

УДК 621.926

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ПОМОЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Л.А. Сиваченко¹, Е.А. Шаройкина¹, А.Н. Хустенко¹, А.А. Шаройкина²

¹Государственное учреждение высшего профессионального образования

Белорусско-российский университет

г. Могилев, Беларусь

²БНТУ Минск, Беларусь

Ежегодно измельчению подвергаются миллионы тонн материала в различных отраслях промышленности. Все эти материалы существенно отличаются друг от друга по своим физико-механическим свойствам: прочности, абразивности, твердости, влажности и др. К конечному продукту, зачастую, предъявляют очень жесткие требования по качеству, содержанию в нем необходимой фракции, усреднению, отсутствию инородных включений. Свойства исходного материала, требования к конечному продукту по дисперсности, в конечном счете, и определяют выбор технологии и конструкции мельниц для тонкого измельчения. Все существующие отечественные и зарубежные агрегаты для измельчения используют следующие основные способы измельчения: раздавливание, удар, истирание, излом, раскалывание, резание, взрыв и различные сочетания этих способов [1, 2, 3, 8].

Вне зависимости от физико-механических свойств, начальных и конечных размеров измельчаемого материала, основные требования, предъявляемые к помольному агрегату, следующие [1, 2, 3, 8]:

- максимально возможная производительность;
- минимальная энерго- и материалоемкость;
- возможно меньшая стоимость и простота в обслуживании;
- низкие эксплуатационные расходы;
- высокая эксплуатационная надежность;
- возможность управления качеством конечного продукта во время его работы;
- минимальная стоимость оборудования.

Нет такой мельницы, которая удовлетворяла бы всем требованиям и, как правило, при каком-

либо существенном преимуществе перед другой машиной имеет ряд недостатков. Поэтому и проводятся работы, направленные на усовершенствование конструкций существующих помольных агрегатов, позволяющие улучшить их технические характеристики, повысить надежность, снизить стоимость и затраты на обслуживание [1, 2].

История исследований процесса измельчения, начиная с работ П. Риттенгера, состоит из постоянного совершенствования теории, методов и конструкции измельчителей. Основными помольными агрегатами для помола цементного клинкера и добавок во всем мире являются шаровые мельницы. Ежегодное производство цемента в мире составляет более 2,5 млрд т. Удельный расход энергии при производстве цемента по мокрому способу составляет 100–115 кВт·ч/т, при этом около 30 % затрачивается на помол сырья, 40 % — на помол клинкера. При обжиге с применением твердого топлива — 5 % на помол угля. Таким образом, в целом на помол затрачивается до 70–75 % всей электроэнергии, расходуемой на производство цемента [4].

Тем не менее, несмотря на свой более чем 100-летний период развития и значительные достижения в технологии шарового измельчения, достигнутый уровень энерго- и металлозатрат остается высоким. Все это означает, что совершенствование конструкции шаровых мельниц и выбор рациональных схем их работы является весьма актуальной проблемой и в настоящее время.

Благодаря простоте конструкции, высокой надежности и возможности легко регулировать степень измельчения, шаровые барабанные мельни-

цы активно использовались сто лет назад в производстве различных материалов. И хотя патенту на изобретение шаровой барабанной мельницы классической конструкции уже более 180 лет, инженерно-технические решения, реализованные в ней, остаются актуальными и в наше время — большая часть сыпучих материалов перемалывается именно на шаровых барабанных мельницах.

В энциклопедии промышленных знаний «Промышленность и техника» за 1896 г. представлена шаровая мельница, используемая в стекольном производстве для измельчения кварцевого песка.

