

*Злобин И. А., директор по продажам в странах СНГ  
Zysk, Karl-Heinrich Dr. специалист технологического отдела  
Loesche GmbH, Германия  
Борисов И.Н., д-р техн. наук, проф.  
Мандрикова О.С., асс.*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

## **ВЛИЯНИЕ ВИДА ПРИМЕНЯЕМОГО ПОМОЛЬНОГО АГРЕГАТА НА ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОДУКТА**

**Igor.Zlobin@loesche.de**

*Первый опыт применения вертикальных валковых мельниц для помола цемента и ряд лабораторных исследований, проведенных в 90гг. прошлого века, показали значительные отличия качественных характеристик цементов, получаемых в различных помольных агрегатах. Прежде всего, отличия касались гранулометрического состава продукта, что являлось причиной ускоренных сроков твердения и быстрого набора прочности на ранних сроках твердения цементов, произведенных в вертикальных мельницах. Проведенные мероприятия по оптимизации помольных агрегатов и сепараторов на сегодняшний день позволяют производить цемент с идентичными гранулометрическими характеристиками продукта.*

**Ключевые слова:** *помольный агрегат, вертикальная валковая мельница, шаровая мельница, гранулометрический состав, удельная поверхность, качественные характеристики.*

Активное внедрение новых систем помола цемента с применением вертикальных валковых мельниц с начала восьмидесятых годов прошлого столетия послужило отправной точкой для проведения исследовательских работ по определению влияния вида применяемого помольного агрегата на качественные характеристики продуктов помола. На фоне регулярно поступающих сообщений об успешном вводе в эксплуатацию и достижении гарантийных показателей тех или иных вертикальных мельниц [1, 2], параллельно проводились лабораторные исследования [3-5], которые показывали, что цементы, произведенные в вертикальных валковых мельницах, характеризуются повышенным водопотреблением, ускоренными сроками схватывания и недостижением марочных прочностных характеристик по сравнению с цементами, произведенными в шаровых мельницах [3, 4]. Основными причинами данных отличий указывались различия в гранулометрическом составе получаемых продуктов [4], различия в форме отдельных частиц, что является следствием разницы воздействующих сил [5, 6], недостаточно равномерное распределение сульфатосодержащей добавки при помоле и более высокая реакционная способность отдельных клинкерных фаз в цементах, произведенных в вертикальных мельницах [4, 5].

Гранулометрический или дисперсионный состав получаемого продукта, равно как и тонкость помола, оказывают максимальное влияние на качественные характеристики получаемых продуктов и являются следствием совокупного воздействия нескольких факторов: физических свойств отдельных компонентов и их процент-

ного соотношения в смеси, способа механического воздействия на материал или смесь материалов, наличия и вида используемого сепаратора, времени нахождения материала в помольном агрегате и технологической схемы применяемых в помольном отделении машин и агрегатов.

В цементной промышленности для определения дисперсности и тонкости измельченного материала используются стандартизированные методы определения остатка на контрольных ситах (ГОСТ 310.2, ГОСТ 30744, EN 196-6 и др.) и определение удельной поверхности методом воздухопроницаемости [7], которые по сути не предоставляют полной картины дисперсных характеристик, т.е. не дают представления о том, какую долю по массе, объему или числу составляют частицы в любом диапазоне их размеров. Ситовой остаток, хотя и включен в технологический регламент и требования по качеству продукции цементных заводов, не даёт точной информации о содержании тонких классов менее 45 мкм (минимальное применяемое сито – 20 мкм, при этом начиная с сита 32 мкм точность измерения значительно падает), которые оказывают значительное влияние на кинетику нарастания прочности. Данный метод был внедрен и стандартизирован для имевших повсеместное распространение шаровых мельниц, работающих в открытом цикле. В настоящее время, с появлением современных помольных агрегатов и связанных с этим качественных изменений продуктов, применение ситового анализа как единственного качественного показателя является явно недостаточным.

