

ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 628.4.036:621.926.2(048.83)

МІКУЛЬОНОК І. О.^{1,2*}, ШВАЧКО Д. Г.¹

¹ Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

² Інститут газу Національної академії наук України

ПОДРІБНЮВАЧІ БУДІВЕЛЬНИХ ВІДХОДІВ (Класифікація та огляд конструкцій)

Будівельна галузь є джерелом утворення до половини побутових відходів у світі, тому в контексті циркулярної економіки будівельні відходи, й насамперед відходи від руйнувань, спричинені активними бойовими діями, терористичними актами й диверсіями, мають розглядатися як потенційний ресурс вторинної сировини. Основними компонентами будівельних відходів є бетон, цегла, облицювальна плитка, черепиця й кераміка, деревина, скло, полімерні й бітумні матеріали, метали, кабелі, ґрунт та каміння, дорожній баласт (щебінь), ізоляційні матеріали, а також будівельні матеріали та продукція на основі гіпсу. Натепер найбільш ефективними методами утилізації будівельних відходів є їх використання у будівництві та промисловості будівельних матеріалів з мінімальною зміною фізико-хімічних властивостей і мінімізацією утворення нових відходів. У цьому разі однією з основних операцій з оброблення будівельних відходів є їх розділення на дрібніші фрагменти, зокрема процеси дроблення й подрібнення. Аналіз конструктивно-технологічного оформлення цих процесів показує, що крім традиційного стаціонарного спеціалізованого подрібнювального обладнання наразі широко впроваджуються мобільні універсальні подрібнювачі, насамперед фрезерно-роздавлювального-розривного типу – шредери, які дають змогу ефективно обробляти відходи різної природи (як на мінеральній, так і природній та синтетичній основі). Також набувають поширення комбіновані подрібнювальні установки. При цьому, незважаючи на значну кількість розроблених типів і розмірів подрібнювальне обладнання продовжує удосконалюватися.

Ключові слова: техногенна безпека, будівельні відходи, відходи від руйнувань, утилізація відходів, подрібнювачі, класифікація, патентна документація

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2026.354343

*Corresponding author: i.mikulionok@kpi.ua

Received 13 January 2026; Accepted 05 February 2026

Постановка проблеми.

Будівельна галузь є джерелом утворення до 50 % побутових відходів у світі [1], тому зрозуміла актуальність ефективного управління таким видом великотоннажних відходів як будівельні відходи.

Будівельні відходи в традиційному значенні – це будь-які будівельні матеріали й вироби з них, які не планується використовувати за призначенням, а також залишки будівельних, ремонтних і демонтажних робіт, включаючи роботи з капітального ремонту, реновації, реставрації, реконструкції або знесення/демонтажу будівель, споруд, промислових об'єктів, доріг, інженерних та інших комунікацій.

Одним з різновидів будівельних відходів є відходи, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків [2], морфологічний склад яких надзвичайно різноманітний і залежить від джерела утворення. Це так звані відходи від руйнувань – частини (уламки) пошкоджених (зруйнованих) об'єктів, а також матеріали, предмети, які були всередині або поряд з такими об'єктами у момент пошкодження (руйнування) та/або виконання робіт з демонтажу та які повністю або частково втратили свої споживчі властивості та не можуть у подальшому використовуватись за місцем їх утворення чи виявлення.

Особливого значення проблема будівельних відходів і насамперед відходів від руйнувань останнім часом

набуває для України, адже в результаті повномасштабного вторгнення Російської Федерації кількість утворених будівельних відходів істотно збільшується. За офіційними даними вже через рік після початку активних воєнних дій, а саме на початку 2023 року відходи руйнації в Україні майже зрівнялися з кількістю твердих побутових відходів, що в середньому утворюються в країні за рік [3].

За період з 24 лютого 2022 року по 31 грудня 2024 року лише житловий сектор України зазнав прямих втрат від російської агресії на суму 57,6 млрд USD [4], проте крім житла значних руйнувань зазнали об'єкти критичної інфраструктури, насамперед енергетики, металургії, транспорту, хімічної, харчової та переробної галузей промисловості, освіти, науки, культури та спорту.

Значні обсяги будівельних відходів у контексті циркулярної економіки мають розглядатися як потенційний ресурс різноманітної вторинної сировини, й насамперед мінеральної сировини, тому вирішення проблеми ефективної утилізації цими великотоннажними відходами є надзвичайно актуальним завданням.

Аналіз попередніх досліджень.

Будівельні відходи утворюються насамперед під час будівництва будівель і споруд, виконання робіт з їх капітального ремонту, реконструкції, демонтажу/знесення будівель і споруд, а також утворених у результаті їх руйнування.

Зокрема під час зведення 100-квартирного будинку в середньому утворюється 15–20 т твердих відходів, основну масу яких становить бита цегла, залишки затверділого бетону й будівельного розчину, стінових блоків з керамзитобетону, ніздрюватих бетонів, гіпсокартону, пінопласту, мінеральної вати тощо. А під час демонтажу/знесення одного застарілого п'ятиповерхового будинку в середньому утворюється 3000 м³ будівельних відходів, до складу яких зазвичай входить, % (мас.): 52 – бетон і залізобетон, 32 – кам'яні стінові матеріали (цегла, стінові блоки, піно- та газобетон), 8 – асфальт і будівельні розчини, 4 – метали та їхні сплави, 2 – деревина та пластмаси, 1 – керамічні вироби (сантехнічна кераміка, керамічна плитка), 1 – гіпсокартон, скло та інші відходи [5].

Як бачимо, основними компонентами будівельних відходів є матеріали й вироби на основі мінеральної сировини (бетон, цегла, бетонний розчин, кераміка тощо), а також природних і синтетичних полімерів [6], ефективна утилізація яких зазвичай передбачає дроблення й подрібнення для їх повторного використання чи перероблення.

Процеси дроблення й подрібнення є одними з найбільш енергоємних, зокрема енергоємність підготовчих процесів на підприємствах зі збагачення мінеральної сировини, до яких насамперед належать саме дроблення й подрібнення, а також грохочення, класифікація, промивання й термічне оброблення (випал), досягає 60 % і більше [7, 8], тому зрозуміло, що розроблення та експлуатація ефективного подрібнювального обладнання є далеко не другорядним питанням у процесі утилізації будівельних відходів.

Аналіз окремих видів подрібнювального обладнання хімічної технології, яке може бути використане також і в промисловості будівельних матеріалів, було здійснене в працях [9–13], проте комплексному аналізу дробарок і млинів для руйнування будівельних відходів уваги майже не приділялось.

Метою статті є критичний аналіз конструкцій подрібнювального обладнання, а саме дробарок і млинів, призначених для руйнування будівельних відходів, які утворюються під час будівництва, ремонту, демонтажу або знесення будівель і споруд різноманітного призначення.

Виклад основного матеріалу.

Будівельні відходи утворюються під час будівництва, під час виконання робіт з ремонту й реконструкції, а також під час демонтажу/знесення будівель і споруд (у тому числі зруйнованих; рис. 1).

Будівельні відходи, насамперед у зарубіжних наукових виданнях, часто називають відходами будівельних і монтажних робіт (construction and demolition waste). При цьому вважається, що обсяг відходів монтажних робіт перевищує обсяг відходів будівельних робіт у 20–30 разів [15].

Будівельні відходи можуть бути як промисловими, так і побутовими, основна відмінність яких – обсяги та джерела утворення: у першому випадку це результат масштабного будівництва або демонтажу/знесення будівель і споруд з утворенням великотоннажних відходів, а в другому – результат ремонту квартир, офісних приміщень, дач, приватних будинків і господарських споруд тощо.

Найкращими технологіями утилізації будівельних відходів зазвичай вважається застосування бетону, щебеню, цегляного бою, піску, ґрунту під час виготовлення щебеневої суміші, а також часткове застосування будівельних відходів як ізоляційного матеріалу на полігонах твердих побутових відходів. Інші складові будівельних відходів, які є вторинною сировиною, зазвичай передають на переробні підприємства. При цьому в обох випадках відходи підлягають дробленню та/або подрібненню.

Основні компоненти будівельних відходів і подрібнювачі для них наведено на рис. 2.



Рис. 1 – Зруйнований внаслідок російської атаки будинок у Солом'янському районі столиці України (17 червня 2025 року) [14]

При цьому за характером дії робочих органів на оброблюваний матеріал в часі подрібнювачі можуть бути неперервної та періодичної (переривчастої, циклічної) дії, а за ступенем мобільності – стаціонарними, пересувними (рухомими), а також універсальними.

