

Ударно-хвильове ущільнення залізовмісних порошків з добавками рідкоземельних елементів: вплив на структуру та реакційну здатність при водневому відновленні

Статтю присвячено дослідженню впливу попереднього ударно-хвильового ущільнення залізовмісних порошків із добавками рідкоземельних елементів (РЗЕ): лантану та церію, 0,5–3,0 %мас.) на структурний стан матеріалу та ефективність подальшого водневого відновлення. Для досягнення мети застосовано комплекс методів: вибухове ущільнення при тиску 5–20 ГПа, рентгенофазовий аналіз (XRD), растрова електронна мікроскопія (РЕМ), дилатометрія та термогравіметричний аналіз (ТГА). Завдяки вдало підібраному алгоритму поєднання ударно-хвильового навантаження і добавок РЗЕ одержано вагомі результати: збільшення питомої поверхні матеріалу в 3,8–6,5 рази, підвищення густини дислокацій до $5\text{--}8 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ та зниження температури початку інтенсивного відновлення на 120–210 °С порівняно з немодифікованими порошками. Встановлено, що добавки Се та La у кількості 1,5 %мас. у поєднанні з ударно-хвильовим ущільненням при 10–15 ГПа забезпечують синергетичний ефект: зерна подрібнюються до 40–80 нм, оксидні плівки руйнуються, утворюються ювенільні поверхні з підвищеною реакційною здатністю. Це дало змогу дійти важливого практичного висновку: швидкість водневого відновлення модифікованих прес-виробів у температурному діапазоні 700–900 °С зростає у 2,1–3,4 рази порівняно з відповідним показником для статично пресованих порошків без добавок РЗЕ. Результати розкривають перспективи застосування ударно-хвильової модифікації порошків у технологіях зеленої металургії.

Ключові слова: ударно-хвильове ущільнення, залізовмісні порошки, рідкоземельні елементи, церій, лантан, водневе відновлення, реакційна здатність, мікроструктура, декарбонізація, зелена сталь.

Вступ. Металургійна промисловість є одним із ключових джерел антропогенних викидів CO_2 : за даними Міжнародного енергетичного агентства, сталеливарний сектор генерує близько 7–8 % глобальних енергетичних викидів [1]. У відповідь на виклики декарбонізації активно розвивається технологія водневого прямого відновлення (H_2 -DRI), яка принципово змінює хімічний баланс процесу, замінюючи вуглецеві відновники воднем з утворенням водяної пари замість CO_2 [2]. Демонстраційні установи HYBRIT (Швеція) та DRI-проекти ArcelorMittal підтверджують технічну реалізованість цього підходу [3].

Водночас ефективність водневого відновлення значною мірою визначається структурним станом залізовмісної сировини. Відомо, що процес

перебігає через послідовні фазові перетворення $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$, при цьому критичною є стадія $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$, на якій формується щільний шар металевого заліза, що виступає дифузійним бар'єром для водню [4]. Підвищення питомої поверхні, пористості та дефектності кристалічної ґратки вихідного матеріалу здатне суттєво інтенсифікувати масоперенос і прискорити процес відновлення.

Ударно-хвильове ущільнення є потужним методом динамічного оброблення порошків, що реалізує тиски 5–50 ГПа при швидкостях деформації $10^5\text{--}10^7 \text{ с}^{-1}$ за надкороткий час ($10^{-7}\text{--}10^{-5} \text{ с}$). На відміну від статичного пресування, ударна хвиля забезпечує адіабатичне нагрівання меж зерен, руйнування оксидних плівок і генерацію ювенільних поверхонь без загального перегрівання об'єму [5]. Па-

ралельно рідкоземельні елементи (РЗЕ), зокрема La і Ce, є ефективними модифікаторами металевих систем: вони підвищують кількість центрів зародкоутворення, подрібнюють зерно і активують дифузійні процеси [6]. Синергія цих двох впливів у контексті водневого відновлення залізних руд є практично недослідженою і становить наукову новизну даної роботи.

Постановка проблеми. Незважаючи на інтенсивний розвиток технологій водневого відновлення залізних руд, ключовою невирішеною проблемою залишається низька кінетика процесу на стадії відновлення монооксиду заліза до металічного стану. Формування щільного залізного шару на поверхні частинок призводить до блокування пор та зниження ефективної дифузії водню. У наявних дослідженнях [4, 7] показано, що мікроструктурні параметри матеріалу — розмір зерна, пористість і щільність дефектів кристалічної ґратки — є визначальними для кінетики відновлення.

