К.В. Баюл¹, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: baiulkonstantin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1426-7956>

І.Г. Муравйова¹, д-р техн. наук, зав. відділу, e-mail: irinamuravyova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5926-7787>

С.В. Ващенко¹, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: sergeyvaschenko.sv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8344-961X>

О.Ю. Худяков¹, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: khudyakovsashko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6507-1120>

Н.О. Солодка², канд. техн. наук, доц., наук. співр., e-mail: solodka_n_o@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-7545-4969>

¹Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

²ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)

Загальна класифікація та системний підхід до розробки конструкцій валкових пресів

На сучасному етапі розвитку гірничо-металургійного комплексу в Україні та за кордоном особлива увага приділяється створенню технологій, які дозволяють раціонально витратити матеріальні та енергетичні ресурси і зменшити негативний вплив на навколишнє середовище. Брикетування відноситься саме до таких технологій, тому кількість підприємств, які його використовують, а також номенклатура і обсяг виробництва брикетів в останні роки швидко розширюється. Отже, зростає потреба в високопродуктивних, надійних в експлуатації валкових пресах, які є основними агрегатами технологічних ліній брикетування. Важливим етапом при створенні промислової ділянки брикетування є обґрунтований вибір типу і конструктивного виконання преса, що є основним агрегатом для виробництва брикетів. Це робить актуальним необхідність вирішення питань подальшого розвитку засобів і методів проектування валкових пресів, який складається з узагальнення та структурування в єдину систему відомих і новостворених методів. Це дозволить в процесі проектування, для конкретних технологічних задач, визначати найбільш ефективну конструкцію валкового преса. Для вирішення такої задачі важливим етапом, який виконано в цій роботі, є створення узагальненої системи класифікації валкових пресів за конструктивними і технологічними параметрами. Виконано аналіз усереднених показників ефективності валкових пресів різних розробників в порівнянні з пресами конструкції Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України. Вказано на перспективність подальшого розвитку наряду зі створенням вдосконалених валкових пресів з розширеними технологічними та технічними характеристиками. Запропоновано структуру системного підходу до розробки валкових пресів, яка базується на основі методів структурно-параметричного синтезу та аналізу.

Ключові слова: валкові преси, брикетування, дрібнофракційні матеріали, класифікація, системний підхід.

Одними зі способів підготовки сировини до технологічних переділів в металургії, гірничодобувній галузі та хімічній промисловості, що здійснюються з використанням валкових пресів, є методи дроблення, компактування та брикетування [1–5]. Ці методи поєднують те, що в значній кількості варіантів їх реалізації, одним з основних агрегатів технологічної лінії є валкові преси. Однак, залежно від технологічного процесу, ці преси мають певні конструктивні особливості. В першу чергу, це тип формуючих елементів, виконаних на робочих поверхнях валків [6]. Далі різниця може полягати в конструктивному виконанні лінії приводу, несучих силових та захисних елементів.

Все це в сукупності визначає енергосилові параметри роботи пресового обладнання, його продуктивність, стабільність роботи, ресурс експлуатації та якість переробки сировини.

Машини і агрегати, в тому числі і валкові преси, є інструментом реалізації технологічних процесів. Різноманіття типів та конструктивних рішень машин призводить до необхідності їх класифікації за тими чи іншими ознаками. Класифікація машин та агрегатів необхідна при технологічному проектуванні підприємств, розробці систем технічного обслуговування та ремонту, здійсненні митних і транспортних операцій при поставці обладнання і т. ін.

Рис. 1. Продукція, що може бути отримана з використанням валкових пресів: а – брикети; б – компактований матеріал; в – подрібнений матеріал

Відмінність конструктивних та експлуатаційних характеристик відомих на сьогодні валкових пресів потребує здійснення науково обґрунтованої та практично прийнятної їх класифікації, яка дозволить на ранній стадії вибору складу технологічної лінії брикетування та проектування пресового обладнання визначити раціональні базові конструктивні характеристики даного типу обладнання.

Аналіз інформації щодо реалізації технологій та конструкцій пресового обладнання для брикетування [1–22] вказує на те, що для валкових пресів не існує узагальненої систематизованої класифікації їх конструкцій. Є лише розрізненні класифікації за окремими ознаками. Але навіть для них часто немає чітко окреслених меж, за якими та, або інша конструкція преса відноситься до відповідної категорії класифікації.

Метою роботи є формування узагальненої класифікації валкових пресів за технологічними та конструктивними параметрами, аналіз показників ефективності, та формування структури системного підходу до моделювання раціональної конструкції валкового преса.

Валкові преси для переробки дрібнофракційних матеріалів можна виділити за рядом ознак.

1. Технологічний процес, що здійснюється – брикетування, компактування, грануляція, дроблення. На рис. 1 представлено загальний вигляд продукції вказаних технологічних процесів.

Брикетування на сьогодні має три основних напрями:

Холодне брикетування без сполучного при високому тиску пресування реалізується в тих умовах, коли вихідний матеріал має таку молекулярну структуру, форму частинок та інші фізико-механічні властивості, що дозволяють отримувати міцний кусковий продукт в процесі пресування [25]. Типовими прикладами таких матеріалів є значна кількість полімерних матеріалів у вигляді дрібних гранул, мінеральні матеріали з високим вмістом глинозему, негашене вапно CaO , каустичний магнезит MgO .

