

© І.О. Осташко¹, В.А. Карпенко¹

¹ Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», Дніпро, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ЛУСКАТОГО ГРАФІТУ У ВІДЦЕНТРОВОМУ МЛИНІ

© I. Ostashko¹, V. Karpenko¹

¹ Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

RESEARCH OF THE PROCESS OF CRUSHING GRAPHITE GRINDING IN A CENTRAL MILL

Мета. Для отримання надтонкого лускатого графіту необхідно проаналізувати і обґрунтувати подрібнюючого обладнання, що дозволяє отримати продукт заданого класу. В якості найбільш доцільного обладнання для цієї мети виступає відцентровий млин ударного типу.

Методика дослідження. У роботі використовувався комплекс апробованих методів дослідження, що включав: лазерно-дифракційний аналіз, оптичну мікроскопію. Також статистичну та математичну обробку експериментальних даних на базі прикладних комп'ютерних програм; експериментальні дослідження в лабораторних умовах.

Результати дослідження. Полягають у встановленні закономірностей процесу подрібнення лускатого графіту у відцентровому-ударному млині з вбудованим в млин статичним класифікатором графіту за допомогою повітряного потоку. За результатами дослідження встановлено, що можна подрібнити графіт до кінцевого середнього розміру 10 мкм. Для отримання меншого розміру потрібно використовувати інші, більш енергоємні млини. Це можуть бути роторно-вихрові млини з високим ККД або кульові млини (в основному вібраційні млини, які мають більш високий ККД, ніж звичайні кульові млини). Визначено значення коефіцієнтів рівняння кінетики процесу подрібнення лускатого графіту, що дозволяє прогнозувати продуктивність за класом та час подрібнення для заданого середнього діаметру продукту. В роботі показано доцільність застосування відцентрового млина ударної дії для подрібнення лускатого графіту.

Наукова новизна. Вперше за результатами експериментальних досліджень встановлено значення констант рівняння кінетики процесу подрібнення. Побудовано криві розподілу гранулометричного складу подрібненого лускатого графіту у відцентровому млині в залежності від час подрібнення.

Практична значимість. За результатами дослідження запропоновано обладнання для подрібнення лускатого графіту з отриманням продукту середнім діаметром частинок 10 мкм. Обґрунтовано доцільність застосування відцентрового млина та показано ефективність системи класифікації та видалення продукту подрібнення з помольної камери млина.

Ключові слова: лускатий графіт, подрібнення, дисперсність, кінетика подрібнення, відцентровий млин.

Вступ. Графіт є багатофункціональним мінералом, що знайшов широке поширення в практичному використанні. Графіт – це дуже м'який мінерал, для якого характерні висока електропровідність, теплопровідність, та легкість в механічній обробці. Висока жирність та пластичність робить графіт гарною основою для різноманітних мастил.

В Україні знаходиться одне з найбільших в Європі родовищ руди з високопорядкованим лускатим графітом біля населеного пункту Завалля. Розробкою даного родовища займається підприємство Zavalivskiy Graphite, що входить до десяти найбільших виробників природного графіту у світі. Завалівський комбінат, переробляючи цю руду, виготовляє серію графітів спеціального призначення таблиця 1.

Таблиця 1

Характеристика продукції Zavalivskiy Graphite

Марка графіту	ГТ-1	ГТО-95	ГЛ-1	ГС-4	ГЕ-1	ГЕО-95	ГК-2
Насипна густина	0,417	0,419	0,278	0,413	0,443	0,430	0,141
Середній розмір часток, мкм	132	128	28	260	123	380	8,5

Графіти Завалівського родовища відносяться до високоупорядкованих, лускатих графітів.

Властивості графітів та напрям їх використання залежить від середнього розміру часточок графіту. Отримання необхідної дисперсності графіту досягається, як правило, шляхом подрібнення вихідного графіту в кульових млинах. Також використовують метод диспергування попередньо терморозширеного графіту на струменевих млинах. Очевидно, що навіть при одних і тих же розмірах часточок графіти, дисперговані різними методами, будуть відрізнятися питомою поверхнею. Очевидно, що різні механічні властивості композитів з лускатого графіту обумовлюються питомою поверхнею цих графітів, оскільки чим вища дисперсність часточок, тим менша їх об'ємна і масова кількість здатна з'єднуватися із полімером. Відомо, що ступінь ущільнення лускатого графіту в процесі виготовлення електродів для акумуляторів, залежить не лише від навантаження а й від дисперсності часток графіту.