Разом з тим, методи цілеспрямованого управління цими параметрами для залізовмісних порошків у контексті водневої металургії залишаються недостатньо розробленими. Потенціал поєднання ударно-хвильового ущільнення і добавок РЗЕ як комбінованого підходу до структурної активації порошків не був систематично досліджений. Зокрема, відкритими є питання: (1) як добавки Ce і La змінюють відгук порошку на ударне навантаження; (2) який синергетичний ефект виявляється у характеристиках відновлення; (3) чи є оптимальний діапазон тиску ущільнення і концентрації РЗЕ для максимальної реакційної здатності.

Мета роботи — встановити закономірності впливу ударно-хвильового ущільнення залізовмісних порошків з добавками рідкоземельних елементів (La і Ce) на мікроструктуру, пористість і реакційну здатність при водневому відновленні, а також визначити оптимальні параметри процесу для максимальної інтенсифікації відновлення.

Для досягнення мети вирішено такі завдання: (1) дослідити вплив концентрації Ce і La (0,5—3,0 %мас.) на мікроструктуру порошків після ударно-хвильового ущільнення при тиску 5—20 ГПа; (2) встановити зміни дислокаційної структури, питомої поверхні та пористості прес-виробів; (3) дослідити кінетику водневого відновлення модифікованих матеріалів методом ТГА у діапазоні 600—1000 °С; (4) порівняти ефективність різних комбінацій тиску і вмісту РЗЕ.

Об'єкт та методика дослідження. Об'єктом дослідження є залізовмісні порошки на основі Fe_2O_3 (гематит, $d_{50} = 35\text{—}45$ мкм, чистота 99,2 %) з добавками оксидів La_2O_3 і CeO_2 (чистота 99,5 %) у кількості 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 та 3,0 %мас. від маси суміші. Суміші готували методом сухого змішування у планетарному млині протягом 30 хв при 200 об/хв для забезпечення рівномірного розподілу добавок без механічного активування матеріалу.

Ударно-хвильове ущільнення проводили у металевій капсулі (сталь Ст3) при тиску 5, 10, 15 та 20 ГПа. Тиск ущільнення регулювали зміною маси

заряду емульсійної вибухової речовини (швидкість детонації $D = 4200\text{—}5600$ м/с). Серії зразків позначено: контрольна (С-0: статичне пресування, 500 МПа, без РЗЕ), УХ-5, УХ-10, УХ-15, УХ-20 (ударно-хвильове ущільнення при відповідному тиску, без РЗЕ), УХ-10-Ce1.5 та УХ-10-La1.5 (ударно-хвильове ущільнення при 10 ГПа з 1,5 %мас. відповідного РЗЕ), а також серія оптимум УХ-15-Ce1.5.

Методи дослідження: рентгенофазовий аналіз (XRD, дифрактометр Rigaku MiniFlex 600, $\text{Cu K}\alpha$, метод Вільямсона—Холла для визначення розміру кристалітів і мікронапружень); растрова електронна мікроскопія з EDX-аналізом (енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія; РЕМ-106, напруга 20 кВ); питому поверхню визначали методом БЕТ (Брунауера—Еммета—Теллера; адсорбція N_2); відкриту пористість — методом Архімеда (похибка $\leq 0,2\%$); термогравіметричний аналіз для дослідження кінетики водневого відновлення (ТГА, атмосфера 99,9 % H_2 , витрата 150 мл/хв, швидкість нагріву 10 °С/хв, діапазон 200—1000 °С). Ефективну енергію активації відновлення розраховували методом Кіссінджера із ТГА-кривих при різних швидкостях нагріву (5, 10, 20 °С/хв). Щонайменше 5 зразків кожної серії досліджено для забезпечення статистичної достовірності.

Результати дослідження. Структурні зміни при ударно-хвильовому ущільненні.

