

УДК 621.762.2

УДАРНАЯ МЕЛЬНИЦА

© 2024 г. А. С. Ажгалиева^а, Д. Н. Борисенко^{а, *}, Н. Н. Колесников^а, А. А. Жохов^а

^аИнститут физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, Черноголовка, 142432 Россия

*e-mail: bdn@issp.ac.ru

Поступила в редакцию 22.12.2023 г.

После доработки 10.01.2024 г.

Принята к публикации 10.01.2024 г.

Разработана ударная мельница для получения порошков из стружки тугоплавких металлов способом ударного измельчения для повторного использования в электрометаллургии в устройствах со шнековой подачей, например, в 3D-принтерах. Предложенное устройство позволяет при небольших технических и экономических затратах получить высокую равномерность измельчения с минимальным содержанием пылевой фракции и минимальным содержанием продуктов износа. Результаты достигают за счет использования сопла Лавалья, которое работает в режиме формирования сверхзвуковой струи. В области первого диска Маха размещены стержневые отбойники, расположенные каскадом, а отбойная плита расположена в зоне турбулентности и снабжена винглетами с отверстиями для сепарации измельченного металла.

Ключевые слова: порошковая металлургия, сопло Лавалья, диски Маха, отбойная плита, тугоплавкие металлы, стружка, ударное измельчение.

DOI: 10.31857/S1028096024050163, **EDN:** FSTFXD

ВВЕДЕНИЕ

Для измельчения материалов в промышленности используют различные виды мельниц, принцип действия которых обусловлен основными способами разрушения: раздавливанием, истиранием, раскалыванием, ударом и резанием [1–7]. При производстве тонкодисперсных материалов в больших объемах в условиях промышленности эти способы остаются практически незаменимыми благодаря высоким показателям надежности оборудования и простоте его обслуживания, несмотря на то, что КПД некоторых мельниц довольно невысок и измельчение – достаточно энергоемкий процесс. Поэтому правильный выбор оборудования и требования, предъявляемые к технологии, во многих отраслях промышленности стимулируют поиск новых способов и подходов к решению проблем, связанных с измельчением различных по прочности материалов.

Идея использования сжатой струи газа для измельчения твердого материала получила достаточно много вариантов конструктивного оформления [8]. Принцип работы таких мельниц заключается в следующем: измельчаемый материал

подается в помольную камеру, где подхватывается струями газа-энергонесителя и разгоняется до высоких скоростей. Движущиеся с большой скоростью частицы сталкиваются либо друг с другом, либо с отбойной плитой, в результате происходит их интенсивное разрушение. Дополнительное измельчение осуществляется при трении частиц друг о друга и о стенки помольной камеры. Отсутствие мелющих тел позволяет получать дисперсный материал с низким и даже нулевым содержанием продуктов износа [9]. Размеры частиц готового продукта можно регулировать в широком диапазоне, причем ударную мельницу обычно снабжают классификатором [10]. Во время работы сжатый газ подают в камеру измельчения через сопла. Сопла имеют два варианта исполнения – конические и сопла Лавалья [11]. Конические сопла обычно применяют для непрочных материалов, а также в спиральных струйных мельницах. Режим работы сопла Лавалья в мельницах ударного действия отличается от расчетного и не дает тех преимуществ сверхзвукового течения струи, которое повышает эффективность размолла, особенно в случае измельчения тугоплавких металлов. Специальные ударные мельницы имеют сопла

для формирования встречных потоков материала [12]. В этом случае ожидаемый результат в виде повышения эффективности не подтверждается практически – при встрече потоков наблюдается большая область стагнации, и такой принцип ударного размола оказывается неэффективным при измельчении тугоплавких металлов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для количественного определения распределения частиц по размерам использовали поляризационный микроскоп Meiji MT-9930 проходящего и отраженного света в комплекте со встроенным программным обеспечением Thixomet Lite, позволяющим использовать указанный в [13] металлографический метод случайных секущих.