Усредненное значение удельной поверхно-

сти, выражаемое как отношение суммарной площади поверхности частиц к их массе ( $\text{м}^2/\text{кг}$ ) и определяемое методом воздухопроницаемости, также не является единственной определяющей характеристикой дисперсности продукта, поскольку порошки с различным гранулометрическим составом могут обладать одинаковой удельной поверхностью [7], но является общепринятой качественной характеристикой цемента: чем тоньше размолот цемент, тем выше его прочность во все сроки твердения [8]. Увеличение удельной поверхности – первая мера, которую используют цементные заводы для улучшения прочностных характеристик цементов. Но увеличение тонкости помола, используемое для увеличения марочной прочности цемента, влечет за собой увеличение удельных энергозатрат, снижение единичной производительности помольного агрегата и приводит к росту энерго-технологического коэффициента использования оборудования [9]. В то же время сверхтонкий

помол, свыше  $500 \text{ м}^2/\text{кг}$ , не всегда приводит к дальнейшему увеличению прочности, а, напротив, может снижать её [8]. Достижение общепринятых тонкостей помола в диапазоне от 300 до  $600 \text{ м}^2/\text{кг}$  возможно на любом из рассматриваемых видов помольных агрегатов – на шаровой и на вертикальной мельницах.

Известно, что скорость и степень гидратации частиц цементного порошка напрямую зависят от их размера. Частицы различных размеров определяют кинетику нарастания прочности в различные периоды, что показано на рис. 1 [10]. Максимальное влияние на набор прочности в ранние сроки оказывают частицы размером 0-3 и 3-9 мкм, а в марочном возрасте – частицы в диапазоне 0-25 мкм. Частицы размером более 25 мкм не оказывают значительного влияния на показатель прочности как в ранние сроки твердения, так и в марочном возрасте.

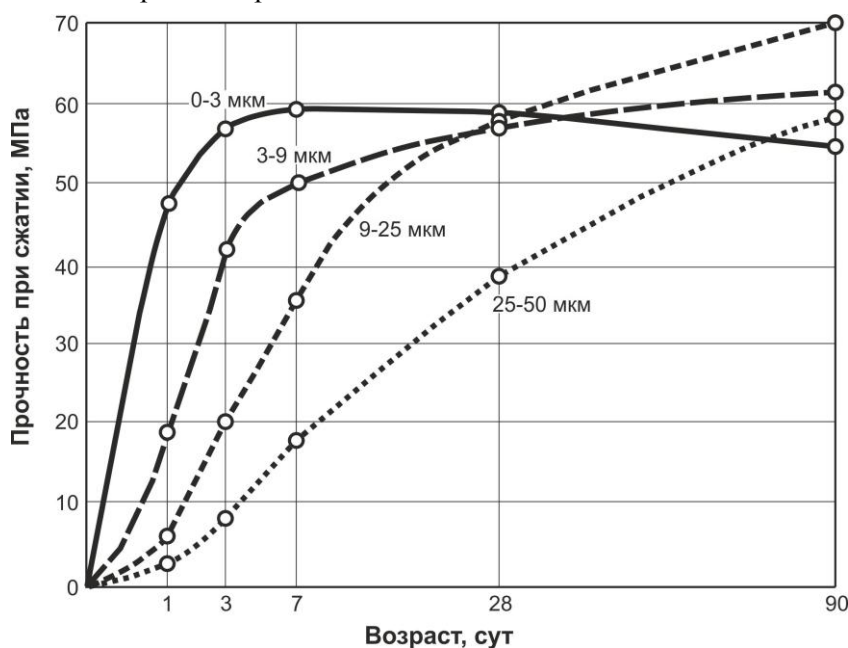


Рис. 1. Кинетика набора прочности частиц цемента различного размера

дисперсности. Применяемые в различных приборах виды лазеров, матрицы измерения и используемые алгоритмы расчётов значительно отличаются друг от друга. Поэтому сравнивать напрямую данные гранулометрического состава, полученные разными методами, нельзя, поскольку они дают отличающиеся друг от друга результаты [7].

