

## РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХТОНКОГО ПОМОЛА МАТЕРИАЛОВ

*Сиваченко Л.А., д.т.н., профессор*

*Белорусско-Российский университет*

*Мирмов Н.И., д.т.н., профессор, директор научно-инженерного центра*

*Г. Маалот, Израиль*

*Дыдышко И.М., аспирант*

*Барановичский государственный университет*

*Сиваченко Т.Л., зам. директора КБ «Промышленные технологии и комплексы»*

Разработка новых материалов с заданным комплексом свойств осуществляется переводом материала в ультрадисперсное состояние, в котором его характерные геометрические размеры оказываются соизмеримы с тем или иным масштабом физического явления, например, поверхностной энергией [1]. Сегодня это называется нанотехнологиями и является приоритетным направлением в науке.

Одним из основных методов получения сверхтонких и наноразмерных композиций является измельчение, осуществляемое преимущественно механическими методами. Главным условием при этом подходе является минимизация размеров мелющих тел. Это положение хорошо известно специалистам [2] и находит самое широкое применение в технике измельчения. Его физическая суть заключается в создании максимальных напряжений в структуре измельчаемого материала. Этот метод успешно реализуется, например, в бисерных и коллоидных мельницах. В настоящее время это одно из основных направлений повышения эффективности тонкого и особенно сверхтонкого помола.

Сравнение различных методов получения ультрадисперсных частиц и наноконпозиций показывает, что для целей производства целого ряда эффективных материалов наиболее приемлемы механические [4]. При этом следует понимать необходимость совмещения этих технологий с другими операциями пререработки дисперсных сред, являющихся основой структуры искусственных конгломератов.

Процесс тонкого и особенно сверхтонкого помола материалов сопряжён с решением целого ряда задач технического и технологического характера. К первым следует отнести аппаратурное выполнение оборудования, ко вторым – блокирование поверхностной энергии частиц измельчаемого вещества, что приводит к их агрегированию, препятствующему дальнейшему протеканию процесса диспергирования. Попытаемся сформировать новый подход в решении некоторой части поставленных задач.

Начнем с того хорошо известного специалистам факта, что при механическом измельчении существует устойчивая зависимость тонины помола от размеров мелющих тел и энергонапряженности рабочего процесса [2,3]. Это четко коррелируется на примерах бисерных мельниц, развитие которых идет по пути уменьшения размеров мелющих тел (шаров), диаметр которых в ряде случаев достигает 50 и даже 20 мкм [5]. Получение столь малых мелющих тел сама по себе очень сложная и дорогостоящая технология и следовать по этому направлению, т.е. создавать собственные установки на подобном принципе действия – значит обрести себя на постоянное отставание.

Попытаемся построить свою философию в понимании диалектики создания аппаратов для сверхтонкого помола материалов механическим способом.

Начнем с того, что при проведении процессов ультрадисперсной пререработки (помола, диспергирования или микрогранулирования) дисперс-

ных сред необходимо постоянно блокировать силы поверхностного взаимодействия между частицами, которые прогрессивно возрастают по мере уменьшения их размеров и в какой-то момент, при достижении критической крупности, процесс разрушения частиц прекращается при любой продолжительности и интенсивности осуществляемых внешних воздействий. Сдвинуть эту границу в сторону получения более мелких частиц можно различными способами: уменьшением размера мелющих тел, оптимизацией характера механизмов единичных актов разрушения, увеличением энергонапряженности процесса, использованием ПАВ, обработкой в жидких средах, применением охлаждающих веществ и т.д.