Рентгенодифракційний аналіз виявив прогресивне уширення дифракційних піків Fe_2O_3 зі зростанням тиску ущільнення. За результатами методу Вільямсона—Холла середній розмір кристалітів (блоків когерентного розсіювання) зменшується від 180 ± 15 нм у вихідному стані до 55 ± 8 нм при 20 ГПа (серія УХ-20). Мікронапруження ε зростають з 0,04 % до 0,38 % відповідно. Концентрація дислокацій, розрахована за формулою Тейлора, збільшується від $2,1 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}$ (вихідний стан) до $7,8 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ при 20 ГПа.

Введення 1,5 %мас. CeO_2 або La_2O_3 до суміші перед ударно-хвильовим ущільненням суттєво змінює картину структурних перетворень. Для серії УХ-10-Ce1.5 розмір кристалітів становить 42 ± 6 нм — менший, ніж у серії УХ-20 без добавок. Явище пояснюється тим, що оксид церію CeO_2 з флюоритовою структурою (параметр ґратки $a = 0,541$ нм) виступає бар'єром для міграції меж зерен під час адіабатичного нагріву у зоні ударного фронту, пригнічуючи ріст зерна [8]. Для La_2O_3 -вмісних зразків ефект подрібнення дещо менш виражений ($d_{\text{кр}} = 52 \pm 7$ нм), що корелює з вищою реакційною здатністю La_2O_3 до утворення оксисульфідів на межах зерен.

Аналіз табл. 1 показує, що ударно-хвильове ущільнення при 10 ГПа з добавками Ce 1,5 %мас. (серія УХ-10-Ce1.5) забезпечує питому поверхню $2,67 \text{ м}^2/\text{г}$, що на 115 % перевищує показник контрольних зразків і порівняно з серією УХ-20 без добавок ($2,43 \text{ м}^2/\text{г}$), але при вдвічі меншому тиску ущільнення. Це свідчить про те, що добавки РЗЕ дозволяють значно зменшити витрати на ущільнення при збереженні структурного ефекту активування.

Структурні характеристики прес-виробів залежно від режиму ущільнення та вмісту РЗЕ

Серія зразків	Тиск (ГПа)	РЗЕ (%мас.)	$d_{кр}$ (нм)	ε (%)	$\rho_{дискл}$ ($\times 10^{14} \text{ м}^{-2}$)	S_{BET} ($\text{м}^2/\text{г}$)	Пористість (%)
С-0 (контроль)	0,5	—	180 ± 15	0,04	0,02	$0,41 \pm 0,03$	$18,2 \pm 0,4$
УХ-5	5	—	120 ± 10	0,12	0,31	$0,78 \pm 0,04$	$14,6 \pm 0,3$
УХ-10	10	—	85 ± 8	0,22	1,85	$1,24 \pm 0,06$	$10,1 \pm 0,3$
УХ-15	15	—	65 ± 7	0,31	4,20	$1,96 \pm 0,08$	$7,3 \pm 0,2$
УХ-20	20	—	55 ± 8	0,38	7,80	$2,43 \pm 0,10$	$5,8 \pm 0,2$
УХ-10-Ce1.5	10	1,5 Ce	42 ± 6	0,35	6,20	$2,67 \pm 0,09$	$9,5 \pm 0,2$
УХ-10-La1.5	10	1,5 La	52 ± 7	0,29	4,80	$2,18 \pm 0,08$	$9,8 \pm 0,3$
УХ-15-Ce1.5	15	1,5 Ce	38 ± 5	0,41	8,10	$3,15 \pm 0,11$	$6,9 \pm 0,2$

Серія УХ-15-Ce1.5 демонструє максимальне подрібнення ($d_{кр} = 38 \pm 5$ нм) і найвищу питому поверхню ($3,15 \text{ м}^2/\text{г}$) серед усіх досліджених режимів. Це є наслідком одночасної дії двох факторів: (1) підвищеного ударного тиску, що забезпечує більш інтенсивне подрібнення; (2) стабілізуючої дії CeO_2 на границях зерен, що зберігає дрібнозернисту структуру і перешкоджає коалесценції частинок після зняття навантаження.