В настоящее время шаровые барабанные мельницы широко используются в производстве цемента, гипса, извести для нужд строительной индустрии, в металлургической и горно-обогатительной промышленности, а также в производстве некоторых видов строительных материалов. Данный тип мельницы отличает простота и надежность, чем, прежде всего, и объясняется их широкое распространение. Однако им присущи и существенные недостатки. Основными недостатками шаровых мельниц являются: относительно большой намол металла на тонну полученного продукта. Так, в среднем при мокром помоле кварцевого песка расход металла на тонну измельченного материала в среднем составляет 3–4 кг, а при сухом помоле 1,5–2,5 кг. По причине абразивного износа мелющих тел через каждые 150–200 ч работы мельницы производится их догрузка. Полную замену мелющих тел обычно осуществляют уже через 1800–2000 ч работы мельницы. Также существенным недостатком мельниц является малая интенсивность воздействия мелющих тел на обрабатываемый материал, что вынуждает значительно увеличивать время помола для получения материала заданных гранулометрических характеристик. Для компенсации относительно слабого ударного и истирающего воздействия мелющих тел на обрабатываемый материал и соответственно повышения практической производительности шаровых барабанных мельниц приходится увеличивать объем барабана, что приводит к значительному увеличению материалоемкости и энергонагруженности оборудования. К тому же необходимо учитывать, что даже при значительном увеличении объема барабана и соответственно габаритных размеров мельницы, коэффициент заполнения мелющими телами обычно не превышает 0,35–0,40.

Одним из факторов, сдерживающих распространение этих мельниц, является низкий их КПД

по самым разным источникам [1] колеблющийся в пределах 0,5–2,0 %. Поэтому исследователям необходимо уделять внимание вопросам повышения эффективности работы шаровых мельниц.

Одним из самых распространенных способов разрушения материалов в мельницах является раздавливание. В последние годы стали динамично развиваться мельницы, в основу которых положен принцип раздавливания — валковые, роliko-маятниковые, горизонтальные и пресс-валковые измельчители.

Преимущества этого метода заключаются в том, что в зоне измельчения создаются высокие нагрузки, достигающие, в зависимости от типа-размера мельницы десятков и даже сотен тонн, вследствие чего наблюдается снижение удельного расхода энергии до 30–40 % по сравнению с традиционными шаровыми мельницами.

Переход на рыночную систему управления экономикой требует от предприятий более эффективного использования существующего помольного парка, повышения его производительности и соответственно уменьшения его количества. Таким образом, в настоящее время существует проблема создания новых либо совершенствования существующих помольных агрегатов, работающих в замкнутом цикле измельчения, обладающих производительностью 270–300 т/ч продукта заданного гранулометрического состава, который в большей степени и предопределяет свойства вяжущего.

Интерес, проявляемый различными исследователями к вертикальным мельницам, несмотря на достаточно длительное время их эксплуатации, остается довольно значительным. Не прекращается поиск оптимальной конструкции мельницы в направлении увеличения ее размеров. Самая крупная вертикальная мельница типа LM-63.4 спроектирована и изготовлена фирмой Loesche (Германия) для фирмы Siam Cement Corporation Thung (Корея) с размером размольной тарели 6,3 м. Она снабжена четырьмя валками диаметром 3,0 м; частота вращения — 22 об./мин; мощность главного привода — 4100 кВт. Производительность данной мельницы обеспечивает сырьем вращающуюся печь производительностью 7500 т клинкера в сутки (800 т/ч). Однако капитальные затраты на установку вертикальных мельниц более чем вдвое выше, чем на установку шаровой мельницы той же производительности [19].

Фирма Polysius (Германия) разработала вертикальную мельницу Quadropol для печного агрегата производительностью 10000 т клинкера в

сутки производительностью 850 т/ч при потребляемой мощности привода 6000 кВт с размером размольной тарели 6,1 м и четырьмя размольными валками внутри [18].

Если при измельчении сырья вертикальные мельницы находят все большее применение, то информация о применимости их для размола более трудно размалываемых материалов, в частности клинкера, весьма противоречива.

Одни исследователи отмечают, что самым слабым местом в конструкции вертикальных мельниц являются тяжело нагруженные подшипниковые опоры, которые часто выводят из строя мельницы [15].

В других исследованиях о применении вертикальных мельниц для размола клинкера однозначно установлено: в связи с большими капитальными вложениями и повышенным износом рабочих органов вертикальные мельницы целесообразно применять только для размола клинкеров низкой и средней прочности [11, 12]. При этом отмечается, что при высокой концентрации пыли (до 100 г/м³) и высокими скоростями аспирационного воздуха (до 70 м/с) имеет место не только высокий абразивный износ рабочих органов мельницы, но и ротора сепаратора [11, 12].

