникність шихти та підвищує ефективність плавки.

Додавання водню позитивно впливає на високотемпературні властивості досліджених видів ЗРС українського виробництва, покращуючи проникність, звужуючи когезійну зону та змінюючи характеристики зони розм'якшення-плавлення, що сприяє більш стабільній та ефективній роботі доменної печі. Однак в літературі багато прикладів досить суперечливих ефектів впливу вдування водневмісних газів на процеси, які протікають в ДП, тому управління поведінкою розм'якшення-плавлення для підтримки належної газопроникності ЗРС залишається складним завданням. Наразі

більшість дослідників і практиків-доменщиків погоджуються в тому, що ці процеси дуже специфічні для різних типів сировини і різних умов, а тому для розуміння перспектив та проблем використання водневмісних газів в українських реаліях необхідно проводити дослідження для конкретних типів сировини та для умов саме українських меткобінатів. Визначення закономірностей процесів розм'якшення та плавлення різних типів ЗПС при використанні водню є необхідною умовою організації ефективної та стабільної роботи доменних печей.

Перелік посилань

1. Utilization and Impacts of Hydrogen in the Ironmaking Processes: A Review from Lab-Scale Basics to Industrial Practices / Kaihui Ma, Junyi Deng, Gang Wang et al. // International Journal of Hydrogen Energy. Volume 46, Issue 52, 29 July 2021, Pages 26646-26664. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.095>
2. Effect of Ternary Basicity of Iron Ore-Fluxed Pellets on Melting and Softening Properties in a Blast Furnace / Fa'Bio R. Silva, Leandro R. Lemos, Paulo De Freitas Nogueira et al. // Metallurgical and Materials Transactions B. Volume 52, pages 69–76. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01917-6>
3. Evaluating the Reduction-Softening Behaviour of Blast Furnace Burden with an Advanced Test / Mikko Iljana, Antti Kemppainen, Timo Paananen et al. // ISIJ International, Vol. 56 (2016), No. 10, pp. 1705-1714. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-117>
4. Reduction of Iron Ore Pellets, Sinter, and Lump Ore under Simulated Blast Furnace Conditions / Anne Heikkilä, Mikko Iljana, Hauke Bartusch et al. // Steel Research Int. 2020, 91, 2000047. <https://doi.org/10.1002/srin.202000047>
5. Исследования высокотемпературных свойств железорудных материалов в лабораторных условиях / А. С. Нестеров, Л. И. Гармаш, К. П. Лопатенко и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. 2018. Выпуск 32. С. 64-79. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2018-32-64-79>
6. New Techniques to Measure Softening and Melting Properties of Mixed Burdens of Lump Ore and Sinter / Xinliang Liu, Tom Honeyands, Damien O'Dea et al. // Conference Paper. December 2017 // <https://www.researchgate.net/publication/321832946>
7. Effect of Degree of Burden Mixing on the Permeability of Ferrous Burden Layers in the Cohesive Zone / Z. W. Liu, B. Chu and Y. Z. Pan // Ironmak. Steelmak. 50 (2023), 226. <https://doi.org/10.1080/03019233.2022.2099699>
8. Influence of Hydrogen Content of Bosh Gas on Softening-Melting Property of Iron-Bearing Burden Material / Yang G., Zhang J., Chen Y. et al. // Iron and Steel (Peking) 47(9): 14-18. <https://www.researchgate.net/publication/288763714>
9. An Overview Analysis of Current Research Status in Iron Oxides Reduction by Hydrogen // Miškovířová Z., Legemza J., Demeter P. et al. / Metals 2024, 14, 589. <https://doi.org/10.3390/met14050589>

10. Softening and Melting Behavior of Ferrous Burden in Hydrogen-rich Blast Furnace Blowing Break and Re-blowing / Qiang Li, Jing Song Wang, Guang Wang // *ISIJ International*. 2024. 65(6). <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-247>

11. Гладков Н. А., Нестеров А. С. Процессы в слое железорудных материалов при его нагревании/ Металлы. 1987. № 3. С. 9-11.

References

1. Ma, K., Deng, J., Wang, G., et al. (2021). Utilization and Impacts of Hydrogen in the Ironmaking Processes: A Review from Lab-Scale Basics to Industrial Practices. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46,(52), 26646-26664. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.095>

2. Silva, F. R., Lemos, L. R., Nogueira, P. D. F., et al. (2021). Effect of Ternary Basicity of Iron Ore-Fluxed Pellets on Melting and Softening Properties in a Blast Furnace. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 52, 69–76. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01917-6>

3. Iljana, M., Kemppainen, A., Paananen, T., et al. (2016). Evaluating the Reduction-Softening Behaviour of Blast Furnace Burden with an Advanced Test. *ISIJ International*, 56(10), 1705-1714. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-117>

