

136 МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.162.16

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344658

ТЕРМОЗМІЦНЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ НА СТАЛЕВИХ ПЕРФОРОВАНИХ ПОДИНАХ

Чупринов Є.В.	канд. техн. наук, доцент, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8605-3434 , e-mail: itchupa@gmail.com ;
Кассім Д.О.	д-р техн. наук, професор, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1750-1237 , e-mail: kassim@duet.edu.ua ;
Зайцев Г.Л.	канд. техн. наук, доцент, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7909-9044 , e-mail: zaitsev@duet.edu.ua ;
Ляхова І.А.	канд. техн. наук, доцент, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7589-8351 , e-mail: liakhova_ia@duet.edu.ua ;
Малій Х.В.	канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9046-4268 , e-mail: kristina.maliy@mipolytech.education

Розроблено, виготовлено та випробувано конструкцію жаростійких сталевих перфорованих піддонів і спосіб їх кріплення до випалювального візка, що дозволяє замінити колосники на конвеєрних машинах для термозміцнення залізорудних окатишів. Мета роботи – вдосконалення процесу виробництва окатишів шляхом зменшення витрати високолегованого металу, підвищення продуктивності обпалювальних машин і поліпшення металургійних характеристик обпалених окатишів. Завдання дослідження – обґрунтування можливості заміни колосників на обпалювальних візках конвеєрних машин, відпрацювання їх конструкції та кріплення на візках, відпрацювання технологічного процесу термозміцнення сирих окатишів. Виконані напівпромислові та промислові випробування показали працездатність прийнятих технічних рішень. Встановлено, що заміна колосників піддонами дозволить зменшити витрату високолегованого металу, підвищити продуктивність випалювальних машин і поліпшити металургійні характеристики випалених окатишів.

Ключові слова: термозміцнення окатишів, перфорована подина, колосникові ґрати, обпалювальна машина, залізорудна сировина, металургійні властивості, економія металу, газодинамічний опір, живий переріз, витрати легованої сталі.

Постановка проблеми

Проблема підвищення ефективності процесів термозміцнення залізорудних окатишів має важливе значення для сучасної чорної металургії, оскільки якість окатишів безпосередньо впливає на стабільність доменної плавки, витрати палива, продуктивність доменних печей та екологічні показники виробництва. Традиційні колосникові подини обпалювальних машин, виготовлені з жароміцних сталей, характеризуються великою масою і значною витратою легуючих елементів, що збільшує капітальні та експлуатаційні витрати. Тому актуальними є дослідження, спрямовані на вирішення завдання щодо зниження витрати жароміцної сталі та поліпшення якості окатишів без будівництва нових цехів і закупівлі дорогого обладнання. Розробка і впровадження сталевих перфорованих подин замість колосників є технічно обґрунтованим напрямом модернізації обпалювальних агрегатів без необхідності їх капітальної реконструкції.

Виконане дослідження має комплексну науково-практичну цінність, оскільки поєднує конструктивні інновації з підвищенням ефективності виробництва,

енергозбереженням і раціональним використанням матеріальних ресурсів у галузі чорної металургії.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У сучасній науково-технічній літературі значна увага приділяється вдосконаленню процесів термозміцнення залізорудних окатишів, оскільки якість обпаленої сировини, зокрема окатишів, визначає ефективність доменної плавки.

Основні напрями досліджень стосуються оптимізації тепло- та масообмінних процесів у шарі окатишів, покращення газорозподілу через подини й колосникові решітки обпалювальних машин, підвищення довговічності жароміцних елементів конструкції та зниження енерговитрат виробництва.

Значний внесок у моделювання процесів обпалу зробили автори [1], які побудували математичну модель тепло- та масообміну під час випалу окатишів на прямій решітці, що дозволило оптимізувати температурний режим і швидкість газового потоку. Подальший розвиток цих моделей здійснили в роботі [2, 3], де врахували взаємодію теплових і хімічних реакцій

усередині шару та комплексно описали процеси тепло- та масопереносу. Результати цих робіт забезпечують теоретичну основу для підбору раціональних параметрів процесу термообробки.