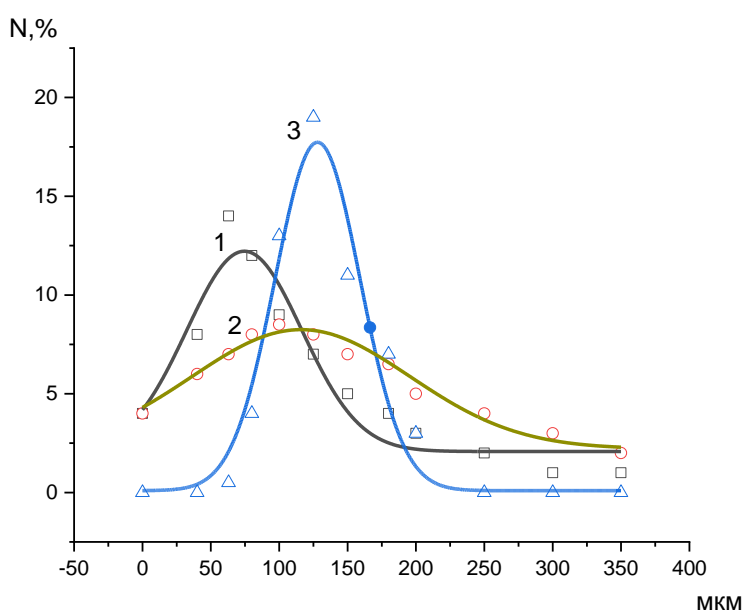


Рис. 1. Криві розподілу за розмірами частинок графітів з близьким значенням їх середніх розмірів (ГТ-1; ГТО-95; ГЕО-95)

Аналізуючи досліджені комерційні марки спеціалізованих графітів можна зробити висновок, що всі вони високочисті, дрібнодисперсні, але відрізняються між собою за розміром, формою часточок і гранулометричним складом. Очевидно, що властивості графітів залежать не лише від середнього розміру частинок, але і від їх розподілу за розмірами (див. рис. 1).

Серед графітових продуктів найбільш широко поширений лускатий графіт, вартість якого пропорційна розміру та якості пластівців. Однак традиційний процес подрібнення та впливання лускатого графіту зазвичай сильно ушкоджує лусочки графіту. Отже, для руди лускатого графіту з різними розмірами частинок дуже важливо розумно вибрати процес подрібнення та обладнання.

Розподіл гранулометричного складу та вміст фіксованого вуглецю є найбільш важливими контрольними показниками для оцінки цінності лусочок графіту, а метод та ступінь дисоціації є найбільш важливими факторами, що визначають вихід готового продукту та вміст фіксованого вуглецю у продуктах з концентратів. Актуальною задачею для оптимізації процесу збагачення лускатого графіту є вибір обладнання і технології подрібнення.

В останні роки стався прорив у технології подрібнення, з'явилося багато нових технологічних процесів, таких як: ступінчасте подрібнення та флотація, технологія швидкої флотації, ступінчасте подрібнення та ступінчастий поділ, попередній поділ, безколекторна флотація та флокуляція зсувом. Процес флотації, процес ультразвукового зміцнення.

Дослідження показали, що процес сортування та сортувальне обладнання фізично руйнуватимуть структуру лусочок графіту, крупнолускатий графіт буде пошкоджений і втрачений у процесі переточування. Тому, найбільш важливою технологією збагачення графіту є розумний вибір обладнання для подрібнення.

Основна частина. Перспективним з точки зору отримання тонкодисперсного лускатого графіту є використання відцентрового млина для його подрібнення. Особливістю запропонованого млина є конструкція робочого органу та спосіб вивантаження матеріалу, який дає змогу суттєво знизити питомі енерговитрати на процес подрібнення, а також проводити сепарацію готового продукту.

