

УДК 621.926.3-027.28(048.83)

МІКУЛЬОНОК І. О.*, **КАРВАЦЬКИЙ А. Я.**, **ЛЕЛЕКА С. В.**, **ІВАНЕНКО О. І.**

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

ВАЛКОВІ ДРОБАРКИ І МЛИНИ (Огляд конструкцій)

Розроблено класифікацію валкових дробарок і млинів для руйнування кускових і сипких матеріалів, оброблюваних на підприємствах хімічної, гірничорудної, будівельної, харчової та електродної галузей промисловості, а також у металургії. Виконано критичний огляд найбільш характерних конструкцій валкових дробарок і млинів, запропонованих науковцями, конструкторами й винахідниками провідних країн світу. Конструкції проаналізовано залежно від кількості валків, типу поверхні валків, форми валків, відносної швидкості робочої поверхні валків, можливості регулювання температури поверхні валків, наявності додаткових робочих органів, а також матеріалу поверхні валків.

Ключові слова: обладнання хімічної технології, валкова дробарка, валковий млин, класифікація, конструкція.

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2022.254157

*Corresponding author: i.mikulionok@kpi.ua

Received 24 October 2021; Accepted 16 December 2021

Постановка проблеми. Одним з найбільш простих, ефективних та універсальних видів обладнання підприємств хімічної, гірничорудної, металургійної, будівельної, харчової та електродної галузей промисловості, призначеного для руйнування кускових і сипких матеріалів, є валкові подрібнювачі – дробарки і млини [1–4].

Переваги цього виду подрібнювального обладнання очевидні: простота і компактність, широкий діапазон регулювання ступеня дроблення, легкість контролю стану зони дроблення, а також зручність експлуатації. Вони придатні для руйнування як крихких, так і еластичних матеріалів, зокрема полімерів і гум [5, 6]. У той же час вони характеризуються підвищеним пилоутворенням, малою придатністю для подрібнення високоміцних мінералів, а також ймовірністю потрапляння в продукт частинок, довжина й ширина яких істотно перевищує величину робочого проміжку, а також.

Однією з галузей промисловості, в якій широко застосовуються валкові подрібнювачі на багатьох етапах технологічного процесу, є електродна промисловість, продукція якої широко застосовується в таких енерго- і матеріалоємних галузях промисловості як хімічна технологія й металургія [7]. Зокрема в електродній промисловості валкові дробарки використовують для крупного й середнього дроблення природного антрациту, сирого коксу, випаленої поворотної продукції (випаленого бою), пресованих поворотних електродної заготовок та некондиційної електродної маси («зелений» бій), а також інших вуглецевих матеріалів.

Незважаючи на високі характеристики традиційних валкових дробарок, їх конструкції постійно вдосконалюються як у напрямку універсалізації, так і спеціалізації, що за час застосування валкових подрібнювачів сприяло створенню їх численних типорозмірів. Тому обґрунтований вибір валкового подрібнювача, найбільш доцільного для ефективного руйнування певного кускового або сипкого матеріалу з метою одержання продукту з прогнозованими формою й розміром частинок є актуальним завданням багатьох галузей промисловості.

Зазначене питання вже було порушене авторами [8], проте далі наведено більш ґрунтовний аналіз розроблених конструкцій валкових подрібнювачів.

Метою статті є розроблення розгорнутої класифікації валкових подрібнювачів – дробарок і млинів, а також аналіз їх конструкцій.

Аналіз попередніх досліджень

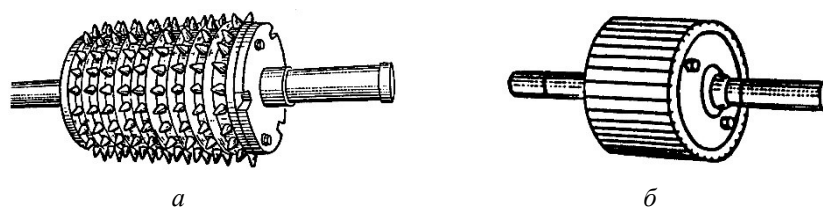
Відповідно до ДСТУ 2411–94 валкова дробарка – це дробарка, у якій матеріал дроблять, стискаючи його між обертовими валками або між валком і нерухомою плитою. При цьому залежно від кількості валків дробарку називають одновалковою, двовалковою, тривалковою тощо [9].

У той же час у різних джерелах науково-технічної, і насамперед патентної, інформації часто не роблять

різниці між валковими й роторними подрібнювачами, бігунами, а також шредерами [10]. Далі під валковим подрібнювачем розглядатимемо лише обладнання, що підпадає під визначення ДСТУ 2411–94, у якому руйнування оброблюваного матеріалу відбувається методами роздавлювання, розколювання, зламу та стирання (при цьому руйнування методами удару й зрізу для валкових подрібнювачів не характерно). Також розглядатимемо подрібнювачі з валками, що мають зовнішню робочу поверхню.

Серед валкових дробарок найбільшого поширення набули двовалкові дробарки з гладкими валками (максимальний середній розмір грудок вихідного матеріалу, який захоплюють валки, становить приблизно 5 % від діаметр валка), рифленими валками (8...10 %) і зубчастими (25...50 %). При цьому ступінь дроблення дробарок з гладкими валками становить 2–4, з рифленими валками – 2–6 і з зубчастими – 3–10 (рис. 1) [4].

Об'ємна продуктивність дробарок з гладкими валками досягає 65 м³/год (дробарка ДГ 1500×600), з рифленими – 54 м³/год (дробарка ДГР 600×400) і з зубчастими – 500 м³/год (дробарка ДДЗ 16). Розміри валків дробарок (діаметр і ширина) – від 400×250 у дробарки ДГ 400×250 до 1600×2000 мм у дробарки ДДЗ 16 [3].



a – зубчастий валок; *б* – рифлений валок

Рис. 1 – Схеми валків валкової дробарки

Аналіз конструкцій валкових подрібнювачів дає змогу запропонувати їхню класифікацію (рис. 2.).

За кількістю валків розрізняють одно-, дво-, три- і багатовалкові подрібнювачі. При цьому найбільшого поширення набули двовалкові подрібнювачі.

Конструкцію одновалкового подрібнювача з нерухомою криволінійною плитою для дроблення відходів пластмас запропоновано в пат. № GB2023440A, FR2429665A1 і заявці № DE2700846A1. Одновалкові подрібнювачі з плоскою плитою описано в пат. № GB2341121A, CN99336A, заявках № WO00/12216A1, DE102005047516A1, з увігнутою плитою – у пат. № GB2042366A, CN100927A, CN105928A, FR441647A, FR2448937A1, UA67539A, а. с. № SU1251946A2, а подрібнювач з однією плоскою і другою криволінійною плитою запропоновано в заявці № WO90/09241A1. При цьому в пат. № GB2341121A і заявці № DE19819638A1 валки, виконані у вигляді восьми- і шестикутної призми, відповідно, забезпечують безперервну ступінчасту зміну кута захоплення подрібнюваного матеріалу.

Нерухома криволінійну плиту одновалкового подрібнювача може бути виконано такою, що складається з шарнірно скріплених між собою плоских секцій. За відносного повороту сусідніх секцій така плита може працювати в парі з валками різного діаметра, що розширює її технологічні можливості.

