УДК 69.002.5

© А. А. Шиманова, канд. техн. наук
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: sommery@ya.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-4-81-87

© А. А. Shimanova, PhD in Sci. Tech.
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: sommery@ya.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОМОЛЬНОГО ПНЕВМОТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА В ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНОВ И ЦЕМЕНТОВ

PROSPECTS FOR THE USE OF GRINDING PNEUMATIC TRANSPORTATION COMPLEX IN THE CONCRETE AND CEMENT TECHNOLOGY

Статья посвящена вопросам создания порошкообразных материалов тонкого и сверхтонкого помола в технологии бетонов и цемента и использованию для этих целей измельчительных машин в составе пневмотранспортного комплекса. Выделены основные актуальные направления применения минеральных порошков. Проанализированы конструкции некоторых измельчительных машин, наиболее востребованных в этой области. Приведены возможные направления повышения эффективности процесса тонкого и сверхтонкого измельчения материалов.

Ключевые слова: строительные материалы, пневмотранспорт, пневмокомплекс, тонкий помол, мельницы, дезинтеграторы.

The article considers the issues associated with producing powdery materials of fine and ultra-fine grinding in the technology of concrete and cement and the use of grinding machines for this purpose as part of the pneumatic transportation complex. The main topical directions of mineral powders application are highlighted. The design of some grinding machines, which are in the biggest demand, is analyzed. The author makes assumptions in regard of possible directions for improving the efficiency of the grinding process of fine and ultra-fine of materials.

Keywords: construction materials, pneumatic transport, pneumatic complex, fine grinding, mills, disintegrators.

Введение

Строительная отрасль на современном этапе развивается высокими темпами, что обусловлено потребностью страны в жилье, инфраструктуре, создании новых строительных технологий, повышении качества и увеличении объема производства строительных материалов и росте эффективности строительства. В то же время в строительной индустрии в целом и в области строительных материалов в частности наблюдается нехватка отечественных промышленных товаров группы «А», т. е. средств производства.

В технологии строительных материалов в области цементных бетонов процессы тонкого и сверхтонкого измельчения материалов главным образом направлены на получение минеральных порошков, которые находят применение в таких направлениях, как:

1) использование тонкодисперсных минеральных добавок (ТМД), способных улучшить

или получить специальные свойства бетона/бетонной смеси. ТМД представляют собой порошки из природных минералов или техногенных отходов с удельной поверхностью, сопоставимой с цементом, или менее. Они могут вводиться как в цемент, так и в бетонную смесь. В России применение минеральных добавок в цементах регламентируется ГОСТ 31108–2016 и может составлять до 35 % от массы¹. Можно выделить основные пути использования тонкодисперсных минеральных порошков:

- применение в качестве микронаполнителей, призванных улучшить структуру бетонного/цементного камня, путем заполнения пористого пространства и создания максимально плотной структуры. В качестве таких порошков, например, применяют молотые карбонатные породы, глины, лёссы, молотый кварцевый песок и пр.;

¹ ГОСТ 31108–2016. Цементы общестроительные. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2016.

- применение в качестве активной минеральной добавки (пуццолановой добавки), обладающей вяжущими свойствами и призванной заместить часть цемента. К активным добавкам можно отнести, например, молотые доменные шлаки, порошки золы-уноса, микрокремнезем, вулканические туфы и пр.;

2) механоактивация портландцемента, целью которой является увеличение реакционной способности вяжущего.

Потребность в активации цемента возникает в случаях:

- восстановления качества слежавшегося (частично потерявшего активность) цемента путем повышения его дисперсности;

- ускорения реакций схватывания и твердения цемента за счет более полной и быстрой гидратации клинкерного фонда (приобретает актуальность в технологии пенобетона; для сокращения сроков распалубки на заводах ЖБИ; при использовании быстротвердеющих смесей, например при создании наливных полов, и пр.);

- повышения эффективности цемента в рамках задачи по созданию высококачественных бетонов;