Відцентровий ударний млин (рис. 2) містить порожнистий вал 1 з робочим органом 2 спеціальної форми, периферійна частина якого створює більший елемент 4, що закріплений на валу 1, котрий розташований у підшипниковому вузлі 3. До нижньої частини підшипникового вузла 3 прикріплений розвантажувальний пристрій 5, що виконано у формі відцентрового вентилятора з робочим колесом 6. Вихідний патрубок 7 розвантажувального пристрою 5 обладнаний засувкою 8. Передня стінка розвантажувальної камери 5 виконана у формі шайби 9, що утворює кільцевий зазор навколо порожнистого вала-ротора 1 та сполучає робоче колесо 6 з помольною камерою 10. Патрубок 11 завантажувального пристрою 12 розташований з зазором у порожнистому валу 1. Завантажувальний пристрій 12 кріпиться до підшипникового вузла 3 за допомогою кронштейна 13. У верхній частині порожнистого вала 1, між розвантажувальним пристроєм 12 і підшипниковим вузлом 3 встановлений шків 14, з'єднаний клиновим ременем 15

зі шківом 16, який закріплений на валу електродвигуна 17. Підшипниковий вузол 3 та електродвигун 17 змонтовані на стійці 18 [1-5].

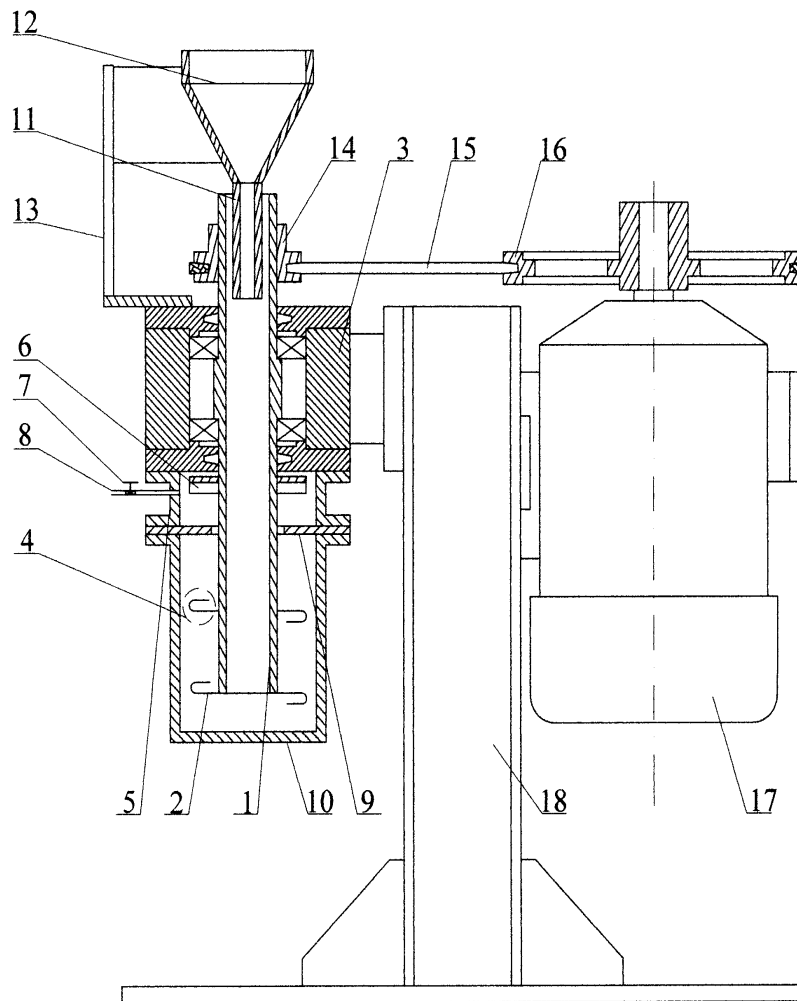


Рис. 2. Відцентровий млин ударної дії

Під час вмикання електродвигуна 17 порожнистий вал 1, через передачу, що складається із шківів 14 і 16 та клинових ременів, отримує обертальний рух разом з робочим колесом 6 та робочим органом ротора 2. Матеріал за допомогою завантажувального вузла 12 через патрубок 11 та порожнистий вал 1 надходить до помольної камери 10 і через кільцевий зазор шайби 6 за допомогою робочого колеса розвантажувального пристрою 5 подається до вихідного патрубку 7. Регулювання режиму роботи здійснюється за допомогою засувки 7. У разі зменшення продуктивності за допомогою засувки 7 час перебування матеріалу в помольній камері збільшується і відповідно крупність подрібненого матеріалу зменшується.