В работе [6] излагается вывод, что аппарат тем энергетически выгоднее (при прочих равных условиях), чем меньше отношение объема его загрузки к производительности и чем выше удельный прирост поверхности при измельчении единицы объема. В подтверждении сказанному авторы предлагают коэффициент так называемого лишнего времени, который определяется как отношение времени ожидания  $t_1$  акта измельчения  $k_2$  к времени  $t_1$  осуществления акта измельчения, т.е.

$$k_t = \frac{k_1}{k_2} \quad (1)$$

Приведенные в этой работе значения  $k_p$  определенные и аналитически и на основании конкретной работы конусной дробилки, составляют соответственно 2000 и 2100. Этот простой и показательный пример даёт все основания полагать, что сокращение значения  $k_p$  должно привести, во-первых, к повышению собственно эффективности процесса помола, во-вторых, что предположительно, обеспечит получение частиц с более мелкими размерами. Последнее обстоятельство следует из свойств частиц «закрывать» полученные ими при измельчении трещины и пониманием того, что «скорострельностью» внешних воздействий этот процесс можно замедлить.

На этом основании заслуживает внимания современное представление сущности так называемого управляемого хаоса, которую можно использованы именуемого как фракталы [7, 8]. Геометрическое построение фракталов может быть чрезвычайно многообразным и один из вариантов его реализации для условий измельчения материалов реально выполнить из произвольно расположенных друг относительно друга во-

локонных образований, образующих пространственно неоднородно по взаимному расположению, но с изотропной плотностью расположения элементарных волокон. Вариант подобного исполнения приведен на рис. 1, где изображена волоконная губка из тонких металлических волокон.

Интенсивное деформирование такого рабочего тела, при условии равномерного его заполнения измельчаемым материалом, может создать новые возможности в сфере сверхтонкого измельчения за счет использования очень тонких и прочных металлических волокон, воздействия на отдельные частички различными по характеру единичными механизмами разрушения, высокой энергонапряженности процесса, минимизации времени ожидания нагружения частиц между актами разрушения. Как вариант выполнения подобного технического решения может быть деформирование волоконного тела в вибрационном устройстве между цилиндрическим инерционным вибратором и охватывающей его цилиндрической камерой (рис.2).

Без проведения специальных исследований достоверно судить о потенциальных возможностях волоконного (фрактального) подхода к организации сверхтонкого помола нельзя. В качестве первых шагов здесь могут быть аналитические работы в части фрактальных взаимодействий волокон между собой и создание физических моделей с использованием тонкой стальной проволоки.



Рис. 1. Фрактальное исполнение измельчающего органа на основе волоконных элементов

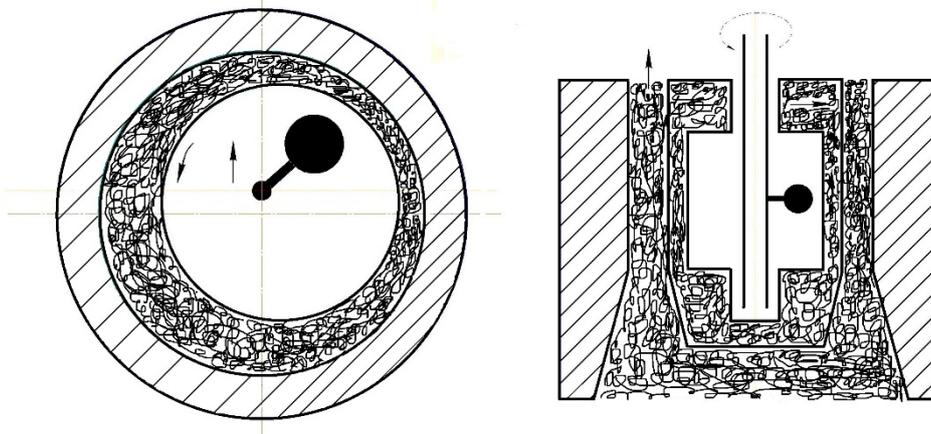


Рис. 2. Варианты реализации волоконного помола на основе вибрационного механизма

Выбор металлических волокон в качестве мелющих тел нам представляется возможным вариантом замены некоторой части аппаратов с шаровой загрузкой, стоимость которой чрезвычайно высока. Следует заметить, что получение тонких волокон (проволоки) значительно проще и дешевле, чем мелких шариков. При этом шаровое измельчение относится к способу помола со свободным движением мелющих тел [2], что не позволяет максимально использовать потенциал измельчения по критерию энергонапряженности и, соответственно, созданию в частицах измельчаемого материала предельных контактных напряжений.

