

Н.С. Прядко, А.В. Бубликов, К.В. Тернова, Л.В. Музыка

## ПРОЦЕС СТРУМИННОГО ПОДРІБНЕННЯ ЯК ОБ'ЄКТ КЕРУВАННЯ

*Актуальність тематики даної роботи визначається необхідністю зниження енергоємності тонкого подрібнення шляхом керування процесом, що пропонується реалізувати на основі результатів акустичного моніторингу. В роботі описано роботу струминного млина у замкнутому циклі. Як відомо тонке подрібнення відноситься до енергоємного виробництва, однак струминне подрібнення незамінне при отриманні тонких і надтонких «чистих» матеріалів, тобто матеріалів без привнесення будь-яких домішок. А зі створенням нового способу контролю процесу з'явилася реальна можливість зниження енергоспоживання струминними млинами при підтриманні оптимальної їх продуктивності. На основі цього виділено вхідні і вихідні, збурюючі і керуючі параметри процесу. Таким чином, представлено струминне подрібнення, як об'єкт керування. Показано проблеми струминного подрібнення і шляхи їх вирішення. Це стало базою подальшої побудови автоматичного керування процесом за акустичними сигналами зони подрібнення.*

*Ключові слова: керування, параметри процесу, збурення, замкнутий цикл.*

**Постановка проблеми.** Струминні млини використовують для одночасного сушіння і подрібнення сировинних матеріалів, а також для середнього та тонкого подрібнення крихких матеріалів з розмірами частинок менше 5 мм до 10 ... 40 мкм з продуктивністю 1 ... 20 т / год. Особливо ефективно їх застосування, коли неприпустимо забруднення матеріалу металевими частинками зносу тіл, що мелють. Струминні млини класифікують за технологічним призначенням: з послідовним подрібненням і поділом матеріалу або з одночасним подрібненням і поділом в одній камері; по виду енергоносія: повітряно-струминні, пароструминні та газоструминні; за конструктивною ознакою: надтонкого подрібнення матеріалу з вертикальної трубчастою або з плоскою помольними камерами, а для тонкого подрібнення з протиточною (ежекторною) камерою [1].

У струминних млинах частинкам матеріалу кінетична енергія передається спільним потоком газу, повітря, пару або продуктів згоряння. Подрібнення здійснюється або при зіткненні зустрічних потоків частинок, або при їх ударі об відбійні плити. Деяка кількість частинок подрібнюється дотичними ударами

об внутрішні поверхні установки при розгоні або транспортуванні по трактах пневмокласифікаційної системи. Повідомлення частинкам необхідної для руйнування швидкості (200 - 400 м / с) здійснюється на відносно коротких ділянках. Тому струминні млини мають порівняно малі габарити. Їх розміри та вага визначаються в основному генератором енергоносія, а також розмірами класифікуючих та пилеосадових пристроїв.

Для підтримки заданих характеристик продуктів подрібнення необхідно контролювати та коригувати параметри процесу (вологість, крупність, подрібнюваність, продуктивність обладнання). Для цього помольні установки оснащують системами автоматичного регулювання і керування.

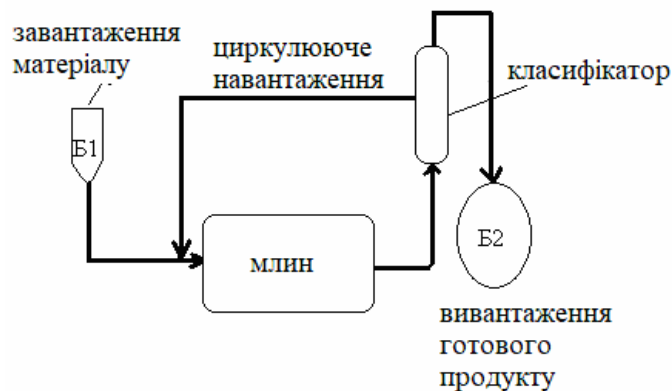
Мета роботи – визначення процесу струминного подрібнення у замкнутому циклі, як об'єкта керування для побудови системи автоматичного керування процесом.

Тонке подрібнення відноситься до енергоємного виробництва, з питомою витратою енергії 200-800 кВт-г/т. Незважаючи на всі зростаючі потреби в тонкодисперсних порошках в різних галузях промисловості, струминні і вихрові млина не можуть перемогти кульові млини за розповсюдженням і популярністю. Однак цей вид устаткування для обробки матеріалів знайшов своє місце у виробництві. Струминне подрібнення незамінне при отриманні тонких і надтонких «чистих» матеріалів, тобто матеріалів без привнесення будь-яких домішок. А зі створенням нового способу контролю процесу з'явилася реальна можливість зниження енергоспоживання струминними млинами при підтриманні оптимальної їх продуктивності.