Таким чином, у зв'язку з відсутністю лопатей на робочих органах та малою їх поверхнею втрати на подолання гідродинамічних опорів будуть значно меншими порівняно з типовими конструкціями, а розташування кільцевого зазору та розвантажувального пристрою над помольною камерою та робочим органом дасть змогу більш ефективно здійснювати сепарацію подрібненого матеріалу.

Попередньо в помольну камеру об'ємом 21,2 л завантажувалося 3,5 кг лускатого графіту марки ГС-4 (рис. 3) та проводили його подрібнення впродовж 1 хв з режимом, якому відповідає частота обертання робочого органу 381 рад/с, а лінійна швидкість на кінці робочого органу близько 57,5 м/с. Час подрібнення вимірювався секундоміром, а споживана потужність стрілочним ватметром у комплекті з трансформатором струму і записувалась на відео для подальшої обробки. Потім здрібнений матеріал проходив ситовий аналіз за допомогою лабораторного вібраційного розсіву та сит з пропускними розмірами 300, 250, 200, 180, 150, 125, 100, 80, 63, 40 мкм. У такій послідовності експеримент виконувався для різних інтервалів часу подрібнення. Для кожного експерименту аналіз гранулометричного складу подрібненого матеріалу виконувався по п'яти зразкам і вираховувалося середнє значення та середньоквадратичне відхилення з метою мінімізації випадкових помилок.



Рис. 3. Лускатий графіт ГС-4 в ситі для розсіву

Гранулометричний склад вихідного матеріалу представлено на рис. 4.

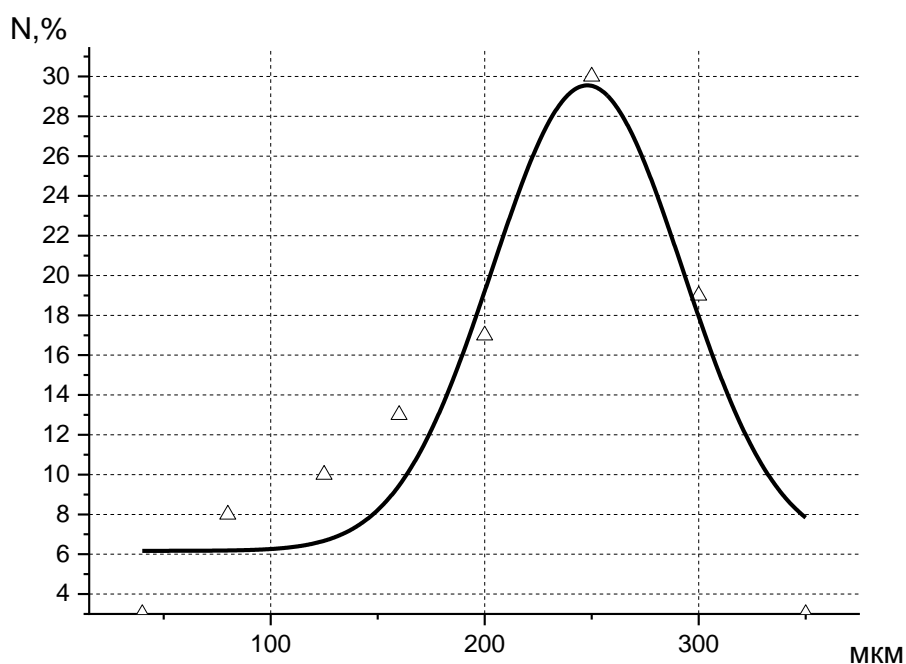


Рис. 4. Гранулометричний склад лускатий графіт ГС-4

Гранулометричний склад лускатого графіту визначався лазерно-дифракційним методом, та методом ситового аналізу. Гранулометричний склад подрібненого ТЗП у відцентровому млині представлений на рис. 5.