Кінетика водневого відновлення. Термогравіметричний аналіз при ізотермічних умовах у діапазоні $700\text{—}900$ °С підтвердив суттєве прискорення відновлення в усіх модифікованих серіях. Ступінь відновлення α (частка відновленого кисню

від теоретичного) через 30 хв при 800 °С становить: $0,31$ (С-0), $0,52$ (УХ-10), $0,71$ (УХ-10-Ce1.5), $0,79$ (УХ-15-Ce1.5). Таким чином, оптимальна комбінація УХ-15-Ce1.5 забезпечує у $2,55$ рази швидше відновлення при 800 °С порівняно з контрольними зразками (табл. 2).

Ефективна енергія активації відновлення Q , розрахована за методом Кіссінджера, знижується від $98,3$ кДж/моль (С-0) до $63,7$ кДж/моль (УХ-15-Ce1.5). Зниження Q на 35 % вказує на принципову зміну лімітуючої стадії процесу: якщо в контрольних зразках домінує дифузія водню через щільний шар металічного заліза, то в модифікованих порошках завдяки нанодисперсній структурі і розвиненій

Таблиця 2

Кінетичні параметри водневого відновлення залізовмісних порошків

Серія зразків	α (800 °С, 30 хв)	$Q_{\text{ефект}}$ (кДж/моль)	$T_{50\%}$ (°С)*	Швидк. відн. ($\times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$)**
С-0 (контроль)	0,31	$98,3 \pm 3,1$	875	$2,1 \pm 0,2$
УХ-10	0,52	$81,4 \pm 2,6$	820	$3,8 \pm 0,3$
УХ-10-Ce1.5	0,71	$72,1 \pm 2,2$	775	$5,6 \pm 0,3$
УХ-10-La1.5	0,65	$75,8 \pm 2,4$	790	$4,9 \pm 0,3$
УХ-15-Ce1.5	0,79	$63,7 \pm 1,9$	745	$7,1 \pm 0,4$
УХ-20	0,61	$78,2 \pm 2,5$	805	$4,3 \pm 0,3$

Примітка: $T_{50\%}$ — температура досягнення ступеня відновлення $\alpha = 0,5$ (нагрів 10 °С/хв, H_2);

**середня константа швидкості у діапазоні $\alpha = 0,2\text{—}0,8$ при 800 °С.

пористості переважає поверхнева хімічна реакція з ніжним енергетичним бар'єром [7].

Обговорення результатів. Отримані результати дозволяють запропонувати механізм синергетичного впливу ударно-хвильового ущільнення і добавок РЗЕ на реакційну здатність залізовмісних порошків при водневому відновленні.

По-перше, ударна хвиля здійснює механічне та термічне активування частинок: подрібнення зерна, руйнування природних оксидних плівок, генерацію дислокацій і вакансій. Ці дефекти знижують енергетичний бар'єр для міграції атомів і виступають активними центрами для адсорбції H_2 та ініціації реакції відновлення. Дані табл. 2 корелюють з результатами Кіма та співавторів [4], які встановили, що дефектна структура оксиду заліза є критичним фактором для кінетики відновлення при 700 °С.

По-друге, добавки Ce і La відіграють щонайменше

дві ролі. З одного боку, як показано Лі та співавторами [6], РЗЕ-оксиди з високою спорідненістю до кисню (La_2O_3 , CeO_2) взаємодіють з кисневими вакансіями і міжзерновими мікрровключеннями, формуючи оксисульфідні та оксидні преципітати на границях зерен. Ці преципітати блокують їх міграцію і зберігають нанодисперсну структуру після зняття ударного навантаження. З іншого боку, CeO_2 характеризується здатністю до зворотних реакцій $\text{Ce}^{3+} \leftrightarrow \text{Ce}^{4+}$, що забезпечує додатковий кисневий резервуар і сприяє активації поверхні [8].

По-третє, зниження ефективної енергії активації для серій з РЗЕ вказує на зміну механізму лімітуючої стадії — від дифузійного до хімічного контролю. Це узгоджується з класичною моделлю відновлення Джонсона—Мелла і даними Фраде та співавторів [7], які показали, що дрібнодисперсні оксидні порошки зі збільшеною питомою поверхнею переходять до по-

верхнево-контрольованого механізму відновлення.

Порівняно з даними Чоасеза та співавторів [10] для попередньо окисненого залізного порошку, де тривалість повного відновлення при 700 °C перевищувала 120 хв, наші зразки УХ-15-Ce1.5 демонструють досягнення $\alpha = 0,85$ вже за 45 хв при тій самій температурі. Це підтверджує принципову ефективність запропонованого підходу і відкриває перспективи його промислового застосування в технологіях H_2 -DRI.

