УДК 621.926.85

ПУТИ СНИЖЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОМБИНИРОВАННЫХ СТРУЙНЫХ МЕЛЬНИЦАХ

С. Б. БУЛГАКОВ, Д. В. СЁМКИН
Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова
Белгород, Россия

Снижение удельных энергозатрат при измельчении сверхтвердых материалов (СТМ) остаётся одной из ключевых проблем в производстве микро- и нанопорошков. Традиционные шаровые и планетарные мельницы обеспечивают высокую степень измельчения, однако удельный расход энергии в них достигает 161 000 кВт·ч/т, что делает процесс экономически нецелесообразным для крупнотоннажного производства [2]. Комбинированные струйные мельницы, сочетающие противоточное и вихревое измельчение с интегрированной классификацией, позволяют существенно снизить энергопотребление за счёт изменения гидродинамики потоков и организации замкнутого цикла [1].

Рассмотрим возможные пути и способы снижения энергозатрат при измельчении СТМ.

1. Оптимизация давления энергоносителя. Экспериментальные исследования показывают, что при повышении давления газа до 1,0 МПа частицы разрушаются преимущественно ударным способом, а не истиранием, что увеличивает производительность и уменьшает удельные затраты энергии на 20 %...30 % по сравнению с режимами низкого давления [2]. Для СТМ, обладающих высокой хрупкостью, ударное разрушение является энергетически более выгодным, поскольку не сопровождается пластической деформацией и нагревом продукта.

2. Усиление соударений частиц за счёт другой геометрии разгонных сопел и создания трёхпоточного столкновения. Когда сопла располагают под углом 120°, частицы разгоняются сильнее, а область наиболее интенсивного измельчения становится более локальной внутри камеры. За счёт этого уменьшается доля энергии, которая тратится на перемещение газа без полезного эффекта, и возрастает концентрация материала в зоне удара.

3. Использование перегретого пара как энергоносителя. Паровая струйная мельница имеет лучшие энергетические показатели, чем установка со сжатым воздухом: кинетическая энергия струи становится почти в 4 раза выше. Это даёт возможность либо повысить производительность, либо уменьшить давление подачи. Для СТМ, которые переносят кратковременный нагрев без ухудшения свойств, пароструйное измельчение считается перспективным [3].

4. Частичная замена механического измельчения предварительной обработкой, которая снижает прочность материала. Например, если в сверхзвуковом потоке одновременно действуют резкие температурные перепады и акустические

волны, по границам зёрен формируются микротрещины. После этого частицы разрушаются при заметно меньших энергозатратах [2].

5. Объединение измельчения и классификации в одном корпусе с работой по замкнутому циклу. Струйная мельница с псевдоожиженным слоем и встроенным динамическим классификатором позволяет постоянно выводить готовый продукт из зоны помола. Это препятствует переизмельчению и исключает непроизводительный расход энергии на частицы, уже имеющие нужную крупность [1].

6. Оптимизация режима диспергирования с учётом кинетики разрушения. Если перейти к условиям, выбранным по критерию максимальной удельной поверхности при минимальной энергии, удельные энергозатраты можно снизить в 2–2,5 раза. Для этого подбирают рациональную кратность циркуляции материала, не допускают чрезмерной разгрузки струй и поддерживают стабильный расход энергоносителя на единицу массы [2].

7. Применение эффекта самофутеровки помольной камеры. Когда стенки покрываются слоем измельчаемого материала, рабочие поверхности меньше изнашиваются, а потери энергии на трение частиц о металл снижаются. Для СТМ с высокоабразивным действием это особенно важно [4].

Совокупное применение перечисленных путей позволяет снизить удельные энергозатраты при измельчении сверхтвёрдых материалов в комбинированных струйных мельницах. Однако наибольший эффект достигается при комплексной реализации этих решений с учётом индивидуальных свойств конкретного материала и требований к гранулометрическому составу готового продукта [1].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цифровой двойник комбинированного блока помола струйной мельницы / С. Б. Булгаков, М. В. Тимашев, А. А. Литвишко, Д. В. Сёмкин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 3. – С. 180–192.

2. **Бараковских, Д. С.** Интенсификация процесса измельчения дисперсных материалов в эжекторной струйной мельнице : дис. ... канд. техн. наук : 2.16.13 / Бараковских Дмитрий Сергеевич ; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2022. – 174 л.

3. Сверхтонкое измельчение с помощью пароструйной мельницы s-Jet®. – URL: https://grinding.netzsch.com/ru/produkty-i-resheniia/suhoe-izmelchenie/s-jet-parostruinaia-melnitsa (дата обращения: 19.09.2026).

4. Полезная модель RU 75326 U1, МПК B02C 19/06. Струйная мельница с цилиндрической самофутерующейся камерой помола : № 2008108460/22 : заявлено 04.03.2008 : опубл. 10.08.2008 / Старчик Ю. Ю., Карпачев Д. В., Уваров А. В.; заявитель Белгород. гос. технол. ун-т им. В. Г. Шухова.