

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ
І ТЕХНОЛОГІЙ**

**Г. ПАНЧЕНКО
А. ІВАНОВ
Н. СУСЛО**

**КОЛОСНИКИ
АГЛОМЕРАЦІЙНИХ І ОБПАЛЮВАЛЬНИХ МАШИН:
умови роботи, конструкції, технологія виробництва**

Монографія

Кривий Ріг -2026

УДК 669.162.224.2:621.74.04

Рецензенти:

В. Й. Засельський – доктор технічних наук, професор (Державний університет економіки і технологій);

Д. О. Кассім – доктор технічних наук, професор (Державний університет економіки і технологій).

Панченко Г., Іванов А., Сусло Н. Колосники агломераційних і обпалювальних машин: умови роботи, конструкції, технологія виробництва : монографія. Кривий Ріг : ДУЕТ, 2026. 128 с.

ISBN 978-XXX-XXX-X

Анотація: У монографії представлено комплексне дослідження життєвого циклу колосників конвеєрних машин, що працюють у надважких умовах теплових агрегатів металургійного комплексу. Проаналізовано специфіку теплових та механічних навантажень, які виникають під час спікання агломерату та обпалювання обкотишів. Розглянуто сучасні конструктивні рішення змінного обладнання палет, спрямовані на підвищення газопроникності шару та мінімізацію втрат від просипу.

Особливу увагу приділено технології виробництва колосників, зокрема оптимізації ливарних процесів для отримання якісних виливків зі стабільними експлуатаційними властивостями. Видання розраховане на наукових співробітників, інженерно-технічний персонал металургійних та машинобудівних підприємств, а також магістрантів та аспірантів технічних спеціальностей.

UDC 669.162.224.2:621.74.04

© Панченко Г., Іванов А., Сусло Н., 2026 © Державний університет економіки і технологій, 2026

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ КОЛОСНИКІВ НА АГЛОМЕРАЦІЙНИХ І ОБПАЛЮВАЛЬНИХ МАШИНАХ	7
1.1. Аналіз режимів спікання агломерату і термозміцнення окатишів	10
1.2. Аналіз температурно-газового режиму на обпалювальних конвеєрних машинах в процесі термозміцнення залізрудних окатишів	17
1.3. Вплив механічних та термомеханічних факторів на експлуатаційну стійкість колосників	28
РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКЦІЯ ТА МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА КОЛОСНИКІВ	47
2.1. Аналіз конструктивних рішень колосників агломераційних та обпалювальних машин	48
2.2. Характеристика сплавів для виготовлення колосників	64
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА КОЛОСНИКІВ	70
3.1. Технологія отримання колосників в разові піщані форми	70
3.2. Виготовлення колосників методом лиття за виплавлюваними моделями	76
3.3. Перспективи застосування вакуум-плівкового формування для виготовлення колосників	80
3.4. Розробка та впровадження технології виготовлення колосників за газифікованими моделями	82
3.4.1. Матеріали для виготовлення газифікованих моделей та форм	86
3.4.2. Устаткування та технологічні режими виготовлення виливків по газифікованих моделях	97
ВИСНОВКИ	121
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	123

ВСТУП

Сучасні процеси виробництва залізорудної сировини характеризуються постійним зростанням вимог до енергоефективності, екологічної безпеки та стабільності технологічних параметрів, що зумовлює необхідність підвищення надійності та довговічності основних елементів випалювального обладнання. Особливе місце серед них займають колосникові решітки конвеєрних випалювальних машин, які працюють в умовах інтенсивного термічного, механічного та хімічного навантаження. Саме колосники визначають рівномірність газорозподілу, стабільність теплового режиму шару окатишів та, зрештою, якість готової продукції. Висока ефективність роботи колосників безпосередньо впливає на енергоспоживання печі, стабільність процесу випалу та мінімізацію втрат матеріалу, що є критично важливим для сучасного металургійного виробництва.

У реальних умовах експлуатації колосники зазнають циклічної дії високих температур, агресивних газових середовищ, абразивного зносу з боку шару окатишів і термічних деформацій, що виникають внаслідок нерівномірного нагріву та охолодження. Поєднання зазначених факторів призводить до інтенсивного зношування, втрати геометричної стабільності, утворення тріщин і, як наслідок, до передчасного виходу колосників з ладу. Це спричиняє зростання експлуатаційних витрат, збільшення простоїв обладнання та негативно впливає на економічні показники виробництва, що підкреслює необхідність системного підходу до їх проектування, вибору матеріалів та технології виготовлення.

Попри значну кількість наукових публікацій, присвячених окремим аспектам термічних процесів випалу окатишів, газодинаміки шару або вибору жаростійких матеріалів, питання комплексного аналізу умов роботи колосників як елементів, що одночасно виконують механічну, теплотехнічну та

газорозподільчу функції, досі залишається недостатньо систематизованим. У більшості робіт колосники розглядаються фрагментарно – або з позицій матеріалознавства, або з точки зору конструктивних рішень, без урахування взаємозв'язку між режимами роботи машини, властивостями матеріалу та технологією виготовлення. Водночас, сучасні тенденції розвитку металургії орієнтуються на інтегровані рішення, що забезпечують одночасне підвищення продуктивності, енергоефективності та ресурсу елементів обладнання.

У зв'язку з цим актуальним є проведення комплексного дослідження, спрямованого на встановлення закономірностей впливу теплових, механічних та хімічних факторів на процеси зношування колосників, а також на обґрунтування раціональних конструктивних і технологічних рішень, здатних забезпечити підвищення їх ресурсу в умовах промислової експлуатації. Особливої уваги потребує аналіз реальних виробничих умов, характерних для випалювальних машин типу Lurgi-552, де експлуатаційні навантаження мають яскраво виражений нерівномірний характер уздовж довжини машини. Такий підхід дозволяє не лише покращити термін служби колосників, а й оптимізувати технологічний процес загалом, зменшивши енерговитрати та підвищивши стабільність якості продукції.

Метою даної монографії є комплексне дослідження умов роботи колосників конвесрних випалювальних машин, аналіз механізмів їх термомеханічного та хімічного зношування, а також розробка науково обґрунтованих рекомендацій щодо удосконалення конструкції, вибору матеріалів і технології виготовлення колосників з метою підвищення їх експлуатаційної надійності та довговічності.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі основні завдання: аналіз теплових і газодинамічних режимів випалу окатишів; дослідження характеру термомеханічних навантажень, що діють на колосники в різних зонах машини; встановлення основних механізмів зношування і руйнування

колосників; оцінка впливу матеріального складу та технології виготовлення на їх експлуатаційні властивості; формування рекомендацій щодо оптимізації конструктивних і технологічних параметрів.

Монографія базується на узагальненні результатів теоретичних досліджень, аналізі літературних джерел і даних промислової експлуатації, а також на власних напівпромислових і виробничих спостереженнях. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні нових і модернізації існуючих випалювальних машин, а також у навчальному процесі при підготовці фахівців металургійного профілю. Крім того, дане дослідження сприяє формуванню науково обґрунтованої бази для подальшого впровадження інноваційних матеріалів і технологій у виробництво, що відповідає сучасним вимогам промислової безпеки та енергоефективності.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ КОЛОСНИКІВ НА АГЛОМЕРАЦІЙНИХ І ОБПАЛЮВАЛЬНИХ МАШИНАХ

Аналіз світового досвіду виробництва чавуну, а також системних досліджень [1] свідчить, що одним із ефективних напрямів удосконалення технології доменної плавки є підвищення якості окатишів і агломерату. Поліпшення властивостей огрудкованої залізорудної сировини сприяє зниженню витрати коксу, зменшенню собівартості продукції та підвищенню конкурентоспроможності товарного чавуну на внутрішньому й зовнішньому ринках.

В умовах розвитку ГМК України традиційним залишається сортамент огрудкованих залізорудних матеріалів для доменної плавки – агломерат та низькоосновні окислені окатиші [1, 2]. Виробничі потужності агломераційних і обпалювальних цехів, введених в експлуатацію у 50–60-х роках минулого століття, не завжди забезпечують доменні цехи залізорудною сировиною необхідної якості [3].

Грудкування залізорудних концентратів з отриманням окатишів і агломерату є ключовим способом підготовки шихти до доменної плавки. Відповідно, підвищення якості окатишів та агломерату і збільшення їх виробництва шляхом підвищення експлуатаційної стійкості конвеєрних машин огрудкування є одним із пріоритетних завдань сучасного виробництва.

Ефективність виробництва огрудкованої залізорудної сировини оцінюється через підвищення її фізико-хімічних характеристик та вдосконалення технології отримання, що безпосередньо впливає на продуктивність доменної плавки. Зокрема, підвищення експлуатаційної надійності всіх елементів конвеєрних машин огрудкування забезпечує більш стабільну роботу агрегатів і оптимальне використання матеріалів [4].

Сучасні вимоги до якості залізородних матеріалів для доменної плавки, за даними Г.Г. Єфименко, Ю.С. Кривченко та інших авторів [5, 6], включають:

а) фізичні властивості – високу механічну міцність ($>75\%$), низьку здатність до руйнування та стирання ($<4\%$) у холодному стані та мінімальні зміни цих характеристик при відновленні; високу пористість;

б) фізико-хімічні властивості – високу відновлюваність, високу температуру початку розм'якшення та малий інтервал між початком розм'якшення і плавленням;

в) хімічний склад – максимальний вміст заліза та низький ($5-7\%$) вміст FeO ; високу основність для виведення сирого вапняку з шихти;

г) стабільний гранулометричний склад (крупність $5-50$ мм, вміст дріб'язку $0-5$ мм у межах $3-5\%$);

д) постійність хімічного складу – відхилення за вмістом заліза $0,2-0,25\%$ та по основності $0,02-0,025$ од. модуля у партіях 500 т.

Однією з ключових умов отримання якісних окатишів і агломерату є надійна робота конвеєрних агломераційних і обпалювальних машин, які забезпечують термічне зміцнення окатишів. Надійність машин конвеєрного типу, частота профілактичних і капітальних ремонтів значною мірою визначається конструкцією колосників, які формують спікальні та обпалювальні візки.

Крім дії високих температур та агресивного газового середовища, колосники зазнають комплексного впливу механічних і термомеханічних навантажень. Під час руху шару окатишів і агломерату постійно чергуються статичні та динамічні сили, що діють на окремі елементи колосникового поля. Маса вантажу, інтенсивність подачі та неоднорідність розподілу матеріалу створюють локальні перевантаження, які разом із термічними циклами прискорюють виникнення мікротріщин та деформацій колосників.

Важливим чинником є взаємодія колосників із потоком газів під час обпалювання. Продукти горіння та конвективні струми формують нерівномірний температурний профіль над і під колосниковим полем, що призводить до локальних перепадів температур і термічних напружень. Це прискорює поверхневе окиснення та утворення виснажуваних зон на робочих елементах. Інтенсивність процесів залежить від конструктивних особливостей колосників: розмір прорізів, товщина ребер, форма і висота елементів визначають розподіл температур та швидкість руху газів у шарі окатишів.

Також значення мають технологічні режими спікання та термозміцнення: частота і амплітуда теплових циклів, швидкість руху візків та рівномірність подачі матеріалу впливають на контакт окатишів із колосниками. Нерівномірне прогрівання або зміщення матеріалу може спричинити локальний перегрів окремих елементів колосникового поля, що підвищує ризик передчасного зносу.

Застосування різних конструктивних схем колосників дозволяє оптимізувати розподіл навантажень і підвищити стійкість у реальних умовах експлуатації. Наприклад, зміна форми прорізів або відстані між колосниками впливає на проходження газів і рівномірність термічного впливу на шар окатишів. Такі конструктивні рішення безпосередньо визначають ефективність теплопередачі, швидкість спікання та загальну продуктивність конвеєрних машин.

Контроль режимів спікання і обпалювання в промислових умовах дозволяє знизити частоту ремонтів колосників і простої машин, що підкреслює необхідність детального вивчення взаємозв'язку технологічних параметрів і експлуатаційної стійкості колосників.

Таким чином, комплексний вплив механічних, термічних та газових факторів формує складне поле напружень і зносу колосників, що обґрунтовує необхідність системного аналізу їх

роботи на агломераційних і обпалювальних машинах та оцінки взаємозв'язку з параметрами виробництва окатишів і агломерату.

1.1. Аналіз режимів спікання агломерату і термозміцнення окатишів

Як вже відзначалося, огрудкування залізорудних концентратів дозволяє підвищити продуктивність доменних печей і поліпшити їх техніко-економічні показники. Існують два процеси огрудкування металургійної сировини : агломерація і виробництво окатишів [7].

Процес агломерації відбувається на машинах безперервної дії конвеєрного типу. Теорія і технологія виробництва агломерату узагальнені в джерелах [8, 9]. Відзначено, що якість агломерату безпосередньо залежить як від складу аглошихти, так і від процесів, що відбуваються при його спіканні.

Гомогенізована і огрудкована агломераційна шихта при наступному високотемпературному нагріві зазнає складний комплекс різноманітних фізичних процесів і хіміко-мінералогічних перетворень (рис. 1.1). Процес спікання аглошихти методом просмоктування через них повітря визначається, передусім, теплообміном між газом і матеріалом.

Розвиток, рух і засвоєння тепла, що відбувається при фільтрації повітря і нагрітих газів через шар, визначають як температурний режим нагріву матеріалу і охолодження готового агломерату, так і швидкість процесу спікання [10]. Шар аглошихти отримує тепло від двох джерел: на першому етапі агломерації від зовнішнього – продуктів спалювання газу в запальному горні (16,7 %); на другому етапі від внутрішнього – продуктів горіння твердого палива в шарі, що спікається (83,3 %). При цьому теплообмінні процеси підкоряються закономірностям передачі тепла в нерухомому шарі.

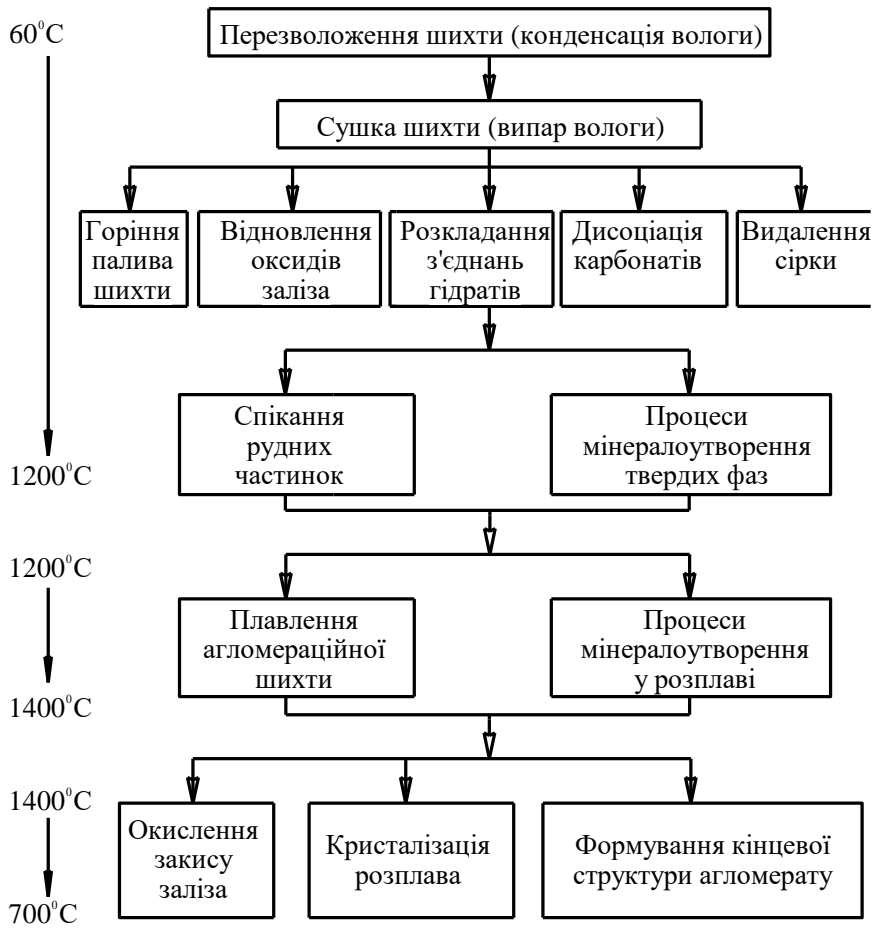
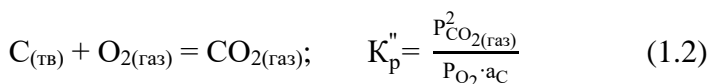
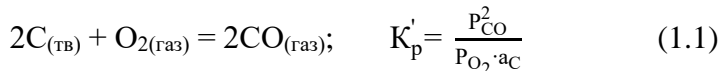


Рис. 1.1. Схема стадій і температурних інтервалів агломераційного процесу [11]

Г.В. Губін, О.В. Марасанова та ін. [12] відзначають, що існують дві чітко виражені сходинки теплообміну шару: на верхній сходинці здійснюється передача тепла від агломерату, що спікся, до повітря, на нижній – від газу до матеріалу. Обидві сходинки теплообміну пов'язані зоною горіння, розташованою між ними. Температура газового потоку при вході на нижню сходинку теплообміну визначається результатами теплообміну на верхній сходинці і горінням палива.

Між газовим потоком і матеріалом в шарі переважає конвективний теплообмін. При високих температурах має місце теплопередача випромінюванням від одного шматка до іншого, у тому числі і при горінні шматків твердого палива.

Як відзначалося вище, основну кількість тепла (83,3%) аглошихта отримує від згорання твердого палива в шарі і тільки близько 16,7% – від зовнішнього джерела тепла – запального горна. Таким чином, процес окислення твердого вуглецю молекулярним киснем може протікати у двох реакціях:



Залежність зміни енергії Гіббса окислення вуглецю по реакціях 1.1 і 1.2 від температури описується рівняннями [13]:

$$\Delta G_T^0(1.1) = -204200 - 178,6T, \text{ Дж/моль} \quad (1.3)$$

$$\Delta G_T^0(1.2) = -393100 - 6,7T, \text{ Дж/моль} \quad (1.4)$$

З наведених рівнянь випливає, що при окисленні вуглецю по реакції 1.1 двох молей вуглецю до 2CO виділяється

$\Delta H_T^0(1.1) = -204,2 \text{ кДж/моль}$, а по реакції 1.2 виділяється $\Delta H_T^0(1.2) = -393,1 \text{ кДж/моль}$.

При аналізі реакції в системі C – O – CO – CO₂:



Залежність зміни енергії Гіббса реакції взаємодії твердого вуглецю з CO₂ від температури має вигляд [14]:

$$\Delta G_T^0(1.2) = 172130 - 177,46T, \text{ Дж/моль} \quad (1.6)$$

Зміна ентальпії в рівнянні (1.5) має позитивний знак, тобто реакція носить ендотермічний характер.

Механізм горіння вуглецю твердого палива представляють у вигляді трьох послідовних етапів:

- 1) адсорбція молекул кисню на поверхні решітки вуглецю;
- 2) хімічна взаємодія кисню і вуглецю з утворенням вуглець-кисневих комплексів C_xO_y;
- 3) розпад комплексів C_xO_y на C і CO₂ та десорбція останніх в навколишню газову атмосферу [14].

На відношення вмісту C:CO₂ в продуктах згорання впливають: температура, тиск, вміст кисню. При низьких температурах реакція відбувається в кінетичному режимі, при високих – в дифузійному. У шарі аглошихти горіння відбувається в проміжній області – в змішаному режимі, коли істотний вплив чинять перераховані вище чинники.

Процес власне горіння твердого вуглецю починається при досягненні температури займання, тобто температури, вище за яку реагуюча система здатна до самоприскорення реакції [8].

Шар палива, що горить, складається з двох основних зон: кисневої, в якій інтенсивно витрачається кисень, утворюється приблизно в рівних кількостях C та CO₂ і підвищується

температура; відновної, в якій інтенсивний розвиток отримує ендотермічна реакція (1.5) [15].

На процес горіння твердого палива в агломераційному шарі впливають такі чинники:

1. Високі питома поверхня і питома теплоємність аглошихти сприяють інтенсивному теплообміну між газом і компонентами шихти і швидкому теплообміну гарячого газу з шаром, що пролягає нижче. Це обмежує товщину зони горіння від 15 до 40 мм.

2. Роз'єднаність часток палива в шарі призводить: до неповноти спалювання С у високотемпературній зоні; нижчій температурі горіння часток, ніж в суцільному шарі палива; великим втратам тепла випромінюванням.

3. Загортання дрібних часток палива всередину гранул аглошихти, що утруднює дифузію до них кисню [15].

Виробництво залізорудних окатишів має ряд переваг порівняно з агломерацією: можливість використання більш тонко подрібнених концентратів (0,05-0,07 мм); підвищена міцність в холодному стані, що робить зручним транспортування окатишів; менший відсоток дрібниці при завантаженні в доменну піч; більший відсоток вмісту заліза та ін. Результати розробок механізму формування структури і властивостей окатишів були узагальнені в роботі [16].

Отримання окатишів відбувається в два етапи:

- огрудкування вологої шихти і отримання сирих окатишів;
- зміцнення сирих окатишів обпалювальним або безобпалювальним способом для надання міцності, необхідної при зберіганні, транспортуванні до доменних цехів і проплавлення їх в печах [7].

Другий етап є найбільш складною і енергоємною операцією виробництва окатишів [17] і може здійснюватися в печах шахтного типу, комбінованих установках «решітка-трубчаста піч», конвексних машинах та інших типах обпалювальних агрегатів [17, 18].

Шахтні печі працюють за принципом протитечії: гарячі гази, що передають тепло обкотишам, рухаються вгору, а окатиші, що обпалюються, – сходять вниз. Незважаючи на низькі експлуатаційні витрати, високий коефіцієнт корисної дії та інші переваги шахтних печей, їх обмежене застосування обумовлено низькою продуктивністю [17].

Конвеєрні обпалювальні машини є найбільш поширеними агрегатами для обпалення залізорудних окатишів [17, 18]. Особливістю і в той же час їх недоліком є необхідність застосування в цих машинах колосників з дорогих високолегованих хромонікелевих сталей.

Режим обпалення окатишів на машинах конвеєрного типу є високотемпературним з максимальною температурою обпалення в шарі окатишів 1250-1280°C [16] і містить послідовне протікання процесів сушки, нагріву, обпалення окатишів та їх охолодження. Сирі окатиші завантажуються на обпалювальний візок, який проходить над дуттевими або вакуум-камерами під секціями горна обпалювальної машини. Теплоносієм при обпаленні окатишів є продукти спалювання газоподібного палива в двопровідних або інжекційних пальниках.

В роботі щодо удосконалення конструкції агрегатів і режимів обпалення окатишів, Г. М. Майзель, Ф.М. Журавльов, І.П. Худорожков та ін. [19] встановили, що якість окатишів залежить від вмісту заліза в концентраті, кількості і складу домішок в шихті, складу і природи залізного концентрату, що огрудковується, особливостей теплових схем обпалювального агрегату і теплових умов термообробки окатишів. Проведені і опубліковані різними дослідниками дані [16, 18, 19] дозволили сформулювати основні вимоги до режиму термообробки окатишів різного складу, який забезпечив би їх транспортабельність і високі металургійні властивості:

- поступовий нагрів окатишів до максимальних температур з швидкістю не вище 100°C/хв.;

- повне окислення окатишів перед вступом в зону максимальних температур;
- певна витримка окатишів в зоні обпалення;
- поступове охолодження окатишів до температур 500-750°C зі швидкістю не більше 100°C/хв. і максимально інтенсивне охолодження від цих температур до 20-100°C.

Авторами [19] докладно досліджена залежність міцності окатишів від тривалості і температури їх термообробки. Встановлено, що при збільшенні температури і тривалості обпалення підвищується міцність окатишів. Шляхи інтенсифікації процесу обпалення окатишів проаналізовані у відомих роботах [20, 21]. Звернена увага, що інтенсивність обпалення можна підвищити шляхом введення в шихту при огрудкуванні окатишів твердого палива і застосування інтенсивного нагріву. Введення в шихту невеликих домішок твердого палива сприяє швидшому нагріву нижніх шарів окатишів і збільшенню питомої продуктивності обпалювальних конвеєрних машин.

З проведеного аналізу технологічних режимів термозміцнення окатишів і спікання агломерату виходить, що від раціональних параметрів технології залежить якість огрудкованої залізородної сировини. При цьому слід зазначити, недостатню вивченість впливу технологічних чинників виробництва окатишів і агломерату на експлуатаційну стійкість дорогих конструктивних елементів конвеєрних машин, зокрема на стійкість колосників з багатокомпонентних хромонікелевих сталей.

Від стійкості колосників, як відзначалося вище, залежить стабільний режим роботи конвеєрних машин, а отже, і отримання окатишів і агломерату з необхідними металургійними властивостями.

Таким чином, актуальним завданням в технології огрудкування залізородних концентратів разом з вдосконаленням технологій отримання окатишів і агломерату є комплексне

дослідження впливу технологічних режимів спікання агломерату і термозміцнення окатишів на стійкість колосників конвеєрних машин.

1.2. Аналіз температурно-газового режиму на обпалювальних конвеєрних машинах в процесі термозміцнення залізорудних окатишів

Гази, що відходять з агломераційного шару і шару окатишів та взаємодіють з колосниками візків конвеєрних машин, представлені продуктами процесу горіння палива, а також компонентами термічної дисоціації високотемпературного спікання агломерату і термообробки окатишів.

Встановлено [22]: гази, що відходять, містять у своєму складі CO_2 , C і вільний кисень (O_2). Разом з цими компонентами у складі газів, що відходять, містяться продукти розкладання гідратів і термодеструкції карбонатних з'єднань, які є в аглошихті і необпалених обкотишах. Основна частина гідратної вологи виділяється в зоні інтенсивного нагріву, але до 20 % може виділятися і у високотемпературних зонах.

Вміст сірчистих газів (SO_2 , SO_3) у складі газів, що відходять, зумовлений наявністю в залізній руді і концентратах сірки у вигляді сульфідів (наприклад, піриту FeS_2) або сульфатів (CaSO_4 , BaSO_4 та ін.) [12], які при високих температурах вступають у взаємодію з киснем і мінералами рудної частини шихти в процесі спікання агломерату і термозміцнення окатишів.

У літературі з хімічних процесів [23] звертається увага на можливість взаємодії молекулярного азоту (повітря) і кисню з утворенням кисневих з'єднань азоту. У зв'язку з обмеженою кількістю наукової літератури про участь азоту в процесах агломерації та обпалення окатишів, нами наведені короткі відомості про азот.

Велика енергія термічної дисоціації молекулярного азоту (941,64 кДж/моль N_2) є причиною виключно малої його

реакційній здатності. В той же час молекулярний азот (N₂) проявляє активність при взаємодії з перехідними металами (Ti, V, Cr, Mo, Fe). З киснем азот помітно взаємодіє тільки понад 2000°С з утворенням монооксиду NO. Цей оксид кипить при – 51,6 К. Термодинамічні властивості NO : C_p⁰ = 29,86 Дж/(моль·К). Рівноважні концентрації NO, який виходить за реакцією N₂ + O₂ ↔ 2NO, складають (у %) : 0,61 (2000°С); 4,48 (3200°С). З водою, розбавленими розчинами кислот і лугів не взаємодіє, але за звичайних умов монооксид NO легко окислюється до NO₂ по реакції NO + 1/2 O₂ = NO₂, хоча з підвищенням температури швидкість реакції зменшується.

На відміну від безбарвного газу NO, оксид NO₂ має червоно-бурий колір. Щільність NO₂ дорівнює 1,491 г/см³ (при 0°С). Термодинамічні властивості NO₂: C_p⁰ = 37,18 Дж/(моль·К), ΔH_{утв}⁰ = 34,2 кДж/моль, ΔS₂₉₈⁰ = 240,06 Дж/(моль·К).

Важливо зазначити, що монооксид, що утворився при високих температурах, нижче 1000°С не розкладається. Але NO може відновлюватися вуглецем, сіркою, SO₂, воднем H₂, активним металом до N₂. Діоксид NO₂ (на відміну від NO) взаємодіє з водою і розчинами лугів за реакціями:



Діоксид NO₂ – сильний окисник, багато речовин, С, S, Р та ін. згорають в NO₂. Відомо, що NO₂ є проміжним продуктом у виробництві кислоти HNO₃ [23]. Оскільки у полум'ї горіння твердого палива (вуглецю, коксу) температура досягає високих значень, можна вважати, що в цих умовах можливе утворення оксидів азоту і їх участь у формуванні окалини на колосниках з високолегованих сталей.