3) создание композиционных вяжущих и вяжущих со специальными свойствами путем совместного помола и/или смешивания портландцемента с минеральными наполнителями и/или химическими добавками. Нашло реализацию в таких материалах, как:

- композиционные цементы — вяжущие состоящие из портландцемента и двух и более минеральных материалов техногенного или природного происхождения. Получаются в результате совместного помола всех компонентов или смешения уже готовых. В подобных цементах возможно замещать до 60–80 % клинкера;

- вяжущее низкой водопотребности (ВНВ) — получают путем совместного помола цемента с минеральными добавками в присутствии порошкообразного суперпластификатора. ВНВ благодаря механоактивации и высокой дисперсности (удельная поверхность около 5000 г/см²) приобретает повышенную активность;

- специальные цементы: тампонажные, расширяющиеся, декоративные и пр.;

4) технологический этап по подготовке сырьевых компонентов в ряде технологий (например, ячеистые бетоны);

5) особо тонко дисперсные вяжущие (ОТДВ). Повышенный интерес в последнее время представляют ультрадисперсные минеральные порошки (с размерами частиц от 0,01 до 25 мкм). ОТДВ могут применяться для приготовления различных инъекционных и ремонтных составов при строительстве и ремонте тоннелей и различных строительных конструкций составов. Кроме того, ОТДВ может выступать модификатором структуры цементного камня.

Приведенные направления использования процессов тонкого измельчения обозначают ряд показателей, достижение которых позволит получить тонкодисперсный минеральный порошок необходимого качества:

- получение порошка необходимой тонкости помола;

- обеспечение заданного гранулометрического состава;

- придание частичкам материала определенной формы.

Прогнозирование эффективности внедрения помольного пневмотранспортного комплекса

Приведенные показатели являются потребительскими характеристиками готового материала и учитываются при выборе помольного оборудования наравне с исходными свойствами сырья (крупность исходного материала, механические свойства, пожаровзрывоопасность и пр.), а также технико-экономическими параметрами помольного оборудования (производительность, энергопотребление, коэффициент использования оборудования и пр.). На сегодняшний день существует большое разнообразие машин для измельчения строительных материалов, однако лишь немногие пригодны для эффективного получения высокодисперсных порошков. Как правило, они представляют собой комплекс «мельница — сепаратор», где мельница выступает основным оборудованием, а сепаратор предназначен для отделения необходимой тонкой фракции и отправки на домол грубой [1]. Для тонкого помола в промышленности строительных материалов наибольшее распространение получили барабанные шаровые мельницы,

вибрационные шаровые, дезинтеграторы и струйные мельницы [2].

Из известных машин для тонкого измельчения материалов в многотоннажных производствах основными являются барабанные мельницы [3]. Это обусловлено простотой и надежностью их конструкции, высоким коэффициентом использования, а также возможностью создавать мельницы больших размеров, что позволяет добиваться больших загрузок сырья. Кроме того, конструкция барабанных шаровых мельниц позволяет осуществлять процесс сушки совместно с измельчением. Барабанные шаровые мельницы используются при помоле как твердых абразивных материалов, так и мягких пород. Конструктивная схема барабанной шаровой мельницы представлена на рис. 1.

При вращении барабана мелющие тела (кроме шаров могут применяться стержни, диски и пр.) центробежной силой прижимаются к его стенке, поднимаются, затем, достигнув определенной высоты, начинают скатываться или падать вниз. Преобладающие типы разрушения сырьевого материала — раздавливание и истирание. Несмотря на достоинства мельниц данной конструкции, им присущи высокий намот мелющих тел и крайне низкая энергонапряженность (у барабанных шаровых мельниц этот показатель связан с ускорением свободного падения мелющих тел). Как известно, максимальная достижимая в любой мельнице тонина помола пропорциональна ее энергонапряженности [4]. «При измельчении цементов в шаровых мельницах до удельной поверхности $3000\text{--}3500\text{ см}^2/\text{г}$ ее прирост практически пропорционален затра-

ченной работе (по закону Риттингера). Лишь при более высоких степенях, когда наступает агломерация тончайших частичек, прирост удельной поверхности сопровождается повышенным расходом энергии» [5]. Таким образом, барабанные шаровые мельницы теряют эффективность при увеличении дисперсности, особенно при сверхтонком помоле. Данные обстоятельства вызвали необходимость создания машин со значительно большим ускорением движения мелющих тел.