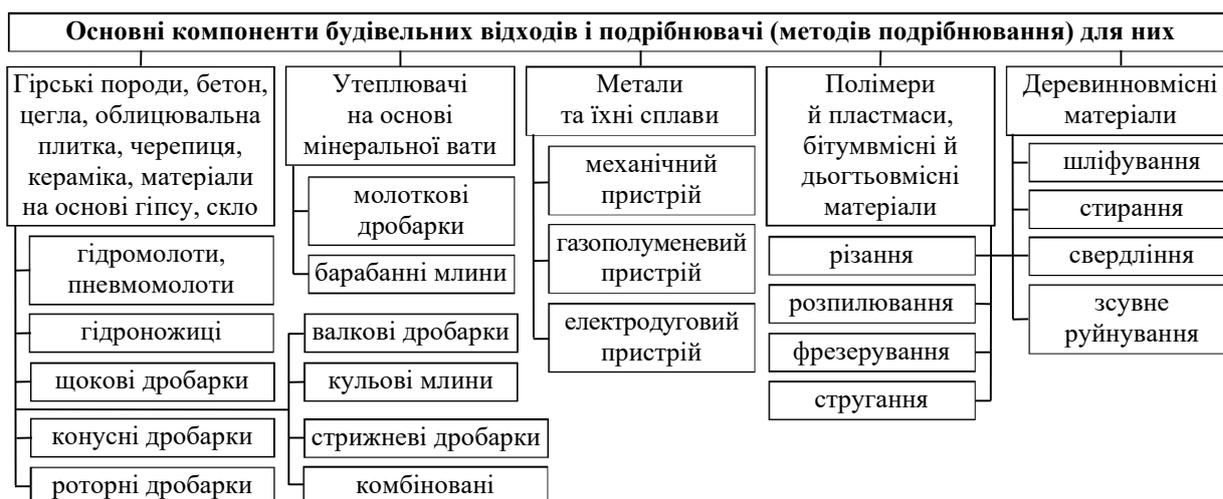


Рис. 2 – Класифікації основних компонентів будівельних відходів і подрібнювачів (методів подрібнювання) для них

Після дроблення й подрібнення або іншого розділення на дрібніші фрагменти відходи на мінеральній основі, що містять природний камінь, бетон і будівельні розчини, мінерально-в'язучі речовини, скло та кераміку зазвичай переробляють на шпаклівку, штукатурку, штучний камінь, декоративні фасадні покриття, щебінь, порошкові наповнювачі для виробництва стінових блоків і суміші для монолітного лиття, наповнювачі для виробництва вогнестійких стінових блоків, порошок сировину для безавтоклавного виробництва пінобетонних блоків або застосування в монолітному будівництві, прес-порошки, суміші для шлікерного лиття, добавки для вогнестійких штукатурок, а також сировину для виробництва пігментів.

Дерев'яні та деревинновмісні матеріали та конструкції зазвичай переробляють на деревинну стружку й вироби на її основі; деревинновмісні пластмаси, арболіт, теплоізоляційні та звукоізоляційні плити; відходи на хімічній основі, такі як полімери й пластмаси, а також бітумвмісні й дьогтьовмісні матеріали – на

тонкодисперсні порошки для виробництва добавок в асфальтобетонні суміші, добавки для виробництва деревних пластмас, наповнювачі для виробництва стінових блоків, порошки, пластівці або гранули для виробництва вторинної полімерної продукції; відходи, що містять брухт металів, – на металургійну сировину.

Перелічені відходи зазвичай достатньо ефективно піддаються утилізації, проте в них можуть бути присутні й такі небезпечні матеріали як будівельні фарби, розчинники, люмінесцентні лампи, електронно-променеві трубки та інші електронні відходи, які потребують подальшого спеціального оброблення для запобігання їхньому негативному впливу на людину й довкілля [16].

Однією з перших операцій, яким піддаються будівельні відходи, є їх сортування, яке зазвичай здійснюють у два послідовні етапи:

- на об'єкті утворення будівельних відходів;
- на спеціалізованому об'єкті оброблення відходів.

До відходів, що потребують сортування на місці утворення, зазвичай відносять: відходи бетону, залізобетону, цегли, каменю, керамічної та цементно-піщаної черепиці, кераміки та інші, що утворюються в результаті знесення стін, несучих конструкцій і покрівлі; полімерні відходи; бітумвімісні відходи; відходи утеплювачів на основі мінеральної вати (скловолокно, кам'яна вата); відходи дерев'яних і деревинних дверних прорізів і коробок; відходи гіпсу; відходи скла та склопакетів; відходи, що містять брухт металів; інші відходи.

Відходи, забруднені хімічними реагентами (у тому числі побутової хімії), медикаментами, азбестом, свинцем, ртуттю, паливом і нафтопродуктами відокремлюють від інших відходів, окремо складають і спрямовувати на підприємства, що спеціалізуються на утилізації відходів цих видів.

Сортування на спеціалізованому об'єкті здійснюють у такій послідовності:

- попереднім сортуванням з потоку відходів вилучають деревину, метали й щебінь;
- грохоченням відсіюють піщану фракцію;
- повітряною класифікацією вилучають легку фракцію – папір, полімери, деревину;
- магнітною сепарацією вилучають металеві включення;
- зазвичай на конвеєрі ручного сортування вилучають деревну фракцію, відходи полімерних виробів, а також кольорові метали.

Після завершення сортування оброблений потік відходів зазвичай представляє собою чистий потік бетонних і цегляних відходів, що подають на дроблення, яке може здійснюватися як на спеціалізованому об'єкті, так і за наявності відповідного обладнання безпосередньо на місці їх утворення.

Потрібно зазначити, що останнім часом на високотехнологічних спеціалізованих підприємствах з утилізації будівельних відходів замість складного та суб'єктивного ручного сортування застосовуються методи, які ґрунтуються на застосуванні комп'ютерної техніки, робототехніки, а також штучного інтелекту [17–19].

Перероблення (утилізація) некондиційних бетонних і залізобетонних виробів здійснюється їх дробленням, подрібненням, а також іншими методами поділу на фрагменти.

Технологічний процес дроблення залізобетонних, бетонних і цегляних блоків включає два етапи:

- попереднє дроблення великогабаритних блоків під розміри приймального бункера дробарки;
- остаточне вторинне дроблення з відділенням арматури та інших елементів.

Як обладнання для попереднього дроблення використовують мобільні дробильні установки, навісне обладнання для екскаваторів (гідрокліщі (гідроножичи), пневмо- й гідромолоти), ручний пневматичний інструмент.

Залежно від складу відходів і вимог до одержуваної з них продукції застосовують різноманітні технології дроблення, зокрема одно- і двостадійне дроблення як без поділу на фракції, так і з поділом на фракції.

Для одностадійного дроблення залізобетонних виробів зазвичай застосовують шоківі дробарки, а для двостадійного – роторні або конусні для одержання зерна щебеню кубічної форми. При цьому дробарки можуть бути стаціонарними, мобільними або універсальними.

Технологічний процес підготовки до утилізації будівельної арматури передбачає такі операції:

- зняття арматури з установки первинного руйнування бетону;
- вилучення залишків арматури з подрібненого бетону;
- розділення арматури на мірні відрізки.

Деревні відходи можуть використовуватися як сировина для виробництва деревної продукції, а також паливних брикетів, фіброліту, деревинно-стружкових плит тощо шляхом їх подрібнення до стану тирси і стружки.

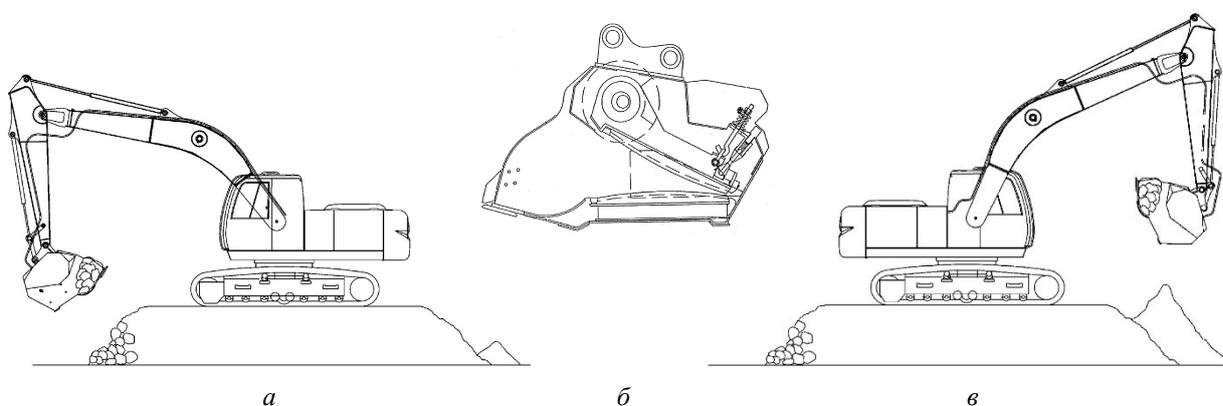
Скловії піддають подрібненню з метою отримання порошкоподібного сипучого матеріалу з частинками розміром менше 0,5–1,0 мм.

Дроблення відходів утеплювача здійснюють лише на спеціалізованому об'єкті у дві стадії: дроблення в молотковій дробарці до частинок розміром менше 8 мм і подрібнення в стрижневому барабанному млині до частинок розміром менше 1 мм.

Дроблення інших відходів, у тому числі полімерних, здійснюють на спеціалізованому об'єкті.

Для попереднього дроблення великогабаритних блоків під розміри приймального бункера дробарки найчастіше використовують оснащену спеціальним обладнанням техніку на самохідному шасі, наприклад, екскаватори з навісним пневмо- або гідрообладнанням. Проте дотепер часто застосовують і ручний пневмоінструмент (насамперед відбійні пневмомолотки, перфоратори тощо).

Екскаватор з вбудованою в його ківш щоквою дробаркою, рухома щока якої має привід від електричної системи екскаватора (пат. EP2572789A1, JP2012066253A, заявки WO2011/145631A1, US2013/153697A1; рис. 3). Перевагою конструкції є її компактність, а недоліками – складнощі під час дроблення високоміцних відходів, а також можливість переподрібнення вихідних відходів через відсутність попереднього грохочення й виділення з вихідних відходів дрібної фракції.



a – подрібнення вихідних відходів; *б* – будова ковша; *в* – розвантаження подрібнених відходів

**Рис. 3 – Екскаватор із вбудованою в його ківш щоквою дробаркою
(пат. EP2572789A1, JP2012066253A, заявки WO2011/145631A1, US2013/153697A1)**

Також у ковші екскаватора запропоновано встановлювати шредер для дроблення бетонних відходів (пат. JPH10159119A; рис. 4).