Для исследований структуры и элементного состава поверхности частиц применяли растровый электронный микроскоп DualBeam VERSA 3D HighVac. Анализ энергодисперсионных спектров проводили с помощью фирменного программного обеспечения, позволяющего в качестве выходных данных получать химический состав образцов, включая расчет погрешностей измерений и статистическую обработку данных.

Рентгенофазовый анализ порошков проводили с использованием дифрактометра Rigaku SmartLab SE (CuK_α -излучение), снабженного полупроводниковым 1D детектором D/Tex Ultra 250 SL с линейной скоростью счета 256×10^6 имп./с. Программное обеспечение Smart Lab, Match3!, Powder Cell с базой данных ICDD PDF2 (2020 г.) позволяет характеризовать материалы методом Ритвельда.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В лаборатории физико-химических основ кристаллизации Института физики твердого тела РАН (ИФТТ РАН) была разработана эффективная ударная мельница, которая позволяла измельчать стружку тугоплавких металлов для повторного использования в электрометаллургии [14]. Благодаря применению “чистого удара” измельченный материал имел характерную осколочную форму, что затрудняло его применение в устройствах со шнековой подачей, например, в 3D-принтерах. Поэтому разработка ударной мельницы для дробления стружки тугоплавких металлов и получения материала с округлой формой частиц, пригодной для равномерного перемещения в шнековом транспортере при подаче в зону плавления, является актуальной задачей. После серии экспериментов конструкция ударной мельницы

была дополнена элементами, представленными на кинематической схеме (рис. 1). Технического результата достигают за счет использования стержневых отбойников, расположенных каскадом в области первого диска Маха, а отбойная плита расположена в зоне турбулентности и снабжена винглетами с отверстиями для сепарации измельченного металла.

Устройство работает следующим образом. Газ-энергоноситель (аргон) подается в сопло Лавала 2 под давлением 1 МПа через входной патрубок 6 и на выходе сопла приобретает скорость ~ 400 м/с. Стружка тугоплавкого металла попадает в сопло по патрубку 7. Приобретая ускорение и разгоняясь до сверхзвуковых скоростей, она сталкивается со стержневыми отбойниками, выполненными из того же тугоплавкого металла и расположенными каскадом в области первого диска Маха. Испытывая многократные соударения с отбойниками, стружка разрушается и попадает в зону турбулентности, где стоит отбойная плита 4. Испытывая вихревое движение вдоль поверхности отбойной плиты, частицы подвергаются абразивному износу и приобретают округлую топологию поверхности, пригодную для равномерного перемещения в шнековом транспортере. Достигая винглетов с отверстиями 5, частицы измельченного металла сепарируются и оседают на дно корпуса 1. Цикл измельчения закончен.

На рис. 2 представлен порошок после однократного размола стружки. Рентгенофазовый анализ порошка показал однофазный состав продукта помола – молибден с кубической объемно-центрированной решеткой типа $\alpha\text{-Fe}$ ($a = 3.14 \text{ \AA}$, $Z = 2$, пространственная группа $Im\bar{3}m$). По данным энергодисперсионного анализа фракционный состав порошка содержит не менее $(70 \pm 3)\%$ основной фракции с характерным

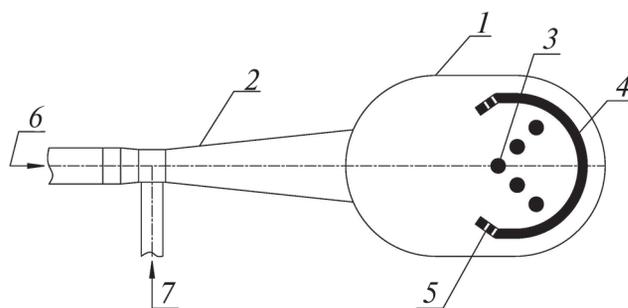


Рис. 1. Кинематическая схема ударной мельницы: 1 – корпус; 2 – сопло Лавала; 3 – стержневые отбойники из молибдена; 4 – отбойная плита из молибдена; 5 – винглеты с отверстиями; 6 – подача газа-энергоносителя; 7 – подача молибденовой стружки.