Варианты единичных актов волоконного измельчения приведены на рис. 3. Во всех случаях соседние волокна (проволочки) 1, 2 могут контактировать по своим образующим (рис. 3, а и 3, б), причем в одном случае по линии (рис. 3, в), а во втором – в точке (рис. 3, г). Характер взаимодействия в каждом конкретном случае может быть различным, например, чистое сжатие, сжатие со сдвигом, истирание и т.д. разрушающие усилия между проволочками могут быть не только очень большими, но и достаточно эффективными для получения ультрадисперсных частиц, т.к. для них создаются оптимальные условия разрушения, диспергирования, механоактивации или микрогранулирования.

Несмотря на свою простоту волоконный способ измельчения материалов в плане его практической реализации являет собой на сегодня полную неопределенность. Это естественным образом следует из того, что подобные методы помола ранее никем не рассматривались, что подтверж-

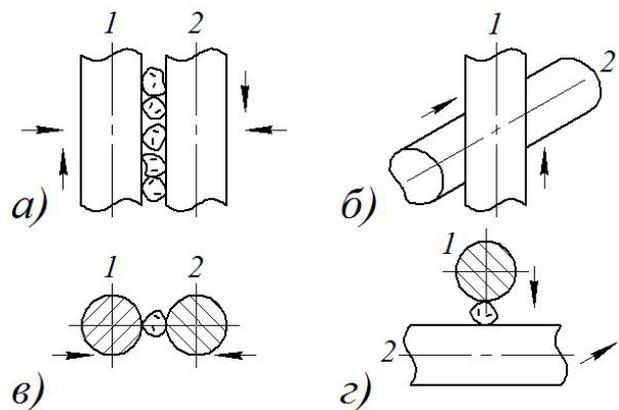


Рис. 3. Варианты единичных актов волоконного измельчения

дено патентным поиском и анализом научно-технической информации.

Во-первых, поведение тонких волокон в обрабатываемой среде твердых частиц и, тем более, в режиме постоянных деформаций совершенно не изучено. Это касается в первую очередь взаимного расположения в пространстве взаимодействующих между собой соседних волоконцев. В качестве выбора их реальных размеров нам представляется, что диаметры отдельных проволочек следует выбирать 0,15–0,50 мм и менее. Во-вторых, не определено, из какого материала и каким образом следует изготавливать волоконные рабочие органы. Обсуждение этого вопроса в таком ракурсе является наиболее актуальным и должно опираться на соответствующие технологии производства мелкосортного профиля. В-третьих, отсутствует информация о процессах износа металлических волокон при взаимодействии с абра-

живными частицами, что особенно актуально для тонких волокон, которые могут перетираться за короткий промежуток времени.

Для определения принципиальной возможности создания волоконной мельницы необходимо разработать и испытать ее опытный образец. Эти работы планируется выполнить на макетном образце, который будет изготовлен из металлического корда – проволоки из стали 70 диаметром  $d=175$  мкм производства Белорусского металлургического завода, г. Жлобин.

В качестве одного из предложений в развитии направления сверхтонкого помола является использование в качестве мелющих тел коротких отрезков проволоки малого диаметра, взаимодействие между которыми под внешним механическим воздействием характеризуется повышенными контактными напряжениями, приводящими к разрушению или накоплению дефектов структуры.

Использование мелющих тел в виде отрезков тонкой проволоки наиболее целесообразно в бисерных мельницах. Главной задачей при этом представляется рубка проволоки. Одним из вариантов ее решения является передавливание сечения проволоки между вращающимися валками с мелкими зубьями. После такой обработки проволоку необходимо разломать на отрезки, например, в простейшем лопастном смесителе. Полученные таким образом мелющие тела в своей аналогии конструктивно подобны конфетам «подушечка». Эффективность помола материалов на основе разработанных устройств и мелющих тел зависит, прежде всего, от организации рабочего процесса и конкретного их использования и может быть очень высокой.