Відомо, що енергія, що витрачається на подрібнення, у багато разів перевищує приріст вільної поверхневої енергії твердого тіла, отриманої в результаті зменшення розміру часток матеріалу. Енергетичний ККД, обчислений за поверхневої енергії, становить близько 0,1% [2]. Інша енергія витрачається на пружну і пластичну деформацію частинок і робочих поверхонь млина, на передачу кінетичної енергії уламків частинок, на тертя частинок між собою, на знос машин, на безрезультатне навантаження, які не призводять до руйнування частинок, на звукові хвилі і т. д. Крім того, в реальних умовах процес руйнування безперервний, тобто деяка кількість частинок не зруйнувалася, до іншої було прикладено зайве навантаження, і частина енергії загубилася. Технологічним завданням подрібнення на збагачувальних комбінатах є розкриття мінералів тонко вкраплених руд. Розкриття повинно здійснюватися при мінімальному переподрібненні вкраплень. На переподрібненні додатково витрачається енер-

гія, а тонкодисперсні частинки погіршують умови сепарації мінералів, що призводить до втрат корисного компонента [3].

Для зниження впливу зазначених факторів у промисловості використовують технології подрібнення в замкнутих циклах. Ідея замкнутих циклів полягає в тому, що з млина за рахунок руху середовища (вода, повітря), що транспортує, витягують свідомо недоподрібнений матеріал, який в зовнішньому класифікаторі (гідравлічні та пневматичні класифікатори, циклони) дрібна фракція виділяється в бункер готового матеріалу, а велика фракція пневмотранспортом йде на повторне подрібнення у млин. До матеріалу, що подрібнюється в млині, через подрібнююче середовище з певною інтенсивністю (наприклад, пропорційній потужності електроприводу) підводиться енергія, яка витрачається на деформацію матеріалу, що подрібнюється, і на утворення нової поверхні при його руйнуванні. Питомі енерговитрати на одиницю маси подрібненого матеріалу при цьому складе  $E_{yo} = N/Q$ , кВт · ч/т, звідкіля випливає, що зниження енергоспоживання при подрібненні в даному агрегаті можливо досягти збільшенням його продуктивності за умови виконання технологічного завдання - отримання подрібненого продукту із заданою дисперсністю (крупністю). Схема замкнутого циклу струминного подрібнення представлена на рис. 1.



Б1 – бункер завантаження; Б2 – бункер вивантаження

Рисунок 1 – Схема замкнутого циклу струминного подрібнення

Розглянутий процес подрібнення в замкнутому циклі з періодичним завантаженням схильний до дії зовнішніх збурень (надходження нових порцій матеріалу, зміна якості (крупності) вихідного матеріалу) і має внутрішню стохастичну складову (процес руйнування частинок при зіткненні). Однак, зовнішні збурення прикладені на вході, і їх роль, як і внутрішньої стохастичної складової процесу, відносно незначна [4] при сталому робочому режимі. Головну роль у зміні станів відіграє широке використання рециклів в даних процесах, вна-

слідок чого в замкнутих циклах можуть виникати перевантаження млина, що призводять до припинення процесу подрібнення.

Тому при керуванні процесом треба враховувати особливості функціонування замкнутого циклу: чим складніше подрібнюється матеріал, тим більше матеріалу надходить з класифікатора в циркулююче навантаження на додаткове подрібнення. Тому можлива ситуація, коли кількість циркулюючого навантаження необмежено збільшується, апарат для подрібнення також необмежено приймає навантаження і досягає такого режиму, коли він не в змозі переробити матеріал, що надходить в млин. Це може призвести до аварійного режиму, зупинки процесу подрібнення. Щоб уникнути перевантаження млина, необхідно відключити потік свіжого матеріалу до тих пір, поки кількість циркулюючого навантаження стане нижче критичного рівня, або не знизиться до припустимого рівня. Після того, як цей рівень буде досягнуто, можна знову збільшити подачу свіжого матеріалу в цикл подрібнення. Таким чином, циркулююче навантаження є керуючим впливом, яке може суттєво змінювати продуктивність замкнутого циклу подрібнення [5].

Технологічний принцип керування процесами подрібнення полягає в максимізації швидкості скорочення класів руди, крупніше контрольного класу в кінцевому продукті та мінімізації швидкості для класів, дрібніших за контрольний клас. Отже, подрібнення повинно проводитись для збільшення готового класу [6].