Таким образом, гранулометрический состав цементного порошка является основным критерием, оказывающим влияние на кинетику нарастания и марочную прочность цементного камня и бетона [11]. Существует несколько методов определения гранулометрического или дисперсионного состава порошков, но ни один из этих методов не стандартизирован в действующих нормах, определяющих качество цемента.

Наибольшее распространение в цементной промышленности получил метод определения гранулометрического состава посредством лазерной гранулометрии в сухой среде, но существуют также способы определения гранулометрического состава с использованием водяной

дисперсации. Принятая методика определения гранулометрического состава цемента принята описывать с помощью двухпараметрической математической модели функции распределения Розина-Раммлера-Шперлинга-Беннета (RRSB) [11], которая выражается следующим образом:

Гранулометрический состав цемента принято описывать с помощью двухпараметрической математической модели функции распределения Розина-Раммлера-Шперлинга-Беннета (RRSB) [11], которая выражается следующим образом:

$$\frac{1}{R(x)}(1) = \exp\left[\left(\frac{x}{x_0}\right)^n\right]; \quad (1)$$

На формирование гранулометрического состава непосредственное влияние оказывает применяемый помольный агрегат в сочетании с соответствующим технологической схеме помольного отделения периферийным оборудованием. Материалы, перемалываемые в шаровых мельницах, работающих в открытом цикле, подвергаются механическому воздействию мелющих тел бесчисленное количество раз. Получаемый таким образом продукт характеризуется высоким содержанием грубых частиц («недомол»), размером более 60-70 мкм, и значительной долей сверхтонких частиц («перемол») размером менее 3 мкм. Как следствие, данные продукты характеризуются очень широким диапазоном распределения частиц по размеру. Переход на замкнутый цикл помола, т.е. установка сепара-

тора, позволяет значительно сократить долю «перемола» и «недомола», что ведёт к получению более крутой кривой распределения гранулометрического состава. Количество контактов материала с помольными поверхностями в вертикальной мельнице в силу ее конструктивных особенностей значительно меньше, что также ведёт к значительному сокращению «перемола» в продукте и сокращению удельных энергозатрат на помол. Измельченный материал, проходящий через встроенный динамический сепаратор, сразу покидает цикл помола. Это ведёт к тому, что цементы, произведённые в вертикальных мельницах характеризуются значительно более узкой дисперсностью, т.е. более крутой кривой распределения гранулометрического состава. В идеализированном виде кривые распределения гранулометрического состава продуктов, произведенных в шаровой и вертикальной мельницах, представлены на рис. 2.

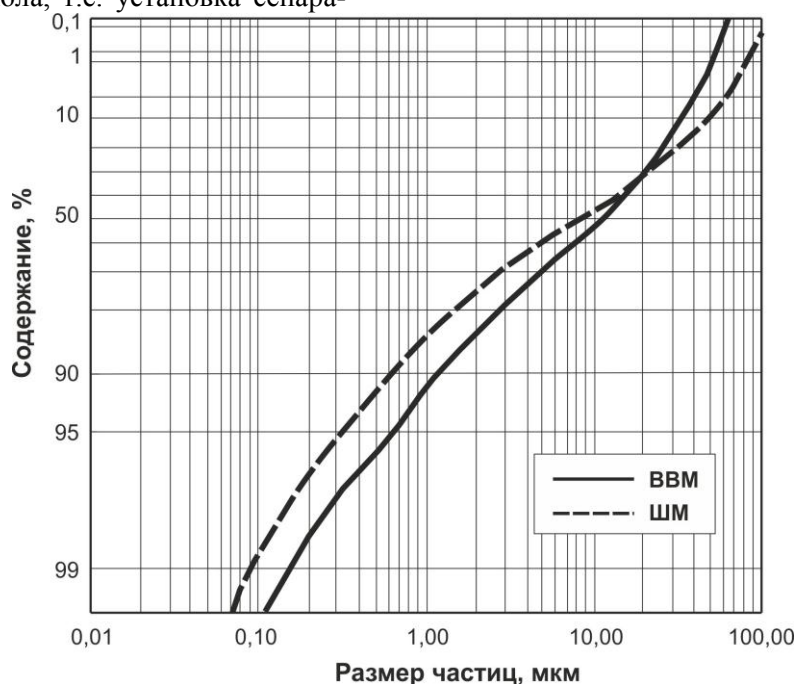


Рис. 2. Кривые распределения гранулометрического состава цемента, получаемых в шаровой и вертикальной мельницах