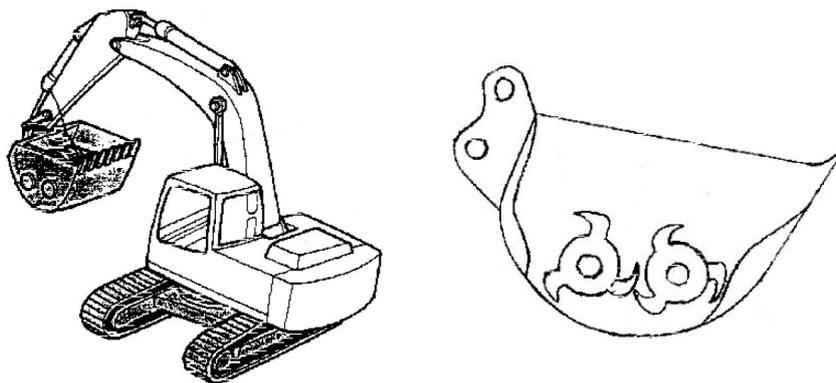


Рис. 4 – Екскаватор із вбудованим у його ківш шредером (пат. JPH10159119A)

Розроблено потужні мобільні дробильні установки у вигляді навісного обладнання екскаваторів, зокрема у вигляді гідромолоту й гідроножиць (гідрокліщів) (пат. CN222288312U; рис. 5). Перевага цих установок – висока універсальність для руйнування великогабаритних будівельних конструкцій та їхніх елементів.

Установка для виробництва заповнювача з бетонних відходів містить щокону дробарку, грохот для виділення грудок для повторного дроблення фракції, а також фрикційний пристрій для відокремлення від кондиційних грудок подрібненого бетону залишків будівельного розчину з метою одержання чистого вторинного гравію як високоякісного заповнювача нових бетонних сумішей (пат. JPН08245248А).

Щокону дробарка з подвійною рухомою щокону, кожна з частин якої має індивідуальний привід (пат. CN120532571А; рис. 6). Зазначена конструкція розширює технологічні можливості дробарки, проте істотно ускладнює її виготовлення та експлуатацію.

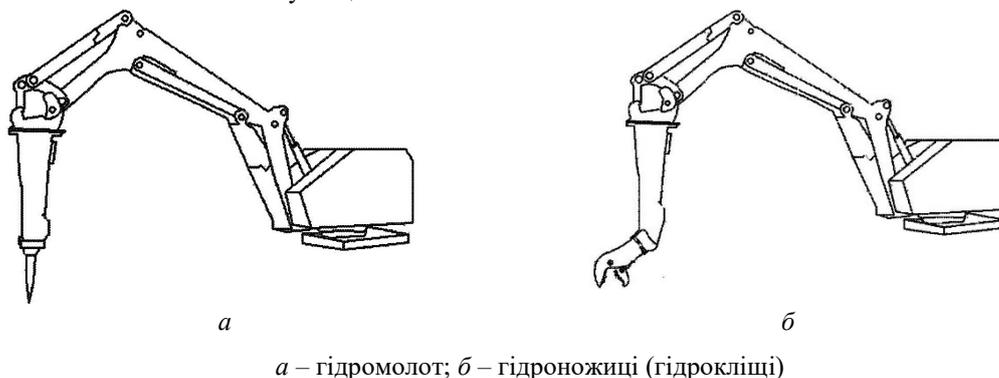


Рис. 5 – Навісне обладнання екскаваторів (пат. CN222288312U)

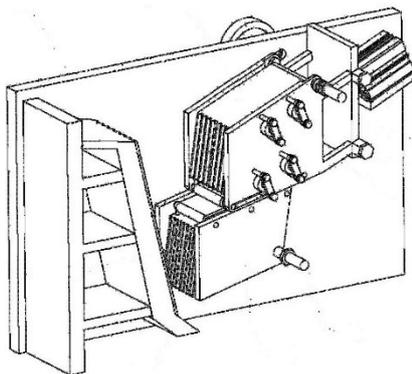


Рис. 6 – Схема будови щокону дробарки з подвійною рухомою щокону (пат. CN120532571А)

Розроблено спосіб двостадійного дроблення за відкритим циклом, перша стадія якого реалізується щокону дробаркою, а друга – конусною з наступним послідовним грохоченням одержаного продукту на двох грохотах та одержанням чотирьох фракцій сипкого матеріалу – по дві на кожному грохоті (пат. EP0548491А1).

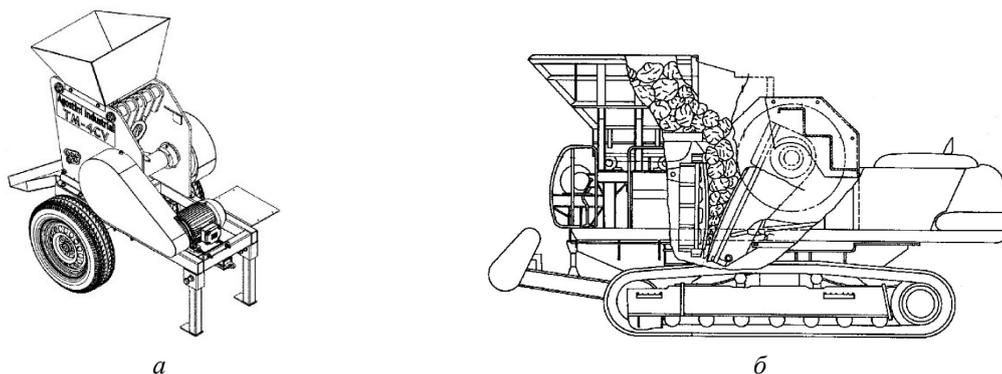
Також виробництво з бетонних відходів дрібного заповнювача одержуваних для нового будівництва бетонних сумішей може відбуватися на кульовому млині (пат. EP4089062А1).

Крім традиційних стаціонарних щоконних, конусних та інших дробарок останнім часом розроблено багато конструкцій малогабаритних мобільних дробарок. Запропоновано компактну пересувну (рухому) щокону дробарку, яка змонтована на автомобільному причепі й може бути використана безпосередньо на місці утворення відходів (пат. EP4260940А1; рис. 7, а).

Щокону дробарку для оброблення будівельних відходів змонтовано на гусеничному шасі (пат. JPН0857343А; рис. 7, б). Самохідні дробильна установка характеризується зручністю контролю оператором стану процесу завантаження й дроблення в дробарці. Також можливість керування процесом дроблення як безпосередньо з установки, так і перебуваючи поряд з нею (пат. JPН0857344А). Запропоновано й інші заходи щодо забезпечення зручності експлуатації дробильної установки (пат. JPН0880448А, JPН0880449А,

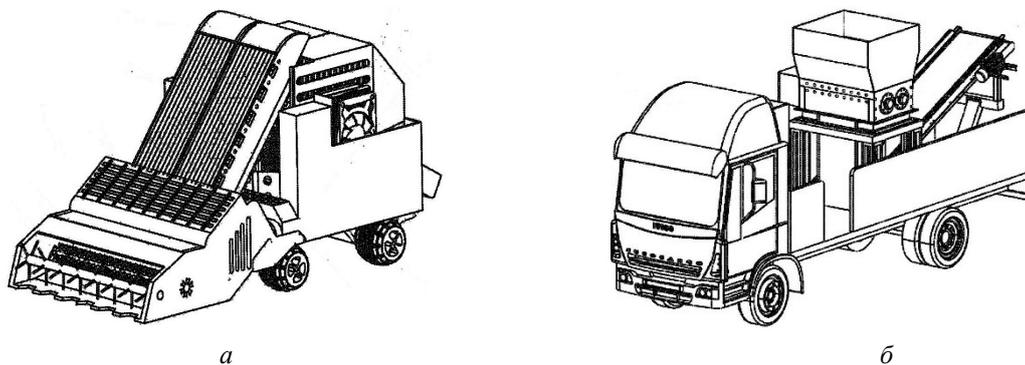
JPН0880450А, JPН0880451А, JPН0893241А, JPН0893242А, JPН0893243А, JPН08151803А, JPН08155327А, JPН08158666А, JPН08168689А, JPН08168692А, JP2025054270А), зокрема її оснащення магнітним сепаратором для видалення з одержуваного продукту металевих включень (пат. JPН0893244А, JPН08168690А, JPН08168691А).

Пересувна (рухома) дробильна установка змонтована на самохідному автомобільному шасі й може бути використана безпосередньо на будівельному майданчику (пат. CN119456169А; рис. 8, а). Установка містить послідовно розташовані ківш, роторну дробарку, конвеєр і шоківу дробарку, при цьому верхні частини ковша й конвеєра оснащені сонячними батареями для генерування електроенергії, що підвищує енергоефективність установки. Зазначена установка двостадійного дроблення характеризується високою мобільністю та ефективністю. Установку аналогічного призначення також розглянуто в пат. CN223324682U (рис. 8, б).