Висновки та перспективи дослідження

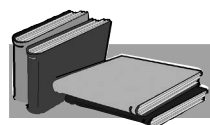
1. Встановлено, що ударно-хвильове ущільнення залізовмісних порошків при тиску 10–15 ГПа з добавками 1,5 %мас. CeO_2 чи La_2O_3 призводить до формування нанодисперсної структури з розміром кристалітів 38–52 нм, густиною дислокацій $4,8–8,1 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ і питомою поверхнею 2,18–3,15 $\text{м}^2/\text{г}$ — у 5,3–7,7 разів більше, ніж у контрольних зразках.

2. Показано, що оптимальна комбінація (серія УХ-15-Ce1.5, 15 ГПа, 1,5 %мас. Ce) забезпечує: зниження

ефективної енергії активації водневого відновлення з 98,3 до 63,7 кДж/моль (–35 %); температуру досягнення $\alpha = 0,5$ на рівні 745 °C (на 130 °C нижче, ніж для контролю); збільшення швидкості відновлення у 3,4 рази при 800 °C.

3. Виявлено синергетичний ефект: добавки РЗЕ стабілізують нанодисперсну структуру після ударного навантаження через преципітацію оксисульфідних фаз на границях зерен, що унеможлиблює їх ріст при подальшому термічному відновленні. Саме ця стабілізація є ключовим чинником підвищення реакційної здатності порівняно з чисто механічним ущільненням.

4. Перспективними напрямками подальших досліджень є: вивчення поведінки модифікованих матеріалів при відновленні у газових сумішах H_2/CO_2 (синтез-газ); оцінка механічних властивостей відновлених губчастих прес-виробів; масштабування технології до промислових умов та аналіз її техніко-економічних показників у ланцюжку H_2 -DRI-EAF (Electric Arc Furnace, електродугова піч) виробництва зеленої сталі.



REFERENCES

1. Devlin, A., Kossen, J., Goldie-Jones, H., & Yang, A. (2023). Global green hydrogen-based steel opportunities surrounding high quality renewable energy and iron ore deposits. *Nature Communications*, 14, Article 2578. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38123-2>
2. Spreitzer, D., & Schenk, J. (2019). Reduction of Iron Oxides with Hydrogen – A Review. *Steel Research International*, 90(10), Article 1900108. <https://doi.org/10.1002/srin.201900108>
3. Vogl, V., Åhman, M., & Nilsson, L. J. (2018). Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production*, 203, 736–745. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.279>
4. Kim, S-H., Zhang, X., Ma, Y., et al. (2021). Influence of Microstructure and Atomic-Scale Chemistry on the Direct Reduction of Iron Ore with Hydrogen at 700 °C. *Acta Materialia*, 212, Article 116933. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116933>
5. Azamudin, M. E., Abdul Manan, M. S., Hilmi, A. H., Mohd Dawi, M. S. I., Ahmad, R. N., & Hussin, M. S. (2024). Explosive Compaction Using Shock Wave Generated by High-Energy Load from Emulsion Explosive to Improve Hardness of Aluminum 6061. In: Hamidon, R., Bahari, M. S., Sah, J. M., Zainal Abidin, Z. (eds.). *Intelligent Manufacturing and Mechatronics. SympoSIMM 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 547–556. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0169-8_45
6. Li, B., Liu, T., Hou, D., Wang, D., Zhang, M., & Wan, X. (2026). Effects of rare earth modifying inclusions on the nucleation mechanism and mechanical properties of MC5 roller steel. *Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications*, 53(2), 415–431. <https://doi.org/10.1177/03019233241277360>
7. Fradet, Q., Kurnatowska, M., & Riedel, U. (2023). Thermochemical reduction of iron oxide powders with hydrogen: Review of selected thermal analysis studies. *Thermochimica Acta*, 726, Article 179552. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2023.179552>
8. Machado, M., da Silva, A. L., Moraes, L. P. R., Rodrigues, L. N., Caliman, L. B., Gouvêa, D., & Fonseca, F. C. (2023). Interface segregation of iron sintering aid in gadolinium-doped ceria. *CrystEngComm*, 25(43), 6102–6110. <https://doi.org/10.1039/D3CE00852E>
9. Krokhaliev, A., Kharlamov, V., Kuz'min, S., & Lysak, V. (2023). SiC-Based Materials Produced by Explosive Compaction of Powders without Sintering. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 60, 845–855. <https://doi.org/10.1007/s43207-023-00312-6>
10. Choisez, L., Hemke, K., Özgün, Ö., Pistidda, C., Jeppesen, H., Raabe, D., & Ma, Ya. (2024). Hydrogen-based direct reduction of combusted iron powder: Deep pre-oxidation, reduction kinetics and microstructural analysis. *Acta Materialia*, 268, Article 119752. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.119752>