Мероприятия, проводимые в последние десятилетия производителями как шаровых так и вертикальных мельниц, направленные на получение более однородного гранулометрического состава: замкнутый цикл помола для отделений с шаровыми мельницами с одной стороны, и получение более пологой кривой распределения гранулометрического состава благодаря внедрению новых динамических сепараторов и расширению возможностей воздействия на процесс помола (давление валков, скорость газового потока, высота ограничительного кольца и скорость вращения сепаратора) в вертикальной мельнице, с другой – привели к тому, что на сегодняшний день гранулометрический состав

цементов, произведённых на разных помольных системах сопоставим, что показано на рис. 3.

Значительно более важным может являться вопрос о распределении отдельных минеральных компонентов по фракциям получаемого продукта. Исследования с бездобавочными цементами показали, что легкоразмалываемый гипс накапливается в тонких фракциях цемента, вытесняя из них зерна клинкера [9]. Предположительно, использование при производстве смешанных цементов добавок, обладающих значительно лучшей размолоспособностью (пуццоланы, известняк), чем клинкерные фазы, также приводит к их накоплению в тонких классах. Повышение удельной поверхности достигается,

главным образом, накоплением в цементе большого количества очень тонких – менее 2-3 мкм – частиц [9]. Так например, введение сухой золы уноса электростанций непосредственно в сепаратор не оказывает прямого влияния на сам процесс помола, но увеличивает удельную поверхность цементного порошка, в то время как дисперсность клинкерных фаз в продукте помола не меняется. В результате, наличие в составе цементной шихты компонентов более легко размалываемых, чем клинкер, искажает взаимосвязь между увеличением удельной поверхности и ожидаемым изменением кинетики нарастания прочности [9]. В алитовом клинкере зерна раз-

мером менее 1 мкм гидратируют практически полностью сразу после затворения, зерна размером 3-5 мкм – за 2-3 суток, в то время как зёрна размером около 30 мкм за 28 суток гидратируют на 85-90% [9]. Результаты исследований З.Б. Энтина [9] позволяют сделать следующее предположение: лучшая размолоспособность алитовой фазы по отношению к белитовой (микротвёрдость  $C_3S$  – 7.670 МПа/см<sup>2</sup>,  $C_2S$  – 10.300 МПа/см<sup>2</sup> [12]) приводит к неравномерному распределению клинкерных фаз по фракциям, что, как следствие, может оказывать влияние на кинетику нарастания прочности.