а – на автомобільному причепі (пат. EP4260940A1); б – на гусеничному шасі (пат. JPН0857343А)

Рис. 7 – Пересувні дробильні установки зі шоківими дробарками



а – пат. CN119456169А; б – пат. CN223324682U

Рис. 8 – Пересувні дробильні установки на самохідному автомобільному шасі

Розроблено змонтований на самохідному або причіпному автомобільному шасі мобільний автономний завантажувально-дробильний агрегат для перероблення бетону, гірських порід, відходів цегельної кладки тощо для виробництва однорідного сипкого матеріалу з еквівалентним діаметром зерен до одного дюйма. Цей агрегат доцільно застосовувати безпосередньо на місці утворення будівельних відходів або поблизу нього, а одержаний подрібнений матеріал можна використовувати як гравійну основу для доріг або як вторинний заповнювач для бетону (заявка US2011/278384А1).

Компактну універсальну пересувну дробарку-шредер для оброблення будівельних відходів різної природи (деревинновмісні й скляні відходи, гіпсокартон тощо), змонтовану на автомобільному причепі, легко перевозити до місця утворення будівельних відходів (пат. KR102676048B1, KR102682113B1; рис. 9). Зазначену дробарку легко пересувати по сходах на потрібний поверх будівлі.

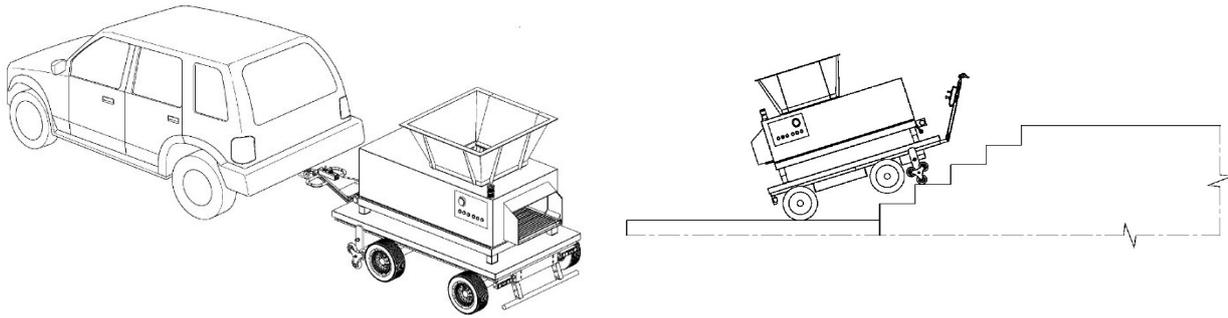
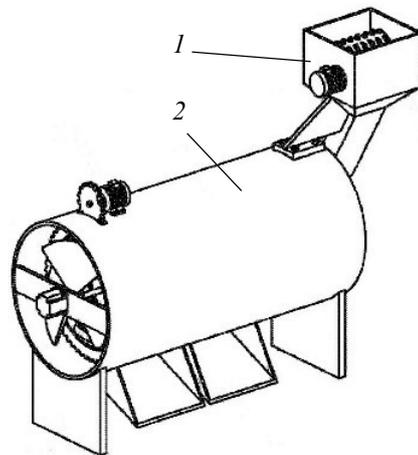


Рис. 9 – Пересувна універсальна дробарка-шредер на автомобільному причепі (пат. KR102676048B1, KR102682113B1)

Мобільна установка для дроблення та грохочення будівельних відходів на місці їх утворення містить причіпне автомобільне шасі зі змонтованою на ньому дробаркою та грохотом на виході з неї (пат. US5445330A). Ця установка призначена для перероблення на місці бетонних і кам'яних відходів, що утворюються в результаті знесення будівель або їх будівництва, перетворенням відходів на заповнювач, який можна змішувати з цементом для виробництва нового бетону.

Також конструкції мобільних подрібнювачів будівельних відходів, змонтованих переважно на автомобільних причепах або самохідних автомобільних шасі, запропоновано а пат. CN119259221A, CN120644269A, CN222606633U, CN222855635U, CN223159322U, CN223263959U.

Розроблено конструкцію двоторного шредера (подрібнювача з тихохідними валами, оснащеними дискретними виступами для роздавлювально-різального руйнування відходів), вихід якого сполучено зі входом трисекційного барабанного грохота (заявка WO2025/236770A1; рис. 10). Така установка дає змогу не лише подрібнювати будівельні відходи різної природи, а й одночасно розділяти подрібнений продукт на фракції за розмірами частинок.



1 – подрібнювач; 2 – барабанний грохот в циліндричному корпусі

Рис. 10 – Дробильно-фракціонувальна установка будівельних відходів (заявка WO2025/236770A1)

Пересувний (рухомий, мобільний) подрібнювач-шредер, який розміщується безпосередньо на будівельному майданчику, містить вал з радіально розташованими на ньому білами, а також закріплену на корпусі подрібнювача планку з нерухомими білами. Розвантаження подрібненого продукту з подрібнювача й транспортування на подальшу утилізацію здійснюється потоком повітря (пат. US3727846A; рис. 11).

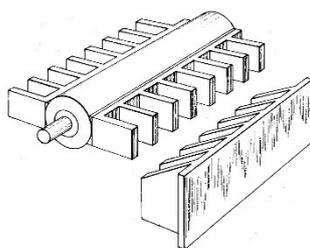


Рис. 11 – Робочі органи пересувного подрібнювача-шредера (пат. US3727846A)

Універсальний шредер з двома роторами, змонтованими з можливістю обертання як в одному, так і в протилежних напрямках, для подрібнення різних компонентів будівельних відходів, а також видалення відходів, що не можуть бути подрібнені (пат. US5248100A; рис. 12). Зміною положення похилих стінок бункера, а також напрямку обертання роторів потік подрібнених або не подрібнених відходів спрямовують у відповідний випускний патрубок.

Надзвичайно ефективний подрібнювач скляних будівельних відходів містить двороторний шредер, розміщений всередині обертового циліндричного сита з внутрішніми й зовнішніми лопатками (пат. CN118976560A; рис. 13). Під час роботи внутрішні лопатки спрямовують крупну фракцію знову на подрібнення, в зовнішні лопатки забезпечують вивантаження готового продукту. Робоча камера частково заповнена охолоджувально-промивальною водою, так що нижні частини дробильних вальців завжди перебувають у її шарі. Вода не лише охолоджує та очищує робочі органи подрібнювача, а й запобігає пилоутворенню під час дроблення.

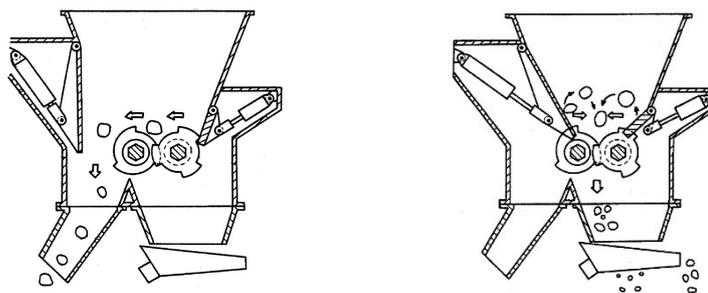
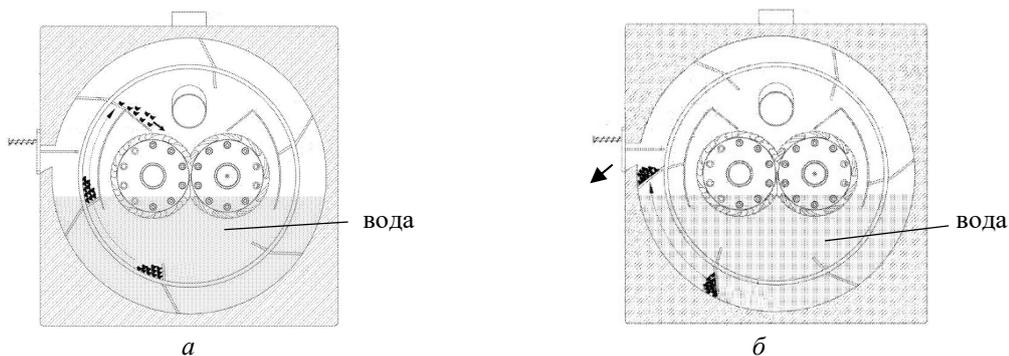


Рис. 12 – Шредер з двома як односпрямовано, так і зустрічно обертовими роторами (пат. US5248100A)



a – процес дроблення будівельних відходів; *б* – процес розвантаження продукту

Рис. 13 – Шредер, розташований в барабанному грохоті (пат. CN118976560A)

Подрібнювач будівельних відходів містить двороторний шредер і розташований під ним хитний грохот для повернення некондиційних крупних грудок подрібнених відходів на вхід шредера для додаткового подрібнення (пат. CN120155286A; рис. 14). Рух просіювальної поверхні грохота забезпечується шатуном.

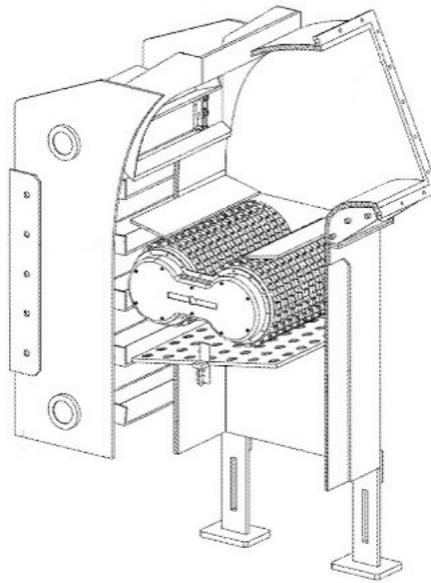


Рис. 14 – Схема будови подрібнювача зі шредером і розташованим під ним хитним грохотом (пат. CN120155286A)

Двороторний шредер з вертикальним розташуванням роторів у камері дроблення із зубчастими стінками, що сходяться між собою в напрямку розвантаження готового продукту (пат. CN214107148U; рис. 15). Розташований під камерою дроблення грохот відділяє крупну фракцію, яка шнековим конвеєром повертається на повторне дроблення.