У пат. № UA18090U і UA51401U запропоновано дробарки з реверсивним валком і увігнутими плитами з різною шорсткістю робочих поверхонь, які охоплюють валок з обох боків. Таке рішення в разі зміни напрямку обертання валка дає змогу регулювати ступінь дроблення.

Тривалкові дробарки запропоновано в пат. № DE9419235U1, CN206762979U, CN207086005U, UA9669A, UA14738A, UA29113A, заявці № DE19533576A1, а п'ятивалкові – у пат. № US1512466A і CN95834A. При цьому середній валок тривалкового подрібнювача може бути розташований зверху, збоку або знизу.

Дробарка з чотирма валками, середні з яких розташовані нижче виносних, запропоновано в заявці № WO2012/151641A1. Таке розташування валків забезпечує утворення кількох робочих зон, що підвищує ефективність дроблення.

Валки чотиривалкового подрібнювача згідно з пат. № UA36055A розташовуються у вертикальній площині в шаховому порядку, при цьому діаметр валків зменшується від верхнього валка до нижнього.

Оригінальний багатовалковий подрібнювач-транспортер запропоновано в заявці № WO2017/148513A1. Регулюванням напрямку й швидкості обертання валків досягають необхідного ступеня дроблення й продуктивності пристрою (рис. 3). Аналогічний подрібнювач і зубчастими валками, розподіленими вздовж зони дроблення на різній висоті, описано в заявці № DE102011000018A1.

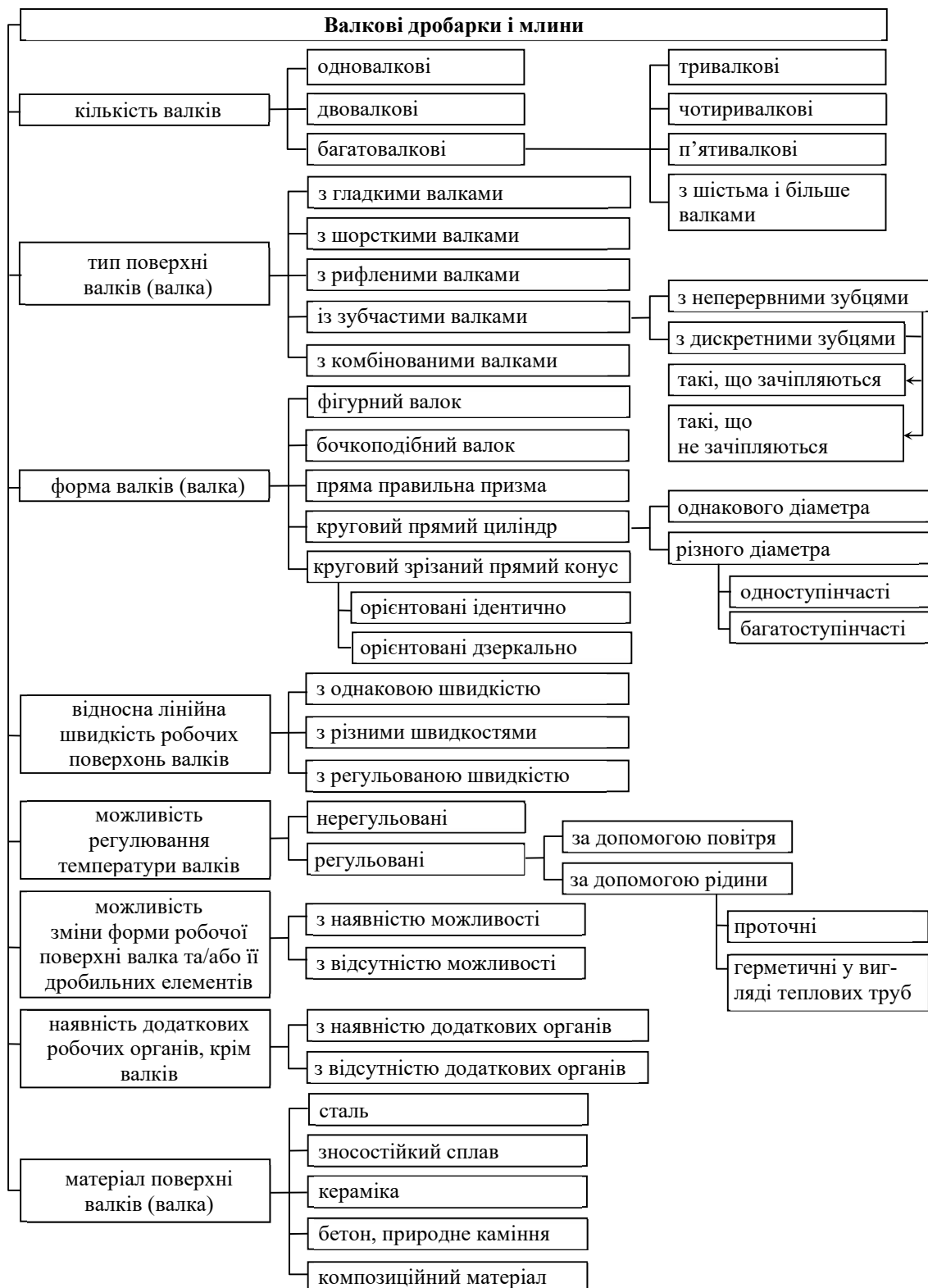


Рис. 2 – Класифікація валкових дробарок і млинів

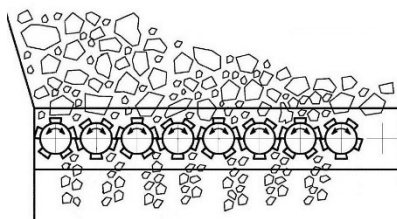


Рис. 3 – Схема дробарки за заявкою № WO2017/148513A1

Багатовалковий подрібнювач для волокнистого матеріалу (зокрема деревини) містить декілька пар валків, розташованих одна під одною (пат. № GB1028836A). Руйнування матеріалу здійснюється як роздавлюванням, так і різанням гострими поздовжніми лезами, утвореними на поверхнях валків.

За типом поверхні валків (валка) традиційно розрізняють подрібнювачі з гладкими, шорсткими, рифленими й зубчастими валками.

Валок з гладкою циліндричною робочою поверхнею складається з циліндричного осердя й співісно закріпленої на ньому за допомогою пружних елементів зносостійкої оболонки (заявка № WO95/33932A1). Пружні елементи сприяють проходженню міцних грудок крізь міжвалковий проміжок без розсування осердь валків.

Валок зі східчастими рифлями, нахиленими в напрямку його обертання, запропоновано в заявці № WO93/16802A1.

Подрібнювач з циліндричними валками, поверхня одного з яких виконана гладкою, а другого – з кільцевими канавками, описано в пат. № GB2286137A і заявці № WO94/07670A2. Цей подрібнювач призначено для руйнування зношених шин за умови їх попереднього охолодження рідким азотом.

Дробарка з циліндричними валками, на робочій поверхні яких по черзі виконано кільцеві виступи й западини, при цьому виступи одного валка розташовано навпроти западин іншого (пат. № 2288036C1).