Окрему групу становлять дослідження газодинаміки та рівномірності нагрівання шару окатишів за допомогою чисельного моделювання (CFD). В [4, 5] показано, що конфігурація газорозподільних отворів у решітці суттєво впливає на рівномірність потоку та стабільність температурного поля. З цими висновками корелюють результати досліджень [6-9], на підставі яких встановлено, що правильна геометрія отворів у подині сприяє покращенню охолодження та зменшенню енергоспоживання агрегатів.

Не менш актуальними залишаються питання довговічності матеріалів решіток і подин, які працюють в умовах агресивних фізичних та хімічних впливів [5, 10]. Отримані результати підкреслюють необхідність пошуку нових матеріалів із підвищеною стійкістю до утворення окалини та термоциклічного зношення.

Певні технічні рішення запропоновано в межах альтернативних технологій термозміцнення, зокрема у процесі «Steel Belt», розробленому компанією LKAB (Швеція) [11, 12]. Ця технологія базується на використанні жароміцної перфорованої сталеві стрічки замість традиційних колосників, що забезпечує зниження витрат металу та підвищення однорідності обпалення окатишів. Проте широке впровадження цього процесу обмежується складністю виготовлення стрічок великої ширини та високими капітальними витратами.

Аналіз останніх досліджень свідчить, що більшість досліджень орієнтовані на моделювання процесів і лабораторні експерименти, тоді як повномасштабні випробування перфорованих сталевих подин у промислових умовах висвітлено недостатньо. Недослідженими залишаються вплив форми й розмірів отворів на газопроникистость шару, умови утворення окалини при тривалій експлуатації та оптимальний вибір матеріалів подин з урахуванням їх термофізичних властивостей.

Отже попри значний прогрес у теоретичному та чисельному моделюванні, комплексні експериментальні дослідження конструкцій перфорованих подин залишаються актуальним науковим завданням. Їх результати мають важливе практичне значення для підвищення ефективності процесів термозміцнення, зменшення матеріалоемності обладнання та продовження ресурсу його роботи.

Мета статті

Огляд літературних джерел показав, що існує явна ніша для досліджень перфорованих сталевих подин як заміни традиційних колосників – особливо у частині довготривалої експлуатації, оптимізації геометрії отворів під конкретні умови та комплексної економічної оцінки. Завданням роботи є обґрунтування та

експериментальна перевірка ефективності використання сталевих перфорованих подин замість традиційних колосників у процесі термозміцнення залізорудних окатишів з метою підвищення їх металургійних характеристик, зменшення витрат жароміцних і легованих сталей, а також поліпшення енергетичної ефективності роботи обпалювальних машин.

Виклад основного матеріалу

Сучасні підприємства для виробництва залізорудних окатишів оснащені конвеєрними обпалювальними машинами, на яких встановлені обпалювальні візки з колосниками, відлитими з жаростійкої сталі. Маса колосників з жаростійкої сталі 40X24H12CЛ з температурою утворення окалини 1000-1050°C на випалювальних машинах різної площі знаходиться в межах 193,5-416 т, при цьому питома експлуатаційна витрата колосників становить 0,06-0,15 кг/т окатишів. Для істотного зниження капітальних витрат (на будівництво нових цехів) і витрат на нове обладнання економічно доцільніше замінити на діючих конвеєрних машинах колосники перфорованими конструкціями меншої маси, забезпечивши їм термін експлуатації не менше, ніж колосників. У зв'язку з цим відпрацьовувалися конструкція сталевих перфорованих піддонів, їх кріплення до випалювальних візків конвеєрних машин і режими термозміцнення залізорудних окатишів.