Для увеличения энергонапряженности вращающихся барабанных мельниц были разработаны вибрационные шаровые мельницы (рис. 2) [6].

В вибромельницах дополнительная энергия передается материалу через вибрацию шаров, приводимых в движение вибраторами, размещенными на корпусе цилиндрической камеры измельчения. Высокая частота колебаний и разнообразный характер воздействий (удар, истирание, сдавливание) измельчающих тел на материал создают комбинацию из разрушающих воздействий, а энергонапряженность составляет около $0,8\text{--}1,2\text{ кВт на } 1\text{ дм}^3$ помольной камеры [7]. Основная особенность процесса вибрационного измельчения: под совокупным воздействием высокочастотных механических воздействий и периодически возникающих напряженных состояний в измельчаемом материале слабые места, всегда имеющиеся в структуре твердого материала, еще более ослабляются, и разрушение частиц происходит в этих точках. Поэтому вибрационная мельница особенно эффективна при получении высокодисперсных продуктов. Основными недостатками шаровых мельниц,

Рис. 1. Схема шаровой мельницы: 1 — корпус; 2 — мелющие тела; 3 — футеровочные плиты; 4 — привод

Рис. 2. Схема вибрационной шаровой мельницы: 1 — электродвигатель; 2 — эластичная муфта; 3 — корпус; 4 — вал вибратора; 5 — дебаланс; 6 — подшипники; 7 — пружины

в том числе и вибрационных, являются загрязнение материала продуктами намола мелющих тел и футеровки. Кроме того, большая часть энергии тратится на движение самих шаров, а не на разрушение материала, и, как следствие, шаровые мельницы имеют низкий КПД. Стремление избавиться от этих недостатков привело к разработкам струйных мельниц.

Струйные мельницы используются преимущественно при получения ультрадисперсных порошков сухим способом и представлены в широком спектре конструкций [8]. Устройство противоточной струйной мельницы приведено на рис. 3.

Кинетическая энергия передается частицам измельчаемого материала посредством потоков газа. Измельчение происходит либо при соударении частиц о частицы во встречных потоках воздуха или пара высокого давления, либо при ударе об отбойную плиту. Благодаря тому что разгон частиц до скоростей разрушения осуществляется на коротких участках, данные мельницы имеют небольшие габариты. Отсутствие движущихся частей и сложных подшипников обуславливает надежность и долгий срок службы мельницы. Возможности струйной мельницы ограничиваются сложностью разгона крупных частиц и необходимостью последующего разделения пылегазовой смеси, т. е. применения пылеочистительного оборудования, включающего на стадии сухого пылеотделения достаточно громоздкие тканевые фильтры либо электрофильтры в связи с большим содержанием в потоке частиц малых размеров (менее 2 мкм) [8].

Еще одной из разновидностей мельниц ударного действия являются дезинтеграторы. В промышленности строительных материалов дезинтеграторы применяются для помола мела, мрамора, трепела, глины и других мягких малоабразивных материалов. Известны попытки применения дезинтеграторов для механоактивации извести и кварцевого песка для создания силикатного вяжущего неавтоклавного твердения [9]. Схемы дезинтеграторов приведены на рис. 4.