У пат. № FR688034A запропоновано валки з прямолінійними, похилими, шевронними й зигзагоподібними рифлями, а в заявці № WO2016/01553A1, крім того, пропонуються й рифлі у вигляді параболи з вершиною в центральній частині бочки валка. Валки з похилими рифлями також описано в пат. № (пат. № DE21926C).

У пат. № FR641258A описано валки з двома типами канавок на кожному валку: похилими й гвинтовими. Така форма робочої поверхні валків забезпечує ефективне руйнування матеріалу.

Двовалковий подрібнювач з неперервними поздовжніми зубами, увігнутими в напрямку обертання валків, запропоновано в пат. № CN108014A. Така форма зубів сприяє перерозподілу подрібнюваного матеріалу до центру міжвалкового проміжку і знижує висипання неповністю подрібненого матеріалу за межі торців валків.

Також розроблено конструкції комбінованих валків, що по довжині робочої частини мають щонайменше дві ділянки з різною формою поверхні (наприклад, пат. № DE160424C, DE161247C, DE408005C, CN537755A, FR341493A, CN208757681U). Подрібнювачі з такими валками забезпечують дво- і багатоступінчасте дроблення.

Двовалкову дробарку з валками, що мають знімні дискретні зуби, запропоновано в заявці № WO83/03062A1. Зазначені зуби не тільки полегшують втягування матеріалу в міжвалковий проміжок, а й інтенсивно його руйнують. Двовалкові дробарки з подібними зубчастими валками описано в пат. № GB239723A, GB1206313A і заявках № WO89/04719A1, WO2009/115456A1, WO2013/058926A1.

Дискретні зуби валка згідно з заявками № WO2006/133870A1 і DE102005027729A1 розташовуються рівномірно по всій його робочій поверхні і можуть бути виконані як точковими, так і витягнутими вздовж твірної валка (рис. 4).

Дискретні зуби кожного з валків подрібнювача за заявкою № WO2007/034038A1 розташовано по гвинтовій лінії (рис. 5), а за заявкою DE102013206341A1 – по параболам з вершиною, спрямованою в напрямку обертання валка.

Валки з дискретними зубами, розташованими групами на знімних кільцевих оболонках, описано в заявці № WO2010/032037A1.

У заявці № DE10028191A1 дискретні зуби на різних валках двовалкової дробарки розташовано по колу й

виконано різної ширини, при цьому широкі зуби одного валка проходять між вузькими зубами другого.

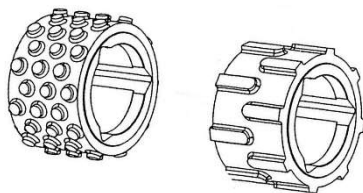


Рис. 4 – Схема знімної оболонки валка за заявками WO2006/133870A1 и DE102005027729A1

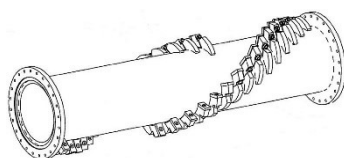


Рис. 5 – Схема знімної оболонки валка за заявкою WO2007/034038A1

Під час потрапляння в робочий проміжок подрібнювача високоміцного матеріалу дискретні зуби валка згідно з пат. № UA91302U утоплюються всередину бочки валка, пропускаючи зазначений матеріал крізь робочий проміжок, після чого під дією пружного елемента повертаються у вихідне положення.

У пат. № DE84040C валки виконано у вигляді зубчастих коліс з шістьма круглими зубами.

Робочу поверхню валка в поперечному напрямку згідно з а. с. № SU368876A1 утворено у вигляді аркади пологих арок з рифлями у формі трапеції на вершині кожної арки і трикутників по її краях, при цьому арки розташовано з проміжками між собою. Недолік цього валка – схильність до забивання рифлень подрібнюваним матеріалом.

За формою валків (валка) розрізняють подрібнювачі з валками, робочу поверхню кожного з яких виконано у вигляді кругового прямого циліндра, кругового зрізаного прямого конуса, прямої правильної призми, правильної зрізаної піраміди, а також з фігурними валками.

Найбільш поширені подрібнювачі з двома циліндричними валками одного діаметра. При цьому для стабілізації величини робочого проміжку під час тривалої експлуатації подрібнювача один його валок запропоновано виконувати з кінцевими конічними фасками, а інший – з аналогічними виступами (заявка № WO2008/106998A1). Подібні конструкції запропоновано в пат. № UA116204U, CN104162466A, CN206064512U, CN206064513U, CN206064514U.

У пат. № RU2534954C2, RU2624290C2, UA114318C2, UA114621C2, UA115660C2 і заявках № WO2013/156586A2, WO2014/117783A1 крайні ділянки одного з валків запропоновано виконувати з кільцевими виступами, які охоплюють бочку відповідного валка і утворюють разом з робочими поверхнями валків замкнену робочу зону. Аналогічне рішення запропоновано і в пат. № DE241239C, при цьому обидва валки двовалкової дробарки забезпечено одним кільцевим виступом, виконаним на різних кінцях валків.

Обичайку валка з циліндричної робочою поверхнею згідно з пат. № GB738027A виконано з товщиною стінки, що збільшується від периферії до центру, що підвищує жорсткість валка в поперечному напрямку. Валок з моментом опору поперечного перерізу, що збільшується від торців його бочки до центру, описано і в пат. № CH280460A.

Крім подрібнювачів з традиційними валками у вигляді кругових прямих циліндрів однакового діаметра, розроблено конструкції з аналогічними валками різного діаметра (наприклад, пат. № DE46247C, GB2094663A, FR2509193A1, UA36934U, UA51247U). Такі подрібнювачі за однакової кутової швидкості валків забезпечують руйнування оброблюваного матеріалу не лише роздавлюванням, але й стиранням. Недолік таких дробарок – підвищене пилоутворення.

У пат. № DE574037C, DE885189C, RU2454279C2, UA831C2, UA52841U запропоновано подрібнювачі з валками, кожен з яких по його довжині має щонайменше дві циліндричні ділянки різного діаметра (дво- і багатоступінчасті валки). Таке конструктивне рішення забезпечує багатоступінчасте дроблення.

Двовалкова дробарка з валками у вигляді кругових зрізаних прямих конусів, обернених один до одного

протилежними основами, запропоновано в пат. № DE218291С.

Дробарки з валками у вигляді правильних призм (пат. № GB2341121А, UA90397U) поєднують переваги як валкових, так і шоккових дробарок. При цьому значно полегшується відновлення пошкоджених ділянок робочих поверхонь валків, які складаються з плоских, а не криволінійних ділянок. При цьому для підвищення ефективності дроблення валки у вигляді квадратних призм споряджають зубами (пат. № DE1045769В, GB772107А; рис. 6).

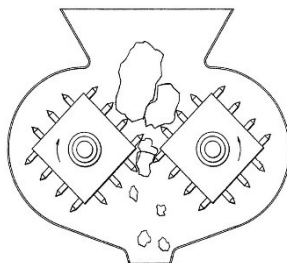


Рис. 6 – Схема одновалкової дробарки згідно з пат. № GB772107А, DE1045769В

Крім двовалкового подрібнювача з призматичними валками розроблено конструкцію одновалкової дробарки з валком у вигляді правильної шестигранної призми (пат. № GB2341121А, DE1045769В, заявка № WO00/12216А1; рис. 7).