Аналіз даних про температурно-газові режими обпалення окатишів проводився стосовно машин конвеєрного типу Lurgi (Лургі-552) ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат»

(ПрАТ ПівнГЗК), м. Кривий Ріг, Україна. Довжина машини Лургі-552 138 м, ширина - 4 м. Вона обладнана 216 обпалювальними візками розміром 4 x 1,5 м кожен. На візку встановлюється від 360 до 380 колосників (плюс 4-5 колосників на сторону) в кожному з 4 рядів. Всього у одному ряду встановлюється від 90 до 95 колосників, так що загальна їх кількість зібраних на машині Лургі-552 складає до 380 шт. Загальна довжина колосника 330 ± 15 мм, ширина з монтажним виступом $40 \pm 0,5$ мм. Литі виступи-приливи мають приблизно по 4 мм з кожної бічної поверхні колосника, так що при їх складанні на візку між колосниками утворюється технологічний проміжок шириною 4-8 мм. Така ширина щілини виключає «розсип» окатишів.

Схема пристрою конвеєрної машини Лургі- 552 з вказівкою функціональних зон і газодуттєвих потоків в режимі обпалення залізорудних окатишів наведена на рис. 1.2. [24].

Як видно з рис. 1.2, уздовж конвеєрної машини є декілька зон, що розрізняються температурними умовами: дві зони сушки початкових (сирих) залізорудних окатишів, які послідовно змінюються зонами підігріву, обпалення, рекуперації, двома зонами охолодження і зоною розвантаження обпалених окатишів в приймальний бункер. Обпалення окатишів ведеться просмоктуванням продуктів згорання природного газу через шар початкових окатишів 300 мм, розташований на шарі обпалених окатишів (постілі) 100 мм. Приведені на рис. 1.2 газодуттєві потоки ілюструють раціональне використання енергоносіїв при сушці і обпаленні окатишів.

Технологічний процес термообробки окатишів на обпалювальних машинах конвеєрного типу є термоциклічним з періодом робочого циклу обпалення окатишів 31-34 хвилини (в середньому, 32,48 хвилин), протягом якого, температура поверхневого шару окатишів змінюється від 25 до 1280°C (табл. 1.1). При цьому, повний цикл теплової дії на колосник складає близько 75 хв.

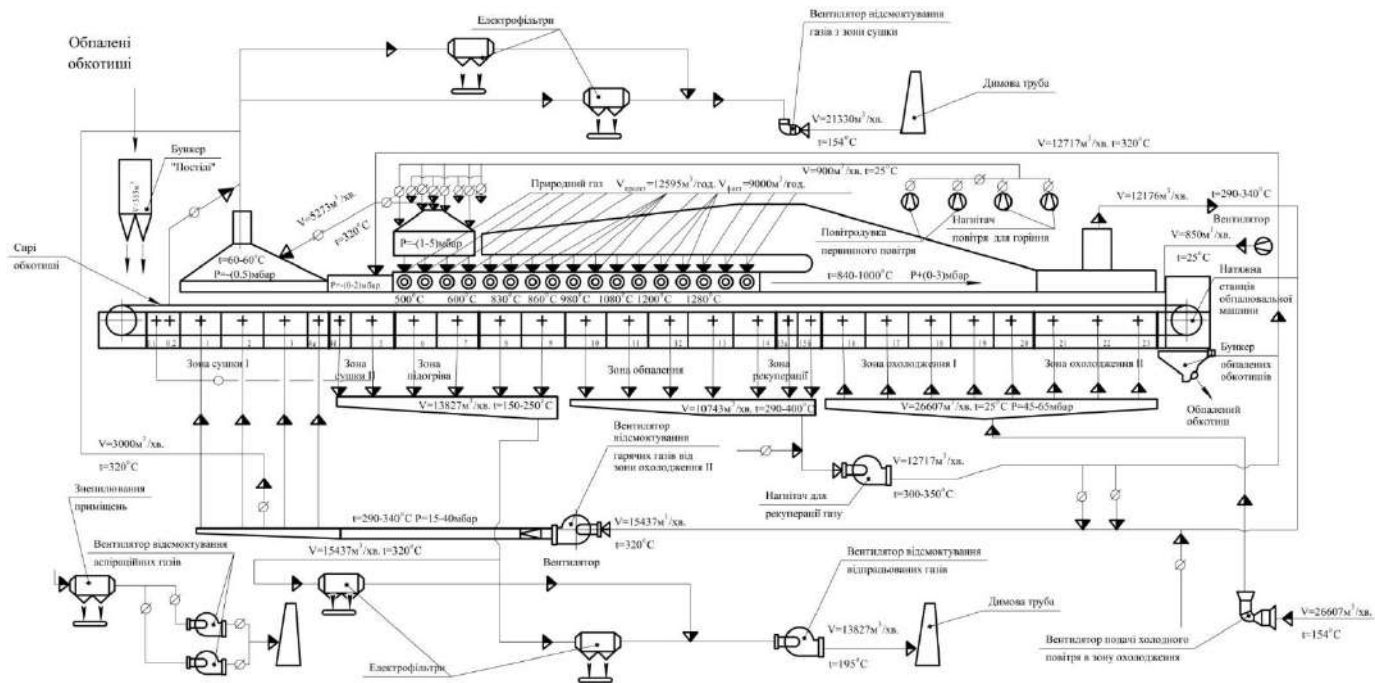


Рис. 1.2. Схема газодуттєвих потоків обпалення окатишів на машині Лургі-552

Таблиця 1.1

**Основні технологічні операції обпалення офлюсованих
окатишів із залізорудного концентрату на машині Лургі- 552**

№ етапу	Етап обпалення окатишів	№ вакуум-камер	Температура газу-теплоносія, °С	Довжина робочої зони, м	Час етапу обпалення окатишів, хв.
1	Сушка 1	1-4а	320	21	5
2	Сушка 2	4в- 5	320	9	2,14
3	Підігрів	6-7	500-800	12	2,86
4	Обпалення	8-13	830-1280	39	9,29
5	Рекуперація	14-15	1280	9	2,14
6	Охолодження 1	16-20	25	30,7	7,3
7	Охолодження 2	21-23	25	17,3	4,12
	Всього:	25		138	32,85

Вимір температури і складу газів, що відходять, проводився газоаналізатором ОКСИ-5М [25]. Хромель-алюмелева термопара з електродами діаметром 1,3 мм застосовувалася для виміру температури на поверхні колосників. В якості вторинного приладу використовували мілівольметр з градуванням ХА. Вільні кінці термопари за допомогою кабелю підводилися до бортів візка, де під'єднувалися до контрольної-вимірювальної апаратури. Експериментальні дані по виміру температур на колосниках при безупинній роботі обпалювальної машини представлені на рис. 1.3.

Результати отримані при швидкості руху стрічки 4,2 м/хв. і витраті газу 23,5 м³/год. Незважаючи на різке збільшення температури над шаром обкотиша в зонах сушки і підігрівання, температура колосників змінюється незначно. Це пов'язано з витрачанням усього тепла на підігрівання сирих окатишів.

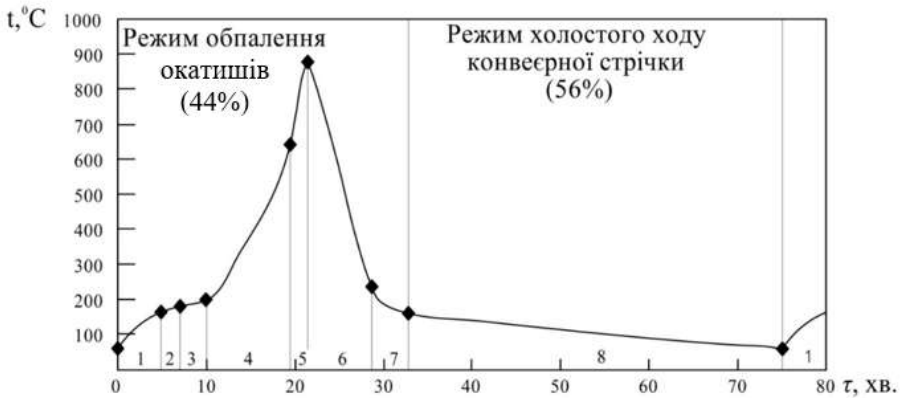


Рис. 1.3. Зміна температури колосників при обпаленні офлюсованих залізорудних окатишів на конвеєрній машині Лургі-552:

1 - сушка 1; 2 - сушка 2; 3 - підігрів; 4 - обпалення;
 5 - рекуперация; 6 - охолодження 1; 7 - охолодження 2; 8 - холостий хід колосників

Середня швидкість нагріву колосників в зоні обпалення (при температурі газу-носія 830-1280 °С) в умовах експерименту склала 47 град/хв., а в зоні рекуперації - 107,5 °С/хв. Збільшення швидкості нагріву в зоні рекуперації, незважаючи на відсутність пальників, пояснюється тепловою інерцією шару окатишів. У цій же зоні спостерігається і максимум температур, оскільки при переході від 15 до 16 вакуум-камери потік гарячих газів на колосники від шару окатишів змінюється на потік холодного повітря через колосники в шар. Швидкість охолодження колосників в камері 16 складає приблизно 105 °С/хв. Таким чином, на межі зон рекуперації і охолодження відбувається різка зміна умов роботи колосників. Швидкий нагрів змінюється не менш швидким охолодженням. Подібний режим роботи машини створює умови, при яких можливе протікання структурних перетворень в колоснику (збільшення розміру зерна, перекристалізація аустеніту у ферит та ін.).

При нормальній роботі машини, залежно від стану колосників і іншого устаткування, кількість зупинок може досягати декількох за зміну, що чинить істотний вплив на умови експлуатації колосників. Оскільки при цьому пальники не відключаються, а лише дещо зменшується подача дугтя, колосники, що опинилися в зонах обпалення і рекуперації, витримують тривалішу і інтенсивнішу теплову дію порівняно з беззупинним режимом.

Експерименти по виміру температури колосників при короткочасних зупинках машини проводили за методикою, описаною вище. Зупинки, що імітують заміну візка, здійснювали у момент проходження візків з термопарою в 13 і на стику 15 і 16 камер. Тривалість зупинок була відповідно до 8 і 6 хвилин. Отримані експериментальні дані представлені на рис. 1.4.

З рис. 1.4 витікає, що при зупинці в камері 13 (крива 1), температура за 8 хвилин піднялася з 560 до 930 °С, швидкість нагріву в середньому, склала 46 град/хв. Після початку руху, температура колосників збільшилася до 1005 °С на стику 15 і 16 камер, після чого почала різко падати, що пояснюється

технологічним режимом обпалення окатишів, оскільки 16 вакуум-камера відповідає початку режиму охолодження обпалених окатишів. Швидкість охолодження в 16 камері склала 137 град/хв. При зупинці на стику 15 і 16 камер (рис. 1.4, крива 2) спостерігається менш інтенсивне зростання температури (за 6 хвилин з 810 до 960°C). Швидкість нагріву і наступного охолодження при цьому істотно нижча (25 і 62 град/хв. відповідно).

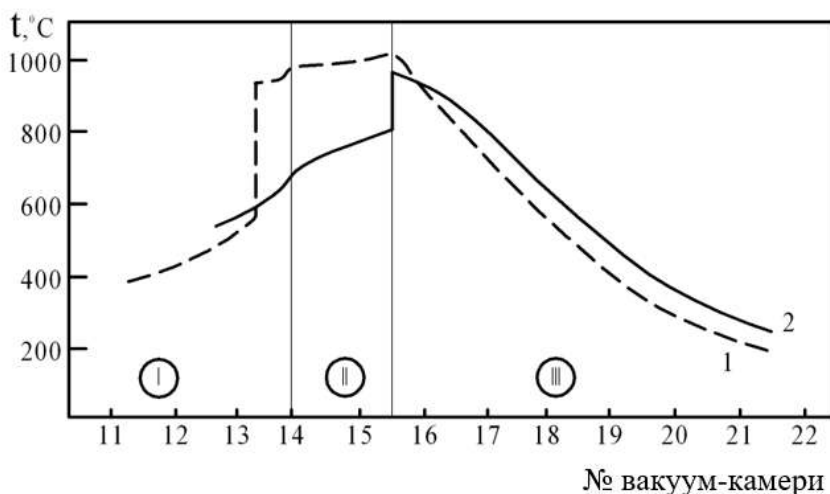


Рис. 1.4. Зміна температури колосників при зупинках машини:

I - зона обпалення; II - зона рекуперації; III - зона охолодження; 1 - зупинка в камері 13; 2 - зупинка на стику 15 і 16 камер

Криві температури колосників 1 і 2 в зоні охолодження мають загасаючий характер (рис. 1.5). При зупинці візка на стику 15 і 16 вакуум-камер, стаціонарні термопари показали підвищення температури в горні на 112°C, що і викликає підвищення температури на колосниках під час зупинки машини.

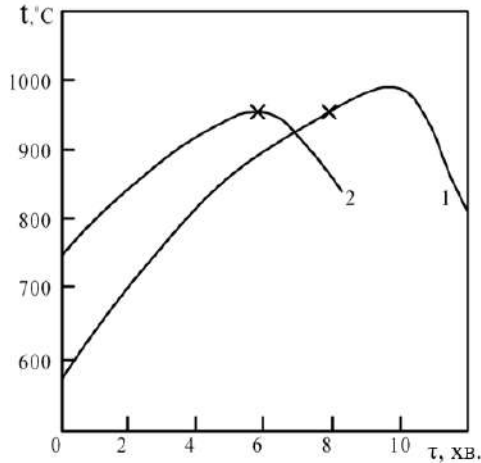


Рис. 1.5. Зміна температури колосників при зупинках машини:

1 - зупинка машини при перебуванні експериментального візка в зоні обпалення (вакуум-камері 13); 2 - зупинка машини при перебуванні експериментального візка в зоні рекуперації (на стику 15 і 16 вакуум-камер); x - момент початку руху візка

Проведені дослідження показали, що при експлуатації обпалювальної машини в нормальному режимі колосники випробовують циклічну теплову дію, що супроводжується різкою зміною температури під час переходу колосників із зони рекуперації в зону охолодження. Максимальна температура на поверхні колосників при цьому не перевищує 900-920°C.

Найбільш несприятливі умови роботи колосників виникають при короткочасних зупинках машини (особливо на візках, що перебувають в зонах обпалення і рекуперації). Тривалість високотемпературної дії на них збільшується і значно зростає максимальна температура колосників в зоні рекуперації, яка досягає 1005°C.

Враховуючи неможливість повного усунення зупинок машини навіть при нормальному стані устаткування, колосники

повинні мати високу жаростійкість короточасних діях температури до 1000°C. Таким чином, забезпечення стабільної роботи устаткування і зменшення кількості зупинок обпалювальної машини на профілактичні огляди і ремонт умовлює підвищення стійкості колосників.

Обпалення окатишів здійснюється спалюванням природного газу, хімічний склад якого такий:

CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	N	CO ₂	O ₂
97,975	0,824	0,276	0,093	0,02	0,006	0,744	0,052	0,01

Колосники найбільш схильні до негативної дії газового середовища у високотемпературних зонах нагріву, обпалення і рекуперації в конвеєрній машині з 10 по 15 вакуум-камер, де температура в горні над шаром окатишів 1000 - 1280°C. Температура в горні і у вакуум-камері (виміри виконані стаціонарними термopарами) показана на рис. 1.6 [25]. Під час зупинки машини на 6 хвилин в зоні рекуперації (15 вакуум-камера) газоаналізатором проведені виміри газів, що відходять.

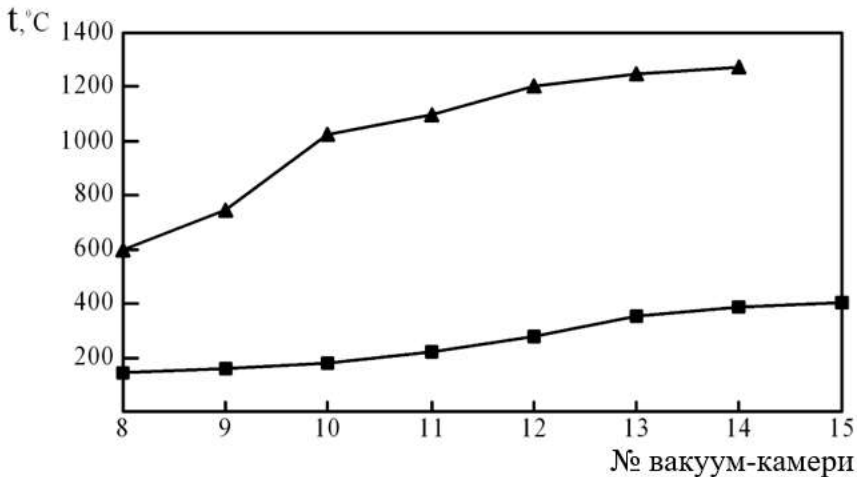


Рис. 1.6. Розподіл температур газової фази в горні і вакуум-камерах по довжині обпалювальної машини Лургі-552:

▲ — температура в горні; ■ — температура в вакуум-камері

Результати наших вимірів складу газів, що відходять, приведені на рис. 1.7 [26].

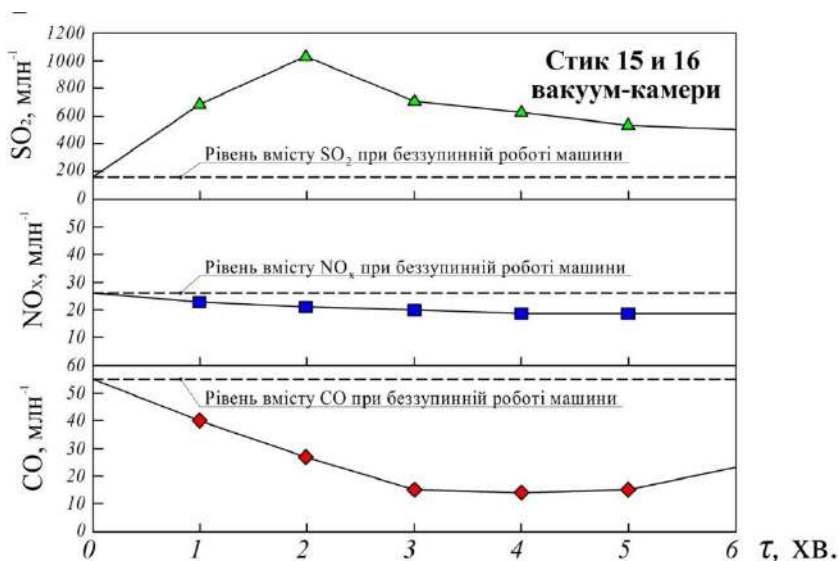


Рис. 1.7. Зміна вмісту CO, NO_x, SO₂ у складі газів, що відходять, при обпаленні окатишів на обпалювальній машині Лургі- 552 під час технологічної зупинки:

—▲— SO₂ —■— NO_x —◆— CO

З приведених на рис. 1.7 даних випливає, що в газах, які відходять, вміст NO_x і CO знижується при зупинці машини, а SO₂ різко зростає, так що на другій хвилині досягає максимального значення; потім концентрація SO₂ починає поступово знижуватися. Оскільки SO₂ у складі природного газу відсутній, наявність SO₂ в газах, що відходять, обумовлена наявністю з'єднань сірки у складі шихтових матеріалів.

Таким чином, аналіз температурно-газових режимів обпалення залізорудних окатишів показує, що колосники обпалювальних конвеєрних машин перебувають у складних

умовах комбінованого впливу високих температур, циклічних теплових навантажень та агресивного газового середовища. Особливо критичними є зони рекуперації та обпалення, де спостерігаються максимальні температури і швидкі перепади теплового потоку, що створюють додаткові термомеханічні напруження та локальні зони окислення колосників.

1.3. Вплив механічних та термомеханічних факторів на експлуатаційну стійкість колосників

Експлуатаційна надійність обпалювальних машин значною мірою залежить від стійкості колосникового полотна до комбінованого впливу. При обпаленні напружений стан колосників обумовлений ударною дією окатишів або часток шихтових матеріалів, а також значними коливаннями температури при протіканні термозміцнюючих процесів [27,28]. Важливо підкреслити, що під час протікання цих процесів суттєво знижуються механічні характеристики матеріалів, зокрема модуль пружності та межа міцності. Як наслідок, в результаті дії технологічного навантаження в умовах високих температур збільшуються пружні та пружнопластичні деформації матеріалу колосника, що безпосередньо сприяє інтенсивному прояву зім'яття і мікрорізання робочих поверхонь деталей.

При цьому, незважаючи на складні умови, глобальні порушення міцності і цілісності колосників зазвичай не настають [27]. Таке положення пояснюється тим, що задовго до фактичного порушення цілісності колосника відбувається інтенсивний термомеханічний знос його торцевих стінок. Це призводить до розширення технологічних проміжків у вантажонесучому полотні та значного збільшення просипу як готової продукції, так і сировинних матеріалів. Таким чином, необхідність у заміні колосників настає значно раніше їх граничного зношування і повного руйнування (рис. 1.8, табл. 1.2), оскільки в цих випадках критично знижується продуктивність

конвеєрної машини через втрату частини сирих і обпалених окатишів.

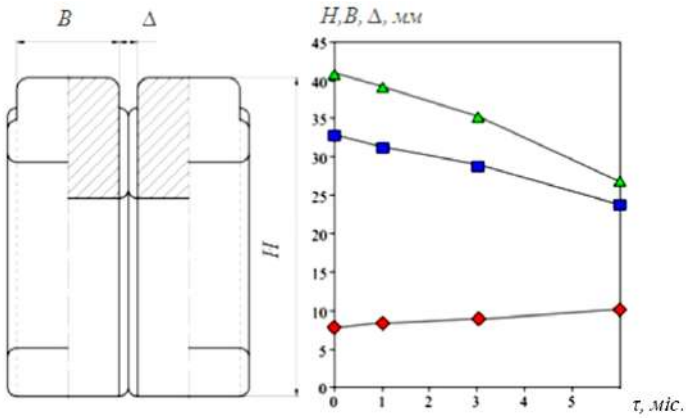


Рис. 1.8. Динаміка зміни розмірів колосника конвеєрної машини Лургі-552 при обпалюванні залізородних окатишів:
 ($t_{\text{обпалення}} = 1280 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_{\text{колосника}} = 900 \dots 920 \text{ } ^\circ\text{C}$):

- ◆— Δ – зміна величини зазору між колосниками,
- B – зміна ширини колосника без технологічних виступів,
- ▲— H – зміна висоти колосника.

Таблиця 1.2

Зміна основних параметрів колосника в процесі обпалення окатишів на машині Лургі-552 [27]

Параметри колосника	Зміна розмірів колосника в процесі його експлуатації, мм			
	новий	1 міс.	3 міс.	6 міс.
Ширина без технологічних виступів (B)	33,0	31,5	29,0	24,0
Висота (H)	41,0	39,2	35,4	27,0
Зазор між суміжними колосниками (Δ)	8,0	8,5	9,0	10,0

Методологічною базою для дослідження впливу термомеханічних факторів стали розрахунки, представлені у

роботі [28], де детально проаналізовано механіку взаємодії елементів полотна з шихтою. Інтеграція механічних параметрів з фактором інтенсивної термічної дії, докорінно змінює динаміку руйнування металу. Це дозволяє більш точно оцінити причини втрати окатишів фракції 10–14 мм, що не лише знижує продуктивність машини, а й провокує вторинний ерозійний знос газоповітряних трактів та систем мультициклонів [28, 29]. На фабриках обпалення окатишів металургійних заводів широко використовується практика заміни суміжних колосників, ширина щілини між якими перевищує $9\div 12$ мм. Таку заміну роблять попри те, що ресурс колосників через граничний знос і, як наслідок, втрати їх міцності далеко не вичерпаний. Як впливає з виробничих даних ПрАТ «ПівнГЗК» [28], при збільшенні ширини щілин (проміжків) до $12\div 14$ мм втрати матеріалу в підпалетний простір зростають більш ніж в 10 разів. При цьому спостерігається характерна закономірність: крупність часток у втратах збільшується від завантажувальної частини машини до розвантажувальної.

Розглянемо характер зношування колосників на машині Лургі-552. Потік дрібних часток, що вивантажуються з вантажонесучого полотна, втрачає суцільність і перестає поводитися як тверде тіло. При цьому міра розпушування потоку зростає, а складові ваги шарів зменшуються, внаслідок чого полотно колосників стає більше схожим на просіювальну поверхню, що призводить до прогресуючого зростання кількості просипу. Характерно, що знос палет в умовах циклічних температурних навантажень відбувається у дві стадії: спочатку як наслідок динамічних ударних навантажень при завантаженні, а згодом – як мікроковзання граничних шарів шихти із зовнішніми шарами колосників [28]. Останній процес особливо інтенсифікується в зонах високих температур через термічне розм'якшення металу та зниження його опору зсуву.

В роботі використана схематизація, в якій робоче середовище представлено у вигляді суцільного ущільненого масиву [29]. Проте такі моделі не враховують ефектів зіткнення

часток матеріалу між собою та безпосередньо часток матеріалу з колосниками. В силу чого ефект взаємодії часток з колосниками суттєво відрізняється від ефектів взаємодії палет з суцільним вантажем. Особливо це критично для зон випалу, де механічне тертя накладається на термічну деградацію поверхневого шару. Тому для наближених розрахунків і оцінки несучої здатності колосникового полотна, а також міри його зносостійкості в умовах термомеханічного впливу, використовуємо загальноприйняту методику [29, 30].

Передбачається, що знос бічних і несучих поверхонь колосників пропорційний силам сухого тертя. Тоді нормальна реакція бічних поверхонь (N_6) визначається як:

$$N_6 = KN_n, \text{ (Н)}, \quad (1.8)$$

де K – коефіцієнт зносу колосників (враховує стан поверхні та її геометрію);

N_n – нормальна реакція поверхні палети на дію шару шихти, що розраховується за формулою:

$$N_n = \rho g h_{\text{ш}}, \text{ (Н/м}^2\text{)}; \quad (1.9)$$

ρ – насипна щільність шару шихти, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

$h_{\text{ш}}$ – висота шару окатишів на палетах, м.

Висота шару $h_{\text{ш}}$ визначається через параметри роботи конвеєрної машини:

$$h_{\text{ш}} = \frac{Q}{3600B_n V_n \rho}, \text{ м}; \quad (1.10)$$

Q – продуктивність машини;

B_n, V_n – ширина (м) і лінійна швидкість (м/с) руху робочого полотна.

Оскільки механічне навантаження відбувається в умовах інтенсивного нагріву, детальний аналіз механічного впливу, проведений у роботі [28] доцільно доповнити температурним фактором, що дозволило проаналізувати динаміку руйнування матеріалу в умовах їхнього синергетичного впливу. Зі зростанням температури до 900 °С опір матеріалу мікрорізанню та деформації знижується, реальна величина зносу (Z_T) є функцією термомеханічного стану:

$$Z_T = K_T \cdot A_T \quad (1.11)$$

де A_T – робота механічних сил;

K_T – температурний коефіцієнт зносостійкості сталі.

Формування висоти шару $h_{ш}$ на палетах обпалювальних машин суттєво залежить від обраного способу завантаження, що визначає початковий імпульс ударної дії окатишів на гарячі колосники. На рис. 1.9 показані існуючі способи завантаження конвеєрних машин, а також зони інтенсивної силової та термомеханічної взаємодії шихти з елементами палет.

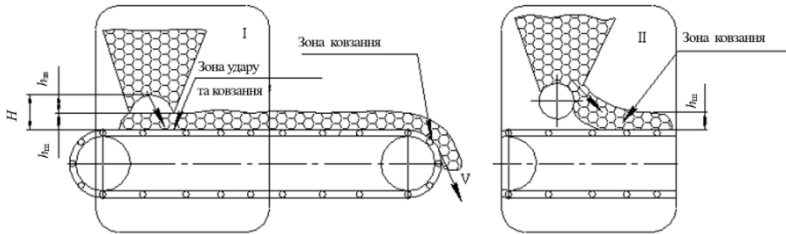


Рис. 1.9. Способи завантаження конвеєрних машин та зони силової взаємодії шихти з палетами

При прямому завантаженні машини з бункера можливі два варіанти взаємодії шихти з палетами, які суттєво відрізняються за характером силового впливу на термічно навантажені колосники:

1. Якщо $D_r \geq 5d_{сер}$, то характер витікання шихти гідравлічний. У цьому випадку знос палет відбувається переважно за рахунок сил сухого тертя [3]:

$$Z = K_{\text{тер}} \cdot f \cdot N_n \cdot V_{\text{ков}} \cdot t_{\text{ков}} \quad (1.12)$$

де D_r – гідравлічний діаметр отвору бункера, м;

$d_{\text{сер}}$ – середній діаметр часток шихти, м;

f – коефіцієнт тертя шихти об поверхню палети;

$V_{\text{ков}}$ – швидкість витікання шихти, м/с.

При високих температурах коефіцієнт f може змінюватися внаслідок адгезійних процесів між окатишем та окисленою поверхнею металу.