З метою вивчення можливості заміни колосників на обпалювальних візках конвеєрних машин, відпрацювання їх конструкції та кріплення на візках, технологічного процесу термозміцнення сирих окатишів були проведені напівпромислові та дослідно-промислові випробування, в яких оптимізовано конструктивні особливості піддонів, форму отворів і величину живого перерізу їх перфорованої поверхні, а також варіанти кріплення піддонів на обпалювальних візках. Відпрацьовані режими термозміцнення сирих окатишів з підвищеною висотою донної постілі, для виключення перегріву піддонів і поліпшення металургійних характеристик обпалених окатишів.

У напівпромислових умовах режими термозміцнення сирих окатишів і конструктивні особливості подин відпрацьовувалися в установці типу чаша (рис. 1) діаметром в світлі 300 мм і висотою 500 мм, обладнаній колосниками з можливістю їх заміни перфорованою подиною товщиною 5 мм з листової легованої сталі 12X18H10T з температурою утворення окалини 850°C (через відсутність інших марок сталі).

Термозміцнення окатишів на колосниках здійснювали на донній постілі висотою 100 мм (як на промислових агрегатах), а на подині підбирали висоту постілі (від 100 до 300 мм), виходячи з умови впливу на подину газів, що відходять від шару, з температурою в межах 850-1050°C.

Експериментально визначено вплив живого перерізу перфорованої подини, форми її отворів і висоти шару донної постілі на її газодинамічний опір.

Встановлено, що виходячи з міцнісних характеристик подини товщиною 5 мм і її мінімального газодинамічного опору, оптимальний живий переріз повинен бути 19-20% (рис. 2), а форма отворів – довгастою з рівними краями (рис. 3).

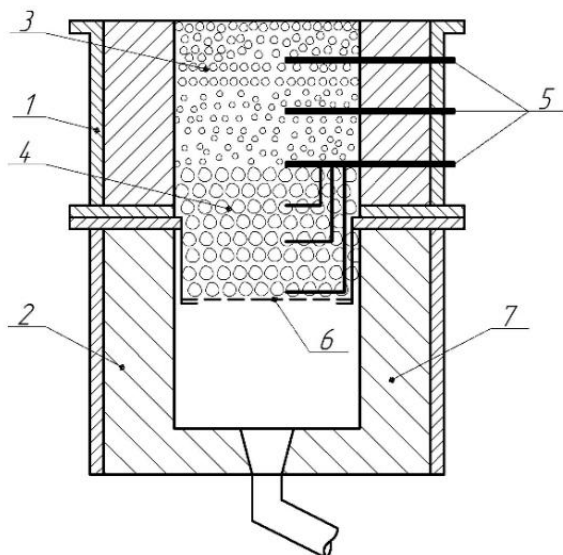


Рис. 1 – Чаша для термозміцнення окатишів: 1 – чаша; 2 – вакуум-камера; 3 – окатиші, що обпалюються; 4 – постіль; 5 – термопари; 6 – перфорована подина; 7 – футерівка

Збільшення висоти шару постілі підвищує її газодинамічний опір (див. рис. 3), тому обмеження її висоти є максимальні температури відхідних газів і утворення окалини подини.

В якості жаростійкої сталі для виготовлення подини випробовувалися наступні марки сталі: 12X18H10T, 20X23H18 і 15X28T з температурами утворення окалини, відповідно, 850°C, 1050°C і 1150°C. Для збільшення терміну служби піддонів бажано застосовувати сталь з максимальною температурою утворення окалини.

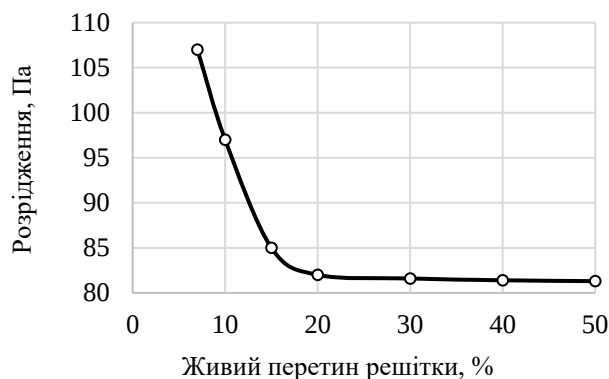


Рис. 2 – Вплив живого перерізу подини на її опір газовому потоку

Також проведено визначення зносостійкості подини товщиною 5 мм у процесах завантаження та розвантаження окатишів, змодельованих виходячи з відомого циклу при річній роботі випалювальних візків близько 8000 год/рік, а також при абразивному впливі просочуваних запиленних (1 г/м^3) газів. Результати випробувань показали, що знос подини від цих впливів склав 0,5% від її маси.