4. Heikkilä, A., Iljana, M., Bartusch, H., et al. (2020). Reduction of Iron Ore Pellets, Sinter, and Lump Ore under Simulated Blast Furnace Conditions *Steel Research Int.*, 91, 2000047. <https://doi.org/10.1002/srin.202000047>

5. Nesterov, A. S., Garmash, L. Y., Lopatenko, K. P., et al. (2018). Issledovaniya vusokotemperaturnukh svoistv zhelezorudnykh materyalov v laboratornykh usloviyakh. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 32, 64-79. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2018-32-64-79>

6. Liu, X., Honeyands, T., O'Dea, D., et al. (2017). New Techniques to Measure Softening and Melting Properties of Mixed Burdens of Lump Ore and Sinter. Conference Paper. <https://www.researchgate.net/publication/321832946>

7. Liu, Z. W., Chu, B., & Pan, Y. Z. (2023). Effect of Degree of Burden Mixing on the Permeability of Ferrous Burden Layers in the Cohesive Zone. *Ironmak. Steelmak*, 50, 226. <https://doi.org/10.1080/03019233.2022.2099699>

8. Yang, G., Zhang, J., Chen, Y. et al. (2012). Influence of Hydrogen Content of Bosh Gas on Softening-Melting Property of Iron-Bearing Burden Material. *Iron and Steel (Peking)*, 47(9): 14-18. <https://www.researchgate.net/publication/288763714>

9. Mišková, Z., Legemza, J., Demeter, P. et al. (2024). An Overview Analysis of Current Research Status in Iron Oxides Reduction by Hydrogen. *Metals*, 14, 589. <https://doi.org/10.3390/met14050589>

10. Softening and Melting Behavior of Ferrous Burden in Hydrogen-rich Blast Furnace Blowing Break and Re-blowing / Li, Q., Wang, J. S., & Wang, G. (2024). *ISIJ International*, 65(6). <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-247>

11. Gladkov, N. A., & Nesterov, A. S. (1987). Protessu v sloe zhelezorudnykh materyalov pri eho nahrevanii. *Metallu*, (3), 9-11.

O. S. Nesterov¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-0183-0327
L. I. Garmash^{1,*}, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-6873-6685
K. P. Lopatenko¹, Researcher
M. H. Boldenko¹, Junior Researcher
O. L. Chaika¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0003-1678-2580
N. H. Ivancha¹, Senior Researcher, ORCID 0000-0002-5366-9328
M. H. Dzhyhota¹, Junior Researcher, ORCID 0000-0003-3062-5127

¹ *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

* *Corresponding author: larysagar@gmail.com*

INFLUENCE OF HYDROGEN ON REDUCTION PROCESSES IN A BLAST FURNACE

Abstract. A necessary condition for the efficient and stable operation of blast furnaces is the understanding of the regularities of the softening-melting processes of different types of iron ore raw materials. These processes are very specific for different types of raw materials and different conditions. The addition of hydrogen to mixtures of reducing gases significantly affects their parameters. The main advantages of using hydrogen in reducing gases are its significant potential for replacing fossil fuels and reducing CO₂ emissions, which is expressed in the positive impact on the reduction and softening-melting processes and the possibility of optimizing the operation of the blast furnace by improving the permeability of the charge layer. Among the main disadvantages and problems are the lower efficiency of using hydrogen in industrial conditions, the high cost of its production and endothermic behavior, which requires a higher temperature environment to achieve acceptable efficiency. The complexity and multifactorial nature of the processes that occur in the plastic zone of the blast furnace can lead to contradictory consequences when using hydrogen-containing gases. A series of experiments were conducted to study the influence of hydrogen content on the properties of the cohesion zone (softening, melting and dripping temperatures, and softening-melting ranges) of sinters and pellets of Ukrainian production in the laboratory conditions of the Iron and Steel Institute. The results of the studies showed that for these types of iron ore raw materials, moderate enrichment of reducing gases with hydrogen (approximately 10-15%) can lead to significant improvements in the operation of the blast furnace. In particular, with an increase in the H₂ content, softening and melting temperatures increase. The addition of hydrogen has a positive effect on the high-temperature properties of all studied types of iron ore raw materials Ukrainian production, improving permeability, narrowing the cohesive zone and changing the softening-melting characteristics, which contributes to more stable and efficient operation of the blast furnace, but the high-temperature behavior of different types of iron ore raw materials has significant differences, which must be taken into account when developing recommendations for the use of hydrogen in a blast furnace.

Key words: reduction processes, hydrogen, iron ore raw material, cohesion zone, blast furnace.

For citation: Nesterov, O. S., Garmash, L. I., Lopatenko, K. P., Boldenko, M. H., Chaika, O. L., Ivancha, N. H. & Dzhyhota, M. H. (2025). Influence of hydrogen on reduction processes in a blast furnace. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 39, 20-33. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-02>

Рукопис надійшов до редакції / Received 02.08.2025

Рекомендовано до друку / Accepted 21.10.2025