Двостадійна установка для дроблення міцних будівельних відходів містить подрібнювач ударної дії першої стадії та шредер другої стадії (пат. CN119951615A; рис. 16). Подрібнювач першої стадії включає два паралельні горизонтально розташовані колінчасті вали із змонтованими на них назустріч один одному ударними стрижнями (піками, зубилами). Попередньо розколені міцні шматки будівельних відходів далі спрямовуються в шредер для остаточного дроблення.

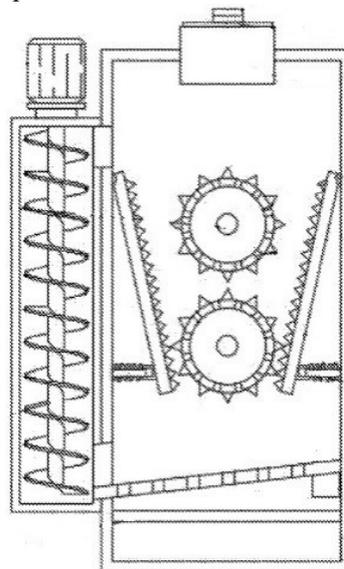


Рис. 15 – Двороторний шредер з вертикальним розташуванням роторів (пат. CN214107148U)

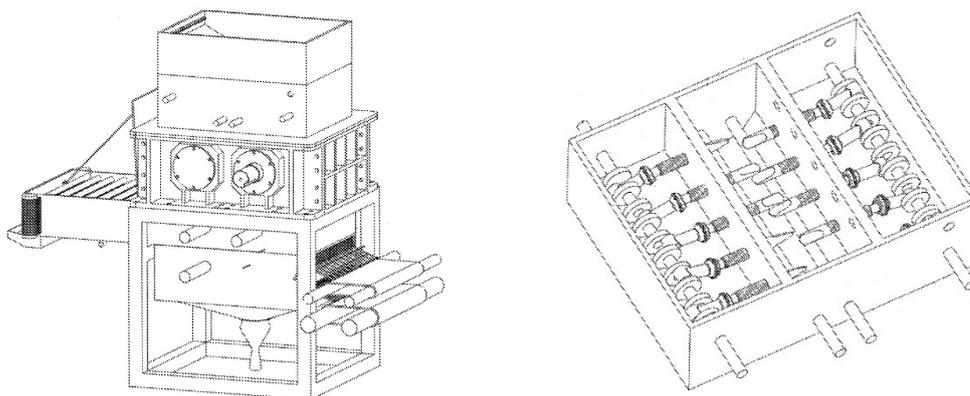


Рис. 16 – Загальний вигляд двостадійної установки для дроблення міцних будівельних відходів і конструкція подрібнювача ударної дії першої стадії дроблення (пат. CN119951615A)

Двовалкова дробарка для дроблення будівельних відходів на основі мінеральної сировини (пат. KR101026225B1; рис. 17). Зусилля дроблення регулюють налаштуванням пружин стискання рухомого валка.

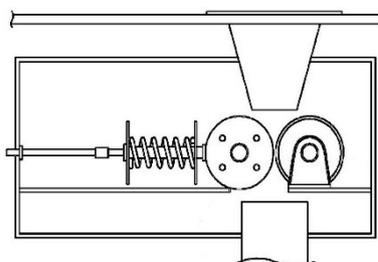


Рис. 17 – Двовалкова дробарка (пат. KR101026225B1)

Подрібнювальні установки, що містять дво валкову дробарку із зубчастими валками та розташованій під нею грохот для виділення з подрібненого матеріалу кондиційного продукту (пат. CN120790298A, CN223113218U).

Багатовалкова триступінчаста дробарка для дроблення будівельних відходів на основі мінеральної сировини (пат. KR101138419B1; рис. 18). Подрібнюваний матеріал послідовно проходить три між валкові проміжки, утворені барабаном і трьома притискними валками, які обертаються від групового привода, що забезпечує однаковість лінійних швидкостей всіх чотирьох робочих органів дробарки, що мінімізує стирання сировини та її пилоутворення.

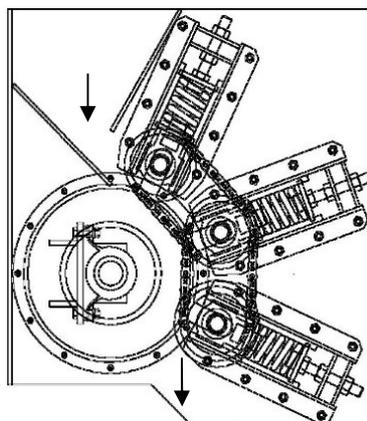


Рис. 18 – Багатовалкова дробарка бетонних відходів (пат. KR101138419B1)

Ротор дробарки будівельних відходів містить численні зубці, аналогічні зубці закріплено на внутрішній поверхні камери дроблення, при цьому її нижня частина виконана перфорованою для видалення готового продукту (пат. CN119327839A). Одержаний продукт використовують у виробництві цегли.

Для виробництва дрібного заповнювача бетонних сумішей з будівельних відходів останні піддають подрібненню в барабанному млині (заявка US2024/238801A1).

Також для виробництва вільного від будівельного розчину заповнювача бетонних сумішей з будівельних відходів розроблено спосіб подрібнення в барабанному млині (пат. KR101549692B1). Приводний барабан виконано з вікнами на його кінцевих ділянках для завантаження вихідної сировини та розвантаження подрібненого продукту, а також перфорацією на його стінці для видалення відділеного будівельного розчину від частинок бетону, а також некондиційного бетонного порошку. Всередині барабана змонтовано співвісний з ним та оснащений індивідуальним приводом вал із закріпленими на ньому ударними лопатками.

Подрібнювач з оснащеним буровою головкою валом-штоком з обертовим рухом і зворотно-поступальним у вертикальному напрямку рухом для руйнування великих фрагментів бетону, а також пресовим механізмом для брикетування пилоподібних продуктів дроблення (пат. KR102212190B1, KR20240071761A). Наявність пресового механізму дає змогу спростити транспортування некондиційних продуктів дроблення до місця їх утилізації, а також утримувати ділянку подрібнення у відносній чистоті.

Роторна дробарка не лише дає змогу подрібнювати будівельні відходи для виробництва заповнювача бетонних сумішей, а й сприяти ефективному відділенню сторонніх домішок від одержуваного гравію (пат. KR102270489B1; рис. 19).

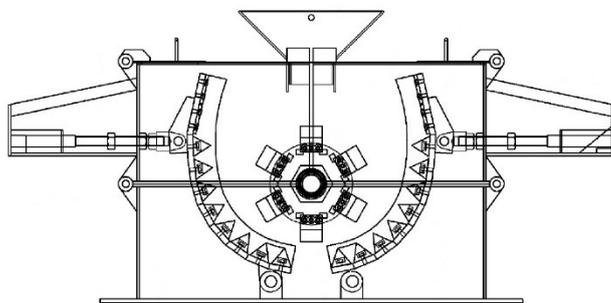
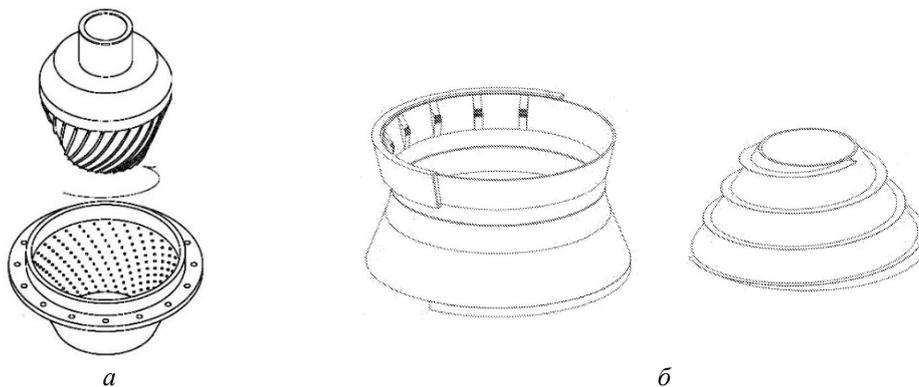


Рис. 19 – Роторна дробарка бетонних відходів (пат. KR102270489B1)

Конусна дробарка має обертовий внутрішній конус, а також засоби для гасіння вібрацій на його вал, які виникають під час дроблення бетонних відходів (пат. KR20090110056A; рис. 20, а). На поверхні внутрішнього конуса виконані спіральні виступи, а на поверхні зовнішнього – дискретні виступи, також розташовані вздовж спіралей, при цьому напрямки зазначених спіралей обох конусів протилежні.

В іншій конусній дробарці спіральний виступ на поверхні внутрішнього конуса виконано з більшим кутом нахилу, що сприяє більш рівномірному розподілу подрібнюваних відходів у робочій камері та рівномірності їх руху в напрямку розвантажувальної щілини (пат. CN119972235A; рис. 20, б).