Холодне брикетування зі сполучним, як правило, реалізується у процесах брикетування при низьких та середніх значеннях тиску пресування (до 100 МПа) [26], але існують деякі специфічні матеріали та технології, виробництво якісних брикетів з яких може бути реалізовано тільки за умови застосування сполучних речовин та високого тиску пресування (≥ 100 МПа) [27].

Значна частина матеріалів, що брикетуються, не мають самі по собі необхідних сполучних властивостей та, як правило, є монофракційними з високою міцністю частинок. В цьому випадку доволі часто необхідне додавання одного або комбінації сполучних та допоміжних речовин для надання шихті фізико-механічних властивостей, що дозволяють в процесі брикетування отримувати якісний кусковий продукт. До таких матеріалів відносяться: флюси магнезійні; флюоритовий концентрат з вмістом $\text{CaF}_2 \geq 90\%$, ільменітовий концентрат з вмістом $\text{TiO}_2 \geq 60\%$; хромітова руда і т. ін.

Гаряче брикетування використовують в процесах, коли сполучні властивості вихідного матеріалу активуються в умовах високих температур: гарячебрикетоване залізо (ГБЖ), конвертерний пил та вельцоксид цинку [28–30].

Компактування являє собою процес ущільнення дрібнофракційних сипких матеріалів у валковому пресі з гладкими або профільованими валками, в процесі чого формується фігурна або плоска плитка. Отриманий таким способом компактний матеріал є проміжним продуктом, з якого шляхом дроблення та подальшого просіювання отримують гранули. Ця технологія найбільш поширена при виробництві однокомпонентних (KCl, SOP, AS) та складних добрив (NPK) [31].

Дроблення/подрібнення мінеральної сировини із використанням валкових пресів являє собою процес руйнування у міжвалковому просторі крупних фракцій мінеральної сировини та дозволяє реалізувати спосіб об'ємного руйнування перероблюваного крупнокускового матеріалу. Це дозволяє при раціонально підібраному силовому впливі на перероблюваний матеріал значно зменшити питомі витрати енергії руйнування. Цей процес дозволяє одночасно реалізувати декілька стадій дроблення і подрібнення сировини в одному технологічному агрегаті, що значно знижує витрати енергії на підготовку матеріалу. Управління параметрами процесу дезінтеграції в цій технології дозволяє досягнути заданої крупності дроблення та при необхідності уникнути переподрібнення. Ця технологія є найбільш поширеною при переробці клінкеру, шлаків, вугілля, вапняку тощо. [1, 2].

2. За силовими показниками запропоновано класифікацію пресів двома способами.

Перший визначає тип преса за величиною тиску пресування, а другий – за величиною зусилля

Тип преса	Зусилля на одиницю довжини пресуючої поверхні валків кН/см	Брикетування та компактування	Подрібнення
Високого тиску	150 140 120 100 80 60	Нікелевий порошок Ільменітовий та флюоритовий концентрати Мінеральні руди Вапно негашене Алюмінієва стружка Губчасте залізо Комплексні азотно-фосфорно-калійні добрива (NPK) Каустичний магнезит MgO Сульфат амонію Поварена сіль Сода FGD гіпс	Руди Цементний клінкер
Середнього тиску	40 20	Мідний концентрат Прокатна окалина Хромітова руда Каолін Малеїновий ангідрид	Вугілля
Малого тиску	10 0	Вугілля із сполучним	

Рис. 2. Класифікація валкових пресів за матеріалами, що переробляються, та питомим зусиллям пресування

пресування, що припадає на одиницю пресуючої поверхні валків.

За величиною тиску пресування класифікація брикетних пресів в різних інформаційних джерелах має ряд відмінностей, але загалом вона наступна:

- преси низького і середнього тиску 20–100 МПа;
- преси високого тиску 100–200 МПа;
- преси надвисокого тиску 200–500 МПа.

За розподільним зусиллям пресування, яке припадає на одиницю довжини робочої поверхні валків, класифікація виглядає таким чином (рис. 2):

- низького тиску із розподільним зусиллям пресування до 15 кН/см (150 тс/м);
- середнього тиску з розподільним зусиллям пресування від 15 до 50 кН/см (від 150 до 500 тс/м);
- високого тиску з розподільним зусиллям пресування від 50 до 200 кН/см (≤ 2000 тс/м).

3. Спосіб подачі шихти в осередок деформації валкових пресів може бути:

- гравітаційний – як правило, використовується для матеріалів з насипною щільністю більшою за

0,6 г/см³, до яких відноситься значна кількість металургійних дрібнофракційних та сипких матеріалів;

- примусовий (з використанням підпресовника) – використовується зазвичай для матеріалів з малою насипною щільністю ($\leq 0,6$ г/см³), низькою сипкістю та з волокнистою структурою [32, 33] – лігнін, торф, буре вугілля, вугільні шлами, металургійний пил тощо.

4. За кількістю валків преси поділяють на дво-валкові та багатовалкові.

Двовалкові преси використовуються в технологіях з одностадійним процесом ущільнювання шихти при гравітаційній подачі шихти та при застосуванні підпресовника. На сьогодні вони є найпоширенішим типом валкових пресів для окусування та дроблення промислової сировини.