Корпорация ИИ (Япония) смонтировала первую промышленную установку вертикальной мельницы на Osaka Cement's Kohchi Plant (Япония) на место традиционной шаровой мельницы мощностью 3700 кВт. После 10 000 ч непрерывной работы без серьезных технических проблем производительность была увеличена более чем на 40 % и снижен удельный расход электроэнергии на 19 %. Эта установка работала перед шаровой мельницей. Преимущества данной вертикальной мельницы — отсутствие собственно сепаратора, удобство контроля, долговечность сферических валков, планетарный привод стола.

Изменения в конструкции шаровой мельницы в этой системе такие:

- в связи с уменьшением размера кусков питания происходит уменьшение в первой камере шаров с диаметра 90 до 40 мм;

- по этой же причине уменьшение во второй камере шаров с диаметра 60 до 20 мм;

- в связи с увеличением гидравлического сопротивления системы выполнена замена вентилятора сепаратора на более высоконапорный.

Производительность системы после модернизации возросла со 105 до 150 т/ч при удельной поверхности 3200 см²/т, удельный расход электроэнергии снизился с 43 до 35 кВт·ч/т [20].

Самой последней разработкой в теории и технике валкового измельчения стала разработка фирмы Loesche технологической схемы измельчения 3 + 3. В такой схеме один валок (меньший) готовит материал, а другой оказывает на него механическое воздействие, тем самым дробя его. Разработанная фирмой вертикальная мельница LM-56.3+3 обеспечивает, по данным разработчиков, производительность по сырью до 860 т/ч, полностью обеспечивая тем самым печной агрегат производительностью 10 000 т/сут. клинкера сырьевыми компонентами. Данная мельница адаптируется для измельчения цементного клинкера с производительностью до 300 т/ч [19]. В стадии технологической отладки находится самая большая вертикальная мельница этой фирмы LM-69.6 с размером размольной тарели 6,9 м с шестью размольными валками, которая способна работать с еще разрабатываемыми печными агрегатами производительностью до 12 500 т клинкера в сутки. В результате исследований, проведенных в Германии, установлено: вертикальная мельница может быть использована для предварительного измельчения клинкера перед тонким помолом в трубной мельнице, капитальные вложения на сооружение 2-валковой мельницы на 25 % выше, чем шаровой, а удельный расход энергии ниже на 10–20 %. Аналогичный вывод сделан в работах.

Следует отметить, что зарубежные авторы в своих выводах противоречат друг другу: в одних работах [13, 14] указывается, что вертикальные мельницы при помоле клинкера работают хуже, чем шаровые, а в других работах [21] — наоборот. Так, в работах [21] вертикальную мельницу рекомендуется использовать только на первой стадии помола, причем в валковую мельницу должен подаваться клинкер размером менее 20 мм.

Таким образом, из приведенного анализа [21] следует, что вертикальные мельницы применяются чаще всего для измельчения сырьевых компонентов. Из-за высокого абразивного износа и малой часовой производительности эти мельницы для помола клинкера не рекомендуются.

Из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что вертикальные мельницы, использующие принцип раздавливания, могут быть применимы для измельчения сырьевых материалов. Для окончательного помола цемента они не могут применяться вследствие существенного износа рабочих органов мельницы и сепаратора. Однако они могут быть применены при грубом помоле клинкера и использованы в технологической линии перед трубными мельницами. Причем в этом случае

в вертикальную мельницу должен подаваться клинкер размером менее 20 мм, предварительно дробленный, что, конечно, усложняет технологию производства цемента.

В последние десятилетия получили развитие пресс-валковые измельчители, которые при больших усилиях сжатия валков (до 350 МПа) могут измельчать прочные материалы, как, например, известняк, цементный клинкер с меньшими энергозатратами, чем обычные шаровые мельницы.

Компания KHD Humboldt Wedag AG (Германия) предлагает прессы с размалывающим усилием от 2 до 32 МН с валками диаметром от 1 до 2,6 м при этом самый крупный имеет мощность 3000 кВт [9].