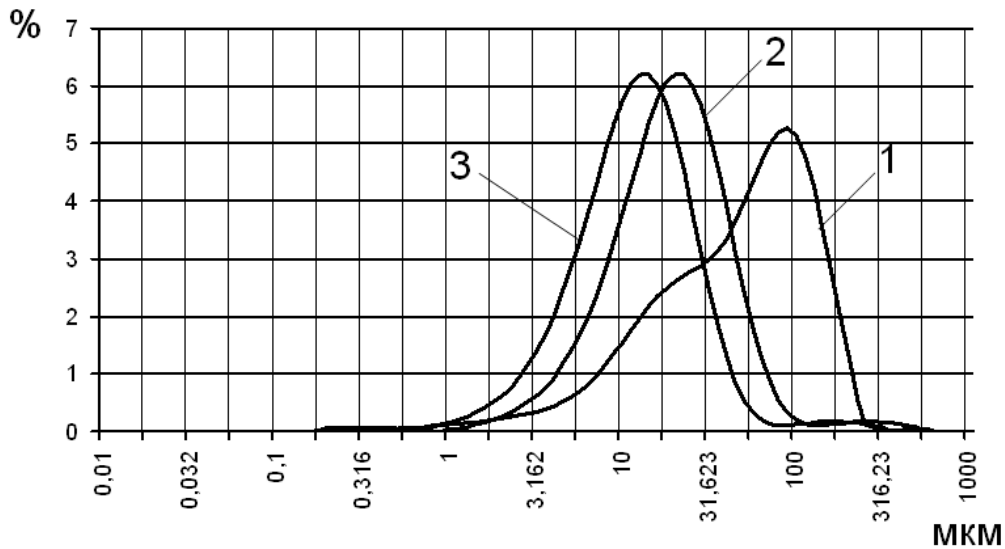


Рис. 5. Зміна гранулометричного складу лускатого графіту у відцентровому млині під час подрібнення: 1, 2, 3 – дві, чотири та шість хвилини подрібнення відповідно

Загальна формула кінетики подрібнення має вигляд:

$$R_x(t) = R_{100-x} k_0^{t^m}$$

де R_x – кількість класу крупнішого за заданий, %; R_{100-x} – кількість класу крупнішого за заданий у вихідному матеріалі, %; k_0 – константа, що характеризує відносну швидкість подрібнення; m – параметр, що характеризує зміну відносної швидкості подрібнення; t – час подрібнення, хв.

Для випадку коли цільовим класом будуть продукти подрібнення лускатого графіту з розмірами часток рівних і менше 10 мкм. При цільовому класі 10 мкм, значення констант у рівнянні будуть наступні: $R_{100-x} = 100$ (%); $k_0 = 0,897$; $m = 0,59$. Для інших цільових класів значення констант наведено у таблиця 2.

Таблиця 2

Значення кінетичних параметрів для різних класів продукті подрібнення лускатого графіту у відцентровому млині

Клас, мкм	R_{100-x} , %	k_0	m
≤10 мкм	100	0,897	0,59
≤40 мкм	100	0,69	0,39
≤70 мкм	100	0,58	0,33
≤100 мкм	100	0,43	0,27

Криві, що відображають кінетику подрібнення у відцентровому млині для класу менше 10 мкм наведені на рис. 6.