Багатовалкові преси не знайшли на сьогодні значного поширення завдяки складності конструкції та налагодження процесу виробництва якісних брикетів. Однак, незважаючи на це, преси такого типу мають наступні переваги. Вони дозволяють реалізовувати процес багатостадійного деформування матеріалів

Технологічний процес	Силові характеристики		Спосіб подачі шихти в прес	Кількість валків
Дроблення 	Тиск пресування	Розподільне зусилля пресування	Гравітаційний 	Двовалкові
Брикетування 				
Компактування 			Примусовий 	Багатовалкові
	Низький (20 – 100 МПа)	Низьке (до 15 кН/см)		
	Високий (100 – 200 МПа)	Середнє від 15 до 50 кН/см		
	Надвисокий (200 – 500 МПа)	Високе від 50 до 200 кН/см		
Напрямок потоку ущільнюваної шихти		Розташування валків відносно опор	Пристрій захисту валків від перенавантаження	Продуктивність
Горизонтальний 	Вертикальний 	Симетричне 	Механічний 	Низька (до 5 т/годину)
З нахилом 				Середня (від 5 до 25 т/годину)
Складний 		Консольне 	Гідравлічний 	Висока (≥ 25 т/годину)

Рис. 3. Загальна класифікація валкових пресів за конструктивними та технологічними параметрами

в одному технологічному агрегаті. При цьому в разі реалізації процесів брикетування та компактування матеріалів з малою насипною щільністю та ярко вираженими пружними властивостями можливе отримання якісного кускового продукту та зниження негативного впливу на його споживчі характеристики пружної післядії.

5. За напрямком потоку ущільнюваної шихти:

Горизонтальний – при реалізації такого напрямку пресування осі валків преса розташовані у вертикальній площині. Такий напрямок потоку ущільнюваної шихти має перевагу в тому, що просипання дрібнофракційного матеріалу в зазор між валками виключається. Таким чином, з'являється можливість брикетування матеріалів, близьких до пілоподібного стану (фракція $\leq 1,0$ мм), з підвищеною текучістю та при малій швидкості деформації. Такий напрямок потоку шихти реалізується, як правило, в малотоннажних пресах з консольним розташуванням валків та оснащених шнековим підпресовником.

Вертикальний – найбільш поширений варіант, який використовується як при гравітаційній подачі матеріалу, так і в разі застосування підпресовника. Осі валків пресу в даному разі розташовані в горизонтальній площині. При такому напрямку потоку ущільнюваної шихти забезпечується рівномірний підпор шихти на обидва валки, а також оптимальні умови захоплення та силового впливу з боку валків на матеріал.

З нахилом – використовується в умовах, коли потрібно забезпечити достатній підпор матеріалу в осе-

редку деформації. При цьому, для матеріалів з підвищеною текучістю дозволяє зменшити на більшу величину значення швидкості деформації в порівнянні з горизонтальним потоком, при якому не відбувається просипу шихти у міжвалковий простір. Зазвичай нахил складає $30\text{--}60^\circ$. Але незважаючи на технологічні переваги такого способу реалізації процесу пресування, він не знайшов широкого розповсюдження. Це пов'язано з тим, що при реалізації цього способу де-що ускладнюється конструкція преса, що призводить до підвищення вартості його виготовлення та обслуговування.

Складний – реалізується у багатовалкових системах, які здійснюють процес багатостадійного пресування. Цей спосіб не знайшов широкого застосування, але є доволі перспективним, оскільки дозволяє досягати високих значень деформації матеріалу та в процесах брикетування і компактування дає можливість зменшити вплив пружної післядії на якість готової продукції за рахунок постадійного ущільнення з чередуванням стадій пресування та релаксації.

6. За розташуванням валків відносно підшипникових опор виділяють преси консольні та з симетричним положенням валків [13].

Преси з консольним розташуванням валків зазвичай мають невелику ширину пресуючих поверхонь, приблизно від 50 до 200 мм, та малу продуктивність (до 10 т/год) [18–20]. При цьому такі преси оснащені підпресовниками та мають вертикальне розташування валків для реалізації горизонтального напрямку потоку матеріалу, що пресується. Консольне розта-

шування валків дозволяє виконувати зміну кільцевих бандажів або сегментів, не демонтуючи валки. Це досить гарна перевага в умовах, коли є необхідність в частій та швидкій зміні калібрування пресуючих поверхонь.

Преси з симетричним розташуванням валків є найпоширенішим конструктивним рішенням в валкових пресах. Таке розташування пресуючих поверхонь дозволяє більш рівномірно розподілити навантаження на підшипникові опори. При такому розташуванні діапазон робочої ширини валків становить приблизно від 50 до 1000 мм. Такі преси дозволяють досягнути більш високої продуктивності в порівнянні з консольними (приблизно до 50 т/год).

7. За типом захисту валків від перенавантаження відрізняють преси з механічним [34] та гідравлічним пристроєм [35].

Як правило, механічними пристроями для захисту валків від перенавантаження оснащуються валкові преси малого та середнього тиску пресування (тиск пресування до 100 МПа, або з розподільним зусиллям пресування до 50 кН/см). При цьому загальне зусилля пресування таких пресів не перевищує 2000 кН.

Гідравлічними пристроями для захисту валків від перенавантаження оснащуються преси високого тиску (≥ 100 кН, або з розподільним зусиллям пресування ≥ 50 кН/см). Зусилля пресування таких пресів ≥ 2000 кН.

8. За продуктивністю валкові преси розділяють на три основні групи: низької – до 5 т/год; середньої – від 5 до 25 т/год; високої – понад 25 т/год.