а – пат. KR20090110056A; *б* – пат. CN119972235A

Рис. 20 – Робочі органи конусних дробарок для будівельних відходів

Розроблено молоткову дробарку з Т-подібними молотками (пат. CN223010694U; рис. 21). Завдяки зміщеному від поздовжньої осі ротора центра тяжіння молотків зусилля дроблення істотно збільшується.

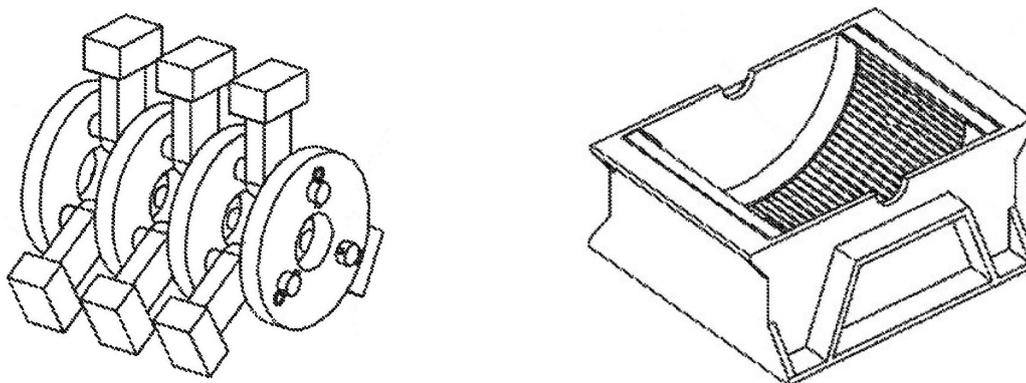


Рис. 21 – Ротор і нижнє сито молоткової дробарки з Т-подібними молотками (пат. CN223010694U)

Молоткова дробарка з пластинчастими молотками і двома ударними плитами: основної й допоміжної, причому виступи плит збільшуються в напрямку обертання ротора, що підвищує інтенсивність та ефективність дроблення (пат. CN223128174U; рис. 22).

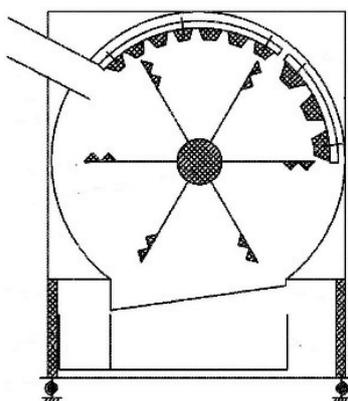
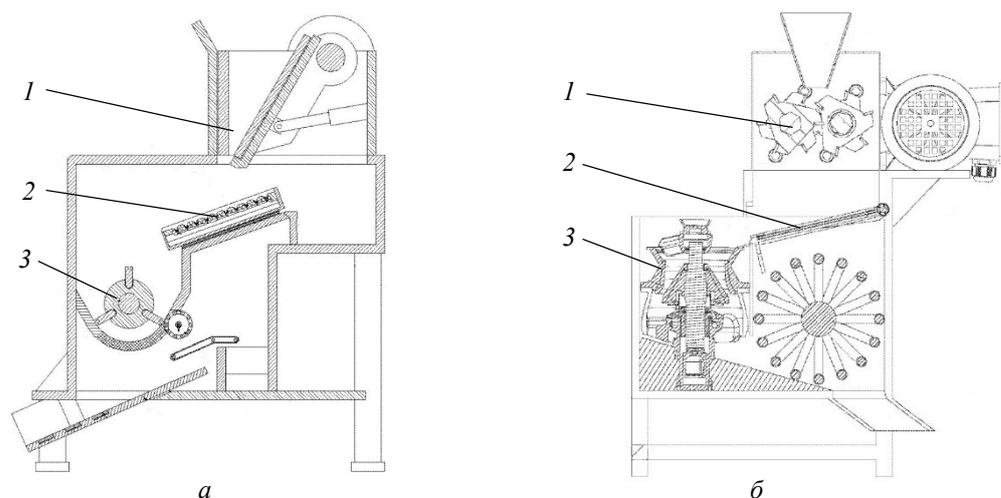


Рис. 22 – Молоткова дробарка з пластинчастими молотками і двома ударними плитами (пат. CN223128174U)

Подрібнювальна установка для двостадійного руйнування бетонних відходів для виробництва заповнювача бетонних сумішей містить молоткову дробарку першої стадії руйнування вихідної сировини, оснащену грохотом у вигляді незамкненої циліндричної обичайки, а також двовалкову дробарку другої стадії руйнування для одержання кінцевого продукту – гравію (пат. KR20250063037A).

Комбінована двостадійна дробильна установка для виробництва заповнювача бетонних сумішей містить послідовно розміщені в спільному корпусі шоккову дробарку, магнітний сепаратор і роторну дробарку (пат. CN119303711A; рис. 23, а). Магнітний сепаратор призначений для видалення металевих компонентів будівельних відходів, «розкритих» після оброблення в шоківій дробарці. Двостадійну дробарку аналогічного призначення також запропоновано в пат. CN119608283A.

Комбінована двостадійна дробильна установка для виробництва заповнювача бетонних сумішей містить послідовно розміщені в спільному корпусі шредер, розташований під нею грохот і конусну дробарку для руйнування крупної фракції першої стадії дроблення (пат. CN119608360A; рис. 23, б). Оскільки будівельні відходи можна піддавати вторинному дробленню, гарантується однорідність розміру частинок продукту, при цьому є можливість видалити металеві включення.



a – пат. CN119303711A: 1 – шокова дробарка; 2 – магнітний сепаратор; 3 – роторна дробарка;
б – пат. CN119608360A: 1 – шредер; 2 – грохот; 3 – конусна дробарка

Рис. 23 – Комбіновані двостадійні дробильні установки будівельних відходів

Комбінована двостадійна дробильна установка містить вертикальний циліндричний корпус зі співвісним валом, на верхній частині якого закріплено внутрішній конус конусної дробарки, а на нижній – вертикально розташовані радіальні ударні пластини для подрібнення відходів на вихолі з конусної дробарки (пат. CN119634004A). Установка характеризується надзвичайною компактністю.

Комбінована двостадійна дробильна установка містить одновалкову дробарку першої стадії дроблення та конусну дробарку другого ступеня дроблення (пат. CN119680731A).

Запропоновано конструкцію подрібнювача з вертикальним зворотно-поступальним рухом дробильної головки в камері дроблення з кованою основою у вигляді просіювальної поверхні (на кшталт вертикального преса закритого типу). Недоліки конструкції – значна матеріалоемність і циклічність роботи через потребу періодичного вилучення дробильної головки з камери дроблення й завантаження в неї нової порції будівельних відходів (пат. CN120695922A).

Також запропоновано різноманітні конструкції установок для подрібнення будівельних відходів: шредерів (пат. CN119237071A, CN119565709A, CN119702136A, CN119746988A, CN120115225A, CN120502377A, CN120532577A, CN222240451U, CN222401615U, CN222490358U, CN222490415U, CN222511209U, CN222567837U, CN222658769U, CN222789322U, CN222872269U, CN222943560U, CN223312135U), шоккових дробарок (пат. CN119926555A, CN120618571A, CN120679627A, CN120790267A, CN222384885U, CN222518665U, CN222829708U, UA52840U, UA146271U, UA146272U), конусних дробарок (пат. UA90402U1), валкових дробарок (пат. UA52841U), молоткових дробарок (пат. CN119702154A, CN120346872A, CN120532591A), роторних дробарок (пат. CN220386708U, CN222240665U, CN222519505U, CN222753387U).

Розроблено пристрій для дроблення бітумвмісних покрівельних покриттів з наступним використанням одержаного продукту у виробництві вторинних покрівельних матеріалів (пат. RU2418634C1). Зазначений пристрій містить робочу камеру попереднього дроблення з двома зустрічно обертовими паралельними шнеками з частковим зачепленням витків їхніх нарізок, а також камеру остаточного подрібнення з двома дисками – рухомим і нерухомим, змонтованими один відносно одного з утворенням жорен [7, 8]. Камеру попереднього дроблення конструктивно оформлено подібно до двошнекового преса для перероблення полімерних матеріалів [6, 20–24].

Розроблено установку для подрібнення гіпсокартонних плит, яка включає пристрій для розрізання плити на смуги й подальшого подрібнення одержаних смуг, а також виконаний у вигляді нескінченної замкненої сітки пристрій для відділення частинок гіпсу від частинок паперу з можливістю їх подальшої роздільної утилізації (заявка US2010/282878A1).

Подрібнювальна установка для двостадійного руйнування таких важкоутилізовуваних будівельних відходів як пінопласт або скловолокно містить подрібнювач першої стадії, що має вал з численними

зубчастими лезами для попередніх розрізання й розривання вихідної сировини, а також пару пресувальних валків для надання попередньо зруйнованій сировині компактної форми й транспортування її до подрібнювача другої стадії. Подрібнювач другої стадії містить шнек з розривами у гребені шнека та встановленими в них елементами для остаточного руйнування попередньо зруйнованій сировині (пат. KR20200110266A, KR20200111130A).

Пристрій для подрібнення полімерних будівельних відходів виконано у вигляді ножового роторного подрібнювача з обертовим блоком різальних лез (пат. KR102128305B1; рис. 24). Основні недоліки цього подрібнювача – високий рівень шуму та наявність вібрацій і струсу конструкції [13].