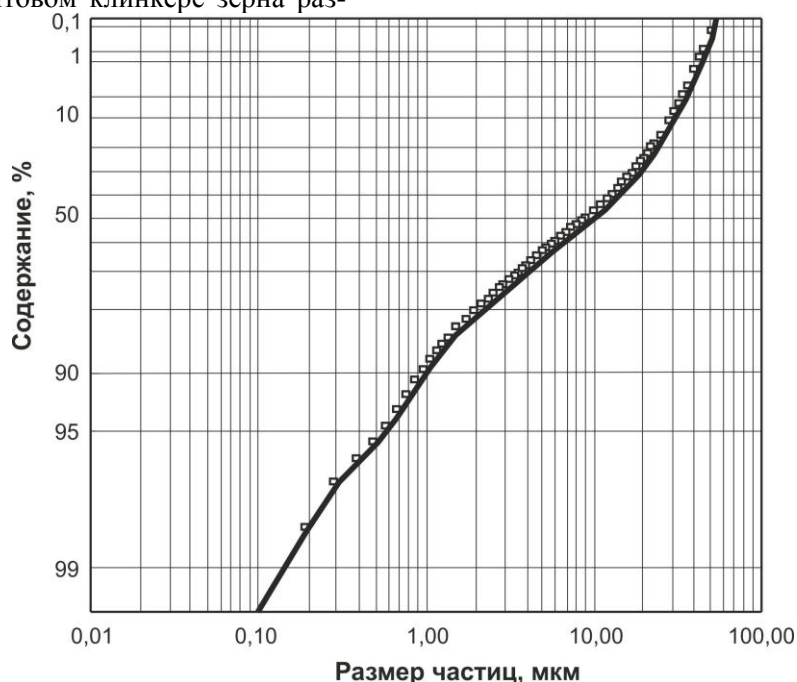


Рис. 3. Идентичное распределение гранулометрического состава цемента, произведённых в шаровой и вертикальной мельницах после оптимизации

Для оценки распределения отдельных клинкерных фаз в тех или иных классах частиц, а также для установления количественного содержания сульфатосодержащей добавки в различных фракциях необходимо проведение седиментационного анализа и автоматизированного минералогического анализа (MLA, Mineral Liberation Analysis), который позволяет установить распределение отдельных минералов по классам крупности.

Таким образом, оптимизация гранулометрического состава цемента представляет собой значительно более мощное средство для улучшения качества цемента, чем повышение его удельной поверхности [9]. Особенно важно это при проведении совместного помола компонентов смешанных цементов, обладающих принципиально различной размолоспособностью. Применяемые в настоящее время виды помольных агрегатов – вертикальная валковая мельница или шаровая мельница с сепаратором – позволяют

производить продукты с одинаковой удельной поверхностью и идентичным гранулометрическим составом. Однако цементы, производимые в различных агрегатах и достигающие нормированную прочность на 28 суток, характеризуются разной кинетикой ее нарастания, что может быть связано с неравномерностью распределения отдельных клинкерных фаз по фракциям получаемого продукта. Влияние помольного агрегата на распределение клинкерных фаз в продукте помола и возможная зависимость от этого прочностных характеристик подлежат дополнительному изучению.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Engeln I. Rollenmühlen für Zement – Betriebsergebnisse aus einem mexikanischen Zementwerk / ZKG International. 2001. № 10. С. 550-554.
2. Reichardt Y., Link G., Gilabert H. Zement-

fertigmahlung auf einer MPS-Walzenschüsselmühle im Zementwerk San Rafael/Equador / ZKG International. 2002. № 11. С. 54-57.

3. Müller-Pfeiffer M. Dr.-Ing., Clemens P. Comparison of grinding systems for cement production and examination of the charge grinding in downstream ball mills / Cement International. 2004. № 2. С. 58-67.

4. Odler I., Chen Y. Einfluss des Mahlens in einer Gutbett-Walzenmühle auf die Eigenschaften des Portlandzementes / ZKG International. 1990. № 4. С. 188-191.

5. Odler I. Einfluß des Zerkleinerungsverfahrens auf die Eigenschaften von Zement / ZKG International. 1995. № 9. С. 496-500.

6. Юдин К.А. К вопросу о математическом моделировании процессов разрушения материалов в шаровых мельницах / Вестник БГТУ им.

В.Г. Шухова. 2011. № 1. С. 91-94.

7. Де Верт К. Способы определения тонкости помола и размальваемости / Цемент и его применение. 2010. № 5. С. 113-116.

8. Классен В.К. Технология и оптимизация производства цемента – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – 308 с.

9. Энтин З.Б. О взаимосвязи гранулометрии и прочности цемента / Цемент и его применение. 2009. № 6. С. 111-113.

10. Locher W. Prof. Dr. Friedrich Zement. Grundlagen der Herstellung und Verwendung / Verlag Bau+Technik. 2000. 522 с.

11. Пашенко А.А Теория цемента – Киев, 1991. – 166 с.

12. Дуда В. Цемент – М.: Стройиздат, 1981. – 264 с.