Фирмой CLE (Франция) совместно с Cement Lafarge (Франция) проведены сравнительные испытания пресс-валкового измельчителя, работающего в замкнутом цикле с сепаратором O-SEPA и с тем же пресс-валковым измельчителем, работающем в рецикле с шаровой мельницей и сепаратором O-SEPA. После широкомасштабных исследований установлено, что совмещение пресс-валкового измельчителя и шаровой мельницы целесообразно экономически и при этом достигается увеличение производительности с 38 до 55 т/ч [196].

В США установка пресс-валкового измельчителя размером 1220×760 мм перед помолом в четырех шаровых мельницах 2,6×12,0 м позволила снизить крупность питания мельниц с 25 до 2 мм, увеличить производительность помольного комплекса на 26 % и снизить удельный расход энергии на 15 %. О каких-либо технических и эксплуатационных проблемах автор не упоминает [10].

Имеется информация о гранулометрическом составе материала, обработанного под давлением 200–350 МПа пресс-валковым измельчителем с размером валков 1,4×0,66 м. При удельном расходе энергии 2–4 кВт·ч/т, пропорционально создаваемому давлению после пресс-валкового измельчителя, в мельницу подается материал от 33 до 43 % меньше 100 мкм, более 55 % продукта менее 1 мм и примерно 10 % частиц более 6 мм, а остальные более 10 мм.

После того, как в конце 80-х – начале 90-х XX в. наблюдался рост производства пресс-валковых измельчителей, в настоящее время наблюдается снижение спроса на эти измельчители. Объясняется это сложностью их конструкции, зачастую низкой эксплуатационной надежностью и нестабильностью в работе, что уменьшило их поставки на рынок в последние годы до 5–10 шт. в год.

При этом пресс-валковые измельчители не всегда пригодны для окончательного измельчения, особенно цемента высокой дисперсности, из-за узкого гранулометрического распределения продуктов измельчения, что зачастую приводит к повышенному водопотреблению [16] и, как правило, снижению прочности готовых изделий.

Но все — и эксплуатационники, и исследователи — едины во мнении, что при повышении эксплуатационной надежности, снижении стоимости и упрощении конструкции пресс-валковые измельчители могут реализовать свой технический потенциал и, обладая рядом преимуществ, таких, как высокая производительность, низкий удельный расход энергии, занимают небольшое пространство, производят мало шума, могут быть представлены на рынке более полно. Более того, мировая тенденция к увеличению объемов производства клинкера до 10 000 т/сут. и более будет стимулировать спрос на эти агрегаты, так как комбинированный процесс измельчения с использованием пресс-валковых измельчителей и статических сепараторов позволяет повышать производительность шаровой мельницы (по утверждению авторов) в 2,0–2,5 раза. Применение их при помоле клинкера в гибридных схемах на стадии грубого помола экономически более оправдано, чем применение валковых, либо роlikо-маятниковых мельниц.

Другим видом оборудования, применяемым для тонкого помола материалов, являются вибрационные мельницы. Простая кинематическая схема вибромельниц обуславливает их высокую эксплуатационную надежность. Приоритетное развитие вибромельницы получили в бывшем СССР. Известен своими разработками в области виброизмельчительного оборудования опытный завод со специальным бюро ВНИИкровли (Москва), в течение ряда лет выпускавший типоразмерный ряд мельниц СВМ. Крупнейшая из них СВМ 320 с объемом помольной камеры 700 дм³, числом камер, равным 2, мощностью привода 315 кВт и производительностью до 5 т/ч. При использовании этих мельниц для измельчения клинкера получены худшие результаты по сравнению с работой трубных мельниц, а именно: малая часовая производительность — до 5,0 т/ч; высокий удельный расход электроэнергии, составляющий 60–80 кВт·ч/т; необходимость предварительного дробления материала до размера не более 5 мм, необходимость охлаждения этих мельниц при измельчении, вследствие чего данные мельницы не могут быть применены для крупнотоннажного по-

мола клинкера. Другим существенным недостатком этих мельниц является очень узкий зерновой состав полученного цемента, что в конечном итоге снижает качество конечного продукта.