Найбільш поширеними на підприємствах гірничо-металургійного комплексу є преси середньої та високої продуктивності. Для крупних металургійних та гірничодобувних підприємств преси низької продуктивності зазвичай не представляють інтерес, оскільки вони не відповідають обсягам виробництва. Преси високої продуктивності використовують, як правило, на ділянках, де не передбачуване часте переналагодження технологічного процесу з одного матеріалу та типу продукції на інший. Та до того ж доволі часто підприємства створюють високопродуктивні ділянки з переробки сировини з двома потоками, тобто з двома пресами середньої продуктивності, що дозволяє підвищити стабільність та надійність лінії в цілому.

На базі наведених в роботі даних складено схему загальної класифікації валкових пресів за конструктивними та технологічними ознаками, яку представлено на рис. 3.

Представлена класифікація буде використана при розробці системного підходу та методів створення нових модифікацій валкових пресів за модульним принципом на базі структурно-параметричного аналізу та синтезу.

Окрім запропонованої класифікації, при розробці пресового обладнання для брикетування дрібнофракційних матеріалів спеціалістами Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (ІЧМ НАНУ) прийняті та використовуються на практиці наступні показники ефективності конструкції валкових пресів:

а

б

в

Рис. 4. Середні значення показників ефективності валкових пресів: а – питома зусилля пресування; б – питома енергоємність; в – питома металоємність; А – ділянка малого питомого зусилля пресування; Б – ділянка середнього питомого зусилля пресування; В – ділянка високого питомого зусилля пресування; 1 – K.R. KOMAREK Inc.; 2 – ЗАТ «Спайдермаш»; 3 – Вепех; 4 – Luoyang Zhongyuan Mining Machine Manufacture Co., Ltd.; 5 – ІЧМ НАНУ

1. Питома зусилля пресування P_u визначається як відношення максимального зусилля пресування $P_{\max}$ до ширини робочої поверхні валків L_v :

$$P_u = \frac{P_{\max}}{L_v} \quad (1)$$

2. Питома енергоємність E_u являє собою відношення потужності N_r приводу до продуктивності Q_{pr} преса:

Рис. 5. Системний підхід до моделювання раціональної конструкції валкового преса

$$E_u = \frac{N_{pr}}{Q_{pr}}. \quad (2)$$

3. Питома металоємність G_u являє собою відношення маси преса m_{pr} до величини корисного ефекту від його використання або основного технічного параметра, в даному варіанті – продуктивності Q_{pr} :

$$G_u = \frac{m_{pr}}{Q_{pr}}. \quad (3)$$

Показники ефективності валкових пресів прийняті відповідно до методів оцінки ефективності металургійного обладнання [36].

На базі даних, наявних в доступних інформаційних джерелах, виконано порівняльний аналіз валкових пресів різних виробників з валковими пресами конструкції ІЧМ НАНУ (рис. 4).

Серед наведених виробників є провідні світові лідери на ринку валкових пресів – Коерперн (Німеччина), K.R. KOMAREK Inc. (США), обидві з недавнього часу входять до корпорації Коерперн Group, та Верех (США); преси ЗАТ «Спайдермаш» (Росія); преси Luoyang Zhongyuan Mining Machine Manufacture Co., Ltd. (Китай) – один з типових виробників валкових машин в КНР.

Порівняльний аналіз діаграм (див. рис. 4) вказує на те, що за середнім значенням показників питомого зусилля пресування валкові преси ІЧМ НАНУ уступають конкурентам та не досягають показників високого тиску пресування, що вказує на перспективність розробки преса високого тиску з метою розширення технологічних можливостей валкових пресів конструкції ІЧМ НАНУ.

Разом з тим, за показниками питомої енергоємності та металоємності, які є відносними величинами, що визначаються принциповим конструктивними та технічними рішеннями, валкові преси ІЧМ НАНУ мають одні з найкращих показників. Це вказує на те, що принципове конструктивне рішення валкових пресів конструкції ІЧМ НАНУ є раціональним та вартим використання в подальших розробках.

Нині для розробки конструкції валкових пресів, як і більшості сучасних промислових машин і агрегатів, активно застосовуються системи автоматизованого проєктування (САПР) – переважно SolidWorks, Компас та Inventor.

Для створення раціональної конструкції валкового преса наявність стандартного набору засобів САПР є необхідною, але не достатньою умовою у зв'язку з необхідністю вирішення вузькоспеціалізованих завдань, зумовлених технологічними особливостями, умовами виготовлення, монтажу та експлуатації, властивими даному класу машин.

На це вказує і те, що в процесі розвитку технологій і машин для брикетування продовжує вдосконалюватися цілий клас методів і математичних моделей, що дозволяють здійснювати прогноз, оцінку і вибір раціональних енергосилових і технологічних параметрів процесу брикетування, конструкції окремих деталей пресового устаткування і режимів його експлуатації.

Перспективним для вирішення такого завдання є застосування відомих в різних галузях знань структурно-параметричного синтезу і аналізу та розвиток засобів і методів формування нових моделей валкових пресів за модульним принципом, з урахуванням вже відомих розробок.

На рис. 5 наведено узагальнену структуру системного підходу до моделювання раціональної конструкції валкового преса з використанням модульного принципу конструювання, яка відображає основні етапи створення нової модифікації машини даного типу – синтез, аналіз і остаточне формування конструкції преса.

Проєктування нової конструкції валкового преса можна представити у вигляді процесу рішення двох взаємозалежних завдань:

1. Вибору структури преса (типу, кількості, умов взаємодії деталей, вузлів та інших елементів преса), тобто структурний синтез.

2. Вибору числових значень параметрів конструктивних елементів преса, тобто параметричний синтез.