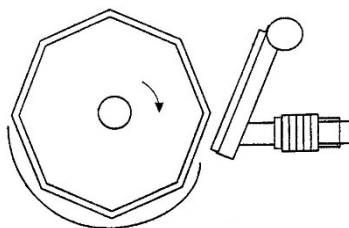


Рис. 7 – Схема одновалкової дробарки згідно з пат. № GB2341121А і заявкою № WO00/12216А1

У пат. № UA83815U запропоновано двовалкову дробарку з валками у вигляді шестикутної зірки в поперечному перетині. При цьому робочу поверхню валків виконано рифленою.

Набагато рідше використовуються подрібнювачі з фігурними валками, наприклад, у вигляді протилежно обернених один до одного основами і таких, що обертаються з однаковими кутовими швидкостями, пірамід з поперечним перерізом у вигляді трикутників Рьоло (пат. № UA68978А, UA127743U). Загальний недолік подрібнювачів з фігурними валками – складність їх виготовлення й ремонту.

Двовалкову дробарку з фігурними валками різної форми описано в заявці № WO99/47263А1 (рис. 8). Під час роботи дробарки подрібнюваний матеріал піддається змінним умовам руйнування.

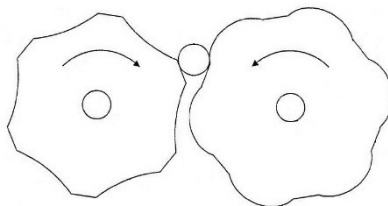


Рис. 8 – Валки дробарки за заявкою № WO99/47263А1

Двовалкову дробарку з фігурними валками однакового поперечного перерізу, що утворюють своєрідне шевронне зачеплення (при цьому виступи й западини кожного валка розташовано під невеликим кутом до його поздовжньої осі), розглянуто в заявці № WO2009/154585А2 (рис. 9).

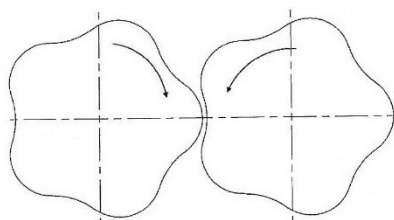


Рис. 9 – Поперечний переріз валків дробарки за заявкою № WO2009/154585A2

Дробарку з валками Х-подібного (хрестоподібного) поперечного перерізу описано в пат. № FR2690359A1. Під час подрібнення матеріал руйнується переважно роздавлюванням в проміжках між зубами сусідніх валків.

У заявці № WO2013/006920A1 валки дробарки виконано різного діаметра для реалізації в міжвалковому проміжку не лише стискальних, але й зсувних зусиль. У разі виконання фігурних валків однакового поперечного перерізу (у вигляді еліпса) їх попередньо повертають один відносно одного для підвищення в міжвалковому проміжку зсувних зусиль (пат. № CN208661352U).

До подрібнювачів з фігурними валками можна віднести й дробарку за заявкою № WO02/05963A1, в якій кожен з валків виконано у вигляді змонтованих на валу абразивних дисків з діаметральним перерізом у вигляді ромбів, при цьому вершини дисків одного валка розташовано між вершинами дисків іншого валка, завдяки чому подрібнюваний матеріал інтенсивно перетирається між сусідніми дисками валків. У заявці № WO2017/072089A1 аналогічний диск виконано порожнистим, що трохи знижує його жорсткість.

Аналогічну конструкцію запропоновано в заявці № WO2007/051834A1, при цьому диски одного з валків виконано з увігнутими робочими поверхнями, а диски іншого – з опуклими.

Подібну конструкцію описано також у заявці № WO02/32575A1, в якій кожен з валків виконано у вигляді набору встановлених по черзі дисків більшого й меншого діаметра, при цьому периферійну частину кожного диска більшого діаметра одного валка розташовано в западині, утвореній двома сусідніми аналогічними дисками іншого валка. Диски виконано з периферійним рифленням, що інтенсифікує процес подрібнення.

У подрібнювачі згідно з а. с. № SU1704818A1 кожен з валків виконано у вигляді трипелюсткових круглих коліс, у пат. № DE4332782A1 і DE8903718U1 – у вигляді багатопелюсткових круглих коліс, а в подрібнювачі згідно з а. с. № SU1445776A1 – у вигляді багатогранника з поверненими один відносно одного на 45° квадратними основами (рис. 10).

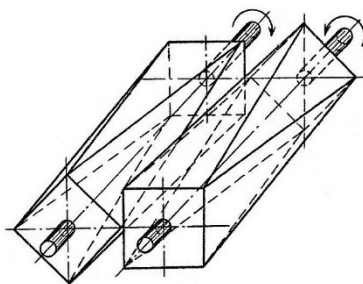


Рис. 10 – Схема робочої зони дробарки згідно з а. с. № SU1445776A1

У подрібнювачі за заявкою № DE102006058055A1 кожен з валків виконано у вигляді набору багатопелюсткових круглих дисків з зачепами на вершинах пелюсток. Зазначені диски сприяють втягуванню матеріалу в міжвалковий проміжок і сприяють розколюванню грудок крихкого матеріалу.

У пат. № DE160801C розглянуто двовалкову дробарку, кожен валок якої виконано у вигляді ступінчастої спіралі з витками, діаметр яких зменшується по довжині валка. Валки орієнтовані таким чином, що проти ділянки більшого діаметра одного валка розташовано ділянку меншого діаметра іншого валка, і таким чином за умови максимального наближення валків вони щільно притискаються один до одного по всій їх робочій довжині (рис. 11).

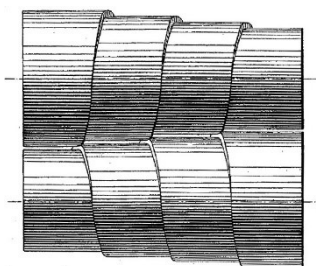


Рис. 11 – Схема валків дробарки згідно з пат. № DE160801C

Бочкоподібні валки (циліндричні валки з бомбіровкою) дають змогу забезпечити прямолінійність міжвалового проміжку (пат. № GB640866A, FR1267719A, заявка № DE202014004257U1).

За відносною лінійною швидкістю робочих поверхнь валків розрізняють подрібнювачі з валками, що обертаються з однаковою, різною й регульованою відносною швидкістю.

Загальний недолік подрібнювачів з валками, що обертаються з різною (в тому числі і регульованою) відносною швидкістю є високе пилоутворення, що призводить як до втрати цільового продукту, так і забруднення навколишнього середовища (пат. № UA28402A, UA36934U, UA51247U).

За можливістю регулювання температури валків (валка) розрізняють подрібнювачі з валками, що мають нерегульовану температуру робочої поверхні, а також валками, що забезпечують регулювання температури робочої поверхні (охолодження та/або нагрівання).