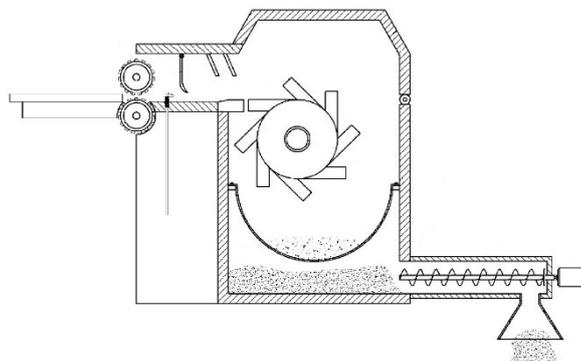


Рис. 24 – Ножовий роторний подрібнювач для полімерних будівельних відходів (пат. KR102128305B1)

Пристрій для подрібнення відносно м'яких будівельних відходів виконано за подібністю молоткової дробарки, у якій замість молотків на роторі підвишені ножі для руйнування відходів різанням (пат. CN222875069U). Частинки подрібненого продукту виділяються крізь циліндричне сито, встановлене в корпусі дробарки під ротором.

Пристрій для дроблення деревини та деревинновмісних матеріалів виконано у вигляді вертикального порожнистого циліндра та розташованого в ньому співвісного з ним вала із закріпленими на ньому й розташованими рівномірно вздовж нього радіальними лопатями й ножами. При цьому на внутрішній поверхні циліндра також закріплено радіальні ножі, розміщені між сусідніми рядами лопатей і ножів вала (заявка WO2022/120958A1). Під час обертання вала відходи ріжуться руйнуються внаслідок ударних навантажень і розрізання. За принципом дії цей пристрій аналогічний дисембратору [7, 8].

Пристрій для різання будівельних відходів з метою отримання волокнистого матеріалу для його подальшого застосування містить корпус з верхнім отвором для подачі відходів, а також двома вертикальними валами із радіально закріпленими й розташованими рівномірно взвод валів лез. При цьому вали встановлено так, що леза кожного вала під час обертання валів частково входять у проміжки між сусідніми лезами іншого вала, що дає змогу уникнути «проскакування» оброблюваних відходів робочої камери корпусу без їх подрібнення (заявка US2008/041998A1). У разі перероблення деревинних відходів одержаний волокнистий матеріал може бути використаний, наприклад, у виробництві деревинноволокнистих плит з вторинної сировини.

Висновки. Проблема вдосконалення існуючих і розроблення нових засобів для руйнування (розділення на фрагменти) будівельних відходів є однією з актуальних майже для кожної країни. Особливого значення ця проблема набуває в разі утворення значних обсягів відходів від руйнувань, які характеризуються різноманітним морфологічним складом залежно від об'єкта руйнування. Отже, для України, яка впродовж чотирьох років щоденно перебуває під постійними ударами ракетами, дронами, бомбами та артилерійськими боеприпасами, ця проблема стає вкрай актуальною.

Зрозуміло, що з огляду на сьогоднішні значні обсяги будівельних відходів такий традиційний напрямок управління ними стає вкрай недоцільним, а часто й просто неможливим через брак вільних земельних ресурсів. Тому найбільш ефективним напрямком стає повторне використання зазначених відходів або їх перероблення на нову продукцію, затребувану насамперед у виробництві будівельних матеріалів і дорожньому будівництві. Саме такі заходи відповідають принципам циркулярної економіки, а саме основному принципу 3R (Reduce, Reuse, Recycle – зменшення утворення, повторне використання та перероблення) [25–28], втілення якого на практиці насамперед передбачає таку операцію з будівельними

відходами, як їх дроблення, подрібнення або інші методи розділення на фрагменти.

Аналіз конструктивно-технологічного оформлення процесів дроблення й подрібнення будівельних відходів показує, що крім традиційного стаціонарного спеціалізованого подрібнювального обладнання наразі широко впроваджуються мобільні універсальні подрібнювачі, насамперед фрезерно-роздавлювального типу – шредери, які дають змогу ефективно обробляти відходи різної природи (як на мінеральній, так і природній та синтетичній основі). Також набувають поширення комбіновані подрібнювальні установки. При цьому, незважаючи на значну кількість розроблених типів і розмірів подрібнювального обладнання продовжує удосконалюватися.

Перспективи подальших досліджень. Надалі передбачено проаналізувати стан питання й напрямки вдосконалення конструктивно-технологічного оформлення інших процесів утилізації будівельних відходів, зокрема шляхи їх використання безпосередньо або після відповідного оброблення та перероблення у складі нових будівельних матеріалів.

Список використаної літератури

1. Bonifazi G., Grosso C., Palmieri R., Serranti S. Current trends and challenges in construction and demolition waste recycling // Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. 2025. Vol. 53. Article 101032. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2025.101032>
2. Порядок управління відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків : Постанова Кабінету Міністрів України від 27 вересня 2022 р., № 1073. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1073-2022-п#text> (Дата звернення: 07.01.2026).
3. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Міндовкілля: Відходи руйнації в Україні вже можна порівняти з кількістю твердих побутових відходів, що в середньому утворюються в країні за рік. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/mindovkillia-vidkhody-ruinatsii-v-ukraini-vzhe-mozhna-porivniaty-z-kilkistiu-tverdykh-pobutovykh-vidkhodiv-shcho-v-serednomu-utvoriuiutsia-v-kraini-za-rik> (Дата звернення: 07.01.2026).
4. Statista: Estimated total war damage value in Ukraine from February 24, 2022 to December 31, 2024, by sector (in billion U.S. dollars). URL: <https://www.statista.com/statistics/1303344/ukraine-infrastructure-war-damage/> (Дата звернення: 07.01.2026).
5. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text> (Дата звернення: 07.01.2026).
6. Мікульонюк І. О. Технологія перероблення полімерів. 5-те вид., перероб. та допов. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 314 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/74268>
7. 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>
8. Мікульонюк І. О. Механічні процеси та обладнання виробництва полімерних і будівельних матеріалів і виробів. 5-те вид., перероб. та допов. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 102 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/74513>
9. Mikulionok I. O. Classification of Roll Grinders for Lumpy and Bulk Materials (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2021. Vol. 56, № 11–12. P. 951–957. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00867-3>
10. Мікульонюк І. О., Карвацький А. Я., Лелека С. В., Іваненко О. І. Валкові дробарки і млини (Огляд конструкцій) // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» : сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2022. № 1(21). С. 30–43. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2022.254157>
11. Mikulionok I. O. Classification of the Tumbling Bodies of Rattlers (Tumbling Barrels) (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. Vol. 57, № 9–10. P. 885–892. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01021-3>
12. Мікульонюк І. О., Карвацький А. Я., Лелека С. В., Іваненко О. І. Подрібнювальні тіла барабаних млинів і дробарок (Огляд конструкцій) // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» : сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2022. № 2(21). С. 9–21. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2022.260339>
13. Mikulionok I. Classification and analysis of polymer and rubber waste shredder designs // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки. 2023. Вип. 23, № 1. С. 41–62. DOI: <https://doi.org/10.31388/2078-0877-2023-23-1-41-62>

14. "Думали нас відселяти, але так нічого й не вирішили": як живуть кияни у зруйнованих російськими атаками будинках. URL: <https://suspihne.media/kyiv/1151864-dumali-nas-vidselati-ale-tak-i-nicogo-ne-virisili-ak-zivut-kiani-u-zrujnovanih-rosijskimi-atakami-budinkah/> (Дата звернення: 07.01.2026).
15. Nautiyal H., Shree V., Khurana S., Kumar N., Varun. Recycling Potential of Building Materials: A Review / In: Muthu S. S. (ed.). Environmental Implications of Recycling and Recycled Products. Singapore : Springer, 2015. P. 31–50. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-287-643-0_2
16. Müller A., Martins I. Recycling of Building Materials: Generation - Processing - Utilization. Wiesbaden : Springer Vieweg Wiesbaden, 2022. 356 p. DOI: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-34609-6>
17. Lu W., Chen J., Xue F. Using computer vision to recognize composition of construction waste mixtures: A semantic segmentation approach // Resources, Conservation and Recycling. 2022. Vol. 178. Article 106022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106022>
18. Dong Z., Chen J., Lu W. Computer vision to recognize construction waste compositions: A novel boundary-aware transformer (BAT) model // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 305. Article 114405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114405>
19. Baek C. R., Kim H. D., Jang Y.-C. Exploring glass recycling: Trends, technologies, and future trajectories // Environmental Engineering Research. 2025. Vol. 30, № 3. Article 240241. DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2024.241>
20. Mikulyonok I. O. Equipment for preparing and continuous molding of thermoplastic composites // Chemical and Petroleum Engineering. 2013. Vol. 48, N 11–12. P. 658–661. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-013-9676-x>.
21. Rauwendaal C. Polymer extrusion. 5th ed. Munich : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. 950 p. – URL: <https://doi.org/10.3139/9781569905395>
22. Mikulionok I. O. Classification of Processes and Equipment for Manufacture of Continuous Products from Thermoplastic Materials // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. Vol. 51, № 1–2. P. 14–19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-015-9990-6>
23. Mikulionok I., Gavva O., Kryvoplias-Volodina L. Modeling the process of polymer processing in twin-screw extruders // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. № 4/5 (94). P. 35–44. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139886>
24. Vlachopoulos J., Polychronopoulos N. D. Understanding Rheology and Technology of Polymer Extrusion. Dundas (ON, Canada) : Polydynamics Inc, 2019. 337 p. URL: http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Rheo_Tech_Book_Part_A.pdf
25. Aadal H., Rad K. G., Fard A. B., Sabet P. G. P., Harirchian E. Implementing 3R Concept in Construction Waste Management at Construction Site // Journal of Applied Environmental and Biological Sciences. 2013. Vol. 3, № 10. P. 160–166. URL: <https://www.researchgate.net/publication/264232510>
26. Purchase C. K., Al Zulayq D. M., O'Brien B. T., Kowalewski M. J., Berenjani A., Tarighaleslami A. H., Seifan M. Circular Economy of Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Lessons, Challenges, and Benefits // Materials. 2022. Vol. 15, № 1. Article 76. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15010076>
27. Papamichael I., Voukkali I., Loizia P., Zorpas A. A. Construction and demolition waste framework of circular economy: A mini review // Waste Management & Research. 2023. Vol. 41, № 12. P. 1728–1740. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X231190804>
28. Gherman I.-E., Lakatos E.-S., Clinci S. D., Lungu F., Constandoiu V. V., Cioca L. I., Rada E. C. Circularity Outlines in the Construction and Demolition Waste Management: A Literature Review // Recycling. 2023. Vol. 8, № 5. Article 69. DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling8050069>

Ihor Mikulionok, Denys Shvachko

CONSTRUCTION WASTE CRUSHERS (Classification and Design Survey)

The subject of research is the design of construction and demolition waste crushers.