Результат структурно-параметричного синтезу раціональної конструкції валкового преса представляється у вигляді таблиць, графіків і текстових файлів, які містять достатній набір інформації для розробки в системах автоматизованого проєктування пакета конструкторської документації на виготовлення вал-

кового преса. Практичний і теоретичний досвід співробітників ІЧМ НАНУ зі створення валкових пресів і дослідження процесу брикетування дозволяє розробити структуру системи моделювання раціональної конструкції валкових пресів. Для реалізації цієї структури використовуються масиви даних і знань (правила і розрахунково-аналітичні методи):

1. Фізико-механічні характеристики матеріалів що брикетуються:

- коефіцієнти зовнішнього, внутрішнього тертя і бічного тиску;

- експериментально встановлений і математично описаний функціональний взаємозв'язок між тиском пресування і величиною ущільнення шихти, що брикетується;

- характеристики пружної післядії в брикетах і т. д.

2. Моделі процесів, що відбуваються при роботі валкового преса:

- модель процесу брикетування дрібнофракційної шихти в осередку деформації валкового преса;

- модель процесу зношування робочої поверхні валків преса;

- модель для оцінки впливу ступеня зносу робочих поверхонь валків преса на енергосилові і технологічні параметри брикетування і т. д.

3. Моделі основних вузлів преса:

- модель валкового блоку;

- модель пристрою запобігання валків від перевантажень;

- модель лінії приводу преса;

- модель підпресовника (якщо такий передбачений конструкцією, виходячи з вимог технології брикетування).

На основі зазначених масивів даних і знань здійснюється структурний і параметричний аналіз та синтез моделі валкового преса із завданням вхідних параметрів і визначенням значень параметрів основних конструктивних елементів та експлуатаційних характеристик преса.

Висновки

Узагальнено базові технічні і конструктивні особливості та межі технологічного застосування валкових пресів за наступними ознаками: технологічний процес, що здійснюється; силові показники; спосіб подачі шихти в осередок деформації; за кількістю валків; за напрямком потоку ущільнюваної шихти; за розташуванням валків відносно підшипникових опор; за типом захисту валків від перенавантаження; за продуктивністю. На базі виконаного в роботі узагальнення створено класифікацію валкових пресів за конструктивними та технологічними параметрами, яка служить базою для створення системного підходу та розробки методів проєктування валкових пресів за модульним принципом на базі структурно-параметричного аналізу та синтезу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Baum W., Patzelt N., Knecht J. Metallurgical benefits of high pressure roll grinding for gold and copper recovery, Society of Mining Engineering (SME), Denver, Colorado, 1997. P. 111–116.
2. Головань В.И., Губин Г.В., Скляр Л.В. Короткая технологическая схема для обогащения магнетитовых руд с использованием технологии дробилок типа HPGR. *Збагачення корисних копалин: Наук.-тех. зб.* 2015. Вип. 61 (102). С. 37–48.
3. Hryniewicz M., Bembenek M., Gara P. Problem of roll press compacting unit selection to consolidate material in two-stage granulation process. *Chemik: nauka – technika – rynek*. 2008. Y. 61. Vol. 9. P. 425–428.
4. Zavaliangos A., Dec R. Powder processing in the roller press – theory and practice. *Powder Handling & Processing*. 2007. Vol. 1. P. 23–28.
5. Khudyakov A.Yu., Vashchenko S.V., Baiul K.V., Semenov Yu.S. Kaolin raw material briquetting for lump chamotte production. *Refract. Ind. Ceram.* 2018. 59 (4). P. 333–337.
6. Baiul K.V. Effect of the geometrical parameters of roll press forming elements on the briquetting process: analytical study. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. July 2012. Volume 51. Issue 3–4. P. 157–164.
7. Носков В.А., Ващенко С.В. Анализ способов и устройств для уплотнения мелкофракционных шихт. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. науч. трудов ИЧМ НАН Украины*. Вып. 6. К.: Наукова думка, 2005.
8. Логинов Ю.Н., Буркин С.П., Бабайлов Н.А. и др. Механика валкового брикетирования сыпучих материалов. Екатеринбург: АМБ, 2011. 304 с.
9. Носков В.А. Создание и внедрение прессового оборудования для брикетирования мелкофракционных металлургических отходов: дис ... д-ра техн. наук: 05.05.08 / НАН Украины; Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова. Днепропетровск, 2001. 318 с. Библиогр.: л. 288–304.
10. Эйдельман Л.П. Состояние брикетирования в металлургии СССР. *Черная металлургия. Бюл. Научно-технической информации*. 1981. № 18. С. 8–12.
11. Srikant, Pimple et al. Roller Compaction Design and Critical Parameters in Drug Formulation and Development: Review. *International Journal of Pharm Tech Research*. 2014–2015. Vol. 7. No. 1. P. 90–98.
12. Эйдельман Л.П. Состояние брикетирования шихтовых материалов в зарубежной черной металлургии. *Черная металлургия. Бюл. Научно-технической информации*. 1982. Вып. 1. С. 28–37.
13. Barnett T. Roll-press briquetting: Compacting fines to reduce waste-handling costs. *Powder and bulk engineering*. 2010. Vol. 24. No. 10. P. 1–6. URL: http://www.powderbulk.com/wp-content/uploads/pdf/pbe_201010_058.pdf
14. Dec R.T., Zavaliangos A., Cunningham J.C. Comparison of various modeling methods for analysis of powder compaction in roller press. *Powder Technology*. 2003. Vol. 130. No. 1–3. P. 265–271. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-5910\(02\)00203-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00203-6)
15. Reynolds G., Ingale R., Roberts R., Kothari S., Gururajan B. Practical application of roller compaction process modeling. *Computers & Chemical Engineering*. 2010. Vol. 34. No. 7. P. 1049–1057. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2010.03.004>
16. Guigon P., Simon O. Roll Press design – influence of force feed systems on compaction. *Powder Technology*. 2003. Vol. 130. No. 1–3. P. 41–48.
17. Hryniewicz M., Janewicz A. Badania i rozwój konstrukcji prasy walcowej [Research and development of roll press construction]. *Problemy Eksploatacji*. 2008. No. 3. P. 143–151.
18. Bembenek M., Hryniewicz M. Badania i opracowanie metody doboru układu zagęszczania prasy walcowej. Kraków: Wydawnictwa AGH, 2010.
19. Полянский Л.И., Кобелев М.В., Ветошкин А.В. Оборудование для брикетирования отсева металлургической извести. *Новые огнеупоры*. 2014. № 3. С. 99–100. URL: https://newogneup.elpub.ru/jour/article/view/449?locale=ru_RU
20. Маймур Б.Н., Петренко В.И., Лебедь А.Т. Совершенствование конструкции и улучшение эксплуатационных характеристик валковых брикетных прессов. *Бюл. научно-технической и экономической информации «Черная металлургия»*. 2011. № 12. С. 67–71.
21. Баюл К.В., Лебедь А.Т., Ващенко С.В., Худяков А.Ю. Состояние разработок и направления совершенствования конструкции и параметров эксплуатации валковых прессов. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 7. С. 117–120.
22. Большаков В.И., Баюл К.В. Анализ современных машин для брикетирования мелкофракционных сырьевых материалов. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2013. № 4. С. 92–96.
23. Равич Б.М. Брикетирование в цветной и черной металлургии. М.: Металлургия, 1975. 232 с.
24. Маймур Б.Н., Худяков А.Ю., Петренко А.Ю., Ващенко С.В., Баюл К.В. Брикетирование металлургического сырья. Актуальность и пути развития метода. *Бюл. научно-технической и экономической информации «Черная металлургия»*. Вып. 1. 2016. С. 74–81.
25. Khudyakov A.Yu., Vashchenko S.V. Analysis of known dependencies and construction of new compaction equations for fine materials of the mining and metallurgical complex. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2020. Vol. 60 (6). P. 618–626. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11148-020-00417-z>