В а.с. № SU889093A1 розглянуто валок дробарки, герметичну порожнину якого заповнено легкокиплячою рідиною (наприклад, водою за тиску, нижчого за атмосферний). Торці порожнистих цапф валка споряджено компактними конденсаторами з вигнутими трубками для сполучення порожнин конденсаторів з порожниною валка. Під час подрібнення робоча поверхня валка нагрівається. Легкокипляча рідина, що перебуває в порожнині валка, випаровується, а утворена пара конденсується в порожнинах конденсаторів. Конденсат захоплюється вигнутими трубками й повертається в порожнину валка. Далі цикл випаровування й конденсації повторюється. Принцип роботи охолоджувача валка аналогічний принципу роботи теплових труб. Недолік валка – охолодження його робочої поверхні у вузькому діапазоні температур, а також неможливість нагріву робочої поверхні валка.

Більш просте технічне рішення аналогічного принципу дії описано в пат. № DE2230954A1, GB1359106A, US3771591A і CN540060A. При цьому конденсація парів холодоагенту здійснюється безпосередньо в цапфах валка, з порожнин яких конденсат перетікає в порожнину валка.

Валок, споряджений двосторонньою тепловою трубою з зонами конденсації на обох цапфах, описано в пат. № CN101879472A. Недолік валка – значна довжина його цапф.

В а.с. № SU1391701A1 описано валок із змонтованими в кожній з його цапф пристроями для підведення й відведення газоподібного холодоагенту. Недоліками цього валка є низька інтенсивність теплообміну, що забезпечується газоподібним холодоагентом, а також складність передачі крутного моменту до валка. Валок з центральним наскрізним каналом для проходу охолодженого повітря запропоновано також у пат. № CN205032213U, при цьому в каналі виконано кільцеві проточки для збільшення поверхні теплообміну.

Порожністі валки з рухом теплоносія (холодоагенту) крізь обидві цапфи запропоновано в пат. № DE4400128C, CN2317938Y, CN2351199Y, CN202078921U, CN206951306U, CN208757681U. Недоліки цих валків – низька інтенсивність теплообміну і складність підведення до валка крутного моменту.

У пат. № KR200452016Y1 описано валок з периферійними каналами для руху рідкого теплоносія (холодоагенту). Недолік валка – підведення й відведення теплоносія крізь обидві цапфи, що ускладнює передачу до валка крутного моменту. Аналогічні валки запропоновано в пат. № DE8621597U, FR887911A, CN2400180Y, CN207086005U, CN208082582U, CN208661259U.

Валок з периферійними каналами та односпрямованим рухом теплоносія (холодоагенту) описано також у пат. № FR679329A і GB199242A. Відмінність цих конструкцій від попередніх полягає в тому, що підведення й відведення теплоносія здійснюється лише крізь одну цапфу. Недолік зазначених валків – нерівномірність температурного поля робочої поверхні в осьовому напрямку.

Валки з периферійними каналами й зустрічним ув сусідніх каналах рухом теплоносія (холодоагенту) описано в пат. № DE587808C і заявці № DE102004056750A1. Підведення і відведення теплоносія

здійснюється крізь одну цапфу. Перевага цієї конструкції – рівномірне температурне поле робочої поверхні.

Валки з центральною порожниною та одностороннім підведенням і відведенням теплоносія (холодоагенту) запропоновано також у пат. № DE572302C, DE635879C, DE840948C, DE975326C, DE1003547B, GB395664A, GB446212A, GB640866A, GB676540A, GB684302A, GB1033839A, FR754431A, FR1036496A, FR1425978A і заявках № DE102012106527A1, DE102015208484A1. Недолік цих валків – низька інтенсивність теплообміну.

Порожнистий валок з підведенням рідини по торцях бочки валка й відведенням в її центральній частині описано в пат. № DE1228895B. Таке технічне рішення забезпечує більш рівномірне температурне поле на робочій по-поверхні валка.

Порожністі валки для циркуляції в них холодоагенту описано у пат. № CH278071A, CH280460A, CH415253A, US1443629A, US1564171A, US1740940A, US2650034A, FR664945A, FR2498478A1, JPS57148442U, а також заявках № KR20140044471A, JP2003290673A. Часто в порожнині валка для інтенсифікації теплообміну встановлюють різні вставки, в тому числі і з канавками різної форми (наприклад, спіральними) на їх зовнішній поверхні (пат. № DE957540C, DE1000665B, DE2002742A1, DE10024851A1, GB825075A, CH347413A, CH694864A5, JPS6233553A, JPS63107732U, CN2151808Y, заявки № WO2011/118310A1, US2012/318896A1, EP0212882A2, EP2266700A2, DE102009033482A1, JP2001219048A). Також у порожнині валка пропонується розташовувати змійовик для охолодної рідини, при цьому для інтенсифікації процесу теплообміну порожнину валка може бути заповнено матеріалом з високою теплопровідністю (заявка № JPS5472565A).

Порожнистий валок з основною форсуною з боку однієї з цапф і декількома додатковими форсунками для розпилювання рідкого теплоносія (холодоагенту) на внутрішню поверхню бочки валка описано в заявках № WO2013/034669A1, US2014/217212A1, EP2753186A1. Валки з комплектом форсунок, які рівномірно розбризкують рідкий теплоносій (холодоагент) на внутрішню поверхню обичайки розглянуто в пат. № DE438490C, DE620040C, DE882031C, GB429425A, US2068779A, US2772075A.

Валок з осьовим циліндричним отвором і розташованим в ньому пристроєм типу «труба в трубі» для циркуляції холодоагенту описано в заявках № WO2016/177603A1, EP3291914A1.

Валок з центральною порожниною, нерухомою осьовою трубою для підведення теплоносія та закріпленими на ній трьома U-подібними перфорованими розподільними трубками з прямолінійною основою запропоновано в пат. № GB434344A, DE595792C, DE632401C. На U-подібних трубках також закріплено лопатки для рівномірного розподілення рідини по внутрішній поверхні бочки валка.

Оригінальне технічне рішення запропоновано в пат. № DE619598C. У порожнині валка змонтовано додаткову U-подібну обичайку з утворенням вузької щілини між внутрішньою поверхнею обичайки валка і увігнутою кришкою. Холодоагент надходить у зазначену щілину з одного торця додаткової обичайки і з боку її іншого торця по западині кришки видаляється за межі валка. Практично плівковий рух рідини значно інтенсифікує процес теплообміну.

Плівковий рух рідини на внутрішній поверхні обичайки валка реалізовано в пат. № DE650459C. При цьому рідина розподіляється за допомогою порожнистої пластини з перфорованою крайкою (з боку внутрішньої поверхні обичайки валка).

У заявці № WO2015/090006A1 розглянуто валок, на осерді якого з гвинтовою канавкою на його зовнішній поверхні встановлено обичайку. Вузол для підведення й відведення холодоагенту закріплюється на одній з цапф валка. Аналогічне технічне рішення, але з прямолінійними каналами на зовнішній поверхні осердя валка, розглянуто в заявці № US2015/136884A1.

Оригінальний охолоджувальний пристрій, запропонований у пат. № CH654492A5, FR2496494A1, містить розташовану вздовж осі валка живильну трубу зі спорядженими форсунками гнучкими трубками, що вільно звисають з неї. Цей пристрій не тільки забезпечує рівномірне та ефективне охолодження робочої поверхні валка, а й простий демонтаж його з валка (одночасним вилученням з валка живильної труби разом з гнучкими трубками).