Розглянемо процес струминного подрібнення в замкнутому циклі як об'єкт керування (рис. 2).

До вхідних параметрів об'єкту керування відносяться: продуктивність бункеру завантаження  $Z_{вх}$ ; гранулометрична характеристика первинного матеріалу  $\gamma_{вх}$ ; швидкість роботи класифікатора (кількість обертів ротора класифікатора)  $n$ ; тиск енергоносія (повітря чи газу)  $P$ .

Технологічний процес подрібнення в замкнутому циклі можна розбити на два процеси, які взаємозв'язані між собою: процес зменшення крупності матеріалу саме в млині (подрібнення) і процес класифікації подрібненого продукту. В зв'язку з цим проаналізуємо вхідні, вихідні змінні у кожному процесі і в замкнутому циклі в загалі. Процес подрібнення в млині характеризується змінними стану: запас матеріалу в млині  $M$ ; технічний стан млина  $\xi_m$ . Процес класифікації також характеризується змінними стану, до яких відноситься технічний стан обладнання (класифікатору)  $\xi_{кл}$ .

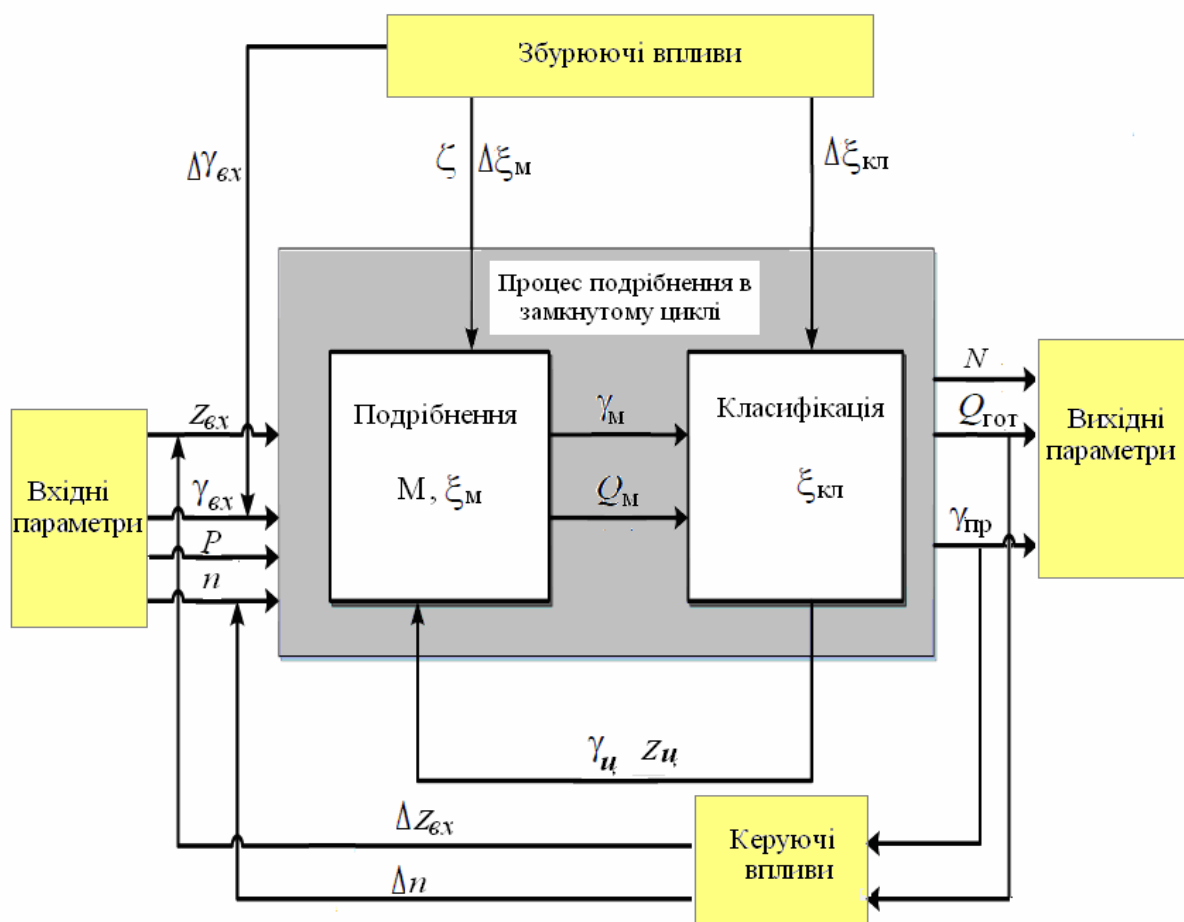


Рисунок 2 – Процес струминного подрібнення в замкнутому циклі як об'єкт керування

Якщо розглядати процес подрібнення в замкнутому циклі в цілому, то до внутрішніх змінних процесу треба віднести: циркуляційне навантаження млина  $Z_{ц}$ ; гранулометричну характеристику циркуляційного навантаження  $\gamma_{ц}$ ; вихід продукту з млина  $Q_M$ ; гранулометричну характеристику продукту млина  $\gamma_M$ .