26. Ващенко С.В., Маймур Б.Н., Петренко В.И., Баюл К.В., Солодка Н.А., Прокудина Э.Б. Исследование условий и механизмов формирования прочностных связей в прессовках при брикетировании мелкофракционных шихтовых материалов. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. тр.* Днепропетровск: ИЧМ НАН Украины. 2015. Вып. 30. С. 343–357.
27. Babailov N.A., Polyanskii L.I., Loginov Y.N. Briquetting Metallurgical Lime Screenings and Parameters Making it Possible to Improve Process Efficiency. *Metallurgist*. 2016. Vol. 60. P. 576–580. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0334-3>
28. Lohmeier L., Wollenberg R., Schröder H. Investigation into the Hot Briquetting of Fine-Grained Residual Materials from Iron and Steel Production. *Steel research int.* December 2020. 2000237. Vol. 91. Iss. 12. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.202000237>
29. Kasai A., Toyota H., Nozawa K., Kitayama S. Reduction of Reducing Agent Rate in Blast Furnace Operation by Carbon Composite Iron Ore Hot Briquette. *ISIJ International*. 2011. Vol. 51. Iss. 8. P. 1333–1335. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1333>
30. Tsutsumi H., Yoshida S., Tetsumoto M. Features of FASTMET Process, *KOBELCO Technology Review*. December, 2010. No. 29. P. 85–92.
31. Compaction with Roller Presses. URL: https://www.koeppern-international.com/fileadmin/user_upload/downloads/Compaction/Brochure_Compaction.pdf
32. Баюл К.В., Ващенко С.В., Худяков А.Ю. Создание устройства для принудительной подачи брикетируемого материала в очаг деформации валкового пресса. *Материалы международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (26–27 апреля 2018 г., г. Могилев)*. Могилев, 2018. С. 70–71.
33. Носков В.А., Ващенко С.В. Анализ способов и устройств для уплотнения мелкофракционных шихт. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. тр.* Днепропетровск: ИЧМ НАН Украины. 2005. Вып. 10. С. 313–320.
34. Носков В.А., Большаков В.И. Устройство для предохранения от перегрузок и настройки заданного усилия брикетирования в валковом прессе. *Захист металургійних машин від поломок: зб. наук. пр.* Маріуполь: ПДТУ. 2000. Вип. 5. С. 91–97.
35. Муравьева И.Г. Комплексное исследование и разработка рациональной системы гидроприжима валкового брикетного пресса: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.04.04. Днепропетровск, 1991. 170 с.
36. Гребеник В.М., Гордиенко А.В., Цапко В.К. Повышение надежности металлургического оборудования. Справочник. М.: Металлургия, 1988. 688 с.