2. Якщо $D_r < 5d_{\text{сер}}$, то витікання шихти стає пульсуючим, з частотою, що дорівнює частоті руйнування зводу витрати. На палету діє ударний імпульс $S = m_p \cdot V_{\text{зіт}}$, де m_p – порція матеріалу, що втратила контакт з основним масивом. Зауважимо, що пульсуючий режим не є оптимальним, оскільки циклічні ударні навантаження на розігріті колосники прискорюють їх втомне руйнування та деформацію.

І. Для гідравлічного режиму завантаження питома робота сил тертя ($A_{\text{тер}}$) дорівнює:

$$A_{\text{тер}} = F_T \cdot V_{\text{ков}} \cdot t_{\text{ков}} \cdot \delta_t \quad (1.13)$$

де F_T – сила тертя;

$V_{\text{ков}}$ – швидкість ковзання матеріалу по палеті;

$t_{\text{ков}}$ – час ковзання;

δ_t – доля часу ковзання за період оберту машини $T_{\text{об}}$. Для машини Лургі-552: $V_p = 0,05$ м/с; $T_{\text{об}} \approx 6000$ с; для АК-62,5: $V_p = 0,1$ м/с; $T_{\text{об}} \approx 2000$ с.

Величина зносу при роботі сил тертя, згідно з [28], визначається як:

$$Z_T = K_T \cdot A_{\text{тер}} \quad (1.14)$$

де K_T – розрахунковий коефіцієнт зносостійкості сталі, що враховує термомеханічний вплив [27,28]:

$$K_T = K_N \left(\frac{T^0}{293} \right)^n \quad (1.15)$$

тут K_N – базова зносостійкість при 20 °С;

T^0 – температура процесу (К);

n – поправочний коефіцієнт, що відображає інтенсивність зниження механічних властивостей при нагріві (табл. 1.3).

Таблиця 1.3

Експериментальні значення коефіцієнта зносостійкості сталі (за даними [2,3])

Марка сталі	Поправочний коефіцієнт, n	Коефіцієнт зносостійкості сталі, $K_N, \text{м}^3/\text{Дж}$
75X28H2СЛ	1,23	$1,28 \cdot 10^{-11}$
40X24H12СЛ	1,21	$1,22 \cdot 10^{-11}$
30X14Г8Ю2Л	1,18	$1,12 \cdot 10^{-11}$

II. Для пульсуючого подання матеріалу інтенсивний знос палети відбувається, якщо енергія зіткнення перевищує критичну величину. Робота сил зіткнення ($A_{\text{тy}}$) пропорційна частині енергії, що витрачається на руйнування поверхні [28]:

$$A_{\text{тy}} = K_a \cdot S_0 \cdot H \frac{2V_{\text{зіт}}^2 - V_{\text{кр}}^2}{\omega 2\pi\tau}, \text{ Дж/м}^2, \quad (1.16)$$

де K_a – коефіцієнт абразивності (для сирих окатишів $K_a = 0,6$; для обпалених $K_a = 0,8$);

S_0 – площа основи вивантажувального отвору, м^2 ;

H – висота скидання матеріалу на палети конвеєрної машини, м;

ω – кутова частота обертання барабана конвеєрної машини, $1/\text{с}$;

τ – поточний час, с;

$V_{\text{зіт}}$ – швидкість зіткнення;

$V_{\text{кр}}$ – критична швидкість, при якій знос мінімальний.

Критичну швидкість визначаємо на основі теорії Герца [28], враховуючи, що модулі пружності є функціями температури:

$$V_{\text{кр}} = \frac{\pi \cdot \sigma_{\text{макс}}^{2,5}}{2\sqrt{10} \rho_M^{1/2}} \left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2(T)} \right) \text{ м/с} \quad (1.17)$$

Знос поверхні від ударної взаємодії (Z_y):

$$Z_y = K_y A_{\text{гy}} \quad (1.18)$$

де K_y – коефіцієнт зносу від удару. За даними експерименту [28], для сталі 30X14Г8Ю2Л K_y становить $(0,28 \div 0,5) \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{Дж}$, що нижче, ніж для широко використовуваної сталі 40X24Н12СЛ.

У металургійному переділі особлива роль відводиться якості окатишів, що досягається під час зміцнюючого обпалення при температурах близько 1300 °С. Технологічна роль колосникового полотна (грат) полягає не лише у транспортуванні, а й у видаленні дріб'язку (некондиція < 10 мм). Проте досвід ПрАТ «ПівніЗК» (ФОК-3) після модернізації 2009 року свідчить, що знос торцевих граней колосників залишається критичним фактором [28,29].

Навіть при збереженні високої несучої здатності через значний поперечний переріз, знос торцевих стінок призводить до просипу кондиційного класу (10÷14 мм). Це змушує проводити вибраковування деталей при високій залишковій міцності, що збільшує витрати дорогої жароміцної сталі. З метою мінімізації цього ефекту необхідно розглянути механіку взаємодії одиничного окатиша з колосником у динаміці завантаження (рис. 1.10), враховуючи, що механічне мікрорізання відбувається на фоні термічного розм'якшення металу.

Якщо виходити з конструкції завантажувального бункера, то потік однорідних часток витікає з розвантажувальної воронки під середнім кутом розвантаження приблизно 81÷85°, з висоти близько 100 мм. Подібне витікання матеріалу можна охарактеризувати як комбіновану ударну і різальну дію потоку окатишів на полотно.

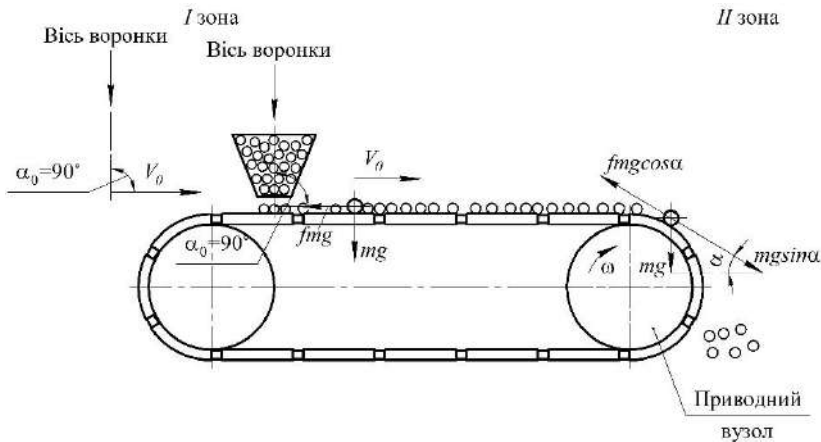


Рис. 1.10. Схема взаємодії окатишів з колосниковим полотном при вивантаженні з бункера [28]

Практично вертикальне падіння потоку дискретних часток на полотно, що переміщається в горизонтальному напрямі, призводить до первинного прослизання гранул по колосниках і мікрорізання їх робочої поверхні. Процес мікрорізання колосника завершиться тоді, коли поступальна швидкість окатиша зрівняється з лінійною швидкістю вантажонесучого полотна. Таким чином, переміщення гранул по полотну супроводжується безперервним мікроковзанням окатишів у зоні їх вивантаження на транспортер (зона контакту).

Слід зауважити, що в даній зоні деформаційна складова у момент падіння окатишів буде менш виражена внаслідок високих міцнісних та жаростійких властивостей матеріалів колосника. Проте, при досягненні робочих температур (900 °С і вище) опір мікрорізання суттєво знижується, що робить цей механізм визначальним у загальній деградації поверхні.

Несталий потік матеріалу з горизонтальним його зміщенням призводить до ерозійного зносу за рахунок мікрорізання, що узгоджується з позицією І. К. Лебедева та ін. [29]. Разом з тим, існує й інша наукова точка зору, згідно з якою знос у зоні взаємодії вертикального потоку часток з

горизонтальним полотном є результатом багатоциклової втоми (позиція Е. Ф. Непомнящего та ін. [30]). Важливо підкреслити, що в умовах термоциклічного навантаження втома матеріалу настає значно швидше через накладання термічних напружень на механічні.

Процес взаємодії окремих твердих часток, що падають на вантажонесуче полотно, коректно відносити до ерозійного виду зношування. Сферична частка, падаючи на основу, впроваджується на певну глибину і створює деформаційну борозну (пляму), яка подовжується за рахунок мікрорізання. Отже, простежується процес із одночасним проявом як деформаційної, так і ріжучої компоненти. Аналогічні види зношування спостерігаються на лопатках газових турбін та роторах димососів, де також присутній високотемпературний фактор.

Ранні теоретичні моделі ерозії будувалися на припущенні виключно про різальну дію часток (роботи І. К. Лебедева, В. М. Братчикова, І. Фінна). Ці моделі вказують на пропорційність зносу квадрату швидкості часток та куту атаки α_0 . Подальші дослідження встановили, що в більшості випадків знос пропорційний швидкості в ступені m ($m = 2,05 \div 2,44$, іноді до 6,5). Експерименти І. Р. Клейса показали, що параметр m є постійним лише для вузьких діапазонів швидкостей [29]. Недоліком цих теорій є невизначеність зносу при кутах атаки $\alpha_0 = 0$ та $\alpha_0 = \pi/2$, що суперечить експериментальним даним.

Більш досконалі результати отримані Бітгером [29], який розглядав ерозію як сукупність деформаційного руйнування та мікрорізання. Ця концепція враховує здатність матеріалу накопичувати внутрішню енергію до певної граничної щільності, після якої настає руйнування. Нільсон і Гілхард запропонували спрощений варіант формул Біттера, які для умов роботи колосників набувають наступного вигляду:

$$I_{ep} = \frac{M}{2\psi} (V_0^2 \cos^2 \alpha_0 - V_{et}^2) + \frac{M}{2\varepsilon} (V_0^2 \sin^2 \alpha_0) \text{ якщо } \alpha_0 > \alpha_p, \quad (1.19)$$

$$I_{ep} = \frac{M}{2\psi} (V_0^2 - V_{et}^2), \text{ якщо } \alpha_0 \leq \alpha_p, \quad (1.20)$$

де I_{ep} – інтенсивність ерозійного зношування (відношення зношеної маси колосників до маси окатишів);

ϵ , ψ – граничні енергії, необхідні для руйнування при деформаційному зношенні та мікрорізанні відповідно;

V_{et} – максимальна вертикальна компонента швидкості, при якій матеріал деформується пружно;

V_0 – швидкість часток окатишів при зіткненні;

α_p – мінімальний кут атаки потоку, при якому $V_p = 0$.

Важливо відмітити, що у роботі [28] ці параметри розглянуті для нормальних умов. Однак, при нагріванні колосників енергії руйнування ϵ та ψ не залишаються константами. Термічне розм'якшення призводить до значного зниження енергії ϵ (мікрорізання), що пояснює стрімке зростання інтенсивності зносу торцевих граней колосників саме в зонах високих температур обпалювальної машини.

На залежність зносу від кута атаки α_0 істотний вплив роблять властивості матеріалу, які в умовах обпалювальної машини є динамічними. Як випливає з досліджень [30], для пластичних матеріалів деформаційна складова зазвичай мала, а максимальний знос спостерігається в області малих кутів атаки. Для крихких матеріалів максимум зносу припадає на кут $\alpha_0 = 90^\circ$. Слід враховувати, що при нагріванні до 900°C навіть жаростійкі сталі колосників набувають більшої пластичності, що змінює характер їх ерозійного руйнування.

Розглянемо фізичні особливості взаємодії потоку окатишів з вантажонесучим полотном. В процесі руху по тракту подання швидкість потоку часток складає V_0 ($2,5 \div 3,5$ м/с). При поданні матеріалу на пластинчатий транспортер вектор V_0 спрямований переважно вертикально ($V_{0y} \approx V_0$), тоді як горизонтальна складова $V_{0x} \approx 0$. Після контакту окатиша з полотном має відбутися вирівнювання його лінійної швидкості до швидкості руху машини

$V_p(V_x=V_p)$, що необхідно для забезпечення безперервності потоку.

Цей процес описується рівнянням $V_p=a \cdot t$, де a – прискорення окатиша, а t – час вирівнювання швидкостей. Протягом часу t відбувається інтенсивне мікроковзання окатиша по колоснику, що супроводжується мікрорізанням полотна. За цей період центр окатиша проходить шлях $L = \frac{at^2}{2}$. Хоча мікроковзання і мікрорізання – процеси взаємопов'язані, для експлуатації машин критичним є саме знос полотна. Переважаючим проявом деградації колосників у цьому випадку є мікрорізання, тоді як деформаційний та втомний знос виражені слабше через високу частоту контактів та специфіку термічного розм'якшення поверхні.

Внаслідок незначної шорсткості та порівняно низької міцності окатишів порівняно з металом, така взаємодія нагадує процес «пришліфовування» колосників. Аналізуючи формули (1.19) і (1.20), а також враховуючи, що енергія деформаційного руйнування ψ значно перевищує енергію мікрорізання ϵ ($\psi \gg \epsilon$), можна стверджувати, що вклад другої компоненти (ріжучої) є визначальним. При існуючій конструкції завантажувальних пристроїв кут атаки близький до 90° , що призводить до максимальної інтенсивності зношування.

Для мінімізації термомеханічного зносу необхідно, щоб горизонтальна складова швидкості потоку V_{0x} дорівнювала швидкості полотна V_p ($V_0 \cos \alpha_0 = V_p$). Однак реалізувати таку рівність конструктивно складно, оскільки V_p дуже мала ($0,05 \div 0,1$ м/с). Аналіз виразів (1.19) і (1.20) показує, що при кутах атаки α_0 у діапазоні $80 \div 90^\circ$ знос істотно збільшується. Отже, при проектуванні вузлів завантаження вибір кута $\alpha_0 \approx 90^\circ$ є технічно невиправданим, оскільки він провокує максимальний знос як робочих поверхонь, так і торців колосників. Більш прийнятні значення кута атаки лежать в інтервалі $35 \div 45^\circ$, де енергія удару перерозподіляється більш сприятливо.

При аналізі умов пружного зіткнення сферичного окатиша з колосником (напівпростором) виходимо з того, що в місці контакту утворюється майданчик радіусом a [31]:

$$a = 0,81 \sqrt[3]{P \frac{1-\mu^2}{E} R} \quad (1.21)$$

де P – статичне зусилля; μ , E – відповідно коефіцієнт Пуассона та модуль пружності матеріалу колосника; R – радіус окатиша. Важливо врахувати, що при робочих температурах модуль пружності E сталі 30X14Г8Ю2Л або 40X24Н12СЛ знижується, що призводить до збільшення радіуса контакту a та глибини впровадження абразиву.

Максимальний контактний тиск у центрі майданчика становить:

$$q_{\max} = 1,5 \cdot q_{\text{ср}} \quad (1.22)$$

де $q_{\text{ср}} = \frac{P}{\pi a^2}$. Контактне зближення (деформація) згідно з [31] дорівнює:

$$\delta = 0,82 \sqrt[3]{\frac{P^2}{R} \left(\frac{1-\mu^2}{E} \right)^2} \quad (1.23)$$

Розподіл тиску по майданчику має еліптичний характер:

$$q = q_{\max} \sqrt[3]{1 - \frac{r^2}{a^2}} \quad (1.24)$$

Розглядаючи динаміку пружного удару за теорією Герца [31], маємо залежність зусилля від зближення:

$$P = c \cdot \delta^{3/2} \quad (1.25)$$

де $c = \sqrt{\frac{2E\sqrt{R}}{3(1-\mu^2)}}$. Для окатиша масою m , що падає на полотно,

диференціальне рівняння руху має вигляд:

$$m \frac{d^2 \delta}{dt^2} = -P \quad (1.26)$$

Підставляючи вираз для зусилля (1.25), отримуємо:

$$m \frac{d^2 \delta}{dt^2} = c \cdot \delta^{3/2} \quad (1.27)$$

При початкових умовах $t=0, \delta=0, \frac{d^2 \delta}{dt^2} = V_{\text{зіт}}$ (де $V_{\text{зіт}}$ – швидкість перед ударом), після інтегрування [31] максимальна сила удару P_{max} складе:

$$P_{\text{max}} = 0,784 \ c^{2/5} \ m^{3/5} \ V_{\text{зіт}}^{6/5} \quad (1.28)$$

Максимальний тиск у центрі контакту при ударі:

$$q_{\text{max}} = 0,422 \left(\frac{E}{1-\mu^2} \right)^{4/5} \left(\frac{mV_{\text{зіт}}^2}{R^3} \right)^{1/5} \quad (1.29)$$

Оскільки при нагріванні колосника значення E падає, максимальний тиск q_{max} дещо знижується за рахунок збільшення площі контакту, проте це супроводжується глибшими пластичними деформаціями та інтенсифікацією мікрорізання, що і визначає сумарний термомеханічний знос.

Використовуючи отриманий вираз (1.29), визначимо контактний тиск в області майданчика взаємодії. Для забезпечення цілісності продукції контактний тиск не повинен перевищувати межу міцності окатиша:

$$q_{\text{max}} \leq [\sigma_{\text{ок}}]. \quad (1.30)$$

Якщо нерівність (1.30) не виконується, це свідчить про те, що швидкість потоку окатишів $V_{\text{зіт}}$ є завищеною і має бути скоригована (зменшена) шляхом зміни геометрії завантажувального пристрою.

Як впливає з теорії контактної взаємодії [31], на межі зони контакту окатиша з напівпростором (поверхнею колосника) виникає головна нормальна напруга σ_r , яка набуває свого максимуму при $r = a$:

$$\sigma_{r(max)} = \frac{1-2\mu^2}{3} q_{max} \quad (1.31)$$

Вважатимемо, що окатиші зруйнуються, якщо значення максимального тиску q_{max} на майданчику контакту перевищить межу міцності матеріалу окатиша σ_{max} . Тоді умова руйнування (1.30) набуває вигляду:

$$0,422 \left(\frac{E}{1-\mu^2} \right)^{4/5} \left(\frac{mV_{зйт}^2}{R^3} \right)^{1/5} \geq \sigma_{max} \quad (1.32)$$

Вирішивши нерівність (30) відносно $V_{зйт}$, отримаємо критичну швидкість руйнування окатиша:

$$V_{руйн} = \frac{12,7\sigma_{max}^{2,5}R^{1,5}}{m^{0,5}} \left(\frac{1-\mu^2}{E} \right)^2 \quad (1.33)$$

де $V_{руйн}$ – швидкість руху окатишів, при якій відбудеться їх механічне руйнування у разі зіткнення з колосником.

Для оцінки довговічності самого полотна необхідно визначити швидкість руху окатишів, за якої деформації колосника залишатимуться в межах пружності. Використовуючи уявлення про середній тиск на майданчику контакту [31], маємо:

$$q_{cp} \leq p_{пл} \quad (1.34)$$

Записавши цю умову через кінетичні параметри окатиша, що рухається:

$$0,28 \left(\frac{E}{1-\mu^2} \right)^{4/5} \left(\frac{mV_{зйт}^2}{R^3} \right)^{1/5} \leq p_{пл} \quad (1.35)$$

Максимальну головну напругу σ_{max} можна визначити з виразу:

$$\sigma_{max} = \frac{3\pi(3+2\mu)}{8} q_{cp} \quad (1.36)$$

Прирівнюючи $\geq \sigma_{max}$ до межі пропорційності матеріалу колосника $\sigma_{пр}$ та виражаючи швидкість через параметри сфери (окатиша), отримуємо критичну швидкість пружної деформації колосника V_{et} :

$$V_{et} = \frac{\pi \sigma_{max}^{2,5}}{2 \cdot 10^{10} \rho_M^{0,5}} \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2(T)} \right)^2 \quad (1.37)$$

де $\sigma_{пр}$ – межа пропорційності матеріалу колосника, яка суттєво зменшується при робочих температурах обпалювальної машини.

З метою модифікації формул Біттера-Нільсона для реальних умов експлуатації, представимо функцію V_{at} як горизонтальну компоненту швидкості окатиша після зіткнення. Початкова горизонтальна компонента до зіткнення складає $V_0 \cos \alpha_0$. У момент контакту на окатиш діє додаткова сила опору, що викликає зміну швидкості на величину ΔV , тоді V_{at} набуде вигляду:

$$V_{at} = V_0 \cos \alpha_0 - \Delta V, \quad (1.38)$$

Якщо $\alpha_0 > \alpha_p$, то $\Delta V = \frac{f}{m} \int P(t) dt$, де f – коефіцієнт тертя. Враховуючи енергетичний підхід Біттера та поправки Нільсона і Гілхриста, формули для визначення ерозійного зносу колосників при термомеханічному впливі набувають остаточного вигляду:

якщо $\alpha_0 > \alpha_p$:

$$I_{cp} = \frac{M \left[V_0^2 \cos^2 \alpha_0 - (V_0^2 \cos \alpha_0 - \Delta V)^2 \right]}{2\psi} + \frac{M (V_0 \sin \alpha_0 - V_{et})^2}{2\varepsilon} \quad (1.39)$$

якщо $\alpha_0 \leq \alpha_p$:

$$I_{ep} = \frac{M(V_0^2 - V_{et}^2)}{2\psi} \quad (1.40)$$

Запропонована математична модель (1.39, 1.40) дозволяє прогнозувати інтенсивність зношування колосників не лише залежно від кута атаки та швидкості завантаження, а й з урахуванням термічної деградації енергій руйнування ψ (Т) та ϵ (Т). Це створює наукове підґрунтя для оптимізації конструкції вузлів завантаження та вибору зносостійких жаростійких сталей, що здатні зберігати високі значення граничних енергій руйнування в умовах високотемпературного обпалювання.

Для виконання практичних розрахунків за визначенням міри зношування колосників під впливом окатишів (твердих сферичних часток) відповідно до виведених моделей (1.39,1.40), необхідно встановити граничні значення енергій руйнування одиниці маси – як при деформаційному зносі (ψ), так і при зносі мікрорізанням (ϵ). Ці дані можуть бути розраховані на базі результатів двох типів промислових експериментів:

1. Визначення зносу при прямоточному витіканні матеріалу з воронки (кут атаки $\alpha_0 \approx 90^\circ$).
2. Визначення зносу при розвантаженні бункера через барабанний живильник (кут α_0 суттєво менший за 90°).

За результатами цих експериментів складається система двох алгебраїчних рівнянь відносно невідомих енергій ψ та (виходячи з формул 1.39, 1.40). При цьому для обох випадків попередньо визначаються швидкості $V_{руйн}$ (1.33) та V_{et} (1.37). Отримані величини енергій використовуються для прогнозування ресурсу колосників при різних параметрах завантажувального потоку.

При прямому завантаженні окатишів на вантажонесуче полотно машини Лургі-552, а також при роботі барабанного живильника на машині АК-62,5, чітко розрізняють зони рівномірного переміщення матеріалу та зони прослизання (рис. 1.10). Аналіз характеру виходу деталей з ладу показує, що хоча

теоретично можливий деформаційний втомний знос через акумуляцію енергії в товщі металу, на практиці такі дефекти (втомні тріщини) не є визначальними. Колосники підлягають заміні переважно через збільшення проміжків між торцевими стінками та зростання просипу кондиційного матеріалу.

Отже, деформаційний знос тіла колосника не є домінуючим фактором. Згідно з теорією Біттера [29], ключовим чинником ерозії тут виступає мікрорізання. Воно спостерігається саме на ділянках мікроковзання – там, де лінійна швидкість потоку окатишів не збігається зі швидкістю руху стрічки.

Розглянемо процеси в зоні вивантаження окатишів на полотно. Виділимо з потоку окремий окатиш. У момент контакту його горизонтальна швидкість $V_x \approx 0$, тоді як полотно рухається зі сталою швидкістю V_p . За рахунок сил тертя полотно прагне прискорити окатиш до V_p . У цьому нестационарному режимі рух окатиша описується диференціальним рівнянням:

$$m \frac{dV_x}{dt} = F_{тер}, \quad (1.41)$$

або, враховуючи силу тертя:

$$m \frac{dV_x}{dt} = f \cdot m \cdot g \quad (1.42)$$

Інтегруючи рівняння (1.42) в межах часу від 0 до $t_{ков}$ та швидкості від 0 до V_p , отримаємо:

$$t_{ков} = \frac{V_p}{f \cdot g}, \quad (1.43)$$

де $t_{ков}$ – час ковзання окатиша по колоснику до моменту вирівнювання швидкостей. Шлях ковзання (активна зона мікрорізання) становить:

$$L_{\text{ков}} = \frac{f \cdot g \cdot t_{\text{ков}}^2}{2}, \quad (1.44)$$

Також важливим є аналіз зони вивантаження промпродукту (барабан розвантаження). На кожен окатиш тут діє сила тертя $F_{\text{тер}}$ та зіштовхуюча сила F_z .

– Якщо $F_{\text{тер}} > F_z$, окатиш утримується на похилій площині палети.

– Якщо $F_{\text{тер}} < F_z$, матеріал вільно ковзає по полотну.

Зі збільшенням кута нахилу палети β на барабані нормальна сила, що притискає окатиш, зменшується, а отже, сила тертя та інтенсивність мікрорізання в цій зоні значно нижчі, ніж у зоні завантаження.

Таким чином, найбільший інтенсивний механічний знос колосників реалізується в зоні завантаження матеріалу на вантажонесуче полотно, де поєднуються максимальний ударний імпульс та тривале мікроковзання часток у процесі вирівнювання швидкостей. У цій зоні визначальними є ударно-абразивні механізми руйнування робочих і торцевих поверхонь колосників. Водночас у зонах термічної обробки матеріалу, де колосники працюють за підвищених температур, механічний вплив реалізується на фоні знижених міцнісних характеристик матеріалу, що зумовлює розвиток термомеханічного зносу. Сукупна дія механічних навантажень і температурних факторів визначає сумарний ресурс колосникового полотна. Оптимізація кута атаки та мінімізація шляху ковзання $L_{\text{ков}}$ у зоні завантаження, а також підвищення термостійкості матеріалу колосників у зонах нагріву є ключовими напрямками підвищення їх експлуатаційної стійкості.

РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКЦІЯ ТА МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА КОЛОСНИКІВ

Фундаментом ефективного функціонування сучасних агломераційних та обпалювальних машин конвеєрного типу є стан їх вантажонесучого полотна. Така машина являє собою замкнений ланцюг спікальних візків-палет, що безперервно переміщуються по рейкових коліях технологічними зонами агрегату. Формування робочого простору для спікання агломерату або термічного зміцнення окатишів забезпечується шляхом монтажу на сталевій рамі кожної палети декількох рядів колосників, які в сукупності утворюють рухому колосникову решітку.

Аналіз світового досвіду експлуатації машин для агломерації та обпалювання [32] дозволяє класифікувати колосникові поля за способом виготовлення на зварні, суцільнолиті та набірні. Вибір конкретного типу конструкції є критичним фактором, оскільки передчасний вихід з ладу елементів решітки призводить до неконтрольованого просипу матеріалу. Це не лише знижує вихід придатного продукту, але й створює ризики аварійних зупинок і серйозних поломок вузлів приводу та газоходів машини.

Зварні колосникові поля, що складаються з жорстко з'єднаних пластин, а також суцільнолиті конструкції, на сьогодні вважаються економічно малоефективними для масового виробництва металургійної сировини. Головним недоліком таких систем є низька ремонтпридатність: локальне пошкодження або термічна деформація окремих сегментів вимагає повної заміни всього полотна. Це неминуче спричиняє тривалі простої обладнання, збільшує металоємність ремонтних робіт та, як наслідок, суттєво підвищує собівартість агломерату та окатишів.

На противагу цьому, найбільш раціональним з інженерної та економічної точок зору є застосування набірних колосникових полів. Така конструкція базується на встановленні окремих взаємозамінних колосників на несучі балки решітки палет. Це

забезпечує можливість оперативної селективної заміни виключно зношених або деформованих елементів без демонтажу всього вузла. Такий підхід мінімізує експлуатаційні витрати та оптимізує металовитрати на підтримку робочого стану агломераційних та обпалювальних машин.

Еволюція технічних рішень у напрямку підвищення ресурсу вантажонесучого полотна призвела до появи значної кількості конструктивних варіацій окремих елементів. Ефективність кожної з них визначається специфікою термічних та механічних навантажень, що притаманні конкретному типу агрегату.

2.1. Аналіз конструктивних рішень колосників агломераційних та обпалювальних машин

Розвиток конструкцій колосників відбувався шляхом пошуку балансу між двома протилежними чинниками: забезпеченням максимального «живого перетину» для проходження газів та збереженням механічної міцності при високих термічних навантаженнях. Аналіз існуючих рішень дозволяє виділити декілька ключових напрямків модернізації.

1. Оптимізація геометрії робочої частини для підвищення газопроникності.

Одним із базових підходів є зміна профілю середньої частини колосника. Характерним прикладом є конструкція, наведена на рис. 2.1 [33], де робоча частина має трапецеїдальну форму з чітко визначеним співвідношенням радіусів кривизни.