Збуреннями технологічного процесу є: зміна гранулометричної характеристики первинного матеріалу  $\Delta\gamma_{вх}$ ; зміна фізико-механічних та речовинних властивостей матеріалу  $\Delta\zeta$ ; зміна технічного стану млина та класифікатору  $\Delta\xi_M, \Delta\xi_{кл}$ .

Вихідними змінними процесу подрібнення в замкнутому циклі являються: продуктивність за готовим продуктом  $Q_{гот}$ ; гранулометрична характеристика готового продукту (або вміст готового класу крупності у вихідному продукті)  $\gamma_{пр}$ ; споживана потужність  $N$ .

До керуючих впливів процесу відносяться: зміна продуктивності за вхідним матеріалом  $\Delta Z_{вх}$ ; керування швидкістю обертання ротора класифікатора  $\Delta n$ .

При роботі струминних протитечних млинів для контролю якості продукту принципово важливо, щоб інтегральні імпульси зустрічних газодисперсних потоків сировини, що розмелюються, були однакові. У такому разі ударна взаємодія потоків найбільш ефективна, процеси ударного руйнування частинок дисперсних зустрічних потоків проходять у розмельній зоні млина, енергія руйнування дисперсних компонентів рівномірно розподіляється між обома зустрічними потоками при їх зіткненні. Проте на практиці зазвичай не досягається така рівномірність, що має своїм наслідком підвищені витрати енергетичних ресурсів на розмел та ерозію розгінних трубок [7], камери млина. Для підвищення ефективності роботи млина необхідно дотримуватись рівномірності густини й однаковості за швидкістю потоків з обох розгінних труб млина, тобто ідентичності роботи дозаторів живильника обох розгінних труб млина. Вирішення технічної задачі забезпечення оптимальних умов роботи млина можливе шляхом конструктивного і режимного вдосконалення роботи живильників, керування його роботи. Роботи в цьому напрямку ведуться в ІТМ НАНУ і ДКАУ [7].

**Висновки.** Описано роботу струминного млина у замкнутому циклі. На основі цього виділено вхідні і вихідні, збуджуючі і керуючі параметри процесу. Таким чином представлено струминне подрібнення, як об'єкт керування. На цій базі побудовано автоматичне керування процесом за акустичними сигналами зони подрібнення.

#### ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Acoustic monitoring of jet grinding / N.S. Pryadko, K.V. Ternova; NAS of Ukraine, Institute of Technical Mechanics of NAS of Ukraine and SSA of Ukraine. — Kyiv : Akadem periodyky, 2020. — 192 p.
2. Пивняк Г. Г., Вайсберг Л. А., Кириченко В. И., Пилов П.И. Измельчение. Энергетика и технология. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2007. 296 с.
3. Андреев Е. Е., Тихонов О. Н. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению. СПб : Санкт-Петербургский гос. горный ун-т., 2007. 439 с .
4. Pryadko N., Muzyka L., Strelnikov H., Ternova K. Acoustic method of jet grinding study and control // E3S Web of Conferences 109, 00074 (2019) Essays of Mining Science and Practice 2019 p.1-11 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900074>

5. Muzyka L.V., Pryadko N.S., Strelnikov H.A., Grenev A.F. Control of mass flow in jet mill on base of acoustic monitoring //Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2019. – № 4. – P. 5-10. <http://nv.nmu.org.ua/index.php/ru/> DOI: 10.29202/nvngu/2019-4/3
6. Музыка Л.В., Прядко Н.С., Стрельников Г.А. Система контроля и регулирования работы газоструйной измельчительной установки для повышения ее производительности // Техническая механика. – 2018. – №2. – С. 113-125.
7. Ihnatev O. D., Shevelova H. M. Effect of the location of a gas flow control element in an ejector unit on the flow pattern // Technical mechanics.–2020.- №3.-С.54 – 63.