Надійшла 01.03.2021

REFERENCES

1. Baum, W., Patzelt, N., Knecht, J. (1997). Metallurgical benefits of high pressure roll grinding for gold and copper recovery, Society of Mining Engineering (SME), Denver, Colorado, pp. 111–116.
2. Golovan, V.I., Gubin, G.V., Sklyar, L.V. (2015). Short technological scheme for beneficiation of magnetite ores using the technology of HPGR crushers. *Mineral enrichment: Scientific and technical collection*, iss. 61 (102), pp. 37–48 [in Russian].
3. Hryniewicz, M., Bembenek, M., Gara, P. (2008). Problem of roll press compacting unit selection to consolidate material in two-stage granulation process. *Chemik: nauka – technika – rynek*, y. 61, vol. 9, pp. 425–428.
4. Zavaliangos, A., Dec, R. (2007). Powder processing in the roller press – theory and practice. *Powder Handling & Processing*, vol. 1, pp. 23–28.
5. Khudyakov, A.Yu., Vashchenko, S.V., Baiul, K.V., Semenov, Yu.S. (2018). Kaolin raw material briquetting for lump chamotte production. *Refract. Ind. Ceram.*, 59 (4), pp. 333–337.
6. Bayul, K.V. (2012). Effect of the geometrical parameters of roll press forming elements on the briquetting process: analytical study. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, volume 51, issue 3–4, pp. 157–164.
7. Noskov, V.A., Vaschenko, S.V. (2005). Analysis of methods and devices for compacting fine-fraction charges. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific papers, Z.I. Nekrasov Iron & Steel Institute, NAS of Ukraine*, iss. 6. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian].
8. Loginov, Y.N., Bourkin, S.P., Babaylov, N.A. et al. (2011). Mechanical roller briquetting of granular material. Ekaterinburg: AMB, 304 p. [in Russian].
9. Noskov, V.A. (2001). Creation and implementation of pressing equipment for briquetting fine-fraction metallurgical waste: Doctor's thesis: 05.05.08. NAS of Ukraine; Z.I. Nekrasov Iron & Steel Institute. Dnepropetrovsk, 318 p. Bibliography: I. 288–304 [in Russian].
10. Eidelman, L.P. (1981). The state of briquetting in the USSR metallurgy. *Ferrous metallurgy. Bul. Scientific and technical information*, no. 18, pp. 8–12 [in Russian].
11. Srikant, P. et al. (2014–2015). Roller Compaction Design and Critical Parameters in Drug Formulation and Development: Review. *International Journal of Pharm Tech Research*, vol. 7, no. 1, pp. 90–98.
12. Eidelman, L.P. (1982). State of briquetting of charge materials in foreign ferrous metallurgy. *Ferrous metallurgy. Bul. Scientific and technical information*, iss. 1, pp. 28–37 [in Russian].