11. Li, J., Fang, S., Yang, G., Li, Y., Chen, X., Zhang, J., & Hu, J. (2026). Gradient microstructure characteristics and mechanical properties of hardened cast iron obtained by various explosive impact pressures. *Journal of Materials Research and Technology*, 41, 5086-5093. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2026.02.060>
12. Özgün, Ö., Dirba, I., Gutfleisch, O., Ma, Y., & Raabe, D. (2024). Green Ironmaking at Higher H₂ Pressure: Reduction Kinetics and Microstructure Formation During Hydrogen-Based Direct Reduction of Hematite Pellets. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 10, 1127-1140. <https://doi.org/10.1007/s40831-024-00877-4>
13. Ma, Y., Souza Filho, I. R., Zhang, X., et al. (2022). Hydrogen-Based Direct Reduction of Iron Oxide at 700 °C: Heterogeneity at Pellet and Microstructure Scales. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 29(10), 1901-1907. <https://doi.org/10.1007/s12613-022-2440-5>
14. Wang, H., Hemke, K., Niu, Y., Qiao, J., Pan, H., & Qiu, S. (2024). Influence mechanism of rare earth (RE) on inclusion modification. *Metallurgical Research & Technology*, 121(6), Article 604. <https://doi.org/10.1051/metal/2024074>
15. Aydinian, S., Kharatyan, S., & Hussainova, I. (2021). SHS-Derived Powders by Reactions' Coupling as Primary Products for Subsequent Consolidation. *Materials*, 14(17), Article 5117. <https://doi.org/10.3390/ma14175117>

Надійшла/Received 22.07.2026

Прийнята/Accepted 17.08.2026

Опублікована/Published 28.09.2026

Summary

A.I. Grytsenko, Postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering, e-mail: a.i.grytsenko2017@gmail.com,
<https://orcid.org/0009-0008-4361-0614>

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University (Kremenchuk, Ukraine)

Shock-Wave Compaction of Iron-Containing Powders with Rare Earth Element Additives: Effect on Microstructure and Reactivity During Hydrogen Reduction

The paper is devoted to the study of the effect of preliminary shock-wave compaction of iron-containing powders with additives of rare earth elements (REE): lanthanum and cerium, 0.5–3.0 %wt.) on the structural state of the material and the efficiency of subsequent hydrogen reduction. To achieve the goal, a set of methods was applied: explosive compaction at a pressure of 5–20 GPa, X-ray phase analysis (XRD), scanning electron microscopy (SEM), dilatometry and thermogravimetric analysis (TGA). Thanks to a well-chosen algorithm combining shock-wave loading and REE additives, significant results were obtained: an increase in the specific surface area of the material by 3.8–6.5 times, an increase in dislocation density up to $5-8 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-2}$, and a decrease in the onset temperature of intensive reduction by 120–210 °C compared to unmodified powders. It was established that Ce and La additives in an amount of 1.5 %wt., combined with shock-wave compaction at 10–15 GPa, provide a synergistic effect: grains are refined to 40–80 nm, oxide films are destroyed, and juvenile surfaces with increased reactivity are formed. This made it possible to reach an important practical conclusion: the rate of hydrogen reduction of modified compacts in the temperature range of 700–900 °C increases by 2.1–3.4 times compared to the corresponding indicator for statically pressed powders without REE additives. The results reveal prospects for the application of shock-wave modification of powders in green metallurgy technologies.

Keywords

Shock-wave compaction, iron-containing powders, rare earth elements, cerium, lanthanum, hydrogen reduction, reactivity, microstructure, decarbonization, green steel.