Особого внимания заслуживает использование механизма дополнительного воздействия на мелкие мелющие тела сжимающими силами, создаваемыми витками пружинного рабочего органа. Его задачей является создание максимально возможных контактных напряжений в рабочих зонах. Это возможно на основе идеи перевода измельчения с метода свободного движения мелющих тел к методу их принудительного адаптивного зацебления.

Осуществить подобную задачу можно на примере пружинной мельницы с мелющей загрузкой в виде мелких шариков диаметром 0,05–0,5 мм. В отличие от традиционных механизмов измельчения между витками на этих мелющих телах реализуются повышенные контактные напряжения, чем обеспечивается сверхтонкий помол. Техническое решение этого метода иллюстрируется рис. 4, 5, на которых соответственно приведены кинематическая схема и общий вид пружинной мельницы [9,10].

Пружинная мельница содержит электродвигатель 1, муфту 2, рабочую камеру 3 в которой на опорных валах 4 посредством узлов крепления 5 смонтирован дугообразно изогнутый пружинный рабочий орган 6, а для загрузки и выгрузки материала предусмотрены патрубки 7, 8.

Работа мельницы производится при заполненной камере 3 исходным материалом, который также содержит от 10 до 50 % по загрузке мелющих тел. При включенном двигателе 1 рабочий орган 6 приводится во вращение и производит разрушение материала как между собственно витками пружины, так и с заклиниванием между ними мелющих шариков. Мелющие тела могут отделять-

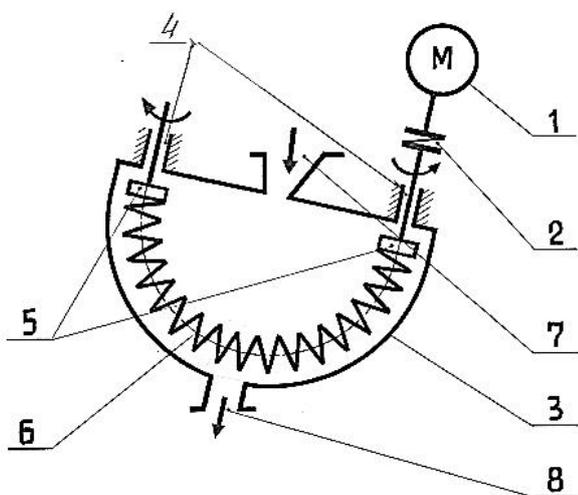


Рис. 4. Кинематическая схема пружинной мельницы

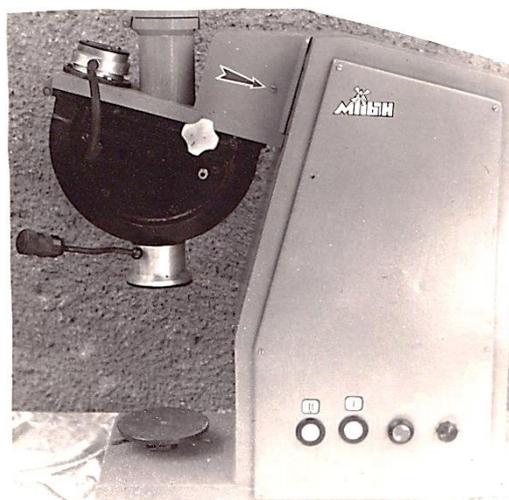


Рис. 5. Общий вид пружинной мельницы

ся от обработанного продукта как посредством сетки, помещаемой в выгрузочный патрубок 8, так и на отдельном посту после выгрузки из аппарата всей находящейся в нем загрузки. Мельница в режиме нанопомола предназначена для работы преимущественно по мокрому способу.

Исходным материалом может быть как достаточно мелкий 0,01 – 0,5 мм сухой продукт, так и суспензия аналогичной крупности. Процесс разрушения материала в пружинной шаровой мельнице происходит в различных ее зонах по-разному. Мелющие тела, свободно движущиеся в камере, измельчают материал, который попадает в зоны их соударений. Мелющие тела, которые захватываются смежными витками пружины рабочего органа 6 и подвергаются сжимающему воздействию, обеспечивают интенсивное измельчение частиц на боковых поверхностях витков.