В конце 90-х гг. прошлого века на рынке помольной техники появилась разработка французской фирмы Group FIVES-LILLE Hogomill (horizontal roller mill) для измельчения цементного клинкера. В основу работы мельницы положен принцип раздавливания внутри цилиндрического корпуса, вращающегося со скоростью 4,0–4,2 м/с (в 1,5 раза больше критической) вращающийся дробящий ролик. Благодаря центробежной силе, измельчаемый материал прижимается к внутренней поверхности цилиндра, формируя при этом однородный слой, затягиваемый в щель между цилиндром и валком, где и происходит измельчение. В сравнении с шаровыми мельницами эти мельницы занимают значительно меньше места, бесшумны, при помоле дают меньшую температуру готового продукта. При производительности 100 т/ч в мельнице одномоментно находится не более 3 т материала, а в контуре мельница – элеватор – сепаратор — не более 20 т измельчаемого материала. Во Вьетнаме две мельницы Hogomill 4000, подключенные к одному динамическому сепаратору, позволяют получать 240 т/ч пуццоланового цемента.

В последние годы отмечена активность исследований в поисках размольного оборудования для тонкого и сверхтонкого помола при низком расходе энергии.

Фирма The Japan Tower Co Ltd (Япония) разработала JTM помольную систему для измельчения шлака, цементного клинкера и рядового цемента до удельной поверхности 8000 см²/г и выше [17].

Успешные испытания установки привели к тому, что эта установка была смонтирована на заводе Nittetsu Cement Co Ltd и Denki Kagaki Kogyo Co Ltd. За время работы достигнуты следующие показатели: в сравнении с трубными мельницами может быть достигнут меньший расход энергии; при замкнутом цикле до удельной поверхности 8000 см²/г и выше тонкость помола такова: почти все частицы меньше 10 мкм, и около 10 % меньше 1 мкм. Температура готового продукта только на 30–40 °С выше температуры окружающей среды. При этом авторы упоминают о сложностях со стабилизацией режима воздушного потока, что требует сложной электронной и пневматической аппаратуры, а также вызывают у них опасения за надежность рабочих узлов и предохранительной футеровки, что, в конечном счете, склоняет чашу весов в пользу применения шаровых мельниц.

Проведенный анализ состояния техники измельчения и конструкций помольных агрегатов для производства цемента позволяет сделать вывод о том, что несмотря на ряд преимуществ, заложенных в конструкции конкретных измельчителей, ни один из них не может быть с достаточной эффективностью применен для помола цементного клинкера.

В связи с этим нами предложен новый вид машин для помола цементного клинкера [7]. В основе его положен механизм стержневого измельчения путем воздействия на частицы материала вибрационных звеньев определенного сечения (круглого, прямоугольного и т. д.). Данный тип машин позволяет уменьшить массу мелющих тел, что приводит к уменьшению мощности и естественно к удешевлению энергоемкости процесса измельчения и помола.

Литература

1. Акунов, В.И. Современное состояние и тенденции совершенствования молотковых дробилок и мельниц / В.И. Акунов // Строительные и дорожные машины. — 1995. — № 1. — С. 11–13.
2. Акунов, В.И. Струйные мельницы / В.И. Акунов. — 2-е изд. — М.: Машиностроение, 1967. — 257 с.
3. Андреев, С.Е. Наивыгоднейшее число оборотов шаровой мельницы / С.Е. Андреев // Горный журнал. — 1954. — № 10. — С. 44–49.
4. Богданов, В.С. Основные процессы в производстве строительных материалов / В.С. Богданов, Н.П. Семикопенко, А.С. Ильин. — Белгород: БГТУ, 2008. — 551 с.
5. Пироцкий, В.З. Технологическая оптимизация процесса измельчения и свойства цементов / В.З. Пироцкий. — М.: НИИЦемент, 1989. — Вып. 98. — Ч. II. — С. 174–178.
6. Хардер, Й. Развитие одноэтапных процессов измельчения в цементной промышленности / Й. Хардер // Цемент. Известь. Гипс. — 2006. — № 1. — С. 24–38.
7. Шаройкина, Е.А. Вибрационные рессорно-стержневые мельницы / Е.А. Шаройкина, Л.А. Сиваченко // Республиканский межотраслевой производственно-практический журнал «Инженер-механик». — 2009. — № 2(43). — С. 32–35.
8. Шарапов, Р.Р. Шаровые мельницы замкнутого цикла: монография / Р.Р. Шарапов. — Белгород: БГТУ, 2008. — 270 с.

9. Штрассер, З. Современное состояние технологии помола от фирмы KHD Humboldt Wedag AG. / З. Штрассер // Цемент и его применение. — 2002. — № 1. — С. 27–30.
10. Kohan William, J. North American roll crusher installation documents increased ball mill efficiency / J. Kohan William // Pit and Quarry. — 1980. — № 10. — P. 21–22.
11. Krufger, W. Evaluation of crushing and grinding system for three different types of raw material / W. Krufger // The New cement and. technology conference. Anateim, California, May 21–24, 1984. — New York, 1984. — P. 1–21.
12. Loesche, E. Experience with roller mill on abrasive materials / E. Loesche, Guenter // Thrieeb Cement Ind. Techn. cont., Vancouver, May 23–27, 1982. — New York, 1982. — P. 1–15.
13. Mathieu, E.U. Erste versucherkebnisse zur vermahlung von Zement klinker aut pendelmuhlen / E.U. Mathieu // Zement. Kalk. Gips. — 1983. — Vol. 36. — № 2. — P. 62–64.
14. Musialik, M. Kierunki rozwoju techniki miellenia w przemyśle cementowym / M. Musialik // Cement, wapno, gips. — 1980. — № 11. — P. 304–307.
15. Reusoh, H. Energiespared zerrleinern in Gutbett – Walzenmuh-len. / H. Reusoh // Kugellagen-Z.-S. — № 233. — P. 20–29.
16. Stroiber, W. Comminution Technology and Energy consumption. Part 1 / W. Stroiber // Cement International. — 2003. — № 2. — P. 44–52.
17. Tanaka, T. The JTM fine grinding system / T. Tanaka // World Cement. — 1989. — Mi 11. — P. 387–391.
18. The new Quadropol from Polysius / International cement review. — 2000. — № 1. — P. 48.
19. The world's largest roller mills / International cement review. — 2000. — № 1. — P. 43–44.
20. Toshiro, Takei. IHI P/G system for clinker grinding / Takei Toshiro // World Cement. — 1990. — № 10. — P. 455–458.
21. Verch, H. Zementmahlung in einer Walmiihle mit ausserem materialum-lauf / H. Verch, Y. Vhlmarn, F. Feiqe // 13 Szilikatipes Szilikattud. kon-femzij Budapest, 1–5 JUN, 1981 / Budapest, 1981. — P. 330–336.

УДК 621.926

РЕЗЕРВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОМОЛА КЛИНКЕРА И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ

¹Сиваченко Л.А., ¹Шаройкина Е.А., ¹Гарафонов А.А., ¹Кулешов М.И., ²Сиваченко Т.Л.

¹Белорусско-Российский университет г. Могилев

²Белгородский государственный технологический ун-т им. В.Г. Шухова

Помол клинкера при производстве цемента по затратам энергии уступает только его обжигу. На эти цели расходуется 30–40 кВт·ч/т электро-энергии, а процесс осуществляется в чрезвычайно энергоемких металлоемких и дорогостоящих мельницах шаровых и валковых [1, 2]. Функциональная уникальность этих машин проверена десятилетиями и сомнений не вызывает. Однако эти гениальные изобретения полноценно отработали свою историческую роль и через определенное время должны быть заменены на более современные.

Не претендуя на полноту решения настоящей проблемы, покажем некоторые варианты набора цепей усовершенствованного оборудования для помола клинкера. Попытки создания принципиально новых помольных агрегатов предпринимались много раз. Но до сих пор реального успеха не имели [1, 3, 4]. Последние годы на рынок цементных мельниц активно продвигаются агрегаты валкового типа, однако явных преимуществ по сравнению с шаровыми они не имеют. В такой острой конкурентной борьбе неизбежно появление новых технических решений. Свои взгляды