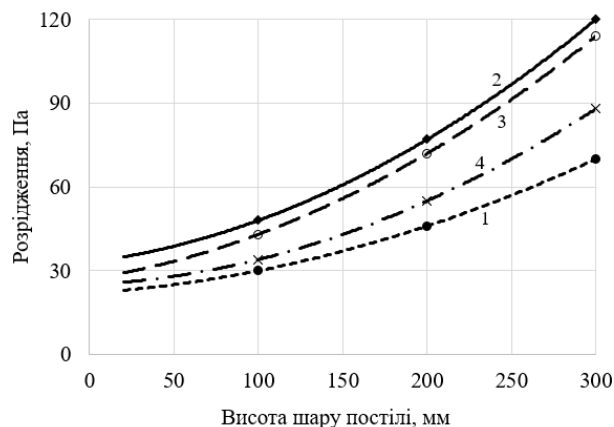


Рис. 3 – Вплив форми отворів та висоти постілі на подині на газодинамічний опір: 1 – сітка; 2 – подина з круглими отворами; 3 – подина з прорізними отворами; 4 – подина з довгастими отворами

Відпрацювання режимів термозміцнення окатишів у обпалювальній чаші показало, що металургійні характеристики обпалених на подині окатишів за всіма показниками (міцність на стиск, на удар і стирання, а також комплекс властивостей при відновленні) на 3-5% (відн.) кращі, ніж у випалених на колосниках. Причому, при практично однакових показниках металургійних характеристик верхнього шару обпалених окатишів, середній і, особливо, нижній шари мали істотно кращі характеристики при випалюванні на подині. При цьому питома продуктивність установки з подиною зросла з 0,8 до 0,805 т/м²·год (табл. 1).

На підставі даних напівпромислових досліджень була розроблена конструкторська документація і виготовлені комплекти сталевих перфорованих піддонів [13] для заміни колосників на випалювальних візках конвеєрних машин ОК-306 і ОК-552 ПівніЗКа шириною, відповідно, 3,0 м і 4,0 м. Комплект піддонів для обпалювального візка довжиною 3 м складався з 16 піддонів, а для обпалювального візка довжиною 4 м – з 24 піддонів з отворами шириною 6 мм із закругленими краями і довжиною 26 мм. Крок між отворами, виходячи з необхідної міцності піддону, був прийнятий рівним 10 мм, а відстань між всіма рядів отворів – 15 мм. Зазначені розміри отворів і їх розташування, з урахуванням конструктивних особливостей підколосникових балок обпалювальних візків і робочих поверхонь самих піддонів, забезпечили живий переріз робочих поверхонь перфорованих піддонів 20,1%.

Таблиця 1

Металургійні властивості обпалених окатишів

Найменування показників	Метод термозміцнення	
	на колосниках	на подині
Питома продуктивність, т/м ² ·год	0,8	0,805
Міцність на стиск, ДаН/ок	213	221
Міцність в барабані, % :		
на удар (+5 мм)	88,6	90,8
стираність (0-0,5 мм)	5,9	5,5
Міцність при відновленні, %:		
на удар (+5 мм)	77,6	80,8
стираність (0-0,5 мм)	9,3	7,9
ступінь відновлення	53,4	54,2
Газопроникність и усадка шару при відновленні:		
усадка шару, %	51,5	50,6
перепад тиску, Па	562,0	476,0
ступінь відновлення, %	93,2	93,0

Живий переріз колосникового поля обпалювальних візків склав 11,2%. Перфоровані подини мали жолобчастий поперечний переріз з висотою бортів 65 мм, що забезпечувало їм жорсткість, необхідну для сприйняття навантажень і, крім того, дозволяло підвищити висоту постілі на 115-130 мм без збільшення висоти бортів обпалювальних візків (рис. 4). Маса комплексу піддонів на один візок становила, відповідно, 0,17 і 0,25 т. На кожній конвеєрній машині випробовувалося по одному випалювальному візку з піддонами.