У пат. № CH666331A5 разом з охолодною рідиною в порожнину валка подається стиснений газ (наприклад, повітря), що забезпечує необхідний ступінь заповнення порожнини валка рідиною й таким чином – стабільний температурний режим робочої поверхні валка.

Обігрівний валок для дроблення зношених шин описано в пат. № CN208407149U. Середня частина бочки цього валка нагрівається інтенсивніше, ніж периферійні ділянки. Проте не зовсім зрозуміло, як запропонований розподіл температури на робочій поверхні валка поліпшує подрібнення шин.

Конструкції обігрівних та/або охолоджуваних валків обладнання для перероблення полімерних

матеріалів і гумових сумішей (у тому числі для руйнування відходів з них) детально розглянуто в праці [11].

За можливістю зміни форми робочої поверхні валка та/або її дробильних елементів розрізняють подрібнювачі з наявністю зазначеної можливості і її відсутністю.

Наприклад, у заявці № WO2013/066933A1 робочу поверхню валка сформовано сукупністю кільцевих секторів, що складають на осерді валка у вигляді циліндричної оболонки, а в а. с. № SU386670A1 робочу поверхню валка сформовано сукупністю кільцевих сегментів. Заміною зазначених секторів або сегментів можна змінювати як форму, так і розміри робочих виступів. Аналогічні рішення запропоновано в пат. № CN205216949U, а. с. № SU1143460A1, заявках № WO2014/033609A2, WO2014/204507A1, WO2015/123770A1, WO2015/123772A1, WO2015/123773A1, WO2018/234347A1, WO2019/002172A1, WO2019/020525A1, WO2019/081313A1, EP0396897A2, DE19606671A1, DE19638237A1, DE102006014874A1.

У пат. № RIRU96039U1 і CH155434A розглянуто валки, змінні обичайки яких затиснуті між торцевими кришками, стягнутими між собою шпильками.

В а. с. № SU762967A1 кожен валок складається з набору дисків, встановлених на валу за допомогою незалежних пружних підвісок. За умови потрапляння між валками грудки твердого матеріалу розсуваються не валки, а їхні окремих диски, пропускаючи вказаний матеріал крізь проміжок між розсувними дисками.

У заявці № DE19614999A1 робоча поверхня валка складається з окремих однакових фігурних елементів (за аналогією з тротуарною плиткою), які встановлюються на бочці валка та стягуються між собою шпильками.

У виконаних на бочці валка поздовжніх пазах (наприклад, типу «ластівчин хвіст») монтуються знімні стрижні різної форми, що утворюють безперервні виступи (заявка № DE19728267A1). Зазначені стрижні можуть бути закріплені як з проміжком один відносно одного, так і впритул один до одного (у цьому разі сукупність зносостійких стрижнів утворює суцільну робочу поверхню валка).

За наявністю додаткових робочих органів, крім валків, розрізняють подрібнювачі з наявністю й відсутністю зазначених додаткових органів.

Наприклад, у заявці № WO03/045561A1 запропоновано двовалкову дробарку з валками, що мають кільцеві й поздовжні виступи й розташовані між двома плитами. Змінюючи напрямок обертання валків, матеріал можна подрібнювати як між валками, так і між кожним з валків і відповідною плитою (рис. 12).

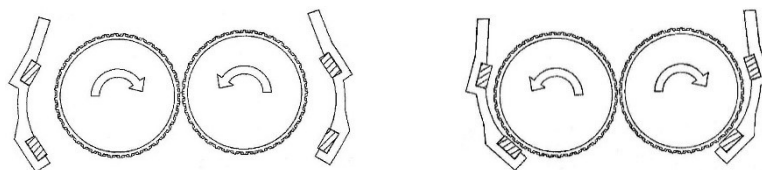


Рис. 12 – Схема робочої зони двовалкової дробарки за заявкою № WO03/045561A1

У пат. № UA15917U, UA55110U на виході з міжвалкового проміжку двовалкової дробарки запропоновано встановлювати додатковий нерухомий подрібнювальний орган у вигляді східчастого клина, виконаного у вигляді набору прямокутних пластин з шириною, зменшується знизу вгору. Аналогічне технічне рішення, але з клином, що має плоскі робочі поверхні, описано в пат. № UA28772A.

У заявці № WO2013/006920A1 також запропоновано матеріал руйнувати не між валками безпосередньо, а між нескінченними стрічками, що частково охоплюють кожний з валків (рис. 13).

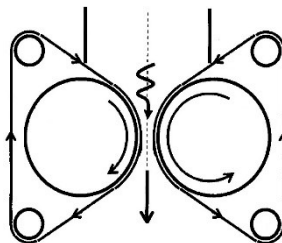


Рис. 13 – Схема двовалкової дробарки за заявкою № WO2013/006920A1

Тривалкова дробарка має валок великого діаметра, а також притиснені до нього збоку та охоплені нескінченною стрічкою два валки меншого діаметра (пат. № RU2571059C1). Руйнування матеріалу

відбувається послідовно у двох між валкових зазорах, при цьому подрібнюваний матеріал фіксується між валком великого діаметра й нескінченною стрічкою (рис. 14).

В а. с. № SU1127630A розташований над опорним валком малого діаметра дробильний валок більшого діаметра знизу охоплює нескінченна стрічка. Подрібнювальний матеріал потрапляє в проміжок між дробильним валком і нескінченною стрічкою, попередньо руйнується, після чого потрапляє в міжвалковий проміжок, у якому стрічка підтискається опорним валком і в результаті матеріал піддається остаточному руйнуванню. Перевага дробарки – високі контактні напруження в міжвалковому проміжку, а також кращі умови захоплення та утримування вихідного матеріалу між дробильним та опорним валками.

У двовалковому подрібнювачі згідно з а. с. № SU1412806A1 між валками розташовано робочу вітку нескінченної стрічки, що складається з окремих ланок, шарнірно з'єднаних між собою. Перевага цього подрібнювача – підвищена продуктивність завдяки утворенню двох робочих проміжків (між кожним з валків і нескінченною стрічкою).

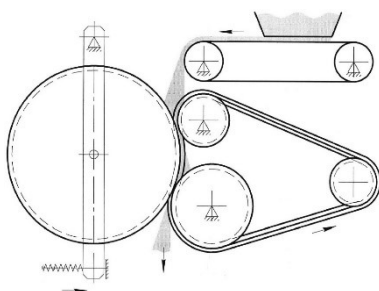


Рис. 14 – Схема тривалкової дробарки згідно з пат. № RU 2571059C1

У двовалковій дробарці згідно з пат. № UA99499U на вході в міжвалковий проміжок встановлено вертикальну плоску плиту, що утворює дві додаткові зони дроблення (з боку обох валків). При цьому в пат. № RU2592905C1 аналогічну плиту виконано з порожниною для охолодної рідини. Для інтенсифікації процесу дроблення аналогічну плиту в пат. № RU2343001C1 виконано такою, що вібрує у вертикальній площині.

У двовалковій дробарці згідно з пат. № RU2680580C1 на вході в міжвалковий проміжок встановлено клин, що вібрує, з увігнутими робочими поверхнями, які утворюють з валками два серпоподібних проміжків, які сходяться.