Материал измельчается между 1-м и 2-м, 2-м и 3-м рядами пальцев под воздействием ударных,

Рис. 3. Устройство противоточной струйной мельницы: 1 — помольная камера; 2 — разгонные сопла; 3 — центральная труба; 4 — сепарационная камера; 5 — циклон; 6 — точки возврата

Рис. 4. Схемы дезинтеграторов: а — с горизонтальной осью вращения; б — с вертикальной осью вращения; 1 — корпус; 2, 3 — валы; 4, 5 — диски; 6, 7 — пальцы; 8 — загрузочная течка; 9 — выход измельчаемого продукта; 10 — аспирационный патрубок; 11 — полый вал; 12, 13 — кольца

истирающих и частично разрывающих нагрузок, зависящих от зазора между соседними рядами пальцев. По мере прохождения частицами рядов пальцев от внутренних к наружным их размер уменьшается. Дезинтеграторы характеризуются высокой степенью помола, а высокая скорость

вращения дисков обеспечивает качественное перемешивание материала, и на выходе получается высокоомогенная смесь. Положительной стороной является высокий КПД при низком потреблении электроэнергии. К недостаткам дезинтеграторов относятся высокий износ пальцев-бил

Рис. 5. Схема помольного пневмотранспортного комплекса: 1 — заборное всасывающее устройство; 2 — исходный материал; 3 — вентилятор; 4 — сепаратор; 5 — измельчитель; 6 — циклон; 7 — готовый продукт; 8 — рукавный фильтр

и эксплуатационные трудности при помоле твердых абразивных материалов.

Следует отметить, что мельницы, характер измельчения которых основан на ударном принципе разрушения материала, наиболее предпочтительны для механоактивации минеральных порошков, так как подобные воздействия вызывают разрушение зерен по местам структурных дефектов и позволяют получать продукт, характеризующийся осколочной формой частиц.

Основываясь на обзоре доступной литературы, можно предположить, что одним из перспективных способов повышения эффективности рассмотренного помольного оборудования является организация работы в замкнутом цикле [10, 11] путем совмещения операций разгрузки, транспортирования и измельчения материала в одном технологическом процессе. Это возможно реализовать при использовании пневмотранспортного помольного комплекса (ППК). Схема разрабатываемого ППК представлена на рис. 5.

Помольный пневмотранспортный комплекс включает всасывающее разрыхляющее заборное устройство [12], нагнетательную транспортную магистраль для подачи материала, сепаратор для разделения продукта измельчения, измельчительную мельницу для тонкого помола и склад готового продукта в виде циклона, рукавного фильтра и всасывающего вентилятора.

Исходный материал, насыщенный воздухом на этапе забора по нагнетательной линии, подается в сепаратор, откуда попадает в измельчительную установку, где дробится. Продукт дробления подхватывается всасывающим потоком, создаваемым вентилятором бункера, и транспортируется в сепаратор, где разделяется: фракция крупнее заданной падает на дно сепаратора и разгружается в измельчитель на повторный помол; фракция, соответствующая заданной, транспортируется в циклон. Поток воздуха с остатками мелкой фракции протягивается вентилятором через рукавный фильтр, где очищается, и затем выбрасывается наружу. Шнековый питатель бункера разгружает продукт в транспортную систему.

Заключение

Предлагаемый помольный пневмотранспортный комплекс и организованный по такой схеме технологический процесс позволят повысить

эффективность при переработке материала на тонну готового продукта по сравнению с существующими технологиями. Для достижения ожидаемого результата необходимо разработать математические модели для каждого этапа технологической схемы, провести численные и натурные эксперименты, что является последующими этапами данного исследования, представляющего актуальную и сложную научную задачу