Експериментально встановлено, що дотримання відношення зовнішнього радіуса до внутрішнього в межах 1,08–1,22 при товщині перетину 20–60 мм дозволяє не лише стабілізувати шар шихти, а й мінімізувати термічні напруження, що виникають при циклічному нагріві.

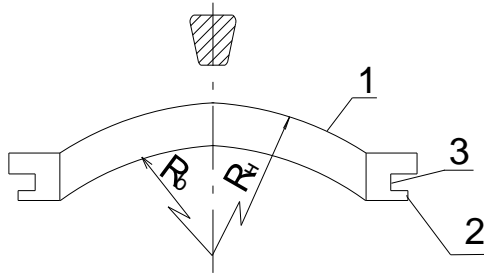


Рис. 2.1. Конструкція колосника з трапецеїдальною формою робочої частини:

1 – робоча частина; 2 – головка колосника; 3 – зів для кріплення колосника; R_B – радіус постійної кривизни; R_H – радіус змінної кривизни

2. Конструкції з посиленими вузлами фіксації та самоочищення.

Наступним етапом еволюції стали колосники з модернізованими головками та опорними елементами. У конструкції на рис. 2.2 [34] головна увага приділена зіву для кріплення.

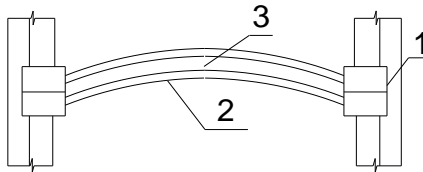


Рис. 2.2. Колосник, з посиленими вузлами фіксації:

1 – бічні опори; 2 – подовжні ребра; 3 – зазор

Наявність виступів на торцях головки (рис. 2.3) [35] виконує подвійну функцію:

- забезпечує стабільний технологічний зазор між суміжними деталями;
- створює ефект самоочищення колосникового поля під час вібраційного впливу при русі палет.

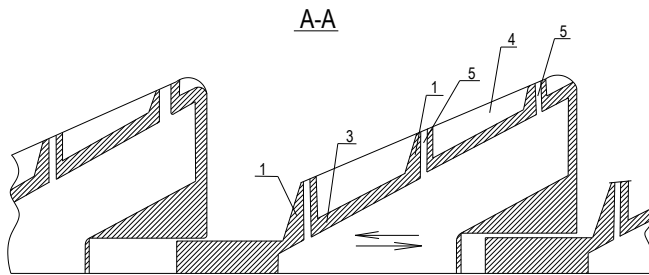
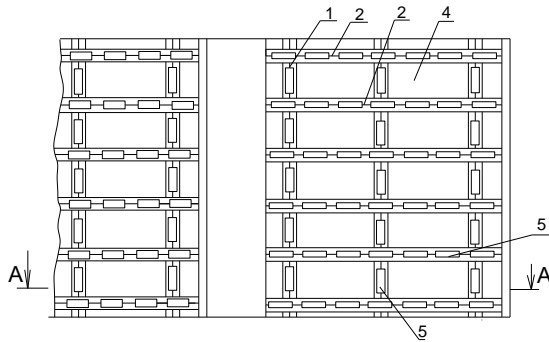
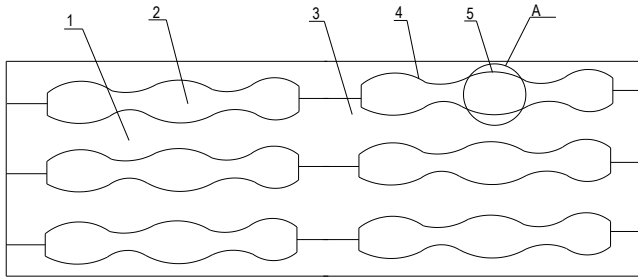


Рис. 2.3. Колосникові ґрати, зібрані з плитчастих колосників:

- 1 – система поперечних ребер; 2 – система подовжніх ребер;
3 – робоча поверхня; 4 – відсіки; 5 – щілиновидні отвори

3. Спеціалізовані рішення для зон інтенсивного термомеханічного зносу.

Для машин, що працюють в умовах підвищеного абразивного впливу, було розроблено колосники з потовщеними приливами у верхній частині (рис. 2.4) [36]. Така конфігурація дозволяє компенсувати втрату металу внаслідок мікрорізання торцевих стінок, про яке йшлося в розділі 1 (п.1.3), тим самим подовжуючи міжремонтний період експлуатації машини.



A

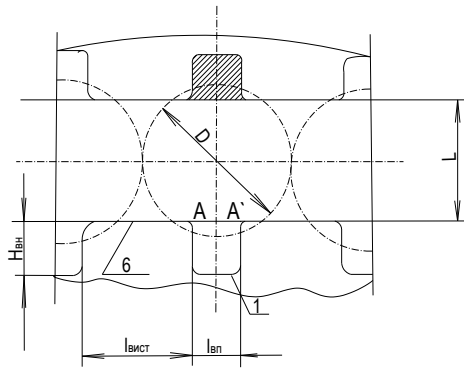


Рис. 2.4. Колосникові ґрати і ділянка корпусу колосника з детальним потоншенням западин і виступів:

- 1 – колосник обпалювального візка; 2 – зазор;
- 3 – дистанційні бобишки; 4 – бічні поверхні; 5 – корпус колосника; 6 – виступи; 7 – западини; L – ширина існуючого зазора між колосниками; $H_{\text{вист}}$ – висота виступів на бічних поверхнях; $I_{\text{вист}}$ – ширина виступів; $I_{\text{зап}}$ – ширина западин

4. Профілювання поперечного перерізу для інтенсифікації тепловідводу від робочої зони

Однією з основних причин втрати роботоздатності колосників є їх обгорання, що призводить до неконтрольованої зміни форми та розмірів деталей. Для вирішення цієї проблеми

було запропоновано конструкцію, що базується на раціональному перерозподілі маси металу по перетину колосника (рис. 1.5–1.8) [37].

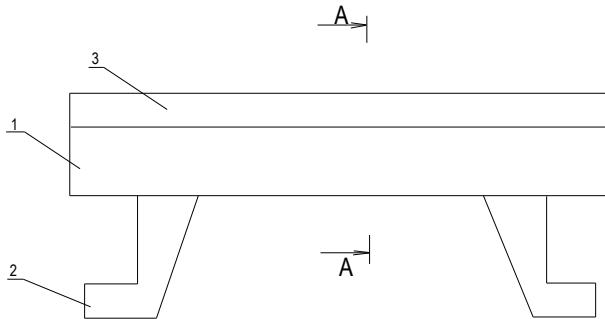


Рис. 2.5. Загальний вигляд колосника з посиленою основою (вигляд збоку):

1 – верхній опорний рожок; 2 – нижній опорний рожок (елементи замкового кріплення); 3 – основне робоче тіло.

Загальна компоновка виробу (рис. 2.5) передбачає наявність верхніх (1) та нижніх (2) опорних рожків, які забезпечують стабільну фіксацію основного тіла (3) на пальцевих балках спікального візка. Проте ключова науково-технічна новизна даної розробки зосереджена у специфічній формі робочої частини колосника (рис. 2.6). На відміну від традиційних конструкцій, тут застосовано вогнутий профіль бокових стінок (5) та суттєве розширення основи (6) основного тіла.

Фізична сутність запропонованого профілювання полягає у створенні ефекту «теплового насоса». Масивна нижня частина (4) виконує функцію акумулятора тепла (холодильника), куди за рахунок високої теплопровідності матеріалу відводиться надлишкове теплове навантаження від робочої головки (2), що безпосередньо контактує з розпеченим шаром агломерату. Така інтенсифікація внутрішнього теплообміну дозволяє стабілізувати температуру робочої поверхні нижче критичних значень газової корозії.

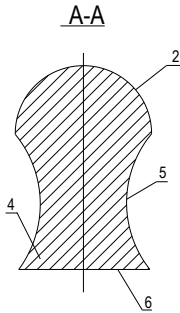


Рис. 2.6. Поперечний розріз колосника з інтенсифікованим тепловідводом:

- 2 – робоча головка (напівсферична);
- 4 – масивна нижня частина (тепловий акумулятор);
- 5 – вогнуті бокові стінки;
- 6 – розширена основа

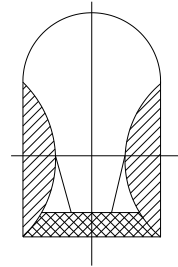


Рис. 2.7. Графічна схема перерозподілу маси металу по перетину

Механізм формування такої структури базується на принципі раціонального перерозподілу металу, що наочно ілюструє схема порівняння з базовим колосником (рис. 2.7). Шляхом перенесення об'ємів маси (M_1 , M_2) з бокових граней у нижню частину (M_4) досягається приріст масивності теплопровідного вузла без збільшення загальної металоемності виробу (2.8).

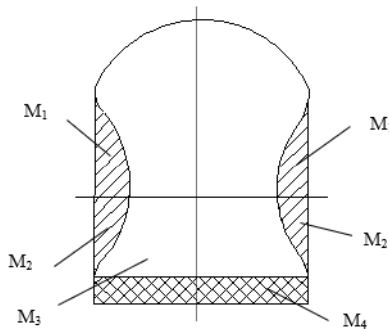


Рис. 2.8. Розрахункова модель визначення геометричних параметрів колосника

Теоретичне обґрунтування параметрів моделі (рис. 2.8) дозволило встановити математичну залежність між геометричними характеристиками перерізу. Експериментально доведено, що оптимальне відношення мінімальної ширини колосника до його ширини в місці спряження має знаходитися в межах 0,33–0,75, а збільшення абсолютної ширини основи до 40–60 мм забезпечує найбільш сприятливий градієнт температур. Впровадження даного профілю дозволяє знизити інтенсивність обгорання деталей та підвищити їхній експлуатаційний ресурс у 1,5–1,7 раза порівняно з серійними зразками.

5. Лабіринтні та криволінійні форми торцевих поверхонь.

Одним із найбільш ефективних методів підвищення ККД агломераційних процесів є застосування колосників із нелінійною геометрією торцевих поверхонь, що дозволяє мінімізувати паразитні підсоси повітря. Характерним прикладом реалізації принципу взаємопов'язаних профілів є конструкція, представлена на рис. 2.9 та 2.10 [38].

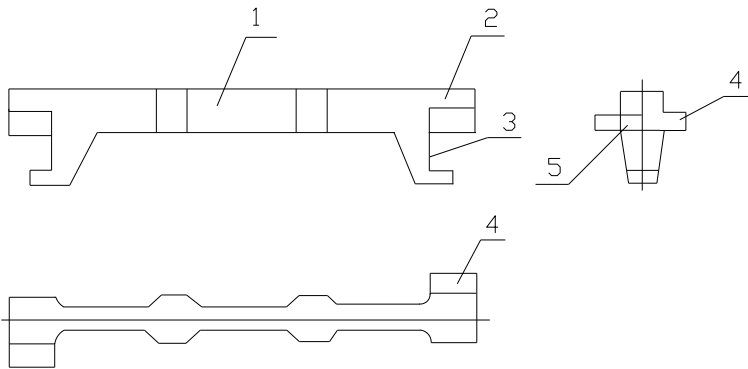


Рис. 2.9. Колосник криволінійною формою торцевих поверхонь (три проекції):

1 – робоча частина; 2 – головка; 3 – зів; 4 – виступ; 5 – паз.

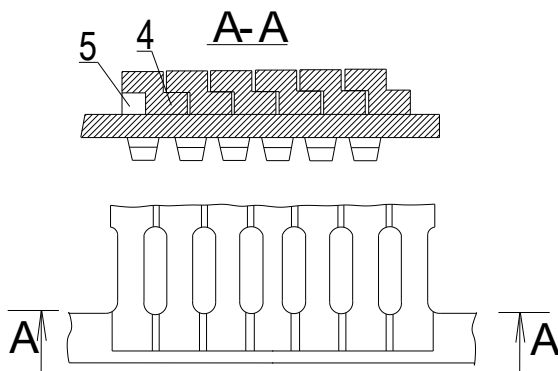


Рис. 2.10. Частина колосникових ґрат з розрізом по А-А:
4 – виступ; 5 – паз

Колосник складається з робочої частини (1) та головки (2) із зівом (3) для встановлення на балку. Ключовою особливістю рішення є те, що опорна частина головки виконана зі спеціальним виступом (4) та пазом (5). Геометричні параметри цих елементів чітко регламентовані: їхня довжина становить 0,5–1,0, а ширина та висота – 0,3–0,6 від відповідних розмірів опорної частини головки.

Така конфігурація реалізує концепцію лабіринтного ущільнення та механічної взаємоблокації. При складанні колосникової решітки виступ (4) одного колосника входить у паз (5) суміжного (рис. 2.10). Це виконує дві критичні функції:

- аеродинамічна стабілізація: викривлення лінії стику створює додатковий опір для потоків газу в місцях контакту. Це перешкоджає прориву теплоносія повз шар шихти, спрямовуючи його безпосередньо в зону реакції;

- запобігання аварійним ситуаціям: наявність системи «виступ-паз» запобігає випаданню частин колосника у разі його випадкової поломки під час експлуатації. Сусідні деталі утримують пошкоджений фрагмент у решітці, запобігаючи його потраплянню в тягодуттєві механізми.

Таким чином, впровадження лабіринтних форм дозволяє одночасно підвищити газодинамічну ефективність агрегату та експлуатаційну надійність решітчастого полотна в умовах інтенсивного термічного зносу.

6. Конструкційні заходи щодо підвищення надійності фіксації та запобігання вібраційному зносу

Важливою науково-технічною проблемою при експлуатації набірних колосникових полів є самовільне переміщення деталей вздовж несучих балок палет під дією знакозмінних термічних навантажень та вібрацій. Для нівелювання цього явища та стабілізації газодинамічного опору шару розроблено систему кріплення зі зміщеними дистанційними елементами (рис. 2.11, 2.12) [39].

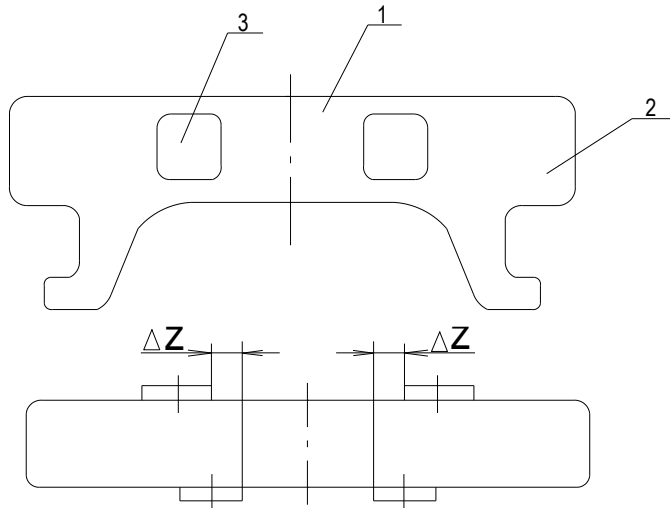


Рис. 2.11. Колосник зі зміщеними дистанційними планками:

1 – основне тіло колосника; 2 – опорні різок; 3 – дистанційна планка

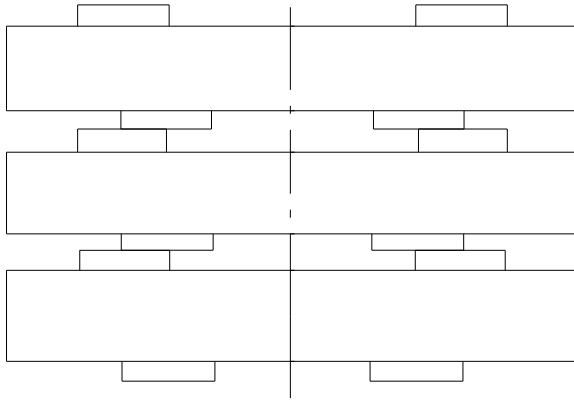


Рис. 2.12. Колосникове поле з колосників зі зміщеними дистанційними планками

Конструкція колосника (рис. 2.11) включає основне тіло (1) та опорні рожки (2), що утворюють посилений зів для охоплення балки палети. Ключовою особливістю є наявність дистанційних планок (3), які розташовані на бокових поверхнях основного тіла зі зміщенням відносно вертикальної осі симетрії. Така конфігурація дозволяє при наборі колосників у касету створювати жорстке зчеплення між суміжними деталями.

Як видно з рис. 2.12, при формуванні колосникового поля дистанційні планки одного колосника впираються у планки або тіло сусіднього, що гарантує збереження заданого технологічного зазору ΔZ по всій площі палети. Це не лише стабілізує положення кожної окремої деталі, а й суттєво знижує контактні напруження в зоні підвісу, запобігаючи передчасному руйнуванню голівок колосників внаслідок втомних тріщин та вібраційного стирання. Впровадження зміщених планок дозволяє створити самоцентровану систему, яка зберігає свою геометрію навіть при значних термічних деформаціях несучих металоконструкцій.

Окрему увагу заслуговує конструкція, зображена на рис. 2.13 [40]. Тут реалізовано принцип «динамічного зазору». Спеціальні виступи на бокових гранях головки не лише дистанціюють колосники один від одного, а й утворюють канали змінного перерізу. Така геометрія сприяє:

- турбулізації газового потоку: що покращує теплообмін між газом і робочою поверхнею колосника;

- механічному самоочищенню: під час розвантаження палет на барабані, за рахунок мінімального люфту в кріпленні, відбувається взаємне мікрозміщення колосників, що призводить до руйнування та видалення дрібних фракцій просипу, які застрягли в зазорах.

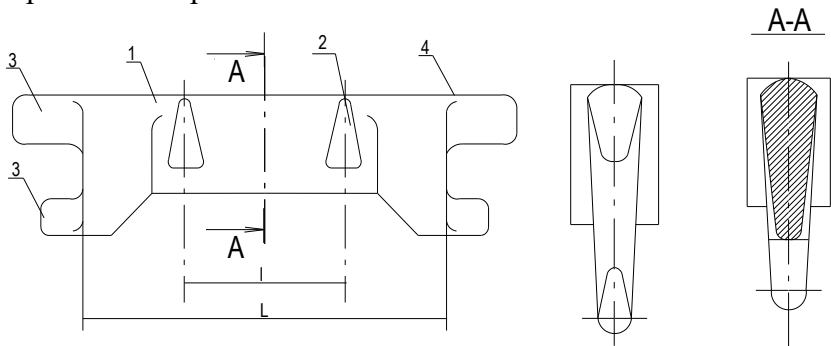


Рис. 2.13. Конструкція колосника з трикутним перетином:
 1 – тіло колосника; 2 – контактні поверхні; 3 – замкові частини; 4 – робоча поверхня колосника

7. Досвід зарубіжного проектування та вітчизняні промислові стандарти

Аналіз світової практики підтверджує, що вибір конструкції колосника тісно пов'язаний зі специфікою сировинної бази та потужністю агрегатів.

На обпалювальних машинах у Польщі (рис. 2.14) [41] перевага надається масивним конструкціям з посиленою нижньою частиною, що забезпечує високу жорсткість при значній товщині шару окатишів.

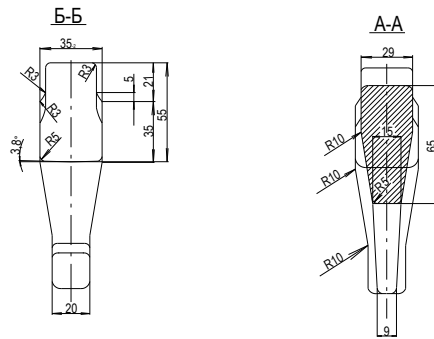
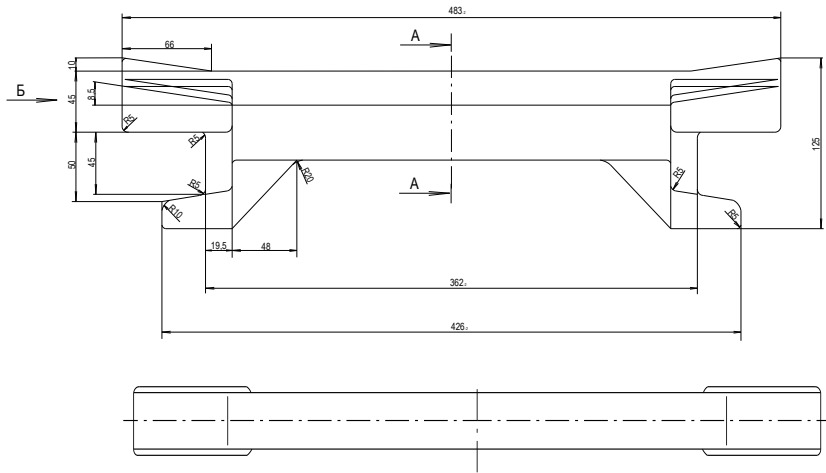


Рис.2.14. Конструкція колосника, що застосовується на обпалювальних машинах у Польщі

Німецька школа проектування (рис. 2.15) [41] орієнтована на «прямі» колосники з максимально чистими лініями профілю, що полегшує їх виготовлення методом точного лиття та забезпечує мінімальний опір повітрю.

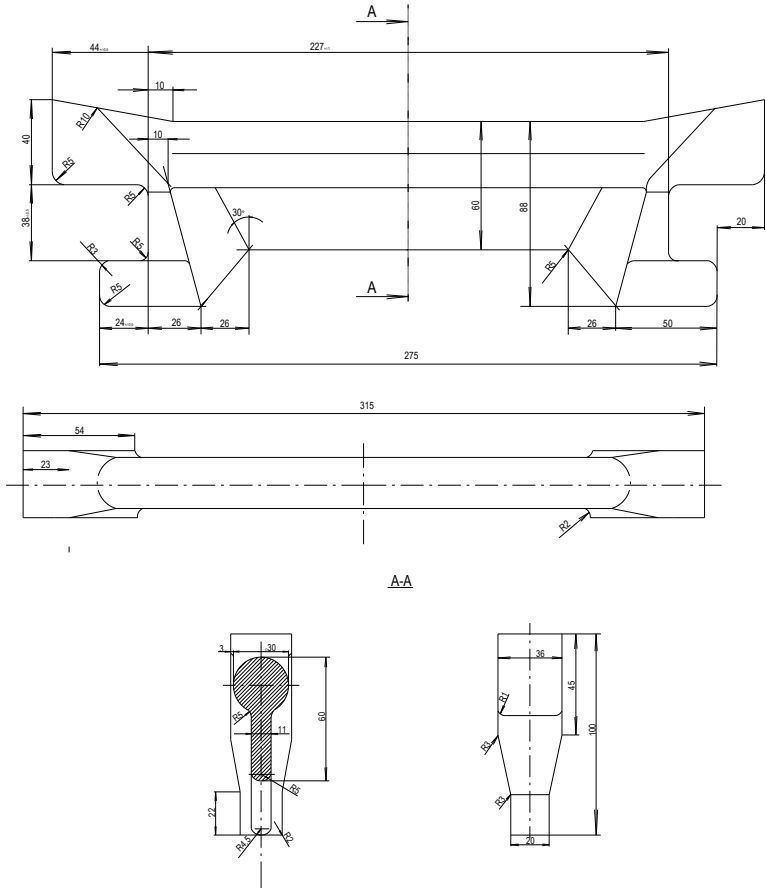


Рис. 2.15. Конструкція колосника, що встановлюється на обпалювальних машинах в Німеччині

Конструкції, що застосовуються в Македонії (рис. 2.17) [41], вирізняються специфічною формою головки, оптимізованою для швидкої заміни в умовах коротких технологічних зупинок.

Важливим прикладом функціональної модернізації є конструкція, наведена на рис. 2.17 [42].

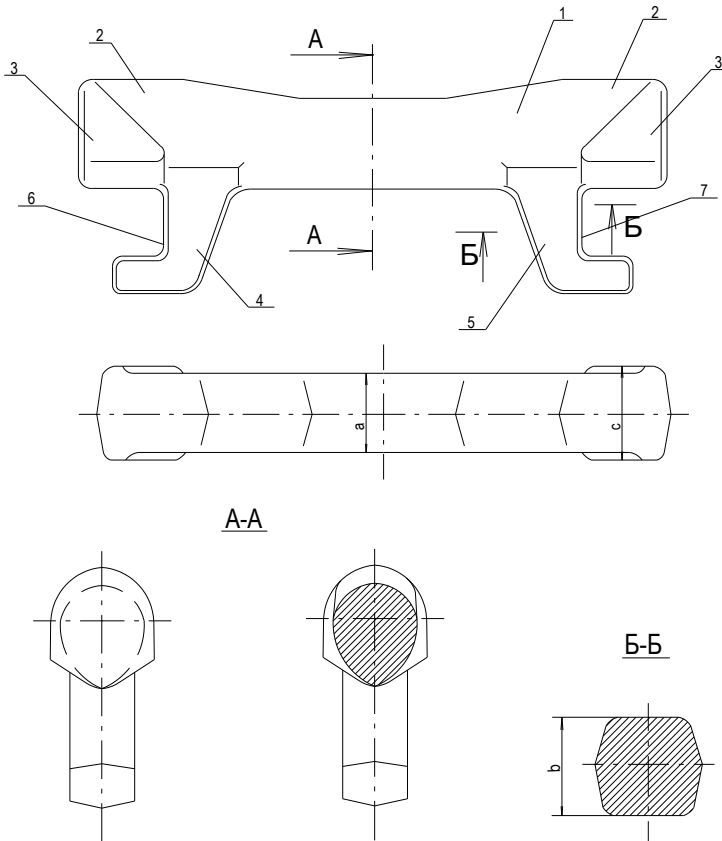


Рис. 2.17. Колосник агломераційної машини на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»:

1 – робоча частина колосника; 2 – бічна поверхня головок;
3 – прямолінійні приливи; 4, 5 – замки; 6, 7 – зиви

Архітектура цього колосника розроблена з урахуванням необхідності мінімізації негативних наслідків термічного розширення та абразивного зносу:

- посилений профіль головки: У порівнянні з базовими моделями, ця конструкція має збільшений радіус переходу від

робочої частини до зони підвісу, що суттєво знижує концентрацію напружень;

- система динамічних приливів: Розташування дистанційних елементів на бокових гранях спроектовано таким чином, щоб створювати ефект «самоочищення». Під час проходження палети через розвантажувальну зірочку, коли відбувається природне вібраційне зміщення колосників, ці приливи діють як механічні деструктори для коренів просипу, що застрягли у щілинах;

- геометрія торців: Оптимізована форма бокових стінок дозволяє зберігати стабільний «живий перетин» навіть при частковому термічному жолобленні деталі.

Основним промисловим стандартом, що пройшов багаторічну апробацію на машинах типу «Лугрі», залишається прямий колосник (рис. 2.18) [43].

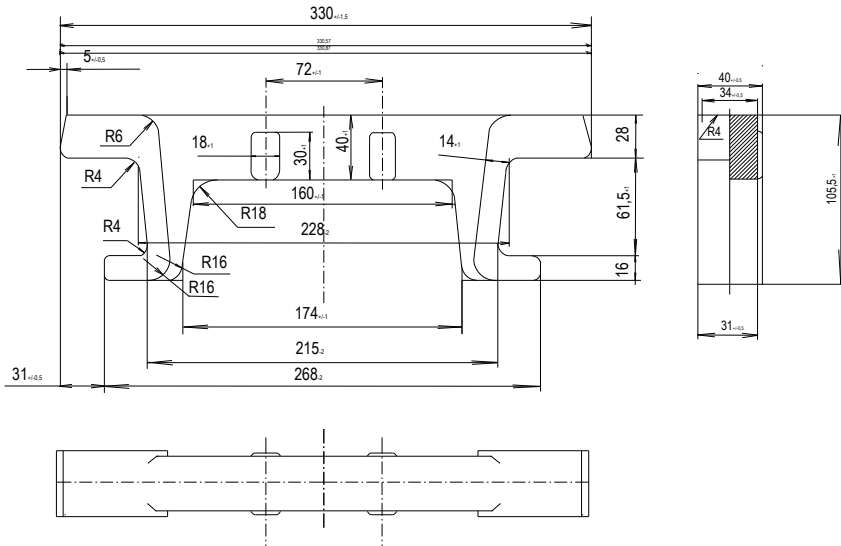


Рис.2.18. Конструкція прямого колосника

Конструктивна лаконічність цього колосника забезпечує:

- рівномірність температурного поля: Відсутність складних виступів у нижній частині мінімізує опір повітрю, що проходить

крізь шар, забезпечуючи однакову якість випалу як у центрі, так і біля бортів палети.

- ремонтпридатність: Проста форма дозволяє проводити швидко візуальну дефектовку та заміну пошкоджених елементів під час короткочасних зупинок машини, що критично важливо для підтримки високого коефіцієнта використання обладнання.