Двовалкові дробарка містить два валки у вигляді зрізаних конусів з вертикальними поздовжніми осями та спрямованих більшими основами вниз, при цьому валки розміщені у вертикальному кожусі овального поперечного перерізу (пат. № RU2652103C1). Зазначена конструкція поєднує переваги як валкових, і конусних дробарок, оскільки руйнування матеріалу відбувається як між валками, так і між кожним з валків та внутрішньою поверхнею кожуха.

За матеріалом робочі поверхні валків розрізняють дробарки зі сталевими, твердосплавними, керамічними, металокерамічними й композиційними валками.

Найбільш поширені валки зі сталевими валками. При цьому робочу поверхню валків іноді виконують зі зносостійким покриттям, наприклад, методом наплавлення (пат. № CN202179976U, CN203342854U, UA85092C2, заявки № WO2005/113185A1, WO2011/157484A1, WO2013/060330A2, WO2015/165942A1, DE102004025175A1, DE102009050636A1). Також запропоновано зносостійке покриття з металевою матрицею й розподіленими в ній зносостійкими частинками (заявка № WO2007/096215A1).

Сталевий валок зі змінною оболонкою, що утворює робочу поверхню та виготовлена із зносостійкого матеріалу (заявка № WO2011/161583A1). Аналогічні технічні рішення з оболонкою, виготовленою зі зносостійкої легованої сталі (пат. № CN200966996Y) та високохромистої сталі (заявка № WO2013/189759A1).

Сталевий валок із закріпленою на його осерді з натягом змінною біметалевою оболонкою, що містить зовнішній шар твердого зносостійкого матеріалу та внутрішній шар з м'якої сталі (пат. № FR1183202A).

Для полегшення демонтажу зносостійкої втулки з осердя валка її виготовляють з матеріалу, коефіцієнт лінійного розширення якого вище за коефіцієнт лінійного розширення матеріалу осердя. За потреби демонтажу втулки її нагрівають за допомогою індукційної котушки (заявка № WO2015/154833A1).

У заявці № WO2010/121304A1 розглянуто сталевий валок з впровадженими в його робочу поверхню врівень з нею дискретними зносостійкими вставками. При цьому в пат. № DE102011102386B3 і заявці № WO2012/159894A2 щільність розташування вставок у центральній частині валка менше, ніж по краях, що

підвищує рівномірність зносу робочої поверхні в цілому.

У заявці № DE102011120178A1 також запропоновано валок з впровадженими в його робочу поверхню врівень з нею дискретними зносостійкими вставками, при цьому розмір вставок максимальний у центральній частині валка, а по краях – мінімальний.

Сталевий валок з кільцевими або поздовжніми канавками на його поверхні, заповненими врівень з його робочою поверхнею зносостійкими вставками, запропонований у пат. № US5902685A і заявці № EP0728523A1.

Робоча поверхня валка згідно з пат. № RI2650906C2, RU188107U1 і заявкою № WO2014/173877A2 містить виступи, наплавлені із зносостійкого сплаву. Аналогічні рішення запропоновано в пат. № US5312056A і заявці № WO2014/179467A1.

У валку згідно із заявкою № WO2015/049050A1 зносостійкість робочої поверхні забезпечується штирями або планками, зафіксованими в отворах бочки валка. Аналогічні рішення наведено в заявках № WO2016/015553A1, WO2016/015556A1, WO2016/101952A1, WO2016/150719A1, WO2017/125301A1, WO2017/125309A1, WO2019/110607A1. При цьому в пат. № CN101823011A штирі виконано знімними.

У заявці № WO2010/150225A1 валок запропоновано споряджати знімною плоскою гнучкою стрічкою зі зносостійкими частинками, що забезпечує високу ремонтпридатність валка. Аналогічне рішення, але з рельєфною гнучкою стрічкою, запропоновано в заявці WO2011/048226A1.

На бочку валка згідно з пат. № US5054702A намотується дріт різного поперечного перерізу, виконаний із зносостійкого матеріалу. Витки дроту щільно прилягають один до одного, утворюючи робочу поверхню валка. Ця конструкція вирізняється високою ремонтпридатністю. Аналогічний валок, але з намотаним як дротом, так і тросом, ланцюгом або будь-яким іншим довгомірним гнучким елементом, описано в пат. № GB404894A.

Валок з покриттям, що має пори для утримання вологи під час дроблення матеріалу, запропоновано в заявці № WO2017/208998A1. Таке рішення під час дроблення забезпечує зниження пилоутворення.

На робочій поверхні валка згідно з пат. № JPH05131154A містяться безперервні різноспрямовані виступи, що утворюють осередки, заповнені дрібнозернистим матеріалом, який виконує не тільки абразивну, але й захисну функцію.

Подрібнювальні валки з керамічним покриттям описано в заявках № EP1566218A1, US2005/199757A1, JP2001219048A, JP2005230755A, KR19980076284A. Обичайку валка згідно з а. с. № SU1368033A1 виконано з металокераміки.

У пат. № FR411647A бочку валка виконано з бетону, а в пат. № DE915521C і DE940619C – з природного каменю.

Валок, бочку якого виконано з полімерного матеріалу або гуми, армованих нетканним текстильним матеріалом, описано в пат. № GB1440788A, CH561319A5 і FR2201181A1. У пат. № DE10027757A1 на робочу поверхню бочки валка нанесено шар полімерного покриття.

Валок з робочим шаром, виконаним з кам'яної кришки з епоксидним сполучним, запропоновано в заявці № WO03/086634A1A, а у валку згідно з пат. № GB191007715A робочу поверхню утворена сукупністю дерев'яних брусків, закріплених на сталевому осерді.

Валок з робочим шаром, виконаним з композиційного матеріалу й розташованими на ньому дискретними плоскими зносостійкими ділянками запропоновано в заявці № WO95/03126A1. Робочий шар при цьому складається з окремих секторів кільцевого циліндра, закріплюваних на сталевому осерді з утворенням суцільної циліндричної робочої поверхні. При цьому композиційні матеріали дають змогу змінювати експлуатаційні властивості робочих органів валкових подрібнювачів у дуже широкому діапазоні величин [12].

Також винахідники й конструктори пропонують інші удосконалення валкових подрібнювачів, які часто споряджають різними допоміжними пристроями, наприклад, пристроєм для очищення робочих органів, зокрема скребками (пат. № EP0404656B1), обертовими щітками (пат. № DE4332782A1, CN202052569U), а також стрижнями (пат. № CN99336A). У заявці № WO96/37306A1 розглянуто подрібнювач, робочі поверхні валків якого безперервно шліфуються. Це забезпечує стабільність величини міжвалкового проміжку вздовж бочок валків, проте припускає потрапляння продуктів зносу валка в подрібнений матеріал. У пат. № US4765550A і GB2134215A описано валки з каналами для відведення рідкої фази, що міститься в подрібнюваному матеріалі.

Висновки. Аналіз конструкцій валкових дробарок і млинів для руйнування кускових і сипучих матеріалів свідчить про наявність їх численних типорозмірів, проте найбільш затребуваними промисловістю залишаються традиційні двовалкові подрібнювачі з гладкими, рифленими та зубчастими валками.