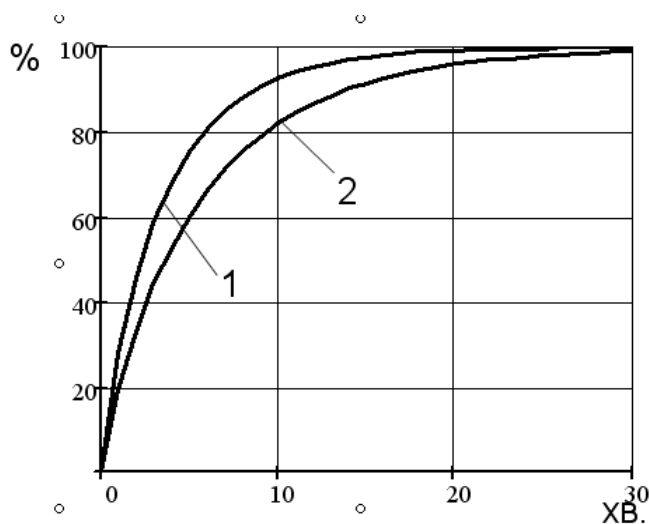


Рис. 6. Кінетичні залежності процесу подрібнення лускатого графіту для класу 10 мкм

З аналізу рисунку видно, що для досягнення порядку 90% готового продукту класу менше 10 мкм необхідно подрібнювати у відцентровому млині на протязі 18 хв. Також з кінетичних залежностей видно, що найбільш доцільним є безперервний процес подрібнення з видаленням готового класу з зони подрібнення. При заданому класі в 10 мкм концентрація готового класу в матеріалі не повинна перевищувати 52 %.

Висновки. В результаті проведення дослідницької роботи отримано залежності зміни гранулометричного складу лускатого графіту під час подрібнення у відцентровому млині. Отримано значення констант рівняння кінетики подрібнення лускатого графіту у відцентровому млині для класу менше 10 мкм. З кінетичних залежностей видно, що найбільш доцільним є неперервний процес подрібнення з видаленням готового класу менше 10 мкм.

Перелік посилань

1. Заяц, Н.Н. (2004). *Производство и применение чешуйчатого графита Завальевского месторождения: монография (рукопис)*. Завалье.
2. Смирнов, В.О., & Білецький, В.С. (2010). *Флотаційні методи збагачення корисних копалин*. Схід. видавн. дім.
3. Виноградов, Б. В., & Осташко, И. А. (2009) *Об энергетических характеристиках центробежных мельниц с S-образным рабочим органом*. Вістник НТУ «ХПІ».
4. Гірін, О. Б., Виноградов, Б. В., & Осташко, І. О. (2013). *Відцентровий млин ударної дії* (Пат. 106773).
5. Vinogradov, B. & Ostashko, O. (2016). Substantiation of key parameters of a centrifugal mill intended for grinding solid residue from the pyrolysis of used automobile tyres. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 91, 133-141. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2016.91.14>

ABSTRACT

Purpose. To obtain ultrafine scaly graphite, it is necessary to analyze and justify the grinding equipment, which allows to obtain a product of a given class. The most appropriate equipment for this purpose is a shock-type centrifugal mill.

Methodology. The work used a complex of tested research methods, which included: laser diffraction analysis, optical microscopy. Also, statistical and mathematical processing of experimental data based on applied computer programs; experimental studies in the laboratory.

Findings. They consist in establishing the regularities of the process of grinding scaly graphite in a centrifugal-impact mill with a static graphite classifier built into the mill using an air flow. According to the results of the study, it was established that graphite can be crushed to a final average size of 10 microns. To obtain a smaller size, you need to use other, more energy-intensive mills. These can be rotary-vortex mills with high efficiency or ball mills (mainly vibrating mills, which have a higher efficiency than conventional ball mills). The value of the coefficients of the equation of kinetics of the grinding process of scaly graphite is determined, which makes it possible to predict productivity by class and grinding time for a given average diameter of the product. The paper shows the feasibility of using a centrifugal shock mill for grinding scaly graphite.

Originality. The technology of grinding flaky graphite to obtain a product of a given dispersion class is proposed. For the first time, according to the results of experimental studies, the value of the constants of the equation of kinetics of the grinding process was established. The distribution curves of the granulometric composition of crushed scaly graphite in the centrifugal mill are constructed depending on the grinding time.

Practical implementation. According to the results of the study, equipment for grinding scaly graphite with the production of a product with an average particle diameter of 10 microns was proposed. The expediency of using a centrifugal mill is substantiated and the effectiveness of the system of classification and removal of the grinding product from the grinding chamber of the mill is shown.

Keywords: *flake graphite, grinding, dispersion, kinetics of grinding, centrifugal mill.*