Проведений комплексний аналіз існуючих конструктивних схем колосників агломераційних та обпалювальних машин дозволяє зробити наступні узагальнення:

Сучасна еволюція форм колосників спрямована на вирішення триєдиної задачі: максимізація газопроникності, мінімізація просипу та забезпечення механічної стабільності при температурах понад 1000 °С.

Використання складних геометричних форм (S-подібні, хвилеподібні профілі, рис. 2.4, 2.9) є найбільш ефективним методом боротьби з паразитними потоками газу та просипом фракцій шихти, проте вимагає вищої точності при виготовленні та монтажі.

Вітчизняний досвід експлуатації підтверджує раціональність використання прямих або модернізованих за допомогою дистанційних приливів колосників (рис. 2.17, 2.18), які поєднують у собі технологічність обслуговування та високу функціональну надійність.

Встановлено, що конструктивні особливості головки та зівів кріплення (рис. 2.11–2.13) відіграють вирішальну роль у запобіганні втомним руйнуванням та неконтрольованому зміщенню деталей вздовж балок палет.

2.2. Характеристика сплавів для виготовлення колосників

Екстремальні умови експлуатації колосників агломераційних та обпалювальних машин обумовлюють необхідність застосування спеціальних високолегованих сталей.

Деталі тривалий час перебувають у складнонапруженому стані під впливом знакозмінних температурних полів та агресивного газового середовища. Основним чинником незворотного руйнування металу є газова корозія, інтенсивність якої різко зростає за наявності поверхневих дефектів (мікротріщин, раковин, несучільностей), що стають вогнищами локального окислення та концентраторами напружень.

Для забезпечення тривалої експлуатації матеріал повинен мати комплекс специфічних властивостей [44]:

- жаростійкість (окаліностійкість): здатність протистояти хімічному руйнуванню поверхні під дією газів;
- жароміцність: здатність зберігати механічну жорсткість та чинити опір повзучості (пластичній деформації під власною вагою та вагою шару окатишів) при високих температурах;
- термічна втомлюваність: стійкість до утворення тріщин при багаторазових змінах температури («нагрів-охолодження»);
- зносостійкість: опір мікрорізанню та зім'яттю, механізми яких детально розглянуті у розділі 1 (п. 1.3).

Залежно від технологічного призначення та температурного режиму агрегатів, колосники виготовляють із жаростійких чавунів або спеціалізованих сталей марок 75X28H2CJ, 40X24H12CJ, 100X25TJ та 24X12H2CJ [45]. Експлуатаційні характеристики цих сплавів визначаються системою легування, де ключову роль відіграють хром, кремній, нікель та титан. Вирішальне значення для стабілізації робочих параметрів деталей має характер взаємодії цих компонентів із навколишнім середовищем та їх вплив на фазовий склад металу.

Зокрема, хром (Cr) виступає як фундаментальний елемент жаростійкості, чия захисна дія базується на формуванні на поверхні металу щільних та тугоплавких оксидів типу Cr_2O_3 або складних сполук шпінельного типу. Згідно з дослідженнями, викладеними у праці Л. Коломб'є та Й. Гохмана [44], при концентрації хрому понад 12–15% спостерігається перший поріг стійкості, що характеризується різким зниженням швидкості корозії внаслідок утворення суцільного захисного шару. При

подальшому підвищенні вмісту хрому до 25–28% (що характерно для сталі марок 75X28H2СЛ та 100X25ТЛ) сплав набуває здатності ефективно протистояти газовій корозії при екстремальних температурах до 1100°C.

Важливу роль у забезпеченні експлуатаційної надійності відіграє нікель (Ni), який підвищує термодинамічну стабільність сплаву в окислювальних середовищах. На відміну від дефектної структури вюститу (FeO), оксид нікелю (NiO) характеризується мінімальною кількістю вакансій у кристалічній решітці, що стає фізичним бар'єром для дифузії іонів металу крізь плівку. Однак слід враховувати, що при температурах понад 1000 °C нікель схильний до значних втрат маси (до 25%), а його позитивний вплив на жаростійкість стає визначальним лише за високих концентрацій, що перевищують 25%.

Для оптимізації вартості сплавів без втрати їх захисних властивостей використовують кремній (Si). Його введення у кількості 2–3% істотно підвищує опір окисленню в сухих газових середовищах за рахунок утворення силікатів із низькою дифузійною проникністю. Це дозволяє частково компенсувати дефіцит нікелю, зберігаючи при цьому цілісність поверхневого шару.

У межах класичної металургійної системи структурної стабілізації завершальним елементом традиційно виступає титан (Ti), проте його застосування є вибіркоким. Попри те, що його присутність може дещо знижувати загальний інтегральний показник жаростійкості, введення титану в межах 0,2–0,3% вважається необхідним переважно для високовуглецевих сталей (наприклад, марки 100X25ТЛ). Завдяки формуванню стабільних та важкорозчинних карбідів (TiC), він стримує ріст зерна в процесі тривалого нагрівання, запобігаючи термічному окрихченню металу.

Проте реальний досвід промислового виробництва найбільш поширених серійних марок, таких як 40X24H12СЛ та 75X28H2СЛ, свідчить про інший підхід. У цих сплавах функцію основного структурного стабілізатора та підсилювача

жаростійкості виконує кремній (Si), а не титан. Саме кремній у поєднанні з високою концентрацією хрому забезпечує формування вторинних захисних бар'єрів під оксидною плівкою, що робить ці сталі найбільш технологічними та економічно виправданими для масового виготовлення колосників.

Разом з тим, сучасна наукова думка не обмежується цією базовою системою. Окрім традиційного легування кремнієм чи титаном, існують роботи [46-49], що обґрунтовують перехід до використання більш складних модифікаторів (рідкісноземельних металів, алюмінію тощо) для забезпечення надвисокої жаростійкості у критичних температурних зонах.

Хімічний склад та граничні температурні режими експлуатації базових сплавів наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Хімічний склад та температурна межа застосування сталей для колосників [45]

Марка сплаву	C, %	Mn, %	Cr, %	Ni, %	Si, %	Ti, %	S, % ≤	P, % ≤	t, °C
40X24H12СЛ	≤0,4	0,3-0,8	22-26	11-13	0,5-1,5	-	0,03	0,035	<1100
75X28H2СЛ	0,4-0,8	0,5-1,0	26-30	2-3	1,0-2,0	-	0,04	0,040	<1000
100X25ТЛ	0,6-0,9	0,4-0,8	24-26	-	0,4-0,8	0,2-0,3	0,03	0,035	<1100
20X24H12	≤0,2	-	24-26	12-15	0,8-1,0	-	0,03	0,035	900-1000

Незважаючи на високий рівень легування, у процесі експлуатації відбуваються незворотні зміни структури металу, що погіршують його властивості:

- карбідоутворення: при тривалому перебуванні в зоні температур 600–800 °С відбувається виділення карбідів хрому по межах зерен. Це призводить до «збіднення» прикордонних зон хромом і робить їх вразливими до міжкристалітної корозії.

- δ-фаза (сигма-фаза): тривалий нагрів спричиняє виділення крихкої сигма-фази (інтерметалід Fe-Cr). Це призводить до критичного окрихчення колосника у холодному стані, внаслідок чого руйнування деталей часто відбувається саме під час завантаження холодної шихти після планової зупинки машини.

У закордонній інженерній практиці (Німеччина, Польща) часто використовують альтернативні сплави з підвищеним вмістом нікелю (до 20–35%) або додаванням рідкоземельних елементів (церій, ітрій) для посилення адгезії оксидної плівки. Це здорожує виробництво, але дозволяє збільшити ресурс колосників на 15–20% у порівнянні зі сталями типу 40X24H12СЛ. Враховуючи дефіцит нікелю в Україні, актуальним завданням є розробка нових марок сталей, у яких цей елемент частково або повністю замінюється кремнієм, марганцем, алюмінієм чи титаном [50].

Виплавка сталей марок 75X28H2СЛ, 100X25ТЛ, 24X12H2СЛ та 40X24H12СЛ здійснюється переважно в дугових сталеплавильних печах (ДСП-3А, ДСП-6H2) з основним футеруванням [51]. Вибір основного процесу обумовлений високою хімічною активністю хрому, який при взаємодії з кислим футеруванням інтенсивно руйнує його. Питомі витрати матеріалів на виробництво однієї тонни рідкої сталі наведені у таблиці 2.2 [52].

Таким чином, вибір системи легування сталей (хром-нікель-кремній) є ключовим фактором жаростійкості, проте економічні чинники вимагають оптимізації хімічного складу в напрямку імпортозаміщення дефіцитного нікелю.

Таблиця 2.2

**Питомі витрати шихтових матеріалів для
виробництва сталей, кг/т**

Найменування	100X25ТЛ	40X24Н12СЛ	75X28Н2СЛ
Задано металошихти, загалом:	1450,0	1350,0	1456,0
- чавун переробний	63,0	-	-
- лом сталевий (обрізь)	767,0	441,0	24,0
- лом оборотний низьколегований	-	100,0	80,0
- лом оборотний хромонікелевий	-	250,0	1030,0
- ферохром ФХ 010-025	560,0	408,0	202,0
- нікель Н-1	-	127,0	3,0
- феросиліцій ФС65-6	7,0	20,0	20,0
Відходи та втрати:			
- чад і безповоротні втрати	130,0	100,0	100,0
- брак	15,0	6,0	6,0
Додаткові матеріали:			
- плавиковий шпат ФК-75	13,0	13,0	14,0
- вапняк	9,0	9,0	9,0

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА КОЛОСНИКІВ

Експлуатаційна надійність колосників обпалювальних та агломераційних машин є комплексною функцією, що залежить не лише від раціональності конструктивних рішень та хімічного складу вибраних сталей, а й значною мірою від досконалості технології їх виготовлення. Якість литої поверхні, мікроструктурна однорідність та відсутність внутрішніх несучільностей безпосередньо визначають інтенсивність перебігу процесів газової корозії та термічної втоми.

Як було показано в попередніх розділах, агресивне середовище та циклічні навантаження миттєво активують деструктивні процеси в зонах ливарних дефектів (раковин, пригару, мікротріщин). Відтак, мінімізація реакційної площі контакту металу з газами шляхом покращення чистоти поверхні та щільності вилівка є ключовим резервом підвищення ресурсу деталей.

Сучасна практика виробництва колосників на потужних металургійних та машинобудівних підприємствах України базується як на традиційних методах лиття, так і на впровадженні прогресивних спеціальних способів отримання заготовок.

3.1. Технологія отримання колосників в разові піщані форми

Традиційна технологія отримання колосників у разові піщані форми реалізується на потужностях ТОВ «Ливарно-механічний завод» (ТОВ «ЛМЗ»), який було створено на базі ремонтних та фасоносталеливарних цехів ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» як окрему виробничу структуру. За даної технології точність відливок зазвичай варіюється в межах класів 7 – 11 – 2 [53].

Геометрична симетрія колосника по осі дозволяє проектувати ливарну форму з розташуванням моделей по площині роз'єму. Таке рішення забезпечує спокійне (ламінальне)

заповнення порожнини розплавом, що мінімізує турбулентні завихрення та виключає динамічні удари металу об стінки форми. Це сприяє дотриманню заданої швидкості підйому рівня металу, послідовному видаленню газоповітряної суміші та забезпечує направлене твердіння виливка [53].

Для інтенсифікації виходу газів, що утворюються в об'ємі форми під час заливання, застосовується метод штучного наколювання каналів [53]. Креслення «Колосник» з нанесенням технологічних вказівок наведено на рисунку 3.1

Якість майбутнього виливка безпосередньо залежить від фізико-хімічних властивостей формувальної суміші. У фасоносталеливарному цеху використовується суміш типу МФ («міцна») наступної рецептури [54]:

1. Кварцовий пісок (пісний, Часів-Ярське родовище) – 42–44 % (300 кг);
2. Оборотна суміш – 56–58 % (400 кг);
3. Вогнетривка глина – 2,7–2,9 % (20 кг);
4. Вода – 35–38 л.

Підготовка компонентів проводиться у чашечних змішувачах з котками. Тривалість перемішування становить 2–3 хвилини, що дозволяє досягти наступних нормативних показників: газопроникність понад 90 од.; вологість у межах 4,0–4,5 %; міцність у вологому стані – 0,40–0,45 кГс/см².

Процес реалізації технологічного циклу у фасоносталеливарному цеху ТОВ «ЛМЗ» базується на використанні парних металевих опок розміром 1060×710×120 мм та різних дерев'яних моделей. Для забезпечення високої металомісткості форми та інтенсифікації виробничого процесу в одній опоці раціонально розташовується дванадцять модельних відбитків.

Основним обладнанням для формування «по-сирому» на підприємстві є струшувальні формувальні машини з перекидним столом моделі 233М. Вибір даного типу машин обумовлений їхньою надійністю при роботі з середніми за розміром опоками та здатністю забезпечувати стабільну щільність набивання. Технічні характеристики машини 233М представлені у таблиці 3.1.

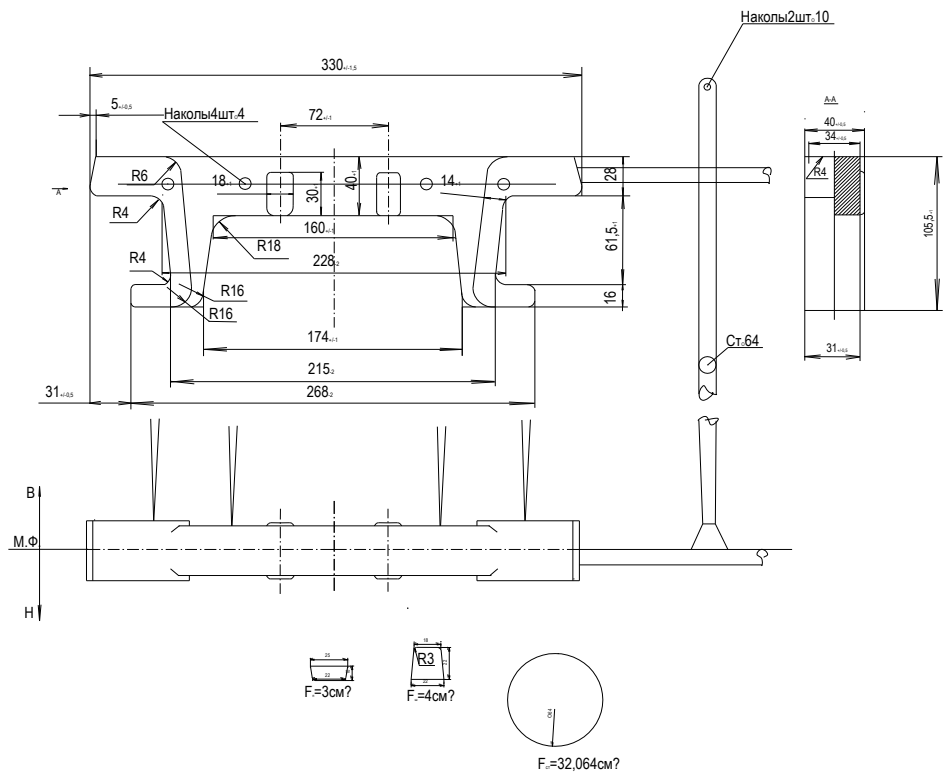


Рис. 3.1. Відливок «колосник» з нанесенням технологічних вказівок

Таблиця 3.1

**Технічна характеристика формувальної
машини моделі 233М**

№ п/п	Найменування	Числова величина
1	Розміри опок в світлі: довжина Ширина	1080мм 800мм
2	Найбільша висота опоки	400мм
3	Тривалість циклу	не більше 80с
4	Вантажопідйомність	не менше 1,32т
5	Витрата стислого повітря	не більше 1,5 м ³ /цикл
6	Найбільший робочий тиск стислого повітря	не менше 0,59кГс/см ²
7	Висота струшування	не менше 40мм
8	Число струшувань в хвилину	не менше 130
9	Відхід витяжки	не менше 400мм
10	Цикл роботи	Післяопераційний
11	Продуктивність	не менше 20 знімать
12	Габаритні розміри машини: довжина ширина висота	3680мм 2100мм 3110мм
13	Маса машини	7000кг

Варто зазначити, що хоча на ТОВ «ЛІМЗ» експлуатується переважно парк машин серії 233М, сучасна ливарна практика передбачає можливість застосування й іншого обладнання аналогічного класу. Зокрема, для виготовлення колосників можуть бути задіяні машини моделей 234М (що мають вищу енергію пресування) або високопродуктивні автоматичні лінії імпульсного формування. Вибір альтернативного обладнання зазвичай диктується серійністю виробництва та необхідним

ступенем автоматизації цеху. Проте, при використанні машин типу 233М критично важливим залишається контроль амплітуди струшування, оскільки недоуцільнення суміші призводить до геометричних спотворень відливок («роздаття» форми).

Виготовлення форм на машині 233М проводиться за наступним алгоритмом:

1. Встановлення опоки на підмодельну плиту машини по центруючих штирях та подача формувальної суміші через живильні лотки.

2. Уцільнення суміші струшувальним механізмом (кількість ударів столу визначається необхідною щільністю набивання).

3. Доуцільнення верхніх шарів суміші за допомогою ручних пневматичних трамбівок з подальшим видаленням надлишків скребком.

4. Фіксація опоки клинами, підйом та поворот столу у верхнє положення.

5. Процес витяжки моделі: спочатку проводиться «повільна витяжка» з одночасним включенням вібраторів для розштовхування моделі, після чого – «швидка витяжка».

6. Оздоблення форми відразу після завершення циклу формування.

Загальна тривалість циклу роботи машини лімітується часом на струшування, поворот напівформи та витяжку моделі. Складена форма у зборі представлена на рисунку 3.2.

Температурний режим та фінішні операції Заливання розплаву проводиться при температурі 1560–1570 °С. Технологічний регламент вимагає суворого дотримання часових інтервалів: розкріплення опок (зняття вантажів) проводиться через 5 хвилин після заливання; для забезпечення стабільної кристалізації форми залишаються нерухожими не менше 15 хвилин; загальна витримка вилівка у формі становить не менше 1 години.

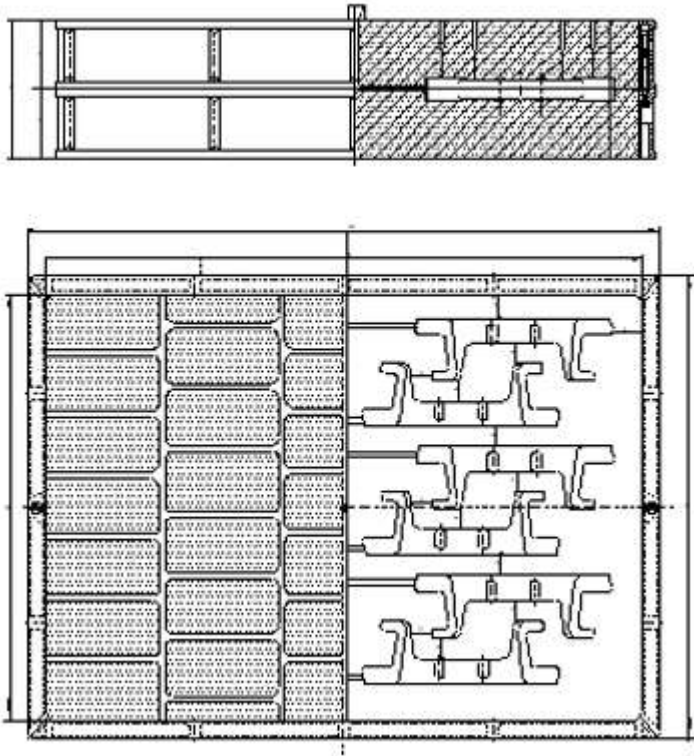


Рис. 3.2. Форма у зборі

Після охолодження проводиться вибивання форм на віброгратах. Видалення литниково-живильної системи здійснюється механічним шляхом (ручними рубильними молотками). Для очищення від пригару та залишків суміші колосники обробляються у галтувальному барабані

Остаточна обробка (зачищення місць обрізання ливників, прибутків та заток) виконується на стаціонарних наждачних верстатах із застосуванням пневматичних молотків [55].

Незважаючи на відпрацьованість, описана технологія має низку суттєвих недоліків, що негативно позначаються на експлуатаційному ресурсі виробів. Досвід експлуатації показує,

що термін служби таких колосників часто не перевищує 6 місяців. Основними причинами передчасного виходу з ладу є термічна деформація та деструкція під дією агресивних газів, вогнищами яких стають ливарні дефекти: тріщини, рванини та раковини.

Використання «сирих» піщано-глинистих форм неминуче веде до високої газотворності, що при недостатній газопроникності (або переущільненні) зумовлює появу газових раковин. Низька податливість таких форм є причиною виникнення гарячих тріщин у процесі кристалізації. З іншого боку, недостатнє ущільнення призводить до викривлень геометрії, піщаних засмічень та інтенсивного пригару.

Отже, застосування піщано-глинистих форм «по-сирому» не може забезпечити необхідну чистоту поверхні та прецизійну точність розмірів. Порушення температурного режиму заливання та втрата рідкоплинності призводять до недоливів, а погане кріплення форм – до утворення заток. Усі ці фактори у сукупності знижують фізико-механічну надійність колосників.

Варто зазначити, що технологічний цикл виготовлення колосників у Криворізькому підрозділі Запорізького ливарно-механічного заводу («ЗЛМЗ») є практично ідентичним до вищеприписаного і характеризується тими ж недоліками, що підкреслює системний характер проблеми та актуальність пошуку альтернативних методів виробництва.

3.2. Виготовлення колосників методом лиття за виплавлюваними моделями

Для підвищення геометричної точності та якості поверхні колосників у Криворізькому підрозділі «ЗЛМЗ», поряд із традиційним формуванням у піщано-глинисті суміші, застосовується метод лиття за виплавлюваними моделями (ЛВМ). Ця технологія дозволяє отримувати виливки з мінімальними припусками на механічну обробку та високою

щільністю металу, що є критично важливим для деталей, які працюють у температурному діапазоні 1000–1100 °С [56].

Процес підготовки модельного складу та виготовлення ланок починається з приготування модельної маси на установці моделі 651. Як базовий матеріал використовується склад КС–5А (Р–3), що складається з 30% свіжих компонентів та 70% матеріалу повернення. Технологічний регламент передбачає плавлення маси та її витримку при температурі 55–57 °С. Контрольним параметром якості суміші є вміст повітря, який не повинен перевищувати 10%, що регулюється зміною тиску в повітропроводі мішалки.

Безпосереднє виготовлення модельних ланок здійснюється на корпусному автоматі моделі 653. Технічні характеристики даного обладнання наведені у таблиці 3.2 [56].

Таблиця 3.2

**Технічна характеристика корпусного
автомата моделі 653**

Параметр	Значення
Продуктивність (ланок), шт/год	180 – 250
Темп роботи (цикл), с	15 – 20
Кількість встановлюваних прес-форм, шт	10
Тиск повітря в системі, Па	5 – 6
Температура води для охолодження прес-форм, °С	8 – 12

Збірка модельних блоків проводиться шляхом насадження ланок на заздалегідь змащений стояк. Герметизація стиків між ланками та ливниковою лійкою здійснюється паяльником при температурі 140–150 °С. Після збірки блоки проходять візуальний контроль на відсутність повітряних бульбашок, раковин та непропаїв стиків. Термін зберігання готових блоків до моменту нанесення покриття не повинен перевищувати двох діб при температурі приміщення 18–25 °С.

Одним із найвідповідальніших етапів є приготування та нанесення багат шарового вогнетривкого покриття. На підприємстві застосовується покриття на основі етилсилікату ET3-40. Процес гідролізу проводиться в спеціальному кожусі гідролізатора при температурі 20–25 °С. Типова рецептура суспензії включає ET3-40, етиловий спирт, воду, соляну та сірчану кислоти, а також наповнювач – пілоподібний кварц (прожарений при 980–1100 °С).

Параметри нанесення вогнетривких шарів наведено в табл. 3.3 [55].

Таблиця 3.3

Режими нанесення та сушіння шарів вогнетривкої оболонки

№ шару	Склад / Матеріал присипки	В'язкість (ВЗ-4), с	Час сушіння, год
1	Подвійне занурення / «Киплячий» пісок (ІК 1025)	35 – 45	1,2 – 2,0
2	Етилсилікатна суспензія / Пісок (ІК 1025)	25 – 30	2,5 – 3,5
3	Етилсилікатна суспензія / Кварцовий пісок (1Т10203)	25 – 30	3,0 – 4,0
4	Рідкоскляна суспензія / Кварцовий пісок	1,69–1,71 (щільність)	8,0 (при 32–35 °С)
5	Зміцнюючий рідкоскляний шар	1,69–1,71 (щільність)	16,0 (при 32–35 °С)

Виплавка модельної маси з готових оболонок проводиться в печі СН–8,16.510/10 при температурі 180–220 °С протягом 2,5–3 годин. Після видалення модельного складу форми прожарюються в термічних печах при температурі 1050–1070 °С для видалення залишків органіки та досягнення необхідної міцності кераміки.

Виплавка жаростійких сталей (75Х28Н2СЛ, 40Х24Н12СЛ, 24Х12Н2СЛ) здійснюється в індукційних печах ІСТ-016, що забезпечує високу чистоту металу за неметалевими включеннями. Розкислення проводиться силікокальцієм СК-30 та алюмінієм (0,050 г на 160 кг металу). Заливання проводиться в гарячі форми (700–800 °С), що дозволяє отримувати тонкостінні елементи колосників без недоливів. Температурні режими заливання залежно від марки сталі представлені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Температурні параметри заливання колосників

Марка сталі	Температура заливання, °С	Час заливання, хв
24Х12Н2СЛ	1560 – 1540	5 – 8
40Х24Н12СЛ	1550 – 1530	5 – 8
75Х28Н2СЛ	1530 – 1510	5 – 8

Відокремлення виливків від стояка проводиться після охолодження за допомогою пневматичних молотків установки 6А92. Очищення поверхні від залишків керамічної оболонки здійснюється хімічним способом в установці моделі 6695 у 40% лужному розчині при температурі 140–150 °С протягом 8–10 годин.

Технологія лиття за виплавлюваними моделями, попри високу якість отриманих колосників, має суттєві обмеження для масового виробництва:

1. Економічна складова: висока вартість складних прес-форм та дорогих матеріалів (етилсилікат, спирт).
2. Часовий фактор: тривалий цикл виготовлення оболонки (до 30–40 годин сушіння), що знижує оборотність парку опок.
3. Технічна складність: громіздкість обладнання та необхідність суворого дотримання температурно-вологісних режимів у цеху.

Це обумовлює обмежене застосування методу ЛВМ на «ЗЛМЗ» (переважно для особливо відповідальних або дрібних партій).

3.3. Перспективи застосування вакуум-плівкового формування для виготовлення колосників

Вакуум-плівкове формування (V-процес) належить до категорії найбільш прогресивних, екологічно безпечних та маловідходних технологій отримання виливків. Цей спосіб забезпечує максимальну механізацію та автоматизацію операцій, базуючись на використанні сухого наповнювача без хімічних зв'язуючих, термопластичних плівок та розрідження повітря (вакууму) в межах 0,3–0,6 бар [57].

Ключовою особливістю вакуум-плівкового формування є відсутність традиційних зв'язуючих матеріалів у складі формувальної суміші. Міцність форми забезпечується за рахунок створення перепаду тиску між внутрішньою порожниною та зовнішньою атмосферою.

При заливанні розплаву в порожнину форми плівка під впливом високої температури випаровується або згорає. Проте завдяки вакууму продукти деструкції плівки проникають у фарбу та поверхневий шар піску, утворюючи тонку зміцнену оболонку. Гази, що утворюються при цьому, створюють захисну атмосферу, що перешкоджає окисленню дзеркала металу. Встановлено, що рідкоплинність хромонікелевих сплавів у вакуумних формах у 2–2,5 рази вища, ніж у традиційних піщаних формах [57].

Використання V-процесу дозволяє досягти показників якості, які зазвичай притаманні лише спеціальним способам лиття:

- геометрична точність: Відповідність 7–9 класу згідно з ДСТУ 26645-85 та стабільність маси відливок;
- якість поверхні: шорсткість мкм забезпечується використанням дрібнозернистого піску без ризику зниження газопроникності форми;
- мінімальні припуски: зниження припусків на механічну обробку на 20–25% забезпечує суттєву економію дорогої високолегованої сталі.

- експлуатаційна стійкість: висока податливість форми при охолодженні практично виключає ризик утворення «гарячих» тріщин у сталевих колосниках, що є критичним для сплавів типу 40X24H12СЛ.

На «ЗЛМЗ» впроваджено лінію V-процесу, що дозволяє розглядати цей метод як реальну альтернативу традиційному литтю для виготовлення серійної номенклатури деталей обпалювальних машин.