При цьому найбільш перспективним напрямом вдосконалення валкових дробарок і млинів є розроблення конструкцій подрібнювальних елементів робочої поверхні валків, а також матеріалів для їх виготовлення.

Перспективи подальших досліджень. Надалі передбачено проаналізувати конструкції інших поширених у промисловості видів подрібнювального обладнання – шоккових дробарок і барабаних млинів, а також шляхи підвищення їх ефективності.

Список використаної літератури

1. Сиденко П. М. Измельчение в химической промышленности. Москва : Химия, 1977. 368 с.
2. Шилаев В. П. Основы обогащения полезных ископаемых. Москва : Недра, 1986. 296 с.
3. Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование. В 5 т. Т. 2. Механические и гидромеханические процессы / Д. А. Баранов, В. Н. Блиничев, А. В. Вязьмин и др.; под ред. А. М. Кутепова. Москва : Логос, 2002. 600 с.
4. Мікульонюк І. О. Механічні, гідромеханічні і масообмінні процеси та обладнання хімічної технології. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 340 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38169>
5. Мікульонюк І. О. Стан та перспективи поводження з твердими полімерними відходами // Енерготехнології та ресурсозбереження. 2021. № 2. С. 52–73. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.2.2021.05>
6. Мікульонюк І. О. Стан та перспективи поводження з пневматичними шинами, що втратили свої споживчі властивості (Огляд) // Енерготехнології та ресурсозбереження. 2021. № 3. С. 63–83. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.3.2021.06>
7. Чалых Е. Ф. Оборудование электродных заводов. Москва : Металлургия, 1990. 238 с.
8. Mikulionok I. O. Classification of Roll Grinders for Lumpy and Bulk Materials (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2021. Vol. 56, No 11–12. P. 951–957. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00867-3>
9. ДСТУ 2411–94. Дробарки. Терміни та визначення. Київ : Держстандарт України, 1994. 15 с.
10. Mikulionok I. O. Pretreatment of Recycled Polymer Raw Material // Journal of Applied Chemistry. 2011. Vol. 83, N 6. P. 1105–1113. DOI: 10.1134/S1070427211060371
11. Mikulionok I. O. Rollers with Peripheral Heat-Supply Channels for Treatment of Plastics and Rubber Mixtures (a survey of patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2013. Vol. 49, Nos 5–6. P. 382–387. DOI: 10.1007/s10556-013-9760-2
12. Микулёнок И. О. Классификация термопластических композиционных материалов и их наполнителей // Пластические массы, 2012. № 9. С. 29–38.

Igor Mikulionok, Anton Karvatskii, Serhii Leleka, Olena Ivanenko

ROLL CRUSHERS AND MILLS (Design review)

The classification of roll crushers and mills for the disintegration of lumpy and loose materials processed at the enterprises of chemical, mining, construction, food and electrode industries, as well as in metallurgy, has been developed. A critical review of the most typical designs of roll crushers and mills proposed by scientists, designers and inventors of the world's leading countries has been performed. The designs are analyzed according to the number of rolls, type of roll surface, shape of rolls, relative speed of working surface of rolls, possibility of roll surface temperature control, availability of additional working elements, as well as roll surface material.

Analysis of the designs of roll crushers and mills for the disintegration of lumpy and granular materials shows that they exist in numerous standard sizes, but conventional two-roll crushers with smooth, fluted and toothed rolls remain the most demanded by industry. In this case, the most promising area for improvement of roll crushers and mills is to develop designs of crushing elements for the working surface of rolls and materials for their manufacture.

In the future, it is planned to analyze the designs of other types of crushing equipment widespread in industry, such as jaw crushers and drum mills, as well as ways to improve their efficiency.

Keywords: *chemical technology equipment, roll crusher, roll mill, classification, design.*

References

1. Sidenko, P. M. (1977). *Izmelcheniye v khimicheskoy promyshlennosti* [Grinding in the chemical industry]. Khimiya, Moscow, URSS.
2. Shilayev, V. P. (1986). *Osnovy obogashcheniya poleznykh iskopayemykh* [Basics of mineral processing]. Nedra, Moscow, URSS.
3. Baranov, D. A., Blinichev, V. N., Vyazmin, A. V., Zhikharev, A. S., Katalymov, A. V., Makarov, Yu. I., Mizonov, V. Ye., Orlov, V. A., Sokolov, V. I., Ushakov, S. G., Frolov, V. F., Chepura, I. V. (2002). *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. Yavleniya perenosy, makrokinetika, podobiye, modelirovaniye, proyektirovaniye. T. 2. Mekhanicheskiye i gidromekhanicheskiye protsessy* [Processes and devices of chemical technology. Transfer phenomena, macrokinetics, similarity, modeling, design. Vol. 2. Mechanical and hydromechanical processes]. Ed.: Kutepov A. M. Logos, Moscow.
4. Mikulionok, I. O. (2014). *Mekhanichni, hidromekhanichni i masoobminni protsessy ta obladnannia khimichnoi tekhnologii* [Mechanical, Hydromechanical, and Mass-Exchange Processes and Equipment in Chemical Engineering]. Kyiv : NTUU «KPI», 340 p. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38169>
5. Mikulionok, I. O. (2021). Stan ta perspektyvy povodzhennia z tverdymy polimernymy vidkhodamy [A state of art and prospects of plastic solid waste management]. *Energotekhnologii ta resursozberezhennia*, no 2, pp. 52–73. doi: 10.33070/etars.2.2021.05 (Ukr.)
6. Mikulionok, I. O. (2021). Stan ta perspektyvy povodzhennia z pnevmatychnymy shynamy, shcho vtratyly svoi spozhyvchi vlastyvoli (Ogliad) [A state of art and prospects of used pneumatic tires management (Review)]. *Energotekhnologii ta resursozberezhennia*, no 3, pp. 63–83. doi: 10.33070/etars.3.2021.06
7. Chalykh, Ye. F. (1990). *Oborudovaniye elektrodnykh zavodov* [Equipment for electrode plants]. Moscow : Metallurgiya, 238 p.
8. Mikulionok, I. O. (2021). Classification of Roll Grinders for Lumpy and Bulk Materials (Survey of Patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 56, no 11–12, pp. 951–957. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00867-3>
9. DSTU 2411–94. *Drobarky. Terminy ta vyznachennia* [Crushers. Terms and definitions]. Kyiv, Derzhstandart Ukrainy, 1994. 15 p.
10. Mikulionok, I. O. (2011). Pretreatment of Recycled Polymer Raw Material. *Journal of Applied Chemistry*, vol. 83, no 6, pp. 1105–1113. doi: 10.1134/S1070427211060371
11. Mikulionok, I. O. (2013). Rollers with Peripheral Heat-Supply Channels for Treatment of Plastics and Rubber Mixtures (a survey of patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 49, no 5–6, pp. 382–387. doi: 10.1007/s10556-013-9760-2
12. Mikulionok, I. O. (2012). Klassifikatsiya termoplasticheskikh kompozitsionnykh materialov i ikh napolniteley [Classification of thermoplastic composite materials and their fillers]. *Plasticheskiye massy*, no 9, pp. 29–38.