Библиографический список

1. Шмитко Е. И. Процессы и аппараты в технологии строительных материалов. СПб.: Проспект Науки, 2010. Т. 2. Практические занятия, лабораторный практикум, курсовое проектирование, расчеты аппаратов. 384 с.
2. Сиденко П. М. Измельчение в химической промышленности. Изд. 2-е, перераб. М.: Химия, 1977. 368 с.
3. Богданов О. С. Справочник по обогащению руд. М.: Недра, 1982. Т. 1. Подготовительные процессы. 367 с.
4. Ходаков Г. С. Тонкое измельчение строительных материалов. М.: Стройиздат, 1972. 240 с.
5. Волженский А. В. Минеральные вяжущие вещества. М.: Стройиздат, 1986. 409 с.
6. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. 753 с.
7. Лесин А. Д. Вибрационные машины в химической технологии. М.: [б. и.], 1968. 80 с.
8. Постникова И. В., Блиничев В. Н., Кравчик Я. Струйные мельницы // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2015. № 2 (42). С. 144–151.
9. Хинт И. А. Основы производства силикальцитных изделий. М.; Л.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1962. 642 с.
10. Сапожников А. И., Репин С. В., Иванов П. С. Инновационные технологии измельчения строительных материалов // Вестник Тувинского гос. ун-та (Технические и физико-математические науки). 2014. № 3. С. 23–28.
11. Голиков В. М., Репин С. В., Сапожников А. И. Снижение энергозатрат при производстве цемента с применением вибрационных машин // Вестник Тувинского гос. ун-та (Технические и физико-математические науки). 2016. № 3. С. 105–113.
12. Пат. 115340 Российская Федерация, МПК В65G 69/18, В65G 53/24. Всасывающее заборное устройство пневмотранспортной установки / С. А. Евтюков,

С. В. Репин, А. А. Кузнецова; СПбГАСУ. 2011152681/11, заявл. 22.12.2011, опубл. 27.04.2012.

References

1. Shmit'ko E. I. *Protsessy i apparaty v tekhnologii stroitel'nykh materialov* [Processes and devices in the technology of building materials]. T. 2. *Prakticheskie zanyatiya, laboratornyy praktikum kursovoe proektirovanie, raschety apparatov* [Vol. 2. Practical classes, laboratory practical course design, calculations of devices]. St. Petersburg, Prospekt Nauki Publ., 2010, 384 p.
2. Sidenko P. M. *Izmel'chenie v khimicheskoy promyshlennosti* [Grinding in the chemical industry]. 2-nd ed., revised. Moscow, Khimiya Publ., 1977, 368 p.
3. Bogdanov O. S. *Spravochnik po obogashcheniyu rud* [Reference book of ore enrichment]. Vol. 1. *Podgotovitel'nye protsessy* [Preliminary processes]. Moscow, Nedra Publ., 1982, 367 p.
4. Khodakov G. S. *Tonkoe izmel'chenie stroitel'nykh materialov* [Fine grinding of building materials]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972, 240 p.
5. Volzhenskiy A. V. *Mineral'nye vyazhushchie veshchestva* [Mineral binders]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986, 409 p.
6. Kasatkin A. G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and devices of chemical technology]. Moscow, Al'yans Publ., 2004, 753 p.
7. Lesin A. D. *Vibratsionnye mashiny v khimicheskoy tekhnologii* [Vibration machines in chemical technology]. Moscow, 1968, 80 p.
8. Postnikova I. V., Blinichev V. N., Kravchik Ya. *Struynye mel'nitsy* [Jet mills]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie – Modern science-intensive technologies. Regional application*, 2015, no. 2 (42), pp. 144–151.
9. Khint I. A. *Osnovy proizvodstva silikal'tsitnykh izdeliy* [Fundamentals of silicalite products production]. Moscow, Leningrad, Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, arkhitekture i stroitel'nykh materialam Publ., 1962, 642 p.
10. Sapozhnikov A. I., Repin S. V., Ivanov P. S. *Innovatsionnye tekhnologii izmel'cheniya stroitel'nykh materialov* [Innovative technologies of grinding of building materials]. *Vestnik tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki – Bulletin of Tuva State University. Technical and physical-mathematical sciences*, 2014, no. 3, pp. 23–28.
11. Golikov V. M., Repin S. V., Sapozhnikov A. I. *Snizhenie ehnergozatrata pri proizvodstve tsementa s primeneniem vibratsionnykh mashin* [Reduction of energy consumption in the production of cement using vibration machines]. *Vestnik tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki – Bulletin of Tuva State University. Technical and physical-mathematical sciences*, 2016, pp. 105–113.
12. Evtyukov S. A., Repin S. V., Kuznetsova A. A. *Vsasyvayushchee zabornoe ustroystvo pnevmotransportnoy ustanovki* [Suction intake device of pneumatic transport installation]. Patent RF no. 115340, St. Petersburg, 2012.