З огляду на габарити встановленого на підприємстві обладнання (лінія виробництва концерну Sinto), для виготовлення колосників доцільно використовувати стандартні опоки з наступними характеристиками:

– розмір опоки у світлі: 1250 × 1250 мм. Така площа дозволяє раціонально розмістити до 16–20 модельних відбитків колосника в одній формі, що на 30–50% перевищує продуктивність стандартних піщаних форм.

– висота напівформ: 300/300 мм. Цього об'єму достатньо для забезпечення необхідного шару наповнювача (сухого кварцового піску) та стабільного утримання вакуумметричного тиску під час заливання.

На відміну від традиційного формування, V-процес на ЗЛМЗ забезпечує отримання виливків із шорсткістю поверхні $Rz < 80$ мкм та розмірною точністю 7–9 класу (згідно з ДСТУ 26645-85). Технологія базується на таких етапах:

1. Нанесення плівки: Нагріта термопластична плівка товщиною 0,1–0,2 мм під дією вакууму (0,5–0,6 бар) ідеально копіює контури моделі колосника.

2. Формування: Використовується сухий пісок марки 1К2О3025, який ущільнюється на вібростолі. Після подачі вакууму в об'єм опоки форма набуває високої жорсткості, що виключає деформацію стінок при заливанні металу.

3. Заливання та кристалізація: Завдяки відсутності вологи та зв'язуючих у формі, виключається утворення газових раковин. Підвищена рідкоплинність хромонікелевих сталей (40X24H12СЛ) у вакуумних формах (у 2–2,5 рази вища порівняно

з ПГС) дозволяє отримувати чіткі кромки та тонкі перетинки колосників без недоливів [57].

Застосування V-процесу для виготовлення колосників на потужностях «ЗЛМЗ» дозволяє:

- знизити витрату металу на 20–25% за рахунок мінімізації припусків на обробку та відсутності заток по роз'єму форми;
- ліквідувати дефекти «гарячих тріщин», оскільки сухий пісок після відключення вакууму втрачає міцність, забезпечуючи ідеальну податливість форми при лінійній усадці виливка;
- економити енергоресурси на етапі очищення, оскільки пісок не пригоряє до металу і легко видаляється при відключенні вакуум-насосів.

Впровадження цієї технології для виробництва колосників дозволило б знизити витрати формувального піску в 4–5 разів та повністю відмовитися від складного сумішоприготувального обладнання. Трудомісткість операцій формування при цьому знижується в 1,5–2 рази, а обрубубання та зачищення – у 2–4 рази.

Проте слід зважити і на основний недолік методу – високу енергомісткість, зумовлену необхідністю безперервної роботи потужних вакуумних насосів від моменту формування до повного затвердіння відливок [57]. Крім того, ливникова система повинна бути незамкненою і забезпечувати максимально швидке заповнення форми, що потребує ретельного комп'ютерного моделювання процесів заливки.

Таким чином, вакуум-плівкове формування є високоефективною альтернативою традиційному литтю в піщано-глинисті форми, особливо в контексті підвищення чистоти поверхні колосників та боротьби з вогнищами газової корозії.

3.4. Розробка та впровадження технології виготовлення колосників за газифікованими моделями

Найбільш перспективним напрямком модернізації ливарного виробництва колосників є впровадження технології

лиття за газифікованими моделями (ЛГМ-процес). Цей метод забезпечує отримання відливок з високою чистотою поверхні та прецизійною точністю розмірів, будучи при цьому екологічно безпечним та маловідходним [58].

Технологічний цикл виготовлення колосників за ЛГМ-процесом базується на використанні пінополістиролових моделей, які не потребують вилучення з форми перед заливанням. Загальна схема виробництва представлена на рис. 3.3 і полягає в наступному. У спеціальних металевих прес-формах або механічною обробкою виготовляють моделі деталей і ливникових систем, використовуючи суспензійний полістирол у вигляді передспінених гранул або нормалізованих пінополістиролових блоків і плит. Моделі (рисунок 3.3, а) сполучають склеюванням або зваркою з елементами ливникової системи, після чого їх один раз офарблюють фарбою або суспензією з зв'язуючого розчину і пилоподібного вогнетривкого матеріалу, які наносять зануренням, кистю або розпилюванням з фарборозпилювача в спеціальних камерах. Отриманий шар сушать на повітрі і одержують таким чином тонкостінну, вогнетривку, газопроникну оболонку завтовшки до 2 мм, яка міцно пов'язана з пінополістироловою моделлю. Після цього її встановлюють в спеціальну опоку-контейнер і рівномірно, обережно, щоб не деформувалася модель, засипають зернистим вогнетривким наповнювачем без зв'язуючого (рисунок 3.3, б). В якості наповнювача використовують кварцові, олівінові, цирконові піски, шамот, магнезит, електрокорунд. В деяких випадках при виготовленні масивних (більше 1 т) відливачів використовують звичайні формувальні суміші з зв'язуючим, такі як рідкі самотверднучі, холоднотверднучі піщано-глинисті, піщано-цементні та інші. Після виготовлення форм їх заливають рідким металом (рисунок 3.3, в), пінополістиролова модель при цьому газифікується під дією теплоти, звільняючи порожнину форми. Після формування відливка опока-контейнер перевертається, формувальний матеріал висипається, відливок

(рисунок 3.3, г) витягується і поступає на фінішні операції – обрубвання, обробку, очищення і контроль [58].

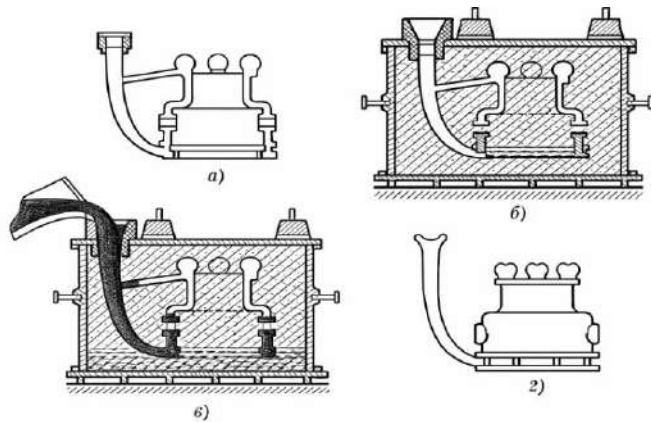


Рис. 3.3. Схема виготовлення відливка по газифікованій моделі:

а – пінополістиролова модель відливка; б – форма, яка підготовлена до заливки; в – заливка форми, газифікація моделі; г – відливок з елементами ливникової системи

Аналізуючи етапи розвитку процесу литва по газифікованим моделям, можна відзначити, що цей процес розвивається в двох самостійних напрямках.

Перший напрям пов'язаний з виготовленням крупних, масивних відливань в умовах дослідного і дрібносерійного виробництва по моделях, що одержуються механічною обробкою пінополістиролових плит і блоків і при необхідності склеюванням.

Другий напрям пов'язаний з виготовленням складних відливань масою до 15 кг з підвищеною точністю розмірів в умовах багатосерійного і масового виробництва по моделях, що одержуються з суспензійного полістиролу, що пройшов спеціальну термічну обробку (передспіювання) і остаточно

спіненного в прес-формах до повного оформлення конфігурації моделей відливань.

В даний час успішно розвиваються обидва напрями литва по газифікованим моделям, що багато в чому сприяє технічному прогресу різних галузей машинобудування [59].

Аналіз промислового впровадження методу дозволяє виділити ряд суттєвих переваг:

- підвищення точності: завдяки нероз'ємності моделі відсутня операція її витягання, що виключає появу дефектів по роз'єму форми та дозволяє відмовитися від формувальних ухилів. Це забезпечує виготовлення колосників зі складними геометричними пазами («зворотним конусом») без додаткових технологічних припусків.

- спрощення конструкції: специфіка ЛГМ дозволяє відмовитися від окремих піщаних стрижнів, що значно підвищує точність внутрішніх порожнин колосника.

- ламінарність заповнення: метал заміщує модель поступово, що сприяє спокійному руху розплаву, мінімізує ерозію стінок форми та покращує живлення виливка.

- економічність та екологічність: використання сухого піску без зв'язуючого ліквідує енергоємні цикли підготовки сумішей та спрощує процес вибивання. Крім того, пінополістирол дозволяє проводити легування та модифікування сталі безпосередньо у формі шляхом введення порошкових добавок у матеріал моделі [60].

Незважаючи на високу ефективність вакуум-плівкового формування (ВПФ), ЛГМ-процес має перевагу у нижчій енергоємності формоутворення (відсутність потреби у постійній роботі потужних вакуумних насосів під час всього циклу) та відсутності зносу дерев'яних моделей.

Для умов ТОВ «ЛМЗ» та «ЗЛМЗ» впровадження ЛГМ-технології для виготовлення колосників із сталей 40X24H12СЛ та 75X28H2СЛ дозволить отримувати виливки з чистою поверхнею, що радикально знижує швидкість високотемпературної газової корозії та збільшує термін експлуатації обпалювальних машин.

Завдяки високій якості отриманих поверхонь, обсяг обробки зводиться до мінімуму.

Таким чином, литво відливань по газифікованих моделях з пінополістиролу, забезпечує отримання відливань з чистою поверхнею, без дефектів і високою точністю розмірів, а також є екологічно чистим в порівнянні з іншими технологічними способами виробництва відливань з застосуванням зв'язуючих матеріалів.

3.4.1. Матеріали для виготовлення газифікованих моделей та форм

Ефективність ЛГМ-процесу безпосередньо залежить від фізико-хімічних властивостей модельних та формувальних матеріалів. Основним компонентом для створення моделей є суспензійний полістирол, що спінується, який отримують шляхом полімеризації стирулу в присутності пароутворювача (найчастіше – ізопентану).

Гранули полістиролу діаметром від 0,1 до 5 мм мають комірчасту структуру. При нагріванні до 80–90 °С полімерна матриця розм'якшується, а ізопентан переходить у газоподібний стан, створюючи внутрішній тиск. Це призводить до збільшення об'єму гранул у 30–40 разів. При термообробці безпосередньо у прес-формах відбувається процес спікання гранул у монолітну піномасу, що з високою точністю відтворює конфігурацію колосника.

Для ливарного виробництва ключовим показником є уявна щільність пінополістиролу, яка визначає співвідношення твердої та газоподібної фаз. Згідно з ДСТУ ISO 2897-2:2015, найбільш адаптованим для ЛГМ-процесу є полістирол типу ПСВ-Л, який містить компоненти, що прискорюють газифікацію та мінімізують утворення сажі при заливці металу [61].

Технічні характеристики основних підтипів полістиролу наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Технічна характеристика полістиролу, що спінюється

Найменування показників	Підтип полістиролу	
	ПСВ-Л-1	ПСВ-Л-1С
Уявна щільність, кг/м ³	20,0-40	22,0-50
Міцність при статичному вигині, Мпа	0,13-0,18	0,17-0,39
Усадка при 60 °С за 24 години %, не більше	0,2	0,15
Швидкість плавлення при термічному ударі (900 °С), см/с, не менше	2,0-2,5	2,5-3,0
Швидкість газифікації при термічному ударі (900 °С), г/с, не менше	9,0-10,0·10 ⁻³	11-12·10 ⁻³
Масова частка залишкового мономера (стиролу) % не менше	0,2-0,25	0,2-0,25
Масова частка пароутворювача %, не менше	5,0-5,5	5,0-5,5
Втрата маси при сушці %, не менше	1,0-1,3	1,5
Відносна в'язкість 1%-ного розчину полімеру в бензолі, не менше	1,8	1,8

Технологічні параметри спінювального полістиролу обирають залежно від масивності та конструктивних особливостей вилівка. Зокрема, для виготовлення моделей прямих колосників, що встановлюються на випалювальних машинах ПрАТ «ЦГЗК» та ПрАТ «ПівніЗК», характерною є товщина стінок у межах 16–40 мм. З огляду на такі параметри, рекомендується застосовувати середньофракційну сировину з розміром гранул 0,9–1,6 мм. Це забезпечує оптимальний баланс

між щільністю моделі (понад 25 кг/м³) та швидкістю її термічної деструкції під час заливки, що відповідає загальним вимогам до фізико-механічних властивостей полімерів згідно з ДСТУ ISO 2897-2:2015. Використання такої фракції сприяє ефективному виведенню продуктів газифікації через вентканали, що є критичним для створення направленою газового режиму в умовах ЛГМ-процесу. Це дозволяє масштабувати виробництво подібної номенклатури металоконструкцій, забезпечуючи високу якість виливків для потреб гірничо-збагачувальної галузі.

Пінополістирол ПСВ-Л використовують також для виготовлення плит і блоків пінопласту марки ПСБ-Л, які призначені для отримання газифікованих моделей в одиничному і дрібносерійному виробництві після їх механічної обробки на спеціальному устаткуванні. Плити і блоки з пінопласту ПСБ-Л випускають прямокутної форми завдовжки 900, 1000, 2000, 3000 мм, шириною 800, 1000 мм і завтовшки 25, 50, 70, 100, 150, 200 мм. По спеціальних замовленнях вони можуть бути виготовлені і інших розмірів. Для отримання газифікованих моделей необхідно використовувати пінопласт з уявною щільністю від 10 до 25 кг/м³.

Пінопластові плити і блоки повинні мати прямокутну форму (відхилення від прямого кута не повинне перевищувати 3 мм на 500 мм грані); не допускається наявність на їх поверхні западин, подряпин, напливів завглибшки більше 5 мм (загальна площа їх не повинна перевищувати 2% площі плити); не повинні містити чужорідних включень і сторонніх предметів [58].

Однією з особливостей литва по газифікованим моделям є нанесення протипригарних покриттів на модель, оскільки форма не має роз'єму, а модель залишається у формі в процесі заливки. Протипригарне покриття виконує дві функції: оберігає відливки від пригару (при заливці чавуну і сталі) і від утворення грубої поверхні в результаті нерівномірного ущільнення суміші.

Протипригарні покриття повинні задовольняти наступним вимогам: мати високу газопроникність; володіти хорошою

адгезією до матеріалу моделі; володіти здатністю швидко висихати і самозміцнюватися на повітрі; мати високу міцність.

Найбільше цим вимогам відповідають протипригарні покриття на основі смоли 101М, склад і властивості яких приведені в таблиці 3.6.

Нанесення протипригарного покриття на пінополістирольні моделі здійснюється методами занурення, фарбування пензлем або пневматичного розпилення (пульверизатором). Вибір методу обумовлюється необхідністю формування гомогенного шару заданої товщини та забезпеченням адгезійної міцності покриття. Для виливків середньої масивності товщина одношарового покриття становить 0,3–0,5 мм. У випадку виготовлення великогабаритних масивних деталей (зокрема колосників випалювальних машин) товщина захисного шару може досягати 2,5 мм, що реалізується шляхом багатократного нанесення з обов'язковим проміжним сушінням кожного шару для видалення летючих компонентів розчинника (бензину БР-2) [58].

Ключовим обмежувальним фактором при розробці технології формування за моделями, що газифікуються, є низька механічна жорсткість пінополістиролу. Граничне напруження стиснення, яке здатна витримати модель без незворотної пластичної деформації, становить $\sigma_{ст} \leq 0,1$ МПа (приблизно 1 кг/см²). Така низька міцність унеможливує використання традиційних енергоємних методів ущільнення формувальної суміші, таких як пресування під високим тиском, імпульсне формування або використання пісcomетів. Навіть при локальному застосуванні ручного або пневматичного інструменту існує високий ризик деструкції та порушення геометрії модельного блоку. Враховуючи специфіку ЛГМ-процесу, пріоритетним є застосування сухих сипучих наповнювачів (кварцових пісків) з високою текучістю, ущільнення яких досягається методами спрямованої вібрації. Це дозволяє забезпечити рівномірну щільність форми навколо складних геометричних елементів моделі без механічного пошкодження її поверхні.

Таблиця 3.6

Склад та властивості швидкосохнучих фарб на основі смоли 101М

Складові фарби	Вміст компоненту, %	Щільність, г/см ³	В'язкість по ВЗ-4, с	Тривалість висихання фарби, хв.	Седиментаційна стійкість, %		Призначення
					через 7 год.	через 24 год.	
Цирконієвий концентрат	67	1,6-1,65	98	15-20	20	40	Стальні та чавунні виливки
Смола 101М	2						
Клей 45-08	10						
Бензин БР-2	21						
Графіт чорний сріблястий	33	1,1-1,2	58	20	25	42	Чавунні виливки
Смола 101М	5						
Клей 45-08	10						
Бензин БР-2	42						
Тальк	46	1,1-1,14	56	20-25	13	28	Виливки із кольорових сплавів
Смола 101М	6						
Клей 45-08	5						
Бензин БР-2	43						
Цирконієвий концентрат	69	1,7	95	15-20	16	20	Стальні та чавунні виливки
Смола 101М	2						
Поліізобутилен П-200	0,2						
Бензин БР-2»	28,8						

Формувальна суміш у ЛГМ-процесі повинна відповідати комплексу суперечливих вимог. Передусім, суміш повинна мати високу газопроникність (у діапазоні 200–500 одиниць) для безперешкодного відведення продуктів термічної деструкції полістиролу крізь товщу форми. Поряд із цим, матеріал має забезпечувати високу термомеханічну міцність при мінімальному ступені ущільнення, щоб запобігти деформації моделі. З точки зору технологічності, важливими є показники високої податливості, легкої вибивності та мінімізації витрат на регенерацію наповнювача.

Відповідно до зазначених критеріїв, у сучасній ливарній практиці виділяють декілька основних типів формувальних систем:

1. Піщано-цементні самотверднучі суміші

Дані системи набули поширення у світовій практиці (Японія, Велика Британія) завдяки високій міцності та газопроникності. Як зв'язуюче використовується портландцемент марок 400 або 500 (близько 10%).

Логіка формування властивостей таких сумішей базується на наступних параметрах:

- компонентний склад: 70–90% вогнетривкого наповнювача (кварцовий, цирконовий або хромистий пісок), до 20% оборотної суміші, 10% цементу та 4–6% води для ініціації процесів гідратації;

- кінетика твердіння: процес набору міцності відбувається поступово: через 1 годину після замішування показник становить 0,02–0,04 МПа (0,2–0,4 кг/см²), за добу зростає до 1,0–1,2 МПа (10–12 кг/см²), а через 48 годин стабілізується на рівні 2,0 МПа (20 кг/см²);

- модифікація та обмеження: для прискорення процесу виробничого циклу до складу вводять активатори (хлористий магній, сульфат натрію). Однак широке застосування таких сумішей обмежується їхньою низькою «живучістю» (до 60 хв) та складністю подальшої регенерації піщаних зерен через наявність міцної цементної оболонки.

2. Рідкоскляні самотверднучі суміші (РСС)

Це найбільш розповсюджений клас сумішей у вітчизняній промисловості. Зв'язуючим виступає рідке скло (модуль 2,2–2,8, щільність 1,3–1,34 г/см³), а отверджувачами – ферохромовий або нефеліновий шлаки. Технологічна логіка застосування РСС базується на хімічному затвердінні рідкого скла під дією порошкоподібних або газоподібних реагентів:

- параметри зв'язуючого та затверджувачів: в якості основи використовують рідке скло (модуль 2,2–2,8, щільність 1,3–1,34 г/см³). Для ініціації самотвердіння вводять ферохромовий шлак (з вмістом не менше 48% СаО та вологістю ≤1,5%) або нефеліновий шлак (80–85% β-модифікації двокальцієвого силікату);

- фізико-механічні показники: системи характеризуються швидким набором міцності; показник на стиск уже через 2 години витримки перевищує 0,2 МПа (2 кг/см²). Для миттєвого затвердіння форми (протягом 1–2 хв) застосовують СО₂-процес, що базується на продуванні суміші вуглекислим газом.

- Проблема вибивності: для покращення податливості в систему вводять до 5% глини, органічні добавки (мінеральні оливи, бітум, крохмаль) або нафталін.

3. Наливні самотверднучі суміші (НСС) у ЛГМ-процесі

На сучасному етапі розвитку ливарного виробництва наливні самотверднучі суміші знаходять широке застосування в умовах одиничного та дрібносерійного виготовлення складних виливків. Ключовою технологічною особливістю НСС є їхня здатність до гравітаційного течіння без прикладання зовнішніх механічних зусиль.

Реологічні властивості таких сумішей забезпечуються введенням у рідке зв'язуюче поверхнево-активних речовин (ПАР), які радикально знижують поверхневий натяг рідкої фази. У процесі перемішування рідка складова рівномірно розподіляється навколо зерен наповнювача, захоплюючи повітря та формуючи стабільну піноподібну структуру. Цей мікроскопічний повітряний прошарок між групами зерен замінює

високе сухе тертя на повітряно-рідинне, надаючи суміші властивостей структурованої рідини з високою текучістю.

Технологічний цикл виготовлення форм із застосуванням НСС включає заливку суміші в опоку або стрижневий ящик з подальшою витримкою до завершення фазових перетворень. У міру твердіння, внаслідок стоншення стінок бульбашок піни (через стікання рідини та дію капілярних сил), відбувається руйнування піни у всьому об'ємі. Цей процес супроводжується втратою текучості та різким зростанням газопроникності зразка – до значень 400–800 одиниць, що є критично важливим для евакуації газів при газифікації моделі.

Найбільш раціональним є використання рідкоскляних НСС (щільність скла 1,32–1,34 г/см³, модуль 2,7–2,8). Завдяки високій текучості такі суміші дозволяють відмовитися від використання додаткових стрижнів навіть у складних порожнистих конструкціях. Це суттєво підвищує геометричну точність виливків та дозволяє мінімізувати припуски на механічну обробку («чорну» вагу) [58].

4. Холоднотверднучі суміші (ХТС)

На сьогодні використання ХТС є найбільш прогресивним методом у світовій ливарній практиці (зокрема у США, Італії та Франції), що зумовлено високим рівнем автоматизації та екологічністю процесу. Зв'язувальна система базується на використанні синтетичних смол на основі фурфурілового спирту, сировиною для якого слугують рослинні відходи.

Технологічна модель застосування ХТС характеризується такими параметрами:

- хімізм та компонентний склад: процес твердіння відбувається внаслідок поліконденсації смоли за присутності кислого каталізатора (зазвичай ортофосфорної кислоти H₃PO₄). Вміст фурфурілового спирту в основі зв'язувального варіюється залежно від типу металу: для сталевого лиття використовують смоли з вмістом спирту близько 60%, для чавунного – на рівні 40–50%.

- фізико-механічні переваги: суміші відзначаються винятковою текучістю, що дозволяє отримувати чіткий відбиток моделі без інтенсивного механічного впливу. Показники міцності на стиск через 1,5–2 години після замішування досягають 0,4–0,8 МПа (4–8 кг/см²). Завдяки органічній природі зв'язувального, форми мають низьку газотворну здатність та демонструють відмінну вибивність після охолодження виливка.

- чутливість до зовнішніх чинників: швидкість твердіння форми критично залежить від термічного стану піску та концентрації каталізатора. Зокрема, збільшення частки Н₃РО₄ понад 1,2% від маси піску призводить до різкого скорочення «часу життя» (живучості) суміші до 5 хвилин і менше, що вимагає високої точності дозування та швидкодії формуютьовального обладнання.

5. Сухий кварцовий пісок

Сухий кварцовий пісок, що використовується як основний наповнювач у ЛГМ-процесі, володіє унікальним комплексом теплофізичних характеристик, які докорінно відрізняють умови затвердіння металу від традиційних методів лиття у вологі піщано-глинисті форми. Низька теплопровідність сухого піску, що варіюється в межах 0,29-0,38 Вт/(м·К), за своїми ізоляційними властивостями наближає його до азбестових матеріалів. Це зумовлює значну термічну інертність форми та суттєве уповільнення швидкості відведення тепла від виливка. Для порівняння: стандартні піщано-глинисті суміші мають теплопровідність у 2,5–3 рази вищу (0,84 Вт/(м·К)), що в умовах ЛГМ-процесу робить швидкість охолодження визначальною при проектуванні технології.

При виготовленні масивних сталевих колосників зазначена теплофізична особливість виступає критичним технологічним фактором. Тривале перебування розплаву та кристалізованого металу в зоні високих температур сприяє інтенсивному росту зерна аустеніту та може призвести до небажаних структурних перетворень жаростійкої сталі, що негативно позначається на її механічних властивостях та експлуатаційному ресурсі. Окрім

структурного аспекту, уповільнення кристалізації спричиняє подовження загального технологічного циклу охолодження в опоках, що вимагає розширення виробничих площ та збільшення оборотності оснащення. Єдиним умовно позитивним наслідком такої термічної інертності є деяке зниження рівня залишкових термічних напруг у виливку, проте цей ефект не нівелює ризики отримання грубозернистої структури.

Ефективним інструментом регулювання теплофізичних та газодинамічних умов формування сталевих колосників є впровадження вакуумного супроводу заливки (процес ЛГМ-В) [62]. Застосування вакууму з розрідженням у межах 0,04–0,06 МПа дозволяє радикально змінити механізм взаємодії в системі «модель–форма–метал». По-перше, фільтрація атмосферного повітря крізь товщу наповнювача створює спрямований газодинамічний потік, який інтенсифікує конвективне відведення тепла. Це частково компенсує низьку теплопровідність піску та сприяє формуванню більш дрібнозернистої та гомогенної структури сталі. По-друге, створюваний градієнт тиску забезпечує примусову евакуацію продуктів термічної деструкції полістиролу, мінімізуючи час їхнього контакту з рідким металом. Це є вирішальним фактором у запобіганні науглецюванню поверхні сталевих колосників та утворенню газових дефектів. Крім того, вакуумування надає сухому піску високої механічної жорсткості за рахунок сил атмосферного стиснення, що гарантує стабільність геометричних розмірів складних елементів виливка під дією гідростатичного тиску розплаву.

Визначальною характеристикою наповнювача, що корелює з ефективністю вакуумування, є його газопроникність, зумовлена морфологією зерен. Для ЛГМ-процесу найбільш технологічно раціональним є використання пісків з округлою формою зерен. На відміну від гострокутних (необкатаних) аналогів, округлий пісок має вищу реологічну рухливість, що забезпечує щільне пакування при віброущільненні та стабільну пористість масиву. Порівняльні дані щодо пористості пісків різної морфології наведено в табл. 3.7 [58].

Таблиця 3.7

**Пористість кварцового піску (%) залежно
від морфології зерен**

Величина зерна, мм	Пісок	
	округлий	Гострокутний
0,075	40,3	51,3
0,10	30,0	50,8
0,15	38,4	47,7

Аналіз даних свідчить, що гострокутні зерна забезпечують вищу загальну пористість, проте через високе внутрішнє тертя та низьку текучість такий наповнювач не здатний адекватно заповнювати складні порожнини моделей колосників. Встановлено нелінійний характер зниження газопроникності при зменшенні фракції: для піску фракції 0,63–0,4 мм вона становить 710–1000 одиниць, тоді як для дрібних фракцій 0,16–0,1 мм показник знижується до 65–100 одиниць.

Суттєвий вплив на аераційні властивості має також адсорбційна здатність зерен. Наявність навіть мінімальної гігроскопічної вологи радикально змінює реологічну поведінку наповнювача. З огляду на це, у промисловій реалізації ЛГМ-технології вологість піску повинна бути максимально наближена до нульового значення, що забезпечує стабільність формування виливків та високу якість їхньої поверхні [58].

Таким чином, розглянуті варіанти хімічно тверднучих сумішей (фуранових ХТС), рідкоскляних самотверднучих систем (РСС) та наливних реологічних складів (НСС) продемонстрували високу міцність та точність відтворення геометрії. Зокрема, наливні суміші дозволяють виключити використання стрижнів у складних порожнинах, що є суттєвою перевагою для одиничного виробництва.

Однак, з огляду на специфіку масового виробництва колосників обпалювальних машин та вимоги до максимальної інтенсивності евакуації продуктів деструкції пінополістиролу,

технологічна перевага обґрунтовано надається сухому кварцовому піску з високим ступенем однорідності зерна (фракції 0,4–0,63 мм).

На відміну від сумішей зі зв'язуючим, сухий пісок забезпечує:

- Максимальну газопроникність: відсутність хімічних плівок на зернах піску та використання вакуумування дозволяє досягти найвищих показників газовідведення, що критично для сталевих литва.

- Термічну стабільність: низька теплопровідність сухого наповнювача мінімізує передчасний термічний вплив на модель до моменту контакту з розплавом.

- Економічну ефективність: можливість 100% регенерації матеріалу без складних хімічних процесів очищення, що значно знижує собівартість виливків.

Таким чином, використання сухого кварцового піску у поєднанні з вакуумуванням форми визначено як найбільш раціональне технологічне рішення для серійного виробництва жаростійких колосників.

3.4.2. Устаткування та технологічні режими виготовлення виливків по газифікованих моделях

Технологічний цикл виготовлення сталевих виливків за ЛГМ-процесом розпочинається з етапу формування моделей, якість яких безпосередньо визначає точність та чистоту поверхні майбутнього колосника.