Интенсивность измельчения материала в пружинных мельницах мелкими мелющими телами потенциально значительно выше, чем в традиционных мельницах, т.к. в межвитковых зонах можно обеспечить предельно допустимые по условиям, прежде всего, прочности по контактным напряжениям измельчающих элементов – витков пружины рабочего органа и мелющих тел.

К достоинствам предлагаемой конструкции мельницы [10] можно отнести ее простоту. При этом присутствие в обрабатываемой среде мелких шариков позволяет отказаться от закрепления пружинного рабочего органа своим свободным кольцом на оси опоры. Шарики будут выполнять роль своеобразных тел качения и дополнительно улучшат условия работы пружины, исключив сопротивление на трение в опоре, которое будет переведено в работу измельчения.

При необходимости в предлагаемой мельнице можно осуществить криогенное измельчение. Для этого в рабочую среду следует вводить хладагент, например, жидкий азот. Повышенная энергонапряженность процесса разрушения, особенно минерального сырья, обеспечивает не только сверхтонкий помол, но и эффект механоактивации, что кардинально изменяет свойства обрабатываемого таким образом продукта.

Потенциал сверхтонкого помола материалов в пружинной мельнице без мелких мелющих тел можно продемонстрировать на примере размола дисульфида молибдена, являющегося одним из наиболее трудно диспергируемых продуктов, показывает возможность обработки не только твердых и хрупких материалов, но и обладающих высокой способностью диспергирования.

Гранулометрические составы в дифференциальной форме исходного дисульфида молибдена и обработанного в течении 2 и 4 часов приведены на рис.6.