The purpose of the article is a critical analysis of the designs of crushing equipment, namely crushers and mills, designed to destroy construction waste generated during the construction, repair, dismantling or demolition of buildings and structures for various purposes.

The construction industry is a source of up to half of the world's household waste, therefore, in the context of a circular economy, construction waste, and primarily waste from destruction caused by active hostilities, terrorist acts, and

sabotage, should be considered as a potential resource of secondary raw materials. The main components of construction waste are concrete, bricks, facing tiles, roof tiles and ceramics, wood, glass, polymer and bitumen materials, metals, cables, soil and stones, road ballast (crushed stone), insulating materials, as well as gypsum-based building materials and products. Currently, the most effective methods of recycling construction waste are their use in construction and the building materials industry with minimal change in physicochemical properties and minimizing the formation of new waste. In this case, one of the main operations for processing construction waste is its separation into smaller fragments, in particular the processes of crushing and grinding. Analysis of the structural and technological design of these processes shows that in addition to traditional stationary specialized crushing equipment, mobile universal crushers are currently widely implemented, primarily of the milling-crushing-rupturing type, that is, shredders, which allow for the effective processing of waste of various natures (both mineral-based and natural and synthetic). Combined crushing plants are also becoming more common. At the same time, despite the significant number of types and sizes developed, crushing equipment continues to be improved.

Keywords: technogenic safety, construction waste, demolition waste, waste disposal, crushers, classification, patent documentation

References

1. Bonifazi, G., Grosso, C., Palmieri, R., Serranti, S. (2025). Current trends and challenges in construction and demolition waste recycling. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 53, article 101032. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2025.101032>
2. [Procedure for managing waste generated in connection with damage (destruction) of buildings and structures as a result of hostilities, terrorist acts, sabotage or work to eliminate their consequences]: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated September 27, 2022, no. 1073. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1073-2022-n#text> (Accessed January 07, 2026). (Ukr.)
3. [Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. Ministry of Environment: Destruction waste in Ukraine is already comparable to the amount of solid household waste generated in the country on average per year]. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/mindovkillia-vidkhody-ruinatsii-v-ukraini-vzhe-mozhna-porivniaty-z-kilkistiu-tverdykh-pobutovykh-vidkhodiv-shcho-v-serednomu-utvoriuutsia-v-kraini-zaruk> (Accessed January 07, 2026). (Ukr.)
4. Statista: Estimated total war damage value in Ukraine from February 24, 2022 to December 31, 2024, by sector (in billion U.S. dollars). URL: <https://www.statista.com/statistics/1303344/ukraine-infrastructure-war-damage/> (Accessed January 07, 2026).
5. [National Waste Management Strategy in Ukraine until 2030]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text> (Accessed January 07, 2026). (Ukr.)
6. Mikulionok, I. O. *Technologiiia pereroblenia polimeriv* [Polymer processing technology]. 5th ed. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/74268> (Ukr.)
7. 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". URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38169> (Ukr.)
8. Mikulionok, I. O. (2025). *Mekhanichni protsessy ta obladnannia vyrobnytstva polimernykh i budivelnykh materialiv i vyrobiv* [Mechanical processes and equipment for the production of polymer and building materials and products]. 5th ed. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/74513> (Ukr.)
9. 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>
10. Mikulionok, I. O., Karvatskii, A. Ya., Leleka, S. V., Ivanenko, O. I. (2022). *Valkovi drobarky i mlyny (Ohliad konstrukttsii)* [Roll Crushers and Mills (Design review)]. *Bulletin of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Series "Chemical engineering, ecology and resource saving"*, no. 1(21), pp. 30–43. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2022.254157> (Ukr.)
11. Mikulionok, I. O. (2022). Classification of the Tumbling Bodies of Rattlers (Tumbling Barrels) (Survey of Patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 57, no. 9–10, pp. 885–892. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01021-3>
12. Mikulionok, I. O., Karvatskii, A. Ya., Leleka, S. V., Ivanenko, O. I. (2022). *Podribniuvalni tila barabannykh*

- mlyniv i drobarok (Ohliad konstruktsii) [Grinding bodies of drum mills and crushers (Design review)]. *Bulletin of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Series "Chemical engineering, ecology and resource saving"*, no. № 2(21), pp. 9–21. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2022.260339> (Ukr.)
13. Mikulionok, I. (2023). Classification and analysis of polymer and rubber waste shredder designs. *Proceedings of the Tavria State agrotechnological university. Technical sciences*, vol. 23, no. 1, pp. 41–62. DOI: <https://doi.org/10.31388/2078-0877-2023-23-1-41-62>
 14. ["They thought about evicting us, but they never decided": how Kyiv residents live in houses destroyed by Russian attacks]. URL: <https://suspilne.media/kyiv/1151864-dumali-nas-vidselati-ale-tak-i-nicogo-ne-virisili-ak-zivut-kiani-u-zrujnovanih-rosijskimi-atakami-budinkah/> (Accessed January 07, 2026) (Ukr.)
 15. Nautiyal, H., Shree, V., Khurana, S., Kumar, N., Varun (2015). Recycling Potential of Building Materials: A Review / In: Muthu S. S. (ed.). *Environmental Implications of Recycling and Recycled Products*. Springer, Singapore, pp. 31–50. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-287-643-0_2
 16. Müller, A., Martins, I. (2022). *Recycling of Building Materials: Generation - Processing - Utilization*. Springer Vieweg Wiesbaden, Wiesbaden. DOI: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-34609-6>
 17. Lu, W., Chen, J., Xue, F. (2022). Using computer vision to recognize composition of construction waste mixtures: A semantic segmentation approach. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 178, article 106022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106022>
 18. Dong, Z., Chen, J., Lu, W. (2022). Computer vision to recognize construction waste compositions: A novel boundary-aware transformer (BAT) model. *Journal of Environmental Management*, vol. 305, article 114405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114405>
 19. Baek, C. R., Kim, H. D., Jang, Y.-C. (2025). Exploring glass recycling: Trends, technologies, and future trajectories. *Environmental Engineering Research*, vol. 30, no. 3, article 240241. DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2024.241>
 20. Mikulyonok, I. O. (2013). Equipment for preparing and continuous molding of thermoplastic composites. *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 48, no. 11–12, pp. 658–661. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-013-9676-x>
 21. Rauwendaal, C. (2014). *Polymer extrusion*. 5th ed. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, Munich. URL: <https://doi.org/10.3139/9781569905395>
 22. Mikulionok, I. O. (2015). Classification of Processes and Equipment for Manufacture of Continuous Products from Thermoplastic Materials. *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 51, no. 1–2, pp. 14–19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-015-9990-6>
 23. Mikulionok, I., Gavva, O., Kryvoplias-Volodina, L. (2018). Modeling the process of polymer processing in twin-screw extruders. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 4/5 (94), pp. 35–44. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139886>
 24. Vlachopoulos, J., Polychronopoulos, N. D. (2019). *Understanding Rheology and Technology of Polymer Extrusion*. Polydynamics Inc., Dundas (ON, Canada) : URL: http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Rheo_Tech_Book_Part_A.pdf
 25. Aadal, H., Rad, K. G., Fard, A. B., Sabet, P. G. P., Harirchian, E. (2013). Implementing 3R Concept in Construction Waste Management at Construction Site. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, vol. 3, no. 10, pp. 160–166. URL: <https://www.researchgate.net/publication/264232510>
 26. Purchase, C. K., Al Zulayq, D. M., O'Brien, B. T., Kowalewski, M. J., Berenjian, A., Tarighaleslami, A. H., Seifan, M. (2022). Circular Economy of Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Lessons, Challenges, and Benefits. *Materials*, vol. 15, no. 1, article 76. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15010076>
 27. Papamichael, I., Voukkali, I., Loizia, P., Zorpas, A. A. (2023). Construction and demolition waste framework of circular economy: A mini review. *Waste Management & Research*, vol. 41, no. 12, pp. 1728–1740. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X231190804>
 28. Gherman, I.-E., Lakatos, E.-S., Clinci, S. D., Lungu, F., Constandoiu, V. V., Cioca, L. I., Rada, E. C. (2023). Circularity Outlines in the Construction and Demolition Waste Management: A Literature Review. *Recycling*, vol. 8, no. 5, article 69. DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling8050069>