Технологія виготовлення моделей колосників визначається серійністю виробництва. В одиничному та дослідному виробництві застосовується механічна обробка пінополістиролових блоків (ПСБ-Л). Для масового виробництва колосників пріоритетним є метод спінування гранул у металевих прес-формах, що забезпечує високу точність та мінімальну шорсткість поверхні.

Використання спінюваного полістиролу (ППС) включає складний комплекс теплових і механічних операцій, що потребують суворого дотримання температурно-часових режимів.

Першою критичною стадією є попереднє спінювання, під час якого вихідна сировина піддається термічному впливу, що призводить до збільшення об'єму гранул у 20–50 разів за рахунок переходу пороутворювача (ізопентану) у газоподібний стан. Для сталевого лиття, де особливо важливою є мінімізація газовиділення при заливці, режим спінювання налаштовують на отримання насипної густини в межах 18–22 кг/м³.

Технологічна підготовка розпочинається з того, що суспензійний полістирол просушується та розсівається по фракціях. Безпосередньо передспінювання проводиться в робочій камері заздалегідь прогрітої установки. Як приклад такого обладнання розглянуто апарат УЕВ–60 (рис. 3.4) [58], що має камеру об'ємом 60 л, встановлену потужність 9 кВт та загальну масу 170 кг. Слід зазначити, що залежно від масштабів виробництва та необхідної продуктивності дільниці, може бути застосоване й інше аналогічне устаткування, яке забезпечує відповідні параметри теплоносія та стабільність насипної щільності гранул.

Процес спінювання в цій камері проводиться протягом 12 хвилин відповідно до обраної фракції матеріалу, після чого сито зі спіненим полістиролом витягується з камери. Важливою візуальною ознакою правильності режиму є те, що полістирол після спінювання не повинен бути надмірно «повітряним» (перепаленим), а його підйом у ситі має становити 8–12 см.

Після завершення термічної обробки матеріал перетирається на спеціальній установці через сито з осередком 1,5×1,5 мм. Це дозволяє отримати однорідний склад гранул та повністю виключити їх злипання. Перетертий пінополістирол пересипається у відкриту ємність і проходить стадію первинної витримки на повітрі протягом 1–1,5 години.

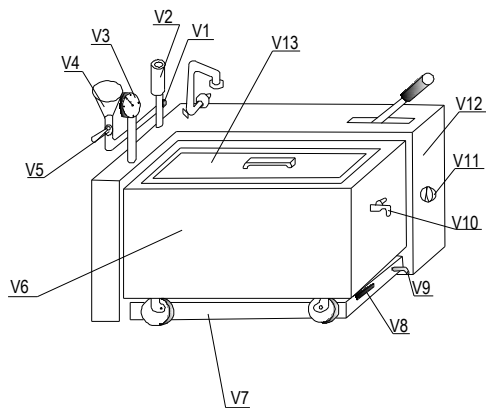


Рис. 3.4. Камера УЕВ – 60 для передспінювання пінополістиролу:

- V1 – кран скидання надмірного тиску з парогенератора;
 V2 – запобіжний клапан; V3 – манометр; V4 – заливальна лійка;
 V5 - кран відкриття заливальної лійки; V6 – робоча камера;
 V7 – бак парогенератора; V8 – кран перевірки наповнення парогенератора; V9 – трубка-рівень; V10 – кран скидання тиску з кожуха робочої камери; V11 – ручка управління;
 V12 – індикаторна лампочка; V13 – кришка робочої камери

Наступним етапом є остаточне доведення параметрів матеріалу: заздалегідь просушений полістирол поміщається в сушильну шафу. Тут він витримується при температурі 45 ± 5 °C протягом 0,5–1,5 години до досягнення необхідної щільності, яка для виготовлення моделей прямого колосника повинна становити $0,022\text{--}0,028$ г/см³. У випадку, якщо після 1,5 години сушіння щільність залишається вищою за $0,028$ г/см³, проводиться додаткова витримка в сушильній шафі при тій же температурі протягом 20–30 хвилин з наступним повторним вимірюванням щільності.

Після спінювання гранули проходять стадію кондиціонування (витримки) в бункерах, що триває від 4 до

24 годин. Ця операція є обов'язковою для стабілізації внутрішнього тиску в гранулах за рахунок дифузії повітря крізь оболонки, що запобігає їх усадці та механічному колапсу при подальшому нагріванні.

Основним етапом формування є спікання гранул безпосередньо у прес-формах. За способом подачі теплоносія в робочу порожнину методи виготовлення моделей класифікують на ванний, автоклавний, метод теплового удару та спінювання струмами високої частоти.

Найбільш простим у технічній реалізації є ванний метод, при якому остаточне спінювання гранул здійснюється шляхом витримки заповнених ними прес-форм у гарячій воді. Перевагою методу є відсутність потреби у дорогому спеціалізованому устаткуванні, що робить його доступним для умов дослідного виробництва. Проте розподіл температурних полів при такому нагріві є несприятливим: через низьку інтенсивність теплопередачі метод не забезпечує належного спікання гранул у центральній частині моделі. Зі збільшенням габаритів виробу тривалість витримки суттєво зростає, що вимагає індивідуального підбору режиму для кожного типорозміру. Крім того, ванний метод дозволяє отримувати моделі з відносно високою об'ємною масою (не менше $0,03\text{--}0,035\text{ г/см}^3$), тоді як для ЛГМ-процесу оптимальними є показники $0,015\text{--}0,025\text{ г/см}^3$. Враховуючи ці обмеження, метод рекомендується виключно для дрібносерійного виготовлення простих виливків [58].

Більш досконалим є автоклавний метод, де як теплоносієм використовують насичену водяну пару з температурою $110\text{--}115\text{ }^\circ\text{C}$, що подається під тиском $1,3\text{--}1,45\text{ кГ/см}^2$. Прес-форми поміщають у робочу камеру автоклава, де відбувається прогрів. У порівнянні з ванним способом, автоклавна обробка забезпечує вищу якість поверхні та дозволяє отримувати моделі з необхідною для сталевого лиття густиною $0,016\text{--}0,020\text{ г/см}^3$. Однак методу притаманна нерівномірність щільності по перерізу моделі, яка зростає пропорційно товщині стінки. Тривалість процесу (до $20\text{--}30\text{ хв}$ для стінок завтовшки 100 мм) та складність

механізації обмежують застосування автоклавів виготовленням невеликих за розмірами тонкостінних моделей в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва [58].

Практична реалізація даного методу розпочинається з підготовки пінополістиролу. Підготовлена достатня кількість підспіненого просушеного матеріалу з однаковим часом попереднього підспінювання і щільністю, що не перевищує $0,028 \text{ г/см}^3$, засипається в бункер задувного пристрою (рис. 3.5). Після заповнення бункера пінополістирол необхідно обробити антистатиком з відстані 15–20 см протягом 3–4 секунд для покращення його текучості та запобігання злипанню гранул.

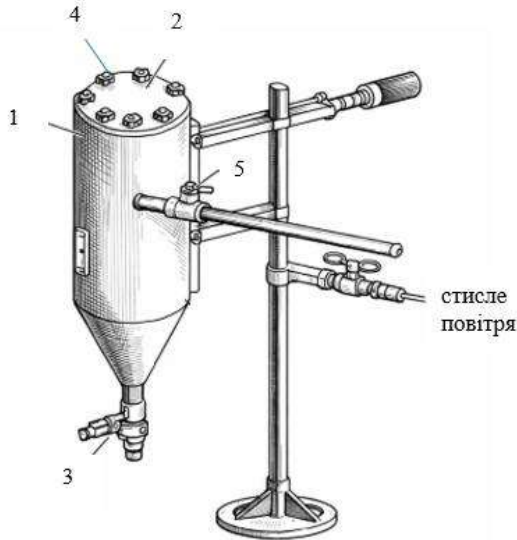


Рис. 3.5. Задувальний пристрій, який застосовується в автоклавах:

- 1 – робоча камера задувного пристрою; 2 – кришка;
- 3 – кран подачі пінополістиролу; 4 – прижимні болти;
- 5 – кран подачі стислого повітря

Далі проводиться операція задування прес-форм пінополістиролом. Тиск стислого повітря при цьому повинен

підтримуватися в межах 2,5–6 атм. Процес задування триває від 2 до 15 секунд у кожен задувний отвір, залежно від габаритів та складності конфігурації прес-форми. Для забезпечення рівномірної щільності моделі прямого колосника необхідно використовувати всі передбачені конструкцією прес-форми задувні отвори. Перевірка ступеня заповнення проводиться шляхом піддування прес-форми стислим повітрям за допомогою пневмопістолета з подальшим візуальним контролем; за потреби здійснюється додування матеріалу.

Після завершення підготовки проводиться безпосередньо спікання моделей. Для цього етапу технології виготовлення моделей колосників застосовується спеціалізоване обладнання: автоклав вертикальний Chiza тип PS SOV (рис. 3.6) або автоклав горизонтальний ГК–100–2 (рис. 3.7).

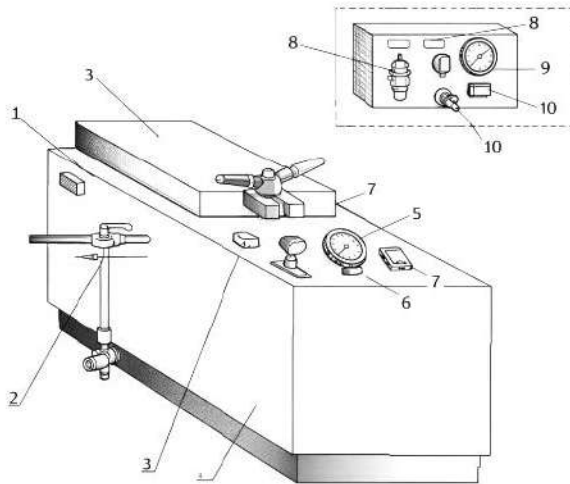


Рис. 3.6. Автоклав вертикальний Chiza тип PS SOV:

- 1 – робоча камера автоклава; 2 - ручка управління вентиляної шафи; 3 – кришка автоклава; 4 – рубильник включення мережі; 5 – індикаторні лампочки окремих фаз; 6 – тумблер включення нагріву; 7 – індикаторна лампочка «нагрів»; 8 – вентиль аераційного маховика; 9 – запобіжний клапан; 10 – манометр; 11 – скидання пари в бак дистильованої води

Вибір конкретного типу автоклава обумовлюється габаритами моделей та організацією робочого простору дільниці. Вертикальний автоклав Chiza зазвичай використовується для дрібносерійного виготовлення малогабаритних моделей або елементів ливникових систем. Його вертикальне завантаження дозволяє компактно розмістити оснащення, забезпечуючи рівномірне охоплення паром невеликих прес-форм, що критично для тонкостінних елементів. Натомість горизонтальний автоклав ГК-100-2, маючи більший об'єм робочої камери та зручну систему горизонтальної викладки, є пріоритетним для виготовлення партій прямих колосників.

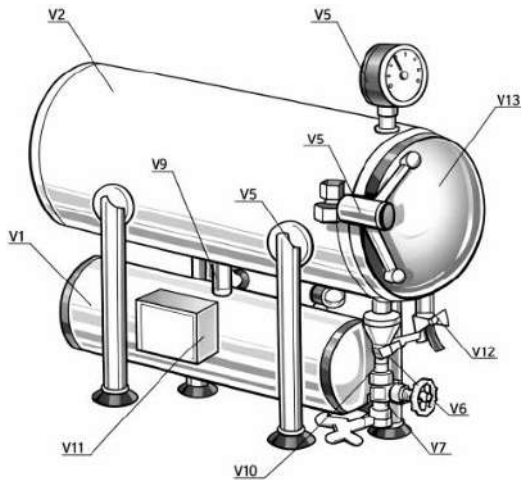


Рис. 3.7. Автоклав горизонтальний ГК-100-2:

V1 – парогенератор; V2 – робоча камера; V3 – нижній манометр;
 V4 – верхній манометр; V5 – притискний гвинт; V6 – кран заповнення парогенератора;
 V7 – кран перекриття трубку рівня; V8 – кран зливу води; V9 – кран повідомлення парогенератора і робочої камери; V10 – трубка рівень; V11 – тумблер включення автоклава; V12 – кран скидання пари; V13 – кришка

Горизонтальна орієнтація камери сприяє стабільному розміщенню довгих прес-форм та забезпечує кращу циркуляцію теплоносія вздовж осі виробу, що мінімізує ризик жолоблення моделі під час термічного розширення. Крім того, ГК-100-2 частіше застосовується в умовах напівпромислових дільниць завдяки надійності вбудованого парогенератора та можливості точного контролю надмірного тиску на манометрах V3 та V4.

Найвищу ефективність у масовому виробництві демонструє безавтоклавний метод зі безпосередньою подачею пари в порожнину форми. При цьому способом крізь систему дюз подається насичена водяна пара безпосередньої дії (гостра пара) з тиском 0,05–0,2 МПа та температурою 105–115 °С. Прямий контакт пари з полімерними зернами забезпечує миттєвий рівномірний прогрів, внаслідок чого гранули вдруге розширюються, деформуючись та зварюючись між собою. Це дозволяє отримати модель з гладкою поверхнею та чіткими контурами колосника.

Після завершення циклу нагрівання здійснюється охолодження моделі водою через канали прес-форми до температури 30–40 °С, що забезпечує необхідну жорсткість полімерного каркаса перед розкриттям форми. Готові моделі підлягають остаточній витримці для повної стабілізації розмірів перед складанням у блоки та нанесенням вогнетривкого покриття.

Безавтоклавний метод із безпосередньою подачею пари в робочу порожнину форми на сучасному етапі реалізується у двох основних технологічних варіаціях. Перший різновид передбачає виготовлення особливо тонкостінних (2–3 мм) пінополістиролових моделей у спеціалізованих прес-формах, що оснащені паровою камерою (рис. 3.8). У такій конструкції насичена пара з камери крізь систему вентів (щілинних отворів у стінках робочої порожнини) надходить усередину, забезпечуючи інтенсивний прогрів гранул по всій площі контакту.

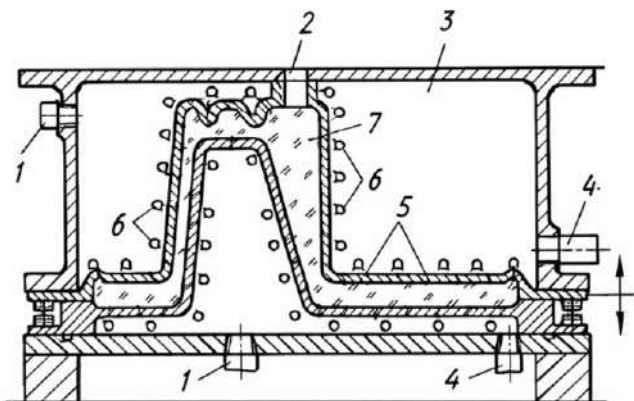


Рис. 3.8. Прес-форма з паровою камерою і вентилями для подачі пари до гранул:

- 1, 4 – отвори для подачі і виходу пари відповідно;
- 2 – отвори для задува гранул; 3 – парова камера;
- 5 – вентилі; 6 – форсунки; 7 – модель

Другий різновид (рис. 3.9) застосовується для отримання масивних моделей із товщиною стінок понад 100 мм, що є актуальним для посилених конструкцій прямих колосників. У цьому випадку прес-форма не має парової камери, а пара подається безпосередньо в об'єм форми через спеціальний перфорований ін'єктор, тоді як вентилі в стінках слугують лише для відведення відпрацьованого теплоносія [58].

Окремої уваги заслуговує високочастотний метод виготовлення пінополістиролових моделей, фізична суть якого полягає у розміщенні заповнених гранулами прес-форм у полі високочастотного конденсатора. Ступінь нагріву діелектричних матеріалів в електричному полі високої частоти визначається їхньою діелектричною проникністю: енергія змінного поля внаслідок діелектричних втрат трансформується у теплову енергію безпосередньо в об'ємі матеріалу.

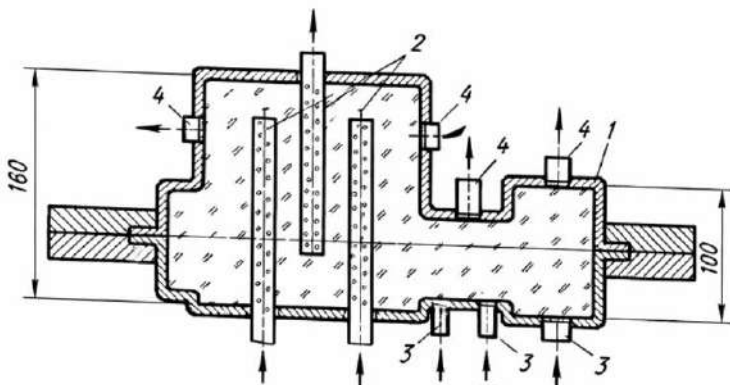


Рис. 3.9. Прес-форма з ін'єкторами для подачі пари до гранул:

- 1 – прес-форма; 2 – ін'єктори; 3 – венті для подачі пари;
4 – венті для виходу повітря і конденсату

Оскільки пінополістирол має вкрай низьке значення тангенса кута діелектричних втрат ($\text{tg}\delta \approx 0,0001$), він практично не нагрівається в електричному полі. Для ініціації процесу використовують спеціальні добавки: попередньо вспінені гранули змочують водою або відповідним розчином. Тонкий шар рідкої фази на поверхні гранул під дією поля миттєво нагрівається, а водяна пара, що утворюється при цьому, здійснює розігрів полімерної основи. На відміну від традиційних парових методів, кількість вологи у цьому процесі мінімальна, вона легко видаляється через перфоровані стінки прес-форми, завдяки чому моделі виходять майже сухими одразу після розкриття оснащення.

Незважаючи на те, що питома вартість енергії при високочастотному нагріві дещо перевищує витрати при методі теплового удару, цей метод має суттєву перевагу у гнучкості виробництва. Завдяки простоті виготовлення та низькій вартості неметалічних прес-форм (зокрема, зі склопластиків або деревини), високочастотне спінювання є перспективним для

умов дрібносерійного виготовлення прямих колосників, де важливо мінімізувати витрати на підготовку виробництва [58].

Проте найбільш радикальним кроком у напрямку скорочення термінів дозаливного етапу є впровадження адитивних технологій. У сучасній ливарній практиці для ЛГМ-процесу все частіше застосовується 3D-друк моделей, що дозволяє реалізувати складні геометричні форми, які важко отримати традиційним пресуванням у металевих формах. Перехід до адитивного виготовлення моделей вимагає врахування особливостей їхнього конструювання саме під подальшу газифікацію в ливарній формі. Зокрема, це стосується забезпечення необхідної швидкості деструкції матеріалу та мінімізації об'єму продуктів розкладу [63].

При виборі між традиційним пінополістиролом та матеріалами для 3D-друку ключовим критерієм виступає зольність та динаміка газифікації. Традиційний спінений полістирол (EPS) має вкрай низьку зольність (0,02–0,05%), що є еталоном для ЛГМ-процесу. На відміну від нього, монолітна структура надрукованої моделі (навіть при низькому відсотку заповнення) зумовлює виділення значно більшого об'єму газів на одиницю об'єму моделі.

Тому при конструюванні моделей під 3D-друк необхідно передбачати спеціальні компенсаційні порожнини або застосовувати мінімально можливу товщину стінок (оболонковий друк), щоб швидкість газифікації не перевищувала пропускну здатність протипригарного покриття. Такий підхід дозволяє уникнути дефектів газового походження та науково обґрунтовано перейти від цифрової моделі до якісного сталевого виливка [63].

Водночас, незважаючи на технологічну привабливість 3D-друку для одиничних замовлень, у багатосерійному виробництві економічна ефективність залишається на боці традиційного формування у формах. Для реалізації вищезазначених методів термічного формування особливе значення має конструкція та матеріал оснащення. Прес-форми

для виготовлення моделей прямого колосника найчастіше виготовляють з алюмінієвих сплавів, що зумовлено їх високою теплопровідністю, рідше – із конструкційних сталей. Конструкція прес-форми повинна володіти необхідною технологічною міцністю і жорсткістю, оскільки при спінюванні гранул у замкненому об'ємі тиск на стінки може досягати 0,6 МПа. Для запобігання деформації робочих поверхонь на зовнішніх стінках прес-форм обов'язково передбачають ребра жорсткості.

Для забезпечення швидкого нагріву гранул, мінімізації втрат тепла та рівномірного протікання процесу формування, прес-форми необхідно виготовляти рівностінними з товщиною стінок у межах 8–10 мм. Така конструктивна особливість забезпечує також синхронне охолодження всіх частин моделі, що критично важливо для уникнення термічних деформацій перед її вилученням. Металеві прес-форми можуть бути виготовлені як методом лиття, так і механічною обробкою з прокату, поковок або штампованих заготовок. Відокремлені елементи прес-форм повинні бути прецизійно підігнані один до одного по площинах роз'єму, а їх стінки повинні мати систему перфорації (венти) для безперешкодного виходу повітря та теплоносія з робочих порожнин.

В умовах багатосерійного і масового виробництва прямих колосників окремі пінополістиролові моделі перед формуванням збирають у блоки, за принципом, аналогічним литтю за моделями, що виплавляються. Моделі виливків часто отримують у прес-формах спільно з елементами ливникової системи – колектором і живильниками. Збірку індивідуальних моделей у єдиний блок здійснюють шляхом склеювання, зварювання або за допомогою спеціальних конструкційних шпильок і пазів. Сформований модельний блок подають на стадію нанесення вогнетривкого покриття (забарвлення), а після завершення циклу сушки – безпосередньо на операцію формування в опоку [58].

Для виготовлення форм у багатосерійному і масовому виробництві виливків за ЛГМ-процесом найбільш поширеними є

сипкі формувальні матеріали без додавання зв'язуючого. Відповідно до фізико-хімічних характеристик наповнювачів, детально розглянутих у п. 3.4.1, використання саме сухих кварцових пісків дозволяє мінімізувати витрати на підготовку сумішей, спростити процес вибивки форм та забезпечити високу газопроникність середовища, що є критичним при газифікації полімерної моделі.

Технологічний процес формування реалізується в певній послідовності (рис. 3.10). На дно спеціалізованої опоки-контейнера насипають шар сухого піску завтовшки 100–150 мм, який піддається попередньому ущільненню за допомогою вібрації. Після створення піщаної постелі в опоку встановлюють підготовлений та офарбований вогнетривким покриттям модельний блок колосників. Далі здійснюється остаточне заповнення опоки піском при одночасній вібрації контейнера. Віброущільнення забезпечує щільну упаковку зерен піску навколо складного контуру моделі, що гарантує відсутність деформацій при заміні полімеру металом. Ущільнену таким чином форму накривають металевою кришкою з отворами для вільної евакуації газів, встановлюють ливникову чашу і, за необхідності, баластний вантаж для компенсації тиску металу.

При виготовленні форм методом засипки моделей сухим піском критичне значення має конструкція тари. Використовуються спеціальні опоки-контейнери, стінки яких обладнані вікнами та отворами, закритими дрібною металевою сіткою (рис. 3.11). Така перфорація необхідна для ефективного відведення продуктів термічної деструкції пінополістиролу, що виділяються у великому об'ємі під час газифікації моделей. Наявність сітки перешкоджає висипанню піску, одночасно забезпечуючи безперешкодний вихід газоподібної фази в систему витяжної вентиляції або безпосередньо в атмосферу цеху.

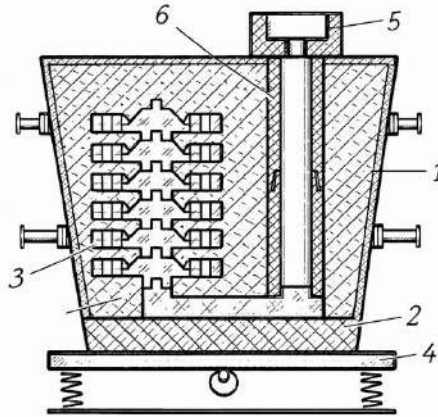


Рис. 3.10. Формування по пінополістироловим моделям із засипкою сухим піском:

1 – опока-контейнер; 2 – піщина постіль; 3 – модель; 4 – вібратор; 5 – чаша; 6 – керамічний стояк

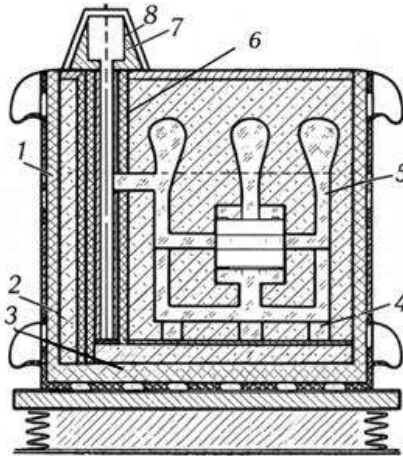


Рис. 3.11. Конструкція опоки- контейнера:

1 – стінки з отворами; 2 – постіль з рідкоскляною сумішшю; 3 – дно; 4 – пінополістиролова модель ливникової системи; 5 – модель відливка; 6 – керамічний стояк; 7 – чаша; 8- азбестова кришка

При виготовленні відливань у формах з сухого піску особливі вимоги пред'являють до ливникових систем. Вони повинні забезпечувати не тільки плавний рух металу під час заливки, але і певну швидкість його підйому у формі. Це досягається застосуванням спеціальних порожнистих стояків, виконаних з керамічних трубок, і регулюванням перетину в ливниковій чаші. Заливку форм проводять рівномірно при постійному гідростатичному натиску з використанням мікропроцесорних датчиків, зв'язаних із заливки електронно-обчислювальної машини, що управляє процесом. Ці датчики контролюють швидкість витрати рідкого металу із заливального пристрою і швидкість газифікації моделі.

Технологічний процес виготовлення форм по газифікованих моделях при використанні формувальних пісків без зв'язуючого дозволяє автоматизувати весь цикл виготовлення відливань, починаючи від підготовки суспензійного полістиролу, виготовлення моделей, збірки їх в модельні блоки, офабовування, формування, заливки металом, вибивки, обрубкування, очищення і контролю відливань, а також регенерації формувального піску.

Необхідно відзначити, що автоматичні лінії виробництва відливань по газифікованих моделях можуть бути багатономенклатурними, на одній лінії можна проводити різні відливки без переналадки самої лінії. Це створює необхідні передумови для створення гнучких, швидко реагуючих на зміну номенклатури відливань виробництва [58].

Логічним розвитком технології лиття по моделях, що газифікуються, став пошук методів, які дозволили б нівелювати основний недолік процесу – інтенсивне газовиділення в контакті з розплавом.

У 1980 році був розроблений ще один різновид процесу виготовлення відливань по газифікованих моделях, яка за кордоном одержала назву «Реплікаст-процес», а в Україні – «ГАМОЛИВ-процес» (Газифікована Модель, Литво, Вакуум). На відміну від базових схем, де вакуумування використовувалося

переважно для стабілізації сухого піску, розглянутих вище, у даному випадку воно набуває нової технологічної функції.

У даний час розроблені ще два різновиди цього процесу: «Реплікаст КФ-процес» і «Реплікаст ЗП-процес». У першому випадку пінополістиролова модель заздалегідь перед заливкою випалюється з керамічної форми, а в другому випадку вона газифікується металом безпосередньо в процесі заливки.

При розробці цих способів вдалося об'єднати переваги способу литва по моделях, що виплавляються, вакуумного формування і ЛГМ-процесу. За технологією на пінополістиролову модель наносять вогнетривке покриття, що створює при сушінні міцну оболонку. Після встановлення блоку в опоку та засипки піском, у контейнері створюють вакуум, який підтримується протягом усієї заливки.

Важливо підкреслити: якщо раніше вакуум тримав пісок навколо моделі, то в «ГАМОЛИВ-процесі» він забезпечує надійну фіксацію керамічної оболонки всередині піщаного наповнювача. Створюючи негативний тиск у товщі сухого піску, вакуумна система притискає вогнетривку скоринку до стінок сформованого гнізда, запобігаючи її руйнуванню після газифікації моделі. Це гарантує ідеальну геометрію відливка та ефективно відведення газів безпосередньо крізь пори кераміки в пісок і далі в систему фільтрації.

Істотною відмінністю «ГАМОЛИВ-процесу» від класичного «Реплікаст-процесу» є двостадійне видалення моделі. Видалення ведуть у два прийоми: спочатку першою порцією металу газифікують основну частину моделі, а забруднений продуктами деструкції метал зливають. Після цього форму остаточно заповнюють чистим розплавом. Така «промивка» форми металом гарантує отримання виливків з максимально чистими поверхнями та стабільною структурою.