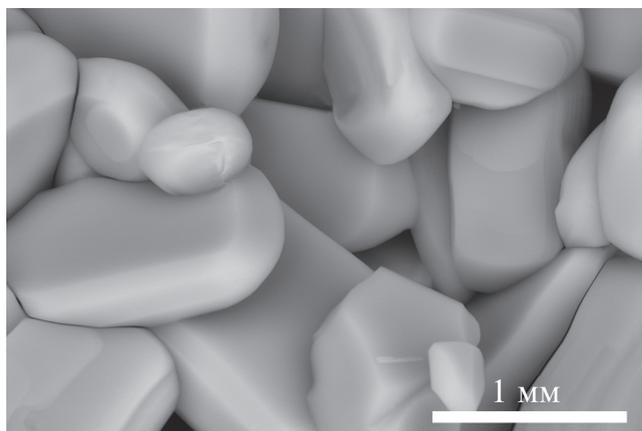


Рис. 2. Порошок после однократного размола стружки.

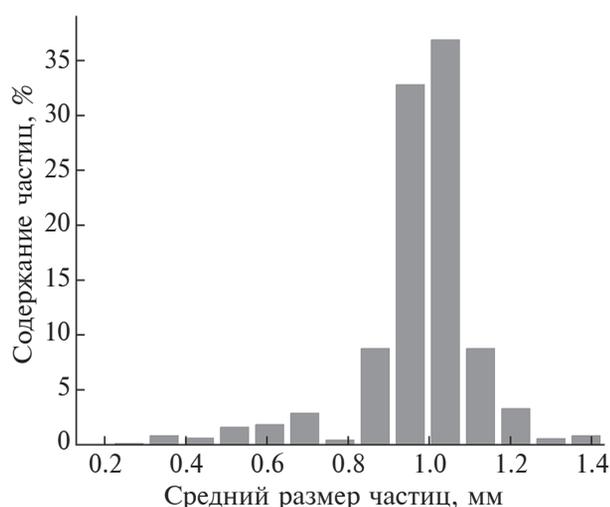


Рис. 3. Фракционный состав порошка.

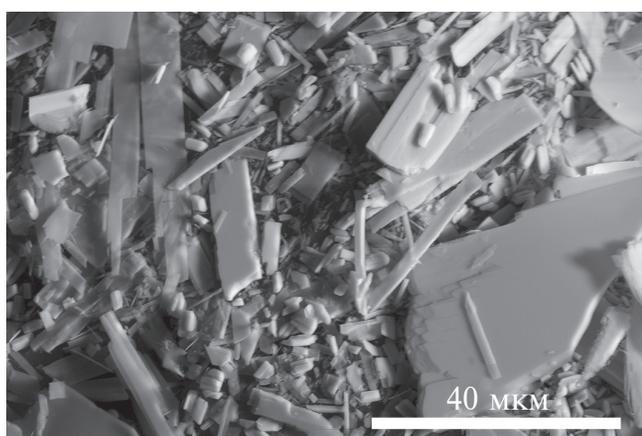


Рис. 4. Изображение пылевой фракции осколочной формы.

размером частиц 1.0 ± 0.2 мм (рис. 3). На рис. 4 представлено изображение пылевой фракции осколочной формы, извлеченной из сепаратора. Отношение массы пылевой фракции к массе основного продукта помола составляет 1 : 9. При анализе энергодисперсионных спектров было обнаружено, что примесный состав по концентрации суммарно не превышает 500 млн^{-1} [15], что соответствует по чистоте марке молибденового порошка ПМ99,95, выпускаемого промышленностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря применению предложенной конструкции ударной мельницы измельченный материал имеет однородную структуру с минимальным содержанием пылевой фракции в продукте помола и химическим составом, соответствующим марке молибденового порошка ПМ99,95. Продукт помола пригоден для дальнейшего применения в электрометаллургии в устройствах со шнековой подачей, например, в 3D-принтерах. С помощью предложенного устройства значительно снижаются энергетические затраты и повышается эффективность переработки вторичного сырья.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики твердого тела российской академии наук (ФТТ РАН).