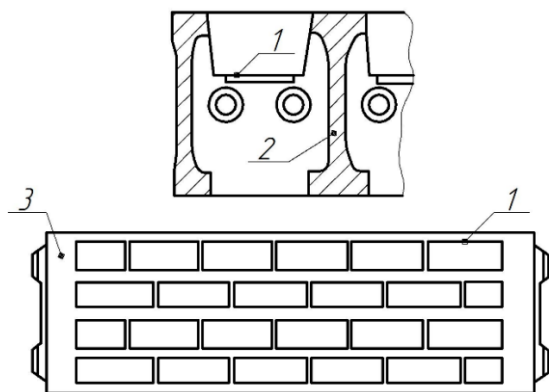


Рис. 4 – Обпалювальний візок з піддонами:
1 – перфорований піддон; 2 – підколосникова балка; 3 – обпалювальний візок

Обпалювальний візок з піддонами пропрацював безперервно 1272 години, а потім, після коригування і вдосконалення кріплення піддонів до підколосникових балок, візок знову був встановлений на обпалювальну машину і пропрацював безперервно ще 1008 годин. Таким чином, візок з піддонами пропрацював під наглядом 2280 годин. Після цього спостереження за візком з піддонами було припинено і він ще тривалий час працював на випалювальній машині.

За час експлуатації обпалювального візка з піддонами забивання отворів у піддонах окатишами та їх уламками не спостерігалось. Окалини на піддонах також не було. Відсутні були поломки, викривлення та інші несправності піддонів. Максимальна температура відходящих газів під піддонами під час безперервної роботи обпалювальної машини становила 570-620°C і підвищувалася до 730-780°C під час короткочасних (до 5 хвилин) зупинок обпалювального візка з піддонами у високотемпературній частині зони випалу. Це є наслідком збільшення висоти шару донної постілі на подині зі 100 мм (на колосниках) до 215-230 мм.

У період випробування обпалювальний візок з перфорованими подинами був зупинений в зоні охолодження і проведено розбір шару та відбір проб обпалених окатишів по висоті шару з цього та сусіднього візка з колосниками. Результати випробувань металургійних властивостей обпалених окатишів, наведені в табл. 2, показали, що міцнісні характеристики обпалених окатишів на візку з подинами вищі, ніж на візку з колосниками. Як видно, міцність при відновленні (+5 мм) вища, а стираність (-0,5 мм) нижча у окатишів, обпалених на візку з подинами, ніж на колосниках. Аналогічна відмінність властивостей окатишів за величинами усадки (ΔН) і газопроникності (ΔР) шару при відновленні під навантаженням.

Таблиця 2

Металургійні властивості обпалених окатишів за висотою шару

Обпалювальний візок	Міцність на стиск, ДаН/ок			
	Верх шару	Середина	Низ шару	Середня
3 колосниками	230	251	176	214
3 подинами	228	265	212	232
Барабанні показники (+5 мм/-0,5 мм), %				
3 колосниками	92,4/6,8	93,6/5,3	88,3/10,8	90,7/8,2
3 подинами	92,6/6,9	94,1/4,9	91,7/7,3	92,4/6,7
Міцність при відновленні (+5 мм/-0,5 мм), %				
3 колосниками	81,6/5,6	78,6/5,1	72,6/17,3	77,6/9,3
3 подинами	79,8/5,6	84,6/4,8	78,1/8,5	80,8/6,2
Усадка та газопроникність шару при відновленні (ΔН, мм/ΔР, Па)				
3 колосниками	49,8/542	50,7/558	56,1/580	52,2/560
3 подинами	48,6/395	50,3/430	53,2/450	50,6/425
Ступінь відновлення, %				
3 колосниками	93,2			
3 подинами	93,0			

Розраховано зниження витрати легованої сталі в разі заміни колосників на обпалювальних візках перфорованими піддонами на кожному типі обпалювальних машин, що працюють на фабриках з виробництва залізрудних окатишів України (табл. 3).