13. Barnett, T. (2010). Roll-press briquetting: Compacting fines to reduce waste-handling costs. *Powder and bulk engineering*, vol. 24, no. 10, pp. 1–6. URL: http://www.powderbulk.com/wp-content/uploads/pdf/pbe_201010_058.pdf
14. Dec, R.T., Zavaliangos, A., Cunningham, J.C. (2003). Comparison of various modeling methods for analysis of powder compaction in roller press. *Powder Technology*, vol. 130, no. 1–3, pp. 265–271, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-5910\(02\)00203-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00203-6)
15. Reynolds, G., Ingale, R., Roberts, R., Kothari, S., Gururajan, B. (2010). Practical application of roller compaction process modeling. *Computers & Chemical Engineering*, vol. 34, no. 7, pp. 1049–1057, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2010.03.004>
16. Guigon, P., Simon, O. (2003). Roll Press design – influence of force feed systems on compaction. *Powder Technology*, vol. 130, no. 1–3, pp. 41–48.
17. Hryniewicz, M., Janewicz, A. (2008). Research and development of roll press construction. *Problemy Eksploatacji*, no. 3, pp. 143–151 [in Polish].
18. Bembenek, M., Hryniewicz, M. (2010). Research and development of a method of selecting the compaction system of a roll press. Krakow: Publishing House AGH [in Polish].
19. Polyansky, L.I., Kobelev, M.V., Vetoshkin, A.V. (2014). Equipment for metallurgical lime screening briquetting. *New refractories*, (3), pp. 99–100. URL: https://newogneup.elpub.ru/jour/article/view/449?locale=ru_RU [in Russian].
20. Maimur, B.N., Petrenko, V.I., Lebed, A.T. (2011). Improvement of design and improvement of operational characteristics of roller briquette presses. *Ferrous metallurgy. Bul. Scientific and technical information*, no. 12, pp. 67–71 [in Russian].
21. Baiul, K.V., Lebed, A.T., Vaschenko, S.V., Khudyakov, A.Yu. (2015). State of development and direction of improving the design and operating parameters of roller presses. *Metallurgical and mining industry*, no. 7, pp. 117–120 [in Russian].
22. Bolshakov, V.I., Baiul, K.V. (2013). Analysis of modern machines for briquetting small-fraction raw materials. *Metallurgical and mining industry*, no. 4, pp. 92–96 [in Russian].
23. Ravich, B.M. (1975). Briquetting in non-ferrous and ferrous metallurgy. Moscow: Metallurgiya, 232 p. [in Russian].
24. Maimur, B.N., Khudyakov, A.Yu., Petrenko, V.I., Vashchenko, S.V., Baiul, K.V. (2016). Briquetting of Metallurgical raw materials. Relevance and development of the method, *Ferrous metallurgy. Bul. Scientific and technical information*, iss. 1, pp. 74–81 [in Russian].
25. Khudyakov, A.Yu., Vashchenko, S.V. (2020). Analysis of known dependencies and construction of new compaction equations for fine materials of the mining and metallurgical complex. *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 60 (6), pp. 618–626, doi: <https://doi.org/10.1007/s11148-020-00417-z>
26. Vashchenko, S.V., Maimur, B.N., Petrenko, V.I., Bayul, K.V., Solodkaya, N.A., Prokudina, E.B. (2015). Research of conditions and mechanisms of formation of strength bonds in compacts during briquetting of fine-fraction charge materials, *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific papers, Z.I. Nekrasov Iron & Steel Institute, NAS of Ukraine*, Dnepropetrovsk: Z.I. Nekrasov Iron & Steel Institute, NAS of Ukraine, iss. 30, pp. 343–357 [in Russian].
27. Babailov, N.A., Polyanskii, L.I., Loginov, Y.N. (2016). Briquetting Metallurgical Lime Screenings and Parameters Making it Possible to Improve Process Efficiency. *Metallurgist*, vol. 60, pp. 576–580, doi: <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0334-3>
28. Lohmeier, L., Wollenberg, R., Schröder, H. (2020). Investigation into the Hot Briquetting of Fine-Grained Residual Materials from Iron and Steel Production. *Steel research int.*, December 2020. 2000237, vol. 91, iss. 12, doi: <https://doi.org/10.1002/srin.202000237>
29. Kasai, A., Toyota, H., Nozawa, K., Kitayama, S. (2011). Reduction of Reducing Agent Rate in Blast Furnace Operation by Carbon Composite Iron Ore Hot Briquette. *ISIJ International*, vol. 51, no. 8, pp. 1333–1335, doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1333>
30. Tsutsumi H., Yoshida S., Tetsumoto M. (2010). Features of FASTMET Process, *KOBELCO Technology Review*, no. 29, pp. 85–92.
31. Compaction with Roller Presses. URL: https://www.koeppern-international.com/fileadmin/user_upload/downloads/Compaction/Brochure_Compaction.pdf
32. Baiul, K.V., Vashchenko, S.V., Khudyakov, A.Yu. (2018). Creation of a device for forced feeding of briquetted material into the deformation zone of a roller press. *Materials of the international scientific and technical conference "Materials, equipment and resource-saving technologies"*, Mogilev, pp. 70–71 [in Russian].
33. Noskov, V.A., Vaschenko, S.V. (2005). Analysis of methods and devices for compacting fine-fraction charges. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific papers, Z.I. Nekrasov Iron & Steel Institute, NAS of Ukraine*. Dnepropetrovsk: Z.I. Nekrasov Iron & Steel Institute, NAS of Ukraine, iss. 10, pp. 313–320 [in Russian].
34. Noskov, V.A., Bolshakov, V.I. (2000). A device for protection against overloads and setting a given briquetting force in a roll press. *Protection of metallurgical machines from breakdowns: coll. Science*, Mariupol: PDTU, iss. 5, pp. 91–97 [in Russian].
35. Muravyova, I.G. (1991). Complex research and development of a rational system of hydraulic clamping of a roller briquette press: dissertation for the degree of candidate of technical sciences: 05.04.04. Dnepropetrovsk, 170 p. [in Russian].
36. Grebenik, V.M., Gordienko, A.V., Tsapko V.K. (1988). Improving the reliability of metallurgical equipment. Directory. Moscow: Metallurgiya, 688 p. [in Russian].

Received 01.03.2021

Summary

K.V. Baiul¹, PhD (Engin.), Senior Researcher,
e-mail: baiulkonstantin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1426-7956>
I.G. Muraviova¹, Dr. Sci. (Engin.), Head of Department,
e-mail: irinamuravyova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5926-7787>
S.V. Vashchenko¹, PhD (Engin.), Senior Researcher,
e-mail: sergeyvaschenko.sv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8344-961X>
O.Yu. Khudyakov¹, PhD (Engin.), Senior Researcher,
e-mail: khudyakovsashko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6507-1120>
N.O. Solodka², PhD (Engin.), Associate Professor, Researcher,
e-mail: solodka_n_o@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-7545-4969>

¹*Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine
(Dnipro, Ukraine)*

²*SHEI "Ukrainian State University of Chemical Technology" (Dnipro, Ukraine)*

General classification and system approach to the development of roll press structures

At the present stage of mining and metallurgical complex development in Ukraine and abroad, special attention is paid to the creation of technologies that allow rational use of the material and energy resources and reduce the negative impact on the environment. Briquetting refers to such technologies, so the number of companies that use it, as well as the range and volume of briquette production in recent years, is expanding rapidly. Consequently, the need for high-performance, reliable in operation of roller presses, which are the main aggregates of technological briquetting lines, increases. An important step in creating an industrial briquetting line is a reasonable choice of press type and design, which is the main unit for the production of the briquettes. It makes the need to solve a problem of further development of tools and methods for roller presses design, which consists of generalization and structuring into a single system of known and newly created analytical methods. It will allow the design process to determine the most efficient roll press design for specific technological tasks. A significant step to solve this problem, which is performing in this work, is to create the roller presses generalized classification system by design and technological parameters. The analysis of average efficiency indicators of roller presses from different developers by comparison with presses of Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine design is performed. The prospects of the further development direction on the improved roller presses with the expanded technological and technical characteristics creation are specified. The structure of the system approach to the roller presses development, based on the structural-parametric synthesis and analysis principles, is proposed.

Keywords

Roller presses, briquetting, small fraction raw materials, classification, system approach.