Незважаючи на високу металургійну якість виливків, що досягається в «ГАМОЛИВ-процесі» завдяки двостадійній заливці, цей метод є обмеженим у застосуванні через високу енергоємність та значні втрати металу на етапі «промивки»

форми. Для серійного виробництва прямих колосників найбільш раціональним залишається згаданий вище класичний ЛГМ-процес із вакуумною стабілізацією форми, оскільки він забезпечує оптимальний баланс між собівартістю та необхідною якістю поверхні.

Фундаментальні механізми взаємодії газифікованої моделі з вакуумованим піском та режими видалення продуктів деструкції полістиролу детально вивчалися на спеціалізованих стендових установках. Такий підхід дозволив у контрольованих умовах встановити закономірності заповнення опок і фільтрації газів, що лягли в основу сучасних промислових регламентів.

Типовим прикладом такого дослідницького обладнання є установка, схема якої наведена на рис. 3.12. Вона призначена для виготовлення відливань по пінополістироловим моделям із застосуванням комбінованого методу формування.

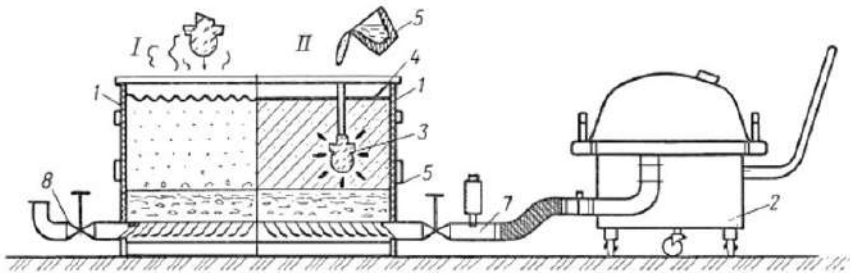


Рис. 3.12. Схема дослідної установки для виготовлення відливань у вакуумованих формах:

- I – позиція формування моделі; II – позиція заливки металу і газифікації моделі; 1 – опока-контейнер; 2 – витяжний вентилятор; 3 – моделі відливки; 4 – поліетиленова плівка; 5 – ківш з металом; 6 – сітка, 7 – розподільна камера, 8 – трубопроводи

Принцип роботи подібних установок базується на ефекті псевдозрідження наповнювача. На першому етапі кварцовий пісок під дією стислого повітря переходить у стан «киплячого шару» (позиція I), що забезпечує вільне занурення моделі. Після цього подача повітря припиняється, вмикається система вакуумування, і пісок миттєво ущільнюється навколо моделі, яка згодом газифікується при заливці металу (позиція II).

Конструктивно установка складається з двох основних вузлів: зварної формоутворювальної місткості (діаметром 400 мм та заввишки 500 мм) та витяжного вентилятора, що забезпечує необхідне розрідження. Ключовим елементом конструкції є розподільна камера (форкамера), відокремлена від робочого об'єму керамічною плитою та фільтруючою сіткою. Така будова гарантує рівномірність подачі стисненого повітря для зрідження та стабільність вакууму по всьому перетину форми.

Для забезпечення герметичності та підтримки стабільного розрідження дзеркало форми покривається поліетиленовою плівкою. Досвідним шляхом встановлено, що динаміка заливки рідким металом безпосередньо залежить від ступеня створеного розрідження, щільності пінополістиролу та конфігурації моделі. Гази, що виникають при газифікації, примусово видаляються вентилятором крізь товщу наповнювача, що забезпечує екологічність процесу та високу якість поверхні виливка. Після завершення кристалізації та охолодження відливка система вакуумування вимикається, що дозволяє легко вилучити готовий виріб із незв'язаного піску [58].

Яскравим прикладом сучасної реалізації технології є схема напівавтоматичної лінії для виготовлення відливок «колосник» (рис. 3.13), розроблена консорціумом італійських фірм «ФАТА» і «Тексид». У міжнародній практиці ця технологічна схема отримала назву «Полікаст-процес».

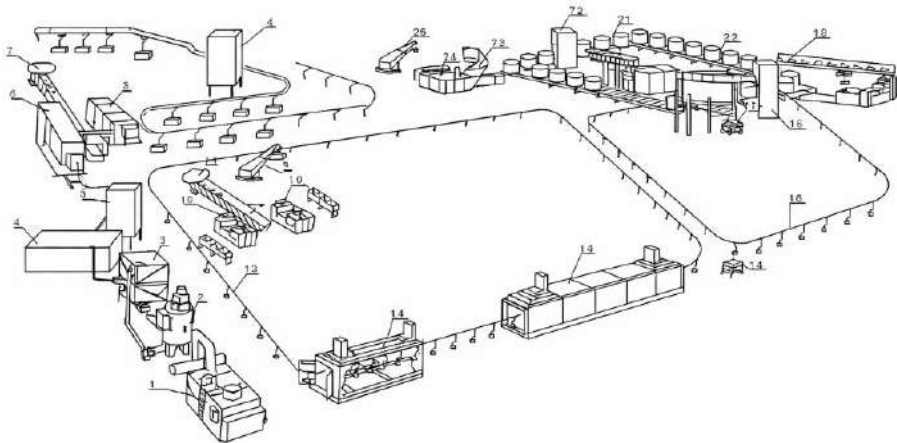


Рис. 3.13. Схема напівавтоматичної лінії для виготовлення відливів колосник по пінополістироловим моделям у формах з сухого кварцового піску без зв'язуючого:

- 1 – установка-класифікатор пінополістиролу;
- 2 – передвспінювач; 3 – установка для просіювання і перетирки;
- 4 – ємність для просушування пінополістирола на повітрі;
- 5,8 – сушильна шафа; 6 – автоматичний блок для спінювання;
- 7 – стіл для сортирування моделей; 10 – верстат для виготовлення елементів ливниково-живлячої системи;
- 12, 16, 20 – конвейер; 11 – стіл для склеювання моделей,
- 13 – камери нанесення суспензії; 14 – камера сушки;
- 9, 15, 23,25 – маніпулятор; 17 – формувальний стіл;
- 18 – автомат для накриття опок плівкою; 19 – ділянка заливки;
- 21 – ділянка охолодження; 22 – автомат для зняття плівки з опок; 24 – вибивні ґрати

Склад та етапи роботи лінії:

Згідно з наведеною схемою (рис. 3.13), технологічний цикл включає повний комплекс операцій – від підготовки сировини до фінішної обробки виливка:

1. Підготовка пінополістиролу: Суспензійний полістирол проходить стадії сушіння та класифікації за фракціями в установці (1), після чого спрямовується на попереднє спінювання (2). Отримані гранули просіюються (3) через сита $1,5 \times 1,5$ мм для видалення агломератів та стабілізуються у ємностях (4) і сушильних шафах (5).

2. Виготовлення моделей: Безпосередньо на ділянці формування моделей (6) створюються робочі елементи, які після сортування (7) та остаточної витримки (8) передаються на збірку. Паралельно на спеціалізованих верстатах (10) виготовляються елементи ливниково-живильної системи, що згодом з'єднуються з моделями відливок у єдині блоки на складальних столах (11).

3. Підготовка модельних блоків: Зібрані блоки транспортуються конвеєром (12) до агрегата фарбування (13), де наноситься вогнетривка суспензія, та проходять сушіння в камері (14).

4. Формування та заливка: Готові блоки з вогнетривкою оболонкою за допомогою маніпуляторів (15) переміщуються на ділянку формування. Блоки фіксуються в опоках-контейнерах під час засипки сухим піском. Після віброущільнення (17) опоки герметизуються спеціальною полімерною плівкою (18), підключаються до вакуумної системи та спрямовуються на заливку (19).

5. Фінішні операції: Після охолодження на конвеєрі (20) плівка знімається (22), а опоки подаються до вибивної ділянки (24). За допомогою маніпуляторів готовий виріб вилучається з піску та спрямовується на очищення та слюсарну обробку (25), а опоки повертаються на новий цикл формування.

Ефективне функціонування такої високотехнологічної лінії можливе лише за умови суворого дотримання технологічних параметрів на кожному етапі виробництва. З метою систематизації цих вимог та практичного забезпечення виготовлення конкретної номенклатури виробів було опрацьовано відповідну нормативну документацію. Практична реалізація запропонованих рішень знайшла відображення у

промислових технологічних картах, які визначають чітку структуру операцій та встановлюють граничні значення параметрів процесу.

На рисунку 2.7 наведено технологічну карту виготовлення газифікованих моделей «колосник», що регламентує режими спінювання, час стабілізації та критерії якості отриманих модельних блоків.

Відповідно, на рисунку 2.8 представлено карту безпосередньо процесу отримання самих виливок. У ній зафіксовано параметри віброущільнення, необхідний ступінь розрідження (вакуумування) та температурні режими заливки, дотримання яких є вирішальним для забезпечення експлуатаційної надійності колосників у складних температурних умовах.

На рис. 3.14 наведено технологічну карту виготовлення газифікованих моделей «колосник», що регламентує режими спінювання, час стабілізації та критерії якості отриманих модельних блоків:

- матеріали та підготовка: використовується полістирол марок Д833А або Д833В з щільністю спіненого матеріалу 0,022–0,028 г/см³. Час попереднього спінювання становить 12 хвилин, що забезпечує стабільну структуру гранул;

- режим спікання: процес відбувається в автоклавах при температурі 150–155°C та тиску 2,4–2,5 кг/см². Це критичні параметри, що гарантують гладку поверхню моделі та відсутність недоливів;

- нанесення покриття: використовується вогнетривка фарба марки ДС-1. Контролюється в'язкість фарби (1,75±0,02 г/см³) та спосіб сушки (повітряний при 45±5°C). Важливо, що час сушки покриття становить 4 години, що мінімізує залишкову вологу;

- геометрія блока: в один блок збирається 5 моделей колосників. Вказана вимога: «перетиски виконувати максимально близько до тіла колосника», що полегшує подальше відокремлення виливків від ливникової системи.

Відповідно, на рис. 3.15 представлено карту безпосередньо процесу отримання самих виливок. У ній зафіксовано безпосередньо металургійний етап і параметри формування:

- матеріал виливка: сталь марки 40Х24Н12СЛ (згідно з ДСТУ 977-88). Це жароміцна сталь, що ідеально підходить для роботи колосників у термічно навантажених зонах;

- параметри заливки: температура металу в печі перед випуском становить $1520 \pm 10^\circ\text{C}$. Маса одного блока виливків – 28 кг, з яких 7 кг припадає на ливникову систему;

- формування та вакуумування: використовується сухий кварцовий пісок марки 2К₁О₂О₃. Розмір опоки: 800×1100×600 мм або 900×1200×400 мм. Глибина вакууму під час заливки: 0,4–0,6 кг/см². Час витримки під вакуумом після заливки – 5 хвилин, а загальний час витримки в опоці до вибивки – не менше ніж 45 хвилин. Це забезпечує повне завершення кристалізації та запобігає деформації виливків.

Узагальнюючи вищевикладене, слід зазначити, що представлений комплекс – від аналізу фізико-хімічних процесів на експериментальній установці до впровадження автоматизованих ліній з повним документальним супроводом – дозволяє забезпечити високу рентабельність і якість виробництва сталевих литва за моделями, що газифікуються.

				Найменування вилки	Шифр креслення	Марка матеріалу
				Колосник		Полістирол
Шифр оснащення						
Моделі вилки		Моделі вилки 2		Моделі ЛЖС		
		-----		Ручне виготовлення		
Час попереднього спінювання, хв		12		Щільність спіненого полістиролу, P=г/см ³		0,022-0,028
Режим спікання моделі						
Автоклав		от, P=кг/см ² °C		до, P=кг/см ²		
ГК-100-2		2,5		2,4		
Chirana PS 50V		155		150		
Матеріал моделі		Пінополістирол Д833А Д833В		Вид вогнетривого покриття		ДС-1
Маса, гр						
Маса моделі вилки, гр/норма витрат		Маса модельного блока, гр		Маса вогнетривого покриття, гр/норма витрат		Маса фарбованого блока, гр
17,8/24,435		120		145/154,32		265
Кількість моделей в блоці				5		
В'язкість (щільність) фарби, сек (г/см ³)		1,75±0,02		Кількість слоїв		1
Спосіб сушки		Повітря		Тем-ра сушки вогнетривого покриття, °C		45±5
Час сушки вогнетривого покриття, годин		4		Час сушки до видічі на ділянку, годин		Не менше ніж 3
Зборку виконувати згідно блока -еталона						
Зборку виконувати згідно блока -еталона						
ТК						
Технологічна карта						

Рис. 3.14. Технологічна карта виготовлення пінополістиролових модельних блоків вилков «Колосник»

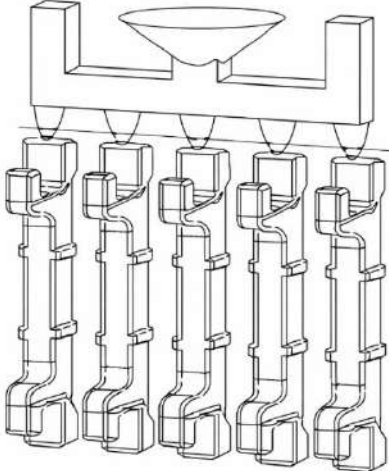
Технологічна карта									
Дубл.									
Взам.									
Повл.									
						Шифр			
Розробив						Найменування вилки "Колосник"			
Перевірил									
БТК									
Затвердив									
Вилка									
Марка матеріалу	ДСТУ	Група контролю	Кількість у блоці						
Сталь 40Х24Н12СЛ	977-88	1-ша	5						
Маса, кг									
Вилки	Блока		Ливникова система						
4,2	28.		7.						
Кількість блоків в опоці	Розмір опоки		Температура в печі перед випуском, °С						
10-16	800*1100*600 900*1200*400		1520±10						
Розтань між блоками, мм	Сухий наповнювач		Вакуум, кгс/см						
Не менше ніж 35	Пісок кварцовий 2К.О.О.		0,4-0,6						
Час витримки під вакуумом після заливки, хв	Час витримки в опоках, хв		Спосіб лиття						
5	Не менше ніж 45		Lost foam						
Термообробка: -----									
									
Вилки відбивати, місця злому зачистити. Оброблення дефектів здійснюється згідно вимог									
ТК	Технологічна карта								

Рис. 3.15. Технологічна карта виготовлення виливок «Колосник»

ВИСНОВКИ

У результаті виконаних досліджень здійснено комплексний аналіз умов роботи колосників конвеєрних агломераційних і випалювальних машин та встановлено закономірності впливу теплових, механічних і хімічних факторів на процеси їх зношування і руйнування. Показано, що колосники працюють в умовах складного напружено-деформованого стану, зумовленого поєднанням циклічних температурних впливів, нерівномірного механічного навантаження з боку шару окатишів та дії агресивного газового середовища.

Встановлено, що характер і інтенсивність зношування колосників істотно змінюються вздовж довжини випалювальної машини залежно від технологічної зони. У зоні завантаження переважає механічний та абразивний знос, зумовлений дією шару окатишів, ударними навантаженнями та нерівномірним розподілом контактних напружень за відсутності високих температур. У подальших зонах запалювання та випалу домінуючим фактором стає термомеханічний вплив, пов'язаний із зростанням температур, наявністю значних температурних градієнтів і циклічністю теплових навантажень. Нерівномірність температурного поля по довжині та ширині колосникового полотна в цих зонах призводить до виникнення локальних термічних деформацій, які з часом спричиняють утворення тріщин і втрату геометричної стабільності елементів. Проведений аналіз механізмів зношування показав, що руйнування колосників має багатофакторний характер і обумовлене одночасною дією абразивного зносу, високотемпературної корозії та термічної втоми матеріалу. При цьому домінуючий механізм зношування змінюється залежно від зони машини та режиму її роботи, що необхідно враховувати при виборі матеріалів і конструктивних рішень.

Дослідження впливу матеріального складу та технології виготовлення колосників дозволило встановити, що підвищення їх ресурсу можливе лише за умови комплексного підходу, який

поєднує оптимізацію хімічного складу сплавів, удосконалення структури матеріалу та раціональну організацію технологічного процесу лиття і термічної обробки. Використання жаростійких і жароміцних сплавів без урахування реальних умов експлуатації не забезпечує суттєвого зростання довговічності колосників.

На основі отриманих результатів обґрунтовано доцільність удосконалення конструкції колосників з урахуванням особливостей теплового та механічного навантаження в різних зонах випалювальної машини. Запропоновані підходи до оптимізації геометрії та технології виготовлення колосників дозволяють знизити рівень локальних напружень, підвищити рівномірність температурного поля та зменшити інтенсивність зношування в найбільш навантажених ділянках.

Практична значущість результатів монографії полягає у можливості їх використання при розробці технічних рішень з модернізації колосникових решіток існуючих випалювальних машин, а також при проектуванні нового обладнання. Запропоновані рекомендації можуть сприяти зниженню експлуатаційних витрат, підвищенню надійності роботи випалювальних агрегатів і стабілізації якості готової продукції.

Монографія базується на узагальненні результатів теоретичних досліджень, аналізі літературних джерел і даних промислової експлуатації, а також на власних напівпромислових і виробничих спостереженнях. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні нових і модернізації існуючих випалювальних машин, оптимізації режимів роботи колосників та підвищенні їх експлуатаційної надійності. Крім того, результати дослідження відкривають можливості для впровадження інноваційних конструкцій та матеріалів у промислове виробництво, що сприятиме зниженню енерговитрат, підвищенню стабільності технологічного процесу та покращенню якості готової продукції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ефименко Г. Г., Черный В. Г. Доменное производство Украины и передовых индустриальных стран мира – состояние, проблемы, перспективы развития. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2007. № 6. С. 7–13.

2. Мищенко И. М., Хлапонин Н. С., Шаповалова Н. Г. Направление развития агломерационного производства Украины. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2006. № 2. С. 12–16.

3. Новое направление в производстве железорудных материалов для доменного передела / Г. Г. Ефименко и др. *Новини науки Придніпров'я*. 2010. Травень. С. 144–148.

4. Bizhanov A., Chizhikova V. *Agglomeration in Metallurgy*. London : Springer, 2020. 278 p.

5. Ефименко Г. Г., Гиммельфарб А. А., Левченко В. Е. *Металлургия чугуна*. Киев : Вища школа, 1981. 496 с.

6. Кривченко Ю. С., Шишняк Ю. Т. Проектирование и строительство агломерационных фабрик для черной металлургии. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2003. № 3. С. 7–9.

7. Biswas A. K., Ray S. C. *Ironmaking and Steelmaking: Theory and Practice*. New Delhi : PHI Learning, 2018. 612 p.

8. Bhagat R. P. *Agglomeration of Iron Ores*. Boca Raton : CRC Press, 2019. 438 p.

9. Zhu D.-q., Pan J., Lu L., Holmes R. J. *Iron ore pelletization. Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability / ed. P. D. Fehlhammer*. Cambridge : Woodhead Publishing, 2015. 478 p.

10. Narasimhan S., Balakrishnan V. *Advances in Agglomeration and Pelletization*. Amsterdam : Elsevier, 2021. 322 p.

11. Gupta R. K. *Iron Ore Pelletization*. New York : Elsevier, 2014. 530 p.

12. Анализ недостатков современного агломерационного процесса и комплексный подход к их

преодолению / Г. В. Губин и др. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2008. № 7. С. 93–96.

13. Гасик М. И., Лякишев Н. П. *Теория и технология электрометаллургии ферросплавов*. Москва : СП Интермет Инжиниринг, 1999. 764 с.

14. Park J. A Short Review of the Effect of Iron Ore Selection on Agglomerate Phase Composition. *Minerals*. 2021. Vol. 12, No. 1. P. 1–14.

15. Сигов А. А., Шурхал В. А. *Агломерационный процесс*. Киев : Техника, 1969. 232 с.

16. Журавлев Ф. М., Малышева Т. Я. *Окатыши из концентратов железистых кварцитов*. Москва : Metallurgia, 1991. 127 с.

17. Агрегаты для обжига железорудных окатышей / А. А. Патлах и др. *Обзорная информация. Серия 3. Окускование руд*. Москва : ЦНИИ ЧМ, 1972. Вып. 6. 43 с.

18. Бережной Н. Н., Губин Г. В. Развитие наиболее распространенных способов обжига железорудных окатышей. *Обзорная информация. Серия 3*. Москва : ЦНИИ ЧМ, 1977. Вып. 2. 16 с.

19. Обжиг окатышей на машинах конвейерного типа / Г. М. Майзель и др. *Обзорная информация. Серия 3*. Москва : ЦНИИ ЧМ, 1975. Вып. 1. 18 с.

20. Gery E. Boullitage du mineral de fer. *Circulaire d'informations techniques*. 1977. № 6. P. 1373–1382.

21. Snare R. F., Hauson G. M. The recoup-system – a new method of heat reconheration in the grate – kiln system. *Ironmaking Proceedings*. 1976. Vol. 35. P. 164–181.

22. Теоретические основы производства окускованного сырья : учеб. пособие / Д. А. Ковалев и др. Днепропетровск : ИМА-Пресс, 2011. 476 с.

23. Dean J. A. *Lange's Handbook of Chemistry*. 15th ed. New York : McGraw-Hill, 1999. 1561 p.

24. Гасик М. И., Учитель А. Д., Панченко А. Н. *Исследование химической эрозии колосников обжиговых*

конвейерных машин при упрочнении железорудных окатышей (Сообщение 2). *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2008. № 2. С. 26–31.

25. Факторы, определяющие работоспособность колосников обжиговых конвейерных машин / А. Н. Панченко и др. *Нові технології*. 2008. № 1 (19). С. 241–245.

26. Влияние технологического режима работы обжиговой машины на стойкость колосников / А. Д. Учитель и др. *Нові технології*. 2009. № 4 (22). С. 199–202.

27. Учитель А. Д., Панченко А. Н., Пополов Д. В. Исследование физико-механических свойств электросталей, обеспечивающих повышенную эксплуатационную стойкость колосников обжиговых и агломерационных машин. *Вісник ПДТУ. Серія: Технічні науки*. 2015. Вип. 31. С. 14–20.

28. Ерозійний знос вантажонесучого полотна обпалювальних машин під впливом залізорудних окатишів / Ю. О. Маліновський та ін. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. № 3 (100). С. 49–63.

29. Лебедев И. К. Износ поверхностей нагрева паровых котлов. Москва : Энергия, 1980. 256 с.

30. Непомнящий Е. Ф. Трение и износ. Москва : Наука, 1972. 345 с.

31. Колесников Ю. В., Морозов Е. М. Механика контактного разрушения. Москва : Наука, 1989. 224 с.

32. Удосконалення технології та обладнання виробництва залізорудної сировини для сучасної доменної плавки : монографія / В. П. Лялюк та ін. *Кривий Ріг : Діонат*, 2017. 368 с.

33. Колосник агломерационной или обжиговой машины : а. с. 428160 СССР, МКИ F 23 h 13/00. № 1809253/22-2 ; заявл. 13.07.72 ; опубл. 15.05.74, Бюл. № 18. 2 с.

34. Колосник : а. с. 866339 СССР, МКИ F 23 h 7/12. № 2881425/24-06 ; заявл. 17.12.79 ; опубл. 23.09.81, Бюл. № 35. 2 с.

35. Плитчатый колосник : а. с. 1086304 СССР, МКИ F 23 h 17/10. № 3545379/24-06 ; заявл. 03.12.82 ; опубл. 15.04.84, Бюл. № 14. 2 с.
36. Колосник обжиговой тележки : а. с. 1532790 СССР, МКИ F 27 B 21/02. № 4294778/31-02 ; заявл. 05.08.87 ; опубл. 30.12.89, Бюл. № 48. 3 с.
37. Колосник агломерационной або обпалювальної машини : пат. 24099 Україна, МПК F27B 21/08. № 4635222 ; заявл. 09.01.1989 ; опубл. 31.08.1998, Бюл. № 4.
38. Колосник : а. с. 550521 СССР, МКИ F 27 B 21/06. № 2173420/02 ; заявл. 19.09.75 ; опубл. 15.03.77, Бюл. № 10. 2 с.
39. Колосник агломерационной або обжиговой машини : пат. 26112 Україна, МПК F27B 21/08. № 4671232 ; заявл. 03.04.1989 ; опубл. 30.04.1999, Бюл. № 2.
40. Колосник рухомого візка агломерационной або обпалювальної машини : пат. 44490 Україна, МПК F27B 21/06. № 201207527 ; заявл. 20.06.2012 ; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1.
41. Технічна документація на колосники обпалювальних машин іноземного виробництва (Польща, Німеччина, Македонія). Архівні матеріали КП «ЗЛМЗ», 2007–2014.
42. Колосникова решітка конвєсрної машини : пат. 896 Україна, МПК F27B21/06. № 2000095197 ; заявл. 08.09.2000 ; опубл. 16.07.2001, Бюл. № 6.
43. Технічне креслення колосника обпалювальної машини № ОБ-403.01. ПАТ ЦГЗК, ФОК, 2016. 1 арк. (Архів ПрАТ «Центральний ГЗК»).
44. Colombier L., Hochmann J. Aciers inoxydables, aciers réfractaires. Paris : Dunod, 1955. 526 p.
45. Панченко А. Н., Иванов А. С. Выбор сплавов для изготовления колосников аглолент и обжиговых машин. Стратегия качества в промышленности и образовании : сб. докладов III Междунар. конф. Болгария : Фортуна, 2007. С. 424–428.

46. Ямшинский М. М., Федоров Г. Е., Платонов Е. А. Эксплуатационные свойства литейных хромоалюминиевых сталей. Литейное производство. 2004. № 9. С. 11–13.
47. Структура и свойства жаростойких хромоалюминиевых сталей / М. М. Ямшинский и др. Литейное производство. 2005. № 10. С. 7–9.
48. Влияние технологических факторов на структуру и свойства жаростойких хромоалюминиевых сталей / М. М. Ямшинский и др. Литейное производство. 2005. № 10. С. 10–12.
49. Малинов Л. С. Безникелевые марганцовистые и хромомарганцовистые стали, чугуны и наплавочные материалы. Metallургическая и горнорудная промышленность. 2003. № 6. С. 62–63.
50. Козлова Н. Н., Доронина Е. В., Матросов Ю. И. Пути создания экономнолегированных сталей и сплавов. Проблемы современной металлургии : сб. науч. тр. ЦНИИчермет. 1982. № 7. С. 169–172.
51. Производство стали в основных электродуговых печах. Технологическая инструкция ТИ-МРК-ЛС-012-2010. Кривой Рог : ОАО Миттал Стіл Кривой Рог, 2010. 48 с.
52. Производство стального литья. Технологическая инструкция ТИ-МРК-ЛС-002-2009. Кривой Рог : ОАО Миттал Стіл Кривой Рог, 2009. 59 с.
53. Могилев В. К., Лев О. И. Справочник литейщика. Москва : Машиностроение, 1988. 320 с.
54. Приготовление формовочных и стержневых смесей, паст и красок : ТИ 013.31550176.038 : технол. инструкция. Кривой Рог : ПАО АрселорМиттал Кривой Рог, 2002. 46 с.
55. Технологічна інструкція «Виготовлення сталевого литва» ТИ-МКР-ЛС-012-2005. Кривий Ріг : ВАТ АрселорМіттал Кривий Ріг, 2005. 75 с.
56. Технологічна інструкція «Виготовлення литва по моделях, що виплавляються». Кривий Ріг : ВАТ КЗГО, 2008. 102 с.

57. Campbell J. Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design. 2nd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2015. 1198 p.

58. Шуляк В. С. Метод лиття по газифіцируемим моделям из пенополистирола. Киев, 1971. 68 с.

59. Дорошенко В. С., Калюжний П. Б., Дьяченко М. М. Лиття за газопроникними полімерними моделями, що газифікуються з відкачуванням по вентканалах газів із робочої порожнини форми. Процеси лиття. 2024. № 2 (156). С. 19–28.

60. Дорошенко В., Янченко О. Приклад ливарної технології виробництва широкої номенклатури металоконструкцій для подальшого масштабування в процесі розбудови машинобудування. Journal of Mechanical Engineering and Transport. 2024. Vol. 10, No. 2. С. 11–20. DOI: 10.63341/vjmet/2.2024.11

61. Пластмаси. Ударостійкий полістирол (PS-I). Частина 2. Приготування випробувальних зразків і визначення властивостей : ДСТУ ISO 2897-2:2015 (ISO 2897-2:2003, IDT). [Чинний від 2016-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2015. 14 с.

62. Дорошенко В. С. Оптимізація методу лиття з вакуумуванням полімерної моделі, що газифікується, у піщаній формі. Нові матеріали і технології в машинобудуванні. 2025. № 6. С. 36–43.

63. Дорошенко В. С. Особливості конструювання моделей для їх 3D-друкування і наступної газифікації в ливарній формі. Метал та лиття України. 2022. Т. 30, № 2 (329). С. 54–58.