Таким чином, виконані напівпромислові та промислові випробування показали, що заміна колосників піддонами дозволить зменшити витрату

високолегованого металу на 85-87%, підвищити продуктивність обпалювальних машин і поліпшити металургійні характеристики обпалених окатишів. У разі використання для виготовлення піддонів жаростійкої листової сталі марки 20Х23Н18 товщиною 5-7 мм з температурою утворення окалини 1050°C, як у колосників (марка сталі 40Х24Н12СЛ), термін служби піддонів істотно збільшиться.

Таблиця 3

Економія легованої сталі на конвеєрних обпалювальних машинах при заміні колосників подинами

Тип обпалювальної машини та їх кількість на ГЗКа	Кількість візків на машині, шт	Маса колосників на машині, т	Маса подин на машині, т	Економія сталі на машині, т
ОК-278 ПівнГЗК 2 шт.	129	193,5	25,8	167,7
ОК-306 ПівнГЗК 2 шт.	189	226,8	34,0	192,8
ОК-336 ЦГЗК 1 шт.	142	284,0	35,5	248,5
ОК-552 ПівнГЗК 2 шт.	208	416,0	52,0	364,0

Висновки

Розроблено конструкцію жаростійкої сталевий перфорованої подини та спосіб її кріплення, що дозволяють замінити колосники на випалювальних візках конвеєрних машин для термозміцнення залізрудних окатишів. Запропоноване технічне рішення забезпечує підвищення ефективності термозміцнення залізрудних окатишів, економію дорогих матеріалів і збільшення продуктивності без потреби у масштабній реконструкції обладнання.

Перелік використаних джерел

- [1] Characterization and drying kinetics of iron ore pellet feed and sinter feed / T.C. Souza Pinto et al. *Drying Technology*. 2021. Vol. 39, iss. 10. Pp. 1359-1370. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1747073>.
- [2] Modelling of heat transfer in a straight grate pellet induration reactor complemented with plant scale experiments / T. Thorat et al. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy*. 2021. Vol. 131, iss. 3. Pp. 283-289. DOI: <https://doi.org/10.1080/25726641.2021.1984828>.
- [3] High temperature oxidation behavior of heat resistant steel with rare earth element Ce / S. Wang et al. *Materials Research Express*. 2020. Vol. 7, № 1. Article 016571. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab692d>.
- [4] Experimental and numerical investigation of iron ore pellet firing using coupled CFD-DEM method / Amani H., Alamdari E. K., Moraveji M. K., Peters B. *Particuology*. 2024. Vol. 93. Pp. 75-86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2024.05.018>.
- [5] CFD prediction of heat/mass transfer in multi-layer sintering process assisted with gaseous fuel injection / Z. Cheng et al. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 128. Article 105654. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105654>.
- [6] Copeland C. R., Claremboux V., Kawatra S. K. A Comparison of Pellet Quality from Straight-grate and Grate-kiln Furnaces. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2018. Vol. 40(3). Pp. 218-223. DOI: <https://doi.org/10.1080/08827508.2018.1536050>.
- [7] Anishchenko A., Kukhar V., Oginskiy I. Design and Durability of Roller Assemblies in Sintering Machines. *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (с. 342–353). Springer International Publishing, 2022. Pp. 342-353. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_40.
- [8] Nilsson E. A. A., Tegman R., Antti M. L. Thermal cycling of grate-link material for iron ore pelletising process. *Ironmaking & Steelmaking*. 2016. Vol. 44(4). Pp. 269-280. DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1210404>.
- [9] Physico-chemical profile and corrosion mechanism of the failure grate bar from iron ore sintering process / X. Fan et al. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 20. Pp. 428-439. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.130>.
- [10] CO reduction in sintering flue gas by CFD-ML for process parameters optimization / F. Wang et al. *Journal of Cleaner Production*. 2025. Vol. 500. Article 145268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145268>.
- [11] Dragge R. The «Steel Belt» Process. *Proceedings of the 4th International Symposium on Pelletizing*, Toronto, 2-5 June 1985. Pp. 1-12.
- [12] Söderholm K., Larsson L., Söderholm P. Managing the 1970s energy crises in a state-owned mining company: strategies pursued by the Swedish iron ore producer LKAB. *Mineral Economics*. 2017. Vol. 31(1-2). Pp. 179-190. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13563-017-0122-y>.
- [13] Візок випалювальних або агломераційних конвеєрних машин: пат. на корисну модель 90519 Україна: МПК С22В1/14. № u201400551; заявл. 20.01.2014; опубл. 26.05.2014, Бюл. № 10. 5 с.

THERMAL STRENGTHENING OF IRON ORE PELLETS ON STEEL PERFORATED BEDS

Chuprynov Ye.V.	PhD (Engineering), associate professor, Technological institute of State university of economics and technology, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8605-3434 , e-mail: itchupa@gmail.com ;
Kassim D.O.	D.Sc. (Engineering), professor, Technological institute of State university of economics and technology, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1750-1237 , e-mail: kassim@duet.edu.ua ;
Zaitsev G.L.	PhD (Engineering), associate professor, Technological institute of State university of economics and technology, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7909-9044 , e-mail: zaitsev@duet.edu.ua ;
Liakhova I.A.	PhD (Engineering), associate professor, Technological institute of State university of economics and technology, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7589-8351 , e-mail: liakhova_ia@duet.edu.ua ;
Maliy K.V.	PhD (Engineering), associate professor, «TECHNICAL UNIVERSITY «METINVEST POLYTECHNIC» LLC, Zaporizhzhia, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9046-4268 , e-mail: kristina.maliy@mipolytech.education

The purpose of the work is to substantiate and experimentally verify the effectiveness of using steel perforated grates instead of grate bars in the process of heat treatment of iron ore pellets. The tasks include improving the metallurgical characteristics of pellets, reducing the consumption of heat-resistant steels, and improving the energy efficiency of roasting machines. The research was conducted in semi-industrial (bowl-type installation) and experimental-industrial conditions on conveyor kilns (SM-306, SM-552). It has been established that the optimal live cross-section of a perforated grate with a thickness of 5 mm is 19-20 % with elongated holes with straight edges. Semi-industrial tests have shown that the metallurgical characteristics of pellets calcined on a perforated grate are 3–5% (relative) better in all respects compared to pellets calcined on grates. At the same time, the specific productivity of the installation increased from 0.8 to 0.805 t/m²·hour. Based on these data, a design of grooved perforated pallets with a live cross-section of 20.1 % was developed for industrial testing. The roasting trolley with pallets operated continuously for over 2,280 hours without clogging the holes, forming scale, breaking down, or warping. The maximum temperature of the waste gases under the pallets did not exceed 780 °C due to an increase in the height of the bottom bed (to 215-230 mm instead of 100 mm). Industrial tests confirmed that the strength characteristics of pellets burned on the bottom (especially in the lower layer) are higher, and the abrasion and gas permeability indicators during recovery are better compared to pellets from a grate trolley. The key scientific and practical result is the development and successful industrial testing of a perforated steel grate design, which reduces the consumption of high-alloy metal by 85–87 % compared to grate bars, increases the productivity of roasting machines, and improves the metallurgical properties of pellets. The scientific novelty lies in the comprehensive experimental study of perforated grate bars in industrial conditions and the establishment of optimal geometric parameters for the holes. The practical significance lies in significant savings in expensive materials and increased heat treatment efficiency without major production reconstruction. Further research may be directed toward optimizing the choice of steel grade for hearths (taking into account the high temperature of scale formation) to ensure maximum service life.

Keywords: pellet induration, perforated hearth plate, grate bars, sintering machine / induration furnace, iron ore feed, metallurgical properties, metal saving / material economy, gas dynamic resistance, open area ratio (live cross-section), alloy steel consumption.

References

- [1] T.C. Souza Pinto, et al., "Characterization and drying kinetics of iron ore pellet feed and sinter feed," *Drying Technology*, vol. 39, iss. 10, pp. 1359-1370, 2020. doi: [10.1080/07373937.2020.1747073](https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1747073).
- [2] T. Thorat, V.N. Nurni, M. Basavaraja, M. Singhai, S. Hazra, and A. Mogale, "Modelling of heat transfer in a straight grate pellet induration reactor complemented with plant scale experiments," *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, vol. 131(3), pp. 283-289, 2021. doi: [10.1080/25726641.2021.1984828](https://doi.org/10.1080/25726641.2021.1984828).
- [3] S. Wang, et al., "High temperature oxidation behavior of heat resistant steel with rare earth element Ce," *Materials Research Express*, vol. 7(1), article 016571, 2020. doi: [10.1088/2053-1591/ab692d](https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab692d).
- [4] H. Amani, E.K. Alamdari, M.K. Moraveji, and B. Peters, "Experimental and numerical investigation of iron ore pellet firing using coupled CFD-DEM method," *Particuology*, Vol. 93, Pp. 75-86, 2024. doi: [10.1016/j.partic.2024.05.018](https://doi.org/10.1016/j.partic.2024.05.018).

- [5] Z. Cheng, P. Fu, Z. Guo, J. Yang, and Q. Wang, "CFD prediction of heat/mass transfer in multi-layer sintering process assisted with gaseous fuel injection," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 128, article 105654, 2021. doi: **10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105654**.
- [6] C.R. Copeland, V. Claremboux, and S.K. Kawatra, "A Comparison of Pellet Quality from Straight-grate and Grate-kiln Furnaces," *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 40(3), pp. 218-223, 2018. doi: **10.1080/08827508.2018.1536050**.
- [7] A. Anishchenko, V. Kukhar, and I. Oginskiy, "Design and Durability of Roller Assemblies in Sintering Machines," in *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer International Publishing, 2022, pp. 342-353. doi: **10.1007/978-3-030-85230-6_40**.
- [8] E.A.A. Nilsson, R. Tegman, and M.L. Antti, "Thermal cycling of grate-link material for iron ore pelletising process," *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 44(4), pp. 269-280, 2016. doi: **10.1080/03019233.2016.1210404**.
- [9] X. Fan, et al., "Physico-chemical profile and corrosion mechanism of the failure grate bar from iron ore sintering process," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 20, pp. 428-439, 2022. doi: **10.1016/j.jmrt.2022.07.130**.
- [10] F. Wang, K. Wang, L. Tang, K. Li, and C. Wang, "CO reduction in sintering flue gas by CFD-ML for process parameters optimization," *Journal of Cleaner Production*, vol. 500, article 145268, 2025. doi: **10.1016/j.jclepro.2025.145268**.
- [11] R. Dragge, "The «Steel Belt» Process," in *Proceedings of the 4th International Symposium on Pelletizing*, Toronto, June 2-5, 1985, pp. 1-12.
- [12] K. Söderholm, L. Larsson, and P. Söderholm, "Managing the 1970s energy crises in a state-owned mining company: strategies pursued by the Swedish iron ore producer LKAB," *Mineral Economics*, vol. 31(1-2), pp. 179-190, 2017. doi: **10.1007/s13563-017-0122-y**.
- [13] V.P. Lyalyuk, et al., "Vizok vypaliuvalnykh abo ahlomeratsiinykh konveiernykh mashyn" ["Trolley for firing or sintering conveyor machines"], UA Utility Model 90519, May 26, 2014. (Ukr.)
- Стаття надійшла 02.09.2025
Стаття прийнята 28.09.2025
Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Термозміцнення залізородних окатишів на сталевих перфорованих подинах / Є. В. Чупринов та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 79-85. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344658>.