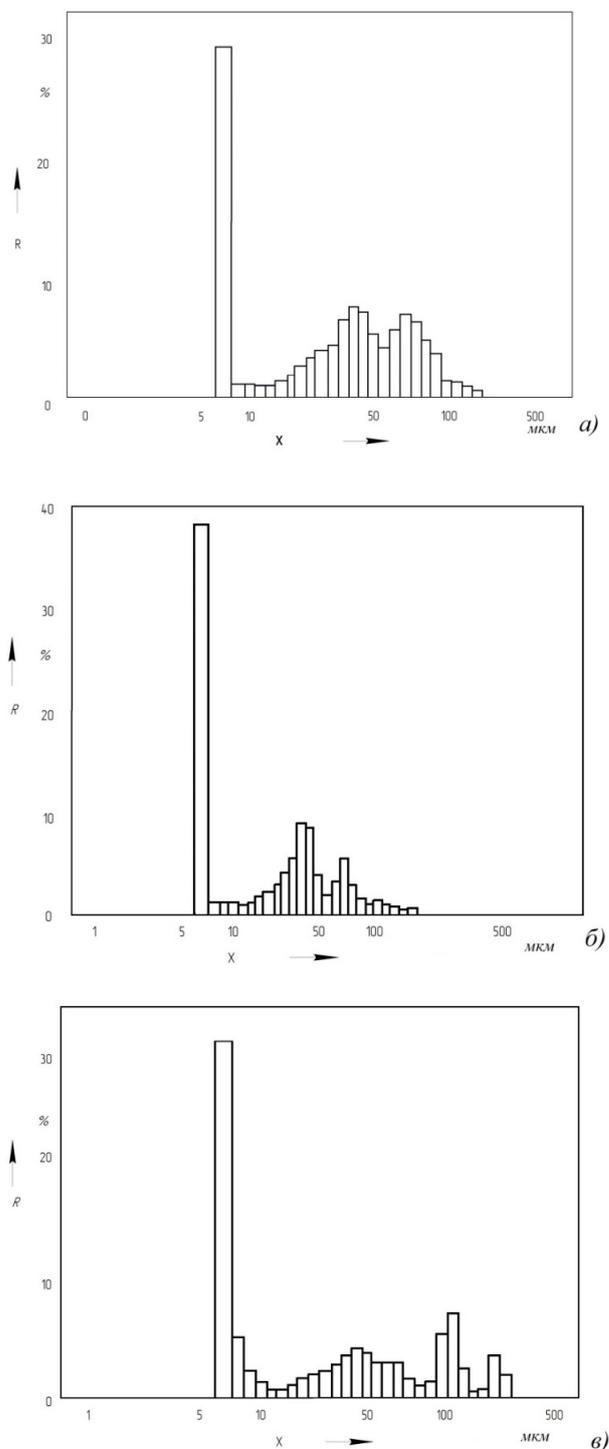


Рис. 6. Гранулометрические составы дисульфида молибдена

Полученные результаты показывают реальную возможность получения в измельченном материале большого количества наночастиц. Заметим, что работ по нанопомолу в аппаратах с пружинными рабочими органами не проводилось.

Введение в помольную камеру пружинной мельницы мелких мелющих тел создает дополнительные механизмы повышения напряжений в частицах измельчаемого материала и, тем самым, позволяет повысить дисперсность готового продукта, в том числе перевести его в разряд нанопродукта. Концепция такого подхода изложена в работах [11,12].

Создание нового эффективного оборудования для комплексной переработки материалов, находящихся в ультрадисперсном состоянии, необходимо для производства продуктов с дополнительными потребительскими свойствами или специального назначения. Область применения аппаратов подобного назначения не только огромна, но и постоянно расширяется, охватывая практически все сферы деятельности человека, начиная от бытовой техники и заканчивая космическими технологиями. Определенную нишу в такой технологической эволюции смогут занять и представленные в данной статье разработки и возможные варианты их развития.

#### *Список используемых источников*

1. Бабенко С.А. Порошки. Получение, свойства, анализ /С.А. Бабенко, А.П. Ильин, В.В. Коробочкин, О. К. Семакина, – Томск; Из-во Томского политехнического университета, 2011, -264 с.
2. Горловский И.А. Оборудование заводов лакокрасочной промышленности /И.А. Горловский, Н.А. Козулин, Ленинград, Химия, Лен. отделение, 1980.–376 с.
3. Вайтехович П.Е. Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил /П.Е. Вайтехович.– Минск, БГТУ, 2008.– 220с.
4. Зеленков С.Ф. Методы получения наночастиц и нанопорошков /С.Ф. Зеленков, О.В. Пустовалов, Межвуз. сб. статей Машины и аппараты для производства строительных материалов, Белгород, БГТУ, 2006, – С. 70–74.
5. A bead mill for making nanodispersions //Chem/ – Eng (USA) – 2005 – Vol/ 112, № 10 – P. 17-18.
6. Ревнивцев В.И. Селективное разрушение минералов /В.И. Ревнивцев [и др.], – М.: Недра, 1988, – 286 с.
7. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах – Москва: Изд-во Постмаркет, 2000. – 352 с.
8. Соболев Н.В. Фракталы – геометрия хаоса /Н.В. Соболев, С.С. Климов // Межвуз. сб. статей Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов, Белгород, БГТУ, 2017, – С. 246-250.
9. Патент США №4899941, Устройство для помола, МПК6В02 С19/22 Авт. Сиваченко Л.А., Кургузиков А.М., Моисеенко В.В. 1988, 39с.
10. Сиваченко Л.А. Технологические аппараты адаптивного действия [Монография]/ Л.А. Сиваченко [и др.], Минск, Изд. центр БГУ, 2008.-375с.
11. Сиваченко Л.А. Технологические аппараты для получения наноразмерных композиций /Л.А. Сиваченко, Т.Л. Сиваченко //Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов, Белгород, БГТУ, 2014, – С. 283-286.
12. Патент Казахстана на изобретение №29820 Пружинная шаровая мельница МПК В02с 19/22, Авт. Унаспеков Б.А., Сиваченко Л.А., Голбан Е.Г. и др., Опубл. 15.05.2015, бюл. №5.