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что в данной работе у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1980. 415 с.
2. Патент РФ № 2282502. Ударная мельница. / Блинов В.В. Блинов В.В., Коростелев С.Б., Новокшанов Ю.В., Пшеничников Ю.М., Руднев А.В., Чивелев В.Д., Шевченко В.И. // 2003. Бюл. № 24.
3. Патент РФ № 2176933. Ударно-отражательная мельница. / “Бюлер АГ”. Крэмер Г., Храпач Е., Храпач В. // 2001. Бюл. № 35.
4. Патент РФ № 2554976. Мельница для ударно-центробежного измельчения материала. / ОАО “НПО Центр”, ЗАО “Урал-Омега”. Бородавко В.И., Воробьев В.В., Гуринович В.В., Иванов Е.Н., Козин А.Ю., Красильников В.А, Таболич А.В., Шиманович П.П. // 2015. Бюл. № 19.
5. Патент РФ № 2559897. Ударно-центробежная мельница. / БГТУ им. В.Г. Шухова. Семикопенко И.А., Вялых С.В., Жуков А.А., Горбань Т.Л., Смирнов Д.В. // 2015. Бюл. № 23.

6. Патент РФ № 69771. Ударно-центробежная мельница. / ОАО "НПК "Механобртехника". Вайсберг Л.А., Арсентьев В.А., Зарогатский Л.П., Пирогова О.А. // 2008. Бюл. № 1.
7. Патент РФ № 2514716. Центробежно-ударная мельница. / Ярославский гос. тех. ун-т. Лебедев А.Е., Зайцев А.И., Капранова А.Б., Чадаев А.И. // 2014. Бюл. № 13.
8. *Постникова И.В., Блиничев В.Н., Кравчик Я.* // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2015. № 2 (42). С. 144.
9. *Ходаков Г.С.* Тонкое измельчение строительных материалов. М.: Стройиздат, 1972. 237 с.
10. Патент РФ № 2200626. Кольцевой вибрационный измельчитель с классификатором. / Институт горного дела Севера СО РАН. Изаксон В.Ю., Власов В.Н., Крамсков Н.П., Клишин В.И., Злобин М.Н., Матвеев А.И. // 2003. Бюл. № 8.
11. *Акунов В.И.* Струйные мельницы. Элементы теории и расчета. М.: Машиностроение, 1967. 265 с.
12. *Горбеев В.И., Горбеев Л.Ж.* Новое направление работ по измельчению. М.: Недра, 1977. 183 с.
13. *Салтыков С.А.* Стереометрическая металлография. М.: Metallurgy, 1976. 270 с.
14. Патент РФ № 2738171. Ударная мельница. / ИФТТ РАН. Борисенко Д.Н., Колесников Н.Н., Майстренко С.П., Редькин Б.С., Хамидов А.М. // 2020. Бюл. № 34.
15. *Романенко И.М., Вирюс (Муханова) А.А., Чурин В.А., Деянов А.С., Иванов А.С.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2012. № 7. С. 72.

Impact Mill

A. S. Azhgalieva¹, D. N. Borisenko^{1,*}, N. N. Kolesnikov¹, A. A. Zhokhov¹

¹*Osipyan Institute of Solid State Physics RAS, Chernogolovka, 142432 Russia*

**e-mail: bdn@issp.ac.ru*

An impact mill has been developed to produce powders from shavings of refractory metals using impact grinding method for reuse in electrometallurgy in devices with screw feed, for example, in 3D printers. The proposed device provides high uniformity of grinding with a minimum content of dust fraction and impurity content at low technical and economic costs. The result is achieved by using a Laval nozzle, which operates in the supersonic jet formation mode. In the area of the first Mach disk there are rod fenders arranged in a cascade, and the impact plate is located in the turbulence zone and is equipped with winglets with holes for separating crushed metal.

Keywords: powder metallurgy, Laval nozzle, Mach discs, impact plate, refractory metals, shavings, impact grinding.