#### REFERENCES

1. Acoustic monitoring of jet grinding / N.S. Pryadko, K.V. Ternova; NAS of Ukraine, Institute of Technical Mechanics of NAS of Ukraine and SSA of Ukraine. — Kyiv : Akadem periodyka, 2020. — 192 p.
2. Pivnyak G. G., Vaysberg L. A., Kirichenko V. I., Pilov P.I., Kirichenko V.V. Izmelchenie. Energetika i tehnologiya. M.: Izdatelskiy dom «Ruda i metallyi», 2007. 296 s.
3. Andreev E. E., Tihonov O. N. Droblenie, izmelchenie i podgotovka syrya k obogascheniyu. SPb : Cankt-Peterburgskiy gos. gornyy un-t., 2007. 439 s .
4. Pryadko N., Muzyka L., Strelnikov H., Ternova K. Acoustic method of jet grinding study and control // E3S Web of Conferences 109, 00074 (2019) Essays of Mining Science and Practice 2019 p.1-11<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900074>
5. Muzyka L.V., Pryadko N.S., Strelnikov H.A., Grenev A.F. Control of mass flow in jet mill on base of acoustic monitoring //Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2019. – № 4. – Pp. 5-10. <http://nv.nmu.org.ua/index.php/ru/> DOI: 10.29202/nvngu/2019-4/3
6. Музыка Л.В., Прядко Н.С., Стрельников Г.А. System for monitoring and regulating the operation of a gas-jet grinding plant to increase its productivity// Tech. mech. №2, 2018, Pp. 113-125.
7. Ihnatev O. D., Shevelova H. M. Effect of the location of a gas flow control element in an ejector unit on the flow pattern // Technical mechanics.–2020.-№3.-С.54 – 63.

Received 19.02.2021.  
Accepted 24.02.2021.

**Процесс струйного измельчения как объект управления**

*Актуальность тематики данной работы определяется необходимостью снижения энергоемкости тонкого измельчения путем управления процессом, предлагается реализовать на основе результатов акустического мониторинга. В работе описано работу струйного мельницы в замкнутом цикле. Как известно тонкое измельчение относится к энергоемкого производства, однако струйное измельчение незаменимо при получении тонких и сверхтонких «чистых» материалов, то есть материалов без привнесения каких-либо примесей. А с созданием нового способа контроля процесса появилась реальная возможность снижения энергопотребления струйными мельницами при поддержке оптимальной их производительности. На основе анализа параметров процесса выделены входные и выходные, возмущающих и управляющие параметры процесса. Таким образом, представлены струйное измельчение, как объект управления. Показаны проблемы струйного измельчения и пути их решения. Это стало базой дальнейшего построения автоматического управления процессом с акустическими сигналами зоны измельчения*

**Jet grinding as a control object**

*The relevance of the subject of this work is determined by the need to reduce the energy consumption of fine grinding by controlling the process, which is proposed to implement based on the results of acoustic monitoring. The paper describes the operation of a jet mill in a closed cycle. It is known that fine grinding refers to energy-intensive production, but jet grinding is indispensable in obtaining thin and ultra-thin "pure" materials, i.e. materials without the introduction of any impurities. And with the creation of a new way to control the process, there is a real opportunity to reduce energy consumption by jet mills while maintaining optimal performance. Based on the process parameter analysis input and output disturbing and control process parameters are selected. In this way, jet grinding is presented as a control object. The problems of jet grinding and ways to solve them are shown. This became the basis for further construction of automatic process control based on the acoustic signals of the grinding zone.*

**Прядко Наталія Сергіївна** – провідний науковий співробітник Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України, д.т.н., с.н.с.

**Бубліков Андрій Вікторович** – доцент кафедри автоматизації та приладобудування, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», д.т.н., доцент.

**Тернова Ктеріна Віталівна** – науковий співробітник Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України, к.т.н..

**Музика Лев Володимирович** – молодший науковий співробітник Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України.



**Прядко Наталия Сергеевна** – ведущий научный сотрудник, Институт технической механики НАН Украины и ГКА Украины, д.т.н., с.н.с..

**Бубликов Андрей Викторович** – доцент кафедры автоматизации и приборостроения, Национальный технический университет «Днепровская политехника», д.т.н, доцент.

**Терновая Екатерина Виталиевна** – научный сотрудник, Институт технической механики НАН Украины и ГКА Украины, к.т.н.

**Музыка Лев Владимирович** – младший научный сотрудник, Институт технической механики НАН Украины и ГКА Украины.

**Pryadko Nataliya Sergeevna** – Leading Researcher, Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Doctor of Technical Sciences.

**Bublikov Andrey Victorovich** – Associate Professor, National Technical University «Dniprovskia Politechnika», Doctor of Technical Sciences.

**Ternova Katerina Vitalivna** - Researcher, Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, PhD.

**Muzyka Lev Volodimirovich** – Junior Researcher, Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine.