

УДК 666.541.18

П.П. Лёрке^{1*}, В.Ф. Вернер²

¹д.т.н., профессор, Исследовательский центр «Linotec», Кельн, Германия

²д.т.н., профессор, ЮКУ им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

*Автор для корреспонденции: paul-loerke@web.de

ОСНОВЫ УЛУЧШЕНИЯ ТЕПЛООБМЕНА С ЭКСТРЕМАЛЬНО ГРУБОЙ СМЕСЬЮ В ПЕЧИ

Аннотация

Приводятся экспериментальные и теоретические доказательства преимущества от использования экстремально грубой сырьевой смеси (остаток на сите 90 мкм 50%) перед обычной тонкомолотой (остаток на сите 90 мкм 14%) сырьевой смесью при производстве цементного клинкера.

В результате повышения насыпной плотности экстремально грубой смеси до 1200-1400 г/л повышается её теплопроводность и процесс перекачивания во вращающейся печи значительно интенсифицируется. Это вызывает интенсивное обновление и увеличение поверхности обжигаемого слоя до зоны спекания. Поэтому теплопередача и количество реакционных контактных точек возрастает. Более высокий вес литра экстремально грубой смеси позволяет при более высокой производительности снизить степень заполнения печей до оптимального значения в 13 % и значительно стабилизировать работу печи при увеличенной периферийной скорости. Все это позволяет повысить производительность печи на 30-40% и снизить расход топлива до 15 %.

Ключевые слова: вращающаяся печь, гранулообразование, степень кальцинирования, скорость вращения, насыпной вес, поверхность теплообмена.

1. Влияние тонины помола сырой смеси на теплообмен в печи.

Для всех включительно самых современных печей самым узким этапом, ограничивающим их производительность, является промежуточная зона. Это связано с очень ограниченной теплопередачей между печными газами и слоем материала в промежуточной зоне и обусловлено следующими причинами: 1. Относительно низкая плотность обычно тонкомолотой сырьевой смеси и, как следствие, её низкая теплопроводность. 2. Псевдооживление обжигаемого слоя материала из-за интенсивного выделения газообразных продуктов. 3. Очень слабое обновление поверхности материала при движении его вдоль печи. Псевдооживление в обжигаемом слое материала связано с разложением CaCO_3 , а также возгонкой кристаллохимически связанной воды и щелочей. В печах с 4-х и 5-и ступенчатым циклонным теплообменником или кальцинатором полное разложение CaCO_3 не может быть достигнуто. Поэтому завершение разложения CaCO_3 происходит в печи. Разложение CaSO_4 и возгонка щелочей начинается примерно при 1150 °С перед зоной спекания и интенсивно протекает при 1300 °С.

Детали отрицательного влияния перечисленных явлений, учитывая данные [1-6], можно объяснить следующим образом: Флюидизация обычно тонкомолотой сырьевой смеси происходит, прежде всего только потому, что обжигаемый материал при максимальном размере зёрен до 300-400 мкм состоит на 85-90% из тонких частиц <90 мкм. Эти частицы с минимальным весом и образованные из них пористые мелкие агломераты не могут противостоять возникающим потокам газа в обжигаемом слое материала. При этом обжигаемый слой материала из мелких частиц <90 мкм приводится потоками газа в летучее состояние и транспортируется так же, как и молотый материал в воздушном транспортном жёлобе. Поэтому обжигаемый материал в псевдооживленном состоянии протекает очень быстро через промежуточную зону в зону спекания печи, практически без достаточного обновления его поверхности. Это приводит к перегреву наружной поверхности обжигаемого

слоя материала при недостаточном нагреве внутреннего слоя. Таким образом, теплопередача в промежуточной зоне печи между печными газами и обжигаемым материалом ограничивается и материал поступает в зону спекания термически недостаточно равномерно подготовленным. Это приводит к образованию на загрузочной стороне печи кольца из сульфатсодержащего спуррита и термической перегрузке зоны спекания, в результате чего уменьшается производительность печи, а также возрастает содержание $\text{CaO}_{\text{св}}$ в клинкере и потребление топлива. Эти представления подтверждают исследования скорости передвижения материала вдоль вращающейся печи при использовании радиоактивных изотопов Na^{24} и Mn^{56} [18]. Таким образом, было установлено, что обычно тонкомолотая смесь максимальную скорость до 45,6 см/мин достигает в промежуточной зоне (в зоне спекания 24,3 см/мин). Это можно сбалансировать следующим путём: известно, что пористость свободно насыпной сырьевой смеси в зависимости от её тонины помола изменяется в диапазоне 50-80 % от общего объёма порошка. При кубической упаковке, когда однородные по размеру частицы находятся друг с другом по шести точкам в контакте, пористость составляет 47,64%, а при гексагональной упаковке, когда частицы, имея различные размеры, контактируют в 12 точках - 25,95% [17]. Поэтому пористость исходной смеси, имеющей в целом одинаковую величину составных частиц, больше пористости смеси из частиц разного размера. Пористость сырьевой смеси из зёрен одинаковой величины возрастает с уменьшением их размера. Плотной упаковке частиц друг к другу в зонах контакта препятствуют дополнительно шероховатости их поверхностей. При увеличении дисперсности зёрен с близким размером поверхности частиц зерна удаляются друг от друга, поскольку возрастает разделительный эффект их шероховатости. Разумеется, при более широком распределении размера зёрен измельчённого материала, объем пустот между частицами уменьшается.

Обусловленное экстремально грубым помолом, лучшее заполнение объёма пустот материала, приводит, как следствие, к их структурному уплотнению или увеличению плотности обжигаемого материала. В результате, насыпной вес увеличивается с 800-1000 г/л для обычно тонкомолотой смеси до 1200-1400 г/л для экстремально грубой смеси. В результате достигается увеличение реакционных контактных точек между частицами и улучшение теплопроводности в слое обжигаемого материала и передача тепла от печных газов к обжигаемому материалу в промежуточной зоне печи.

Обжигаемый материал поступает в зону спекания печи термически более равномерно подготовленный и нагретый в среднем до более высокой температуры. Кроме того, между частицами и гранулами происходят бесчисленные столкновения, которые решительно усиливают ход твердофазных реакций и реакции через расплав удлинённой зоны спекания. Обогащённый на SiO_2 высоко силикатный расплав, образуемый при более низких температурах, позволяет увеличить длину зоны спекания печи на 40-50%. Все это является отличным условием для увеличения производительности печи на 30-40%.

1.1. Особенности обжига экстремально грубой и обычно тонкой смеси.

Для подтверждения уже изложенных представлений представлены промышленно установленные различия в средневзвешенном диаметре гранул, температуре, весе литра и степени разложения кальцита экстремально грубой смеси (ЭГС) и обычно тонкой смеси (ОТС) вдоль печи мокрого способа $\text{Ø}5 \times 185$ м на пробах, отобранных на 40, 55 и на 91 м (рис. 1 и 2).

Средневзвешенный диаметр гранул из экстремально грубого сырьевого шлама от конца цепной зоны на 40 м до конца цепного теплообменника на 55 м несколько уменьшается, а затем до 91 м печи немного возрастает (фиг.1). Средневзвешенный диаметр обычно тонкомолотого шлама с 40 до 91 м непрерывно уменьшается. Из фракционного анализа следует, что в обеих противопоставляемых сырьевых смесях это происходит в результате уменьшения количества гранул размером 3-10 мм. В области цепного теплообменника от 40 до 55 м печи происходит разрушение больших гранул, очевидно, главным образом в

результате механического движения цепей.

При перемещении обжигаемого материала из традиционно тонкого сырьевого шлама вдоль печи от 55 до 91 м в температурном диапазоне около 654 °С продолжается уменьшение средневзвешенного диаметра гранул. Это можно объяснить следующим образом: Термическая возгонка кристаллически связанной воды из глинистых минералов и начавшееся разложение кальцита, вызывают образование в возрастающем количестве химически высокоактивной поверхности с результирующим отсюда увеличением потенциала для топохимического спекания материала. Несмотря на выброс H₂O и CO₂ из обычно тонкомолотого сырья в процессе его слабо функционирующего перекачивания происходит разрыхление и последующий распад гранул. Главная причина заключается в отсутствии достаточно интенсивно функционирующего перекачивания материала, которое в результате достаточно многочисленных столкновений может способствовать эффективному обновлению контактов между частицами и, как следствие, их твердофазному спеканию.

Дальнейшее небольшое увеличение размера гранул из экстремально грубой сырьевой смеси при перемещении от 55 м до 91 м при температуре до 703 °С, очевидно, связано со значительно лучшим функционированием перекачивания материала во вращающейся печи. В результате его положительного влияния на твердофазное спекание частиц образуются гранулы с более плотной структурой и более высокой прочностью. Это вызывает улучшение теплообмена в печи и, как следствие, приводит к повышению веса литра и температуры (рис. 1) (рис. 2) обжигаемого слоя материала из экстремально грубого сырьевого шлама по сравнению с обычно тонкомолотым шламом во всех точках отбора проб вдоль печи (40, 55, 91 м) соответственно примерно на 10% и 7-9%. Это происходит, несмотря, на снижение температуры отходящих газов после печи примерно на 20-30 °С и, несмотря на уменьшение до 50% осаждённого в области 91 м более спечённого материала, который вносится из более высокотемпературной области печи.

Значительно приросшая поверхность теплообмена и более интенсивно протекающее обновление поверхности слоя материала из экстремально грубого сырьевого шлама приводят к непрерывному вскрытию его более холодных слоёв.

Известно, что при температуре смеси в печи около 800 °С степень её кальцинирования должна составлять около 10% [19]. При температуре 700 °С степень кальцинирования материала снижается примерно до 5%. Из анализа образцов, отобранных в печи мокрого способа на 91 м (рис. 2), следует, что фактическая степень кальцинирования при 654-700 °С значительно выше и составляет 20,4% для обычно тонкомолотой сырьевой смеси. Это объясняется существующей в печи циркуляцией материала, которая возникает из-за выноса материала печными газами из более горячих областей промежуточной зоны и последующего его осаждения в более холодных зонах печи за счёт более низких температур газа и, следовательно, снижения скорости выносимого печными газами материала.

Это означает, что в более холодных участках промежуточной зоны печи истинная степень кальцинации обжигаемого материала определяется циркуляцией тонкодисперсной части смеси. При обжиге экстремально грубой смеси при уменьшенном до 50% выносе её тонких фракций из печи [7-16] и при предположительно неизменной эффективности теплообмена было бы верно рассчитывать на 50 % уменьшение степени кальцинирования материала на 91 м, т.е. с 20,4% до 10,2%. Фактически степень кальцинирования увеличилась, примерно, на 18,14%, т. е. с 20,4% для тонкомолотой смеси до 24,1% для экстремально грубой. Таким образом, фактически улучшенная термическая подготовка при улучшении теплообмена в экстремально грубой смеси на печи мокрого способа позволяет увеличить производительность до 30-40% и снизить расход топлива до 15%.

Несмотря на уменьшение доли гранул 3-10 мм в диапазоне от 40 до 55 м печи и снижение степени кальцинирования сырьевой смеси (рис. 1 и 2) вес литра на 91 м увеличивается. Особенно сильно возрастает вес литра на 91 м в печи из экстремально

грубого сырьевого шлама, который при 1080-1100 г/л заметно выше 985 г/л для традиционно тонкомолотой смеси.

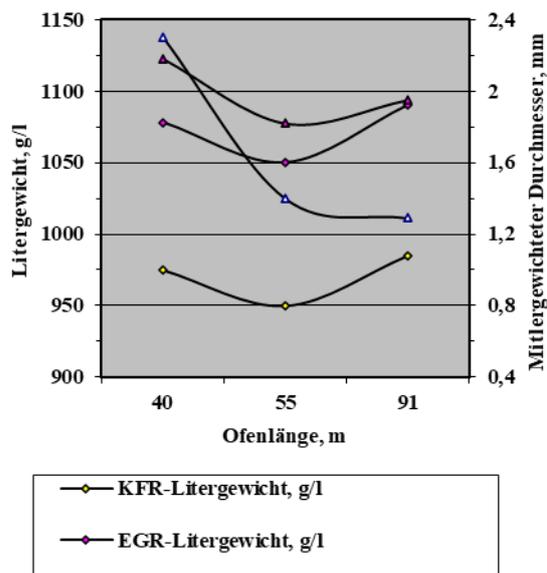


Рис. 1. Средневзвешенный диаметр и вес литра обжигаемого материала вдоль печи Ø5x185 м мокрого способа из ЭГС- и ОТС-сырьевых смесей.

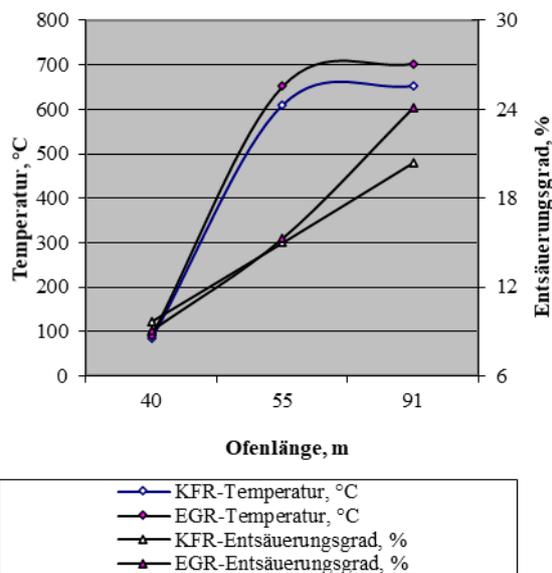


Рис. 2. Температура и степень кальцинирования обжигаемого материала вдоль печи Ø5x185 м мокрого способа из ЭГС- и ОТС-сырьевых смесей.

В результате значительно более интенсивно функционирующего процесса перекачивания экстремально грубой сырьевой смеси в промежуточной зоне достигается повышение теплопроводности в слое материала, увеличение его внешней поверхности теплообмена и усиление обновления её поверхности.

Значительные положительные изменения в поведении экстремально грубой сырьевой смеси при обжиге приводят к увеличению количества расплава и понижению температуры его образования. Это происходит в результате протекающего твёрдофазового синтеза легкоплавких низкоосновных силикатов с образованием из них обогащённого SiO_2 расплава при температурах между 1100 и 1200 °C параллельно к позднее при 1300 °C образующемуся обычному богатого Al_2O_3 и Fe_2O_3 расплаву [7-15]. Богатый SiO_2 расплав образуется при значительно более низких температурах, чем расплав, обогащённый Al_2O_3 и Fe_2O_3 , из обычной тонкозернистой смеси, температура плавления которого в инвариантной точке Т (рис. 3 [20-22]) в 4-х компонентной системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ для серого цемента и составляет 1338 °C. Температура образования расплава для белого цемента из обычной мелкодисперсной смеси ещё выше и составляет в инвариантной точке Е (рис. 3 [20-22]) 3-х компонентной системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 1455 °C. С растворением MgO и щелочей температура плавления обычных и обогащённых SiO_2 расплавов снижается на 40-60 °C. Улучшение переноса тепла в промежуточной зоне и уменьшение температуры появления расплава в зоне спекания увеличивают производительность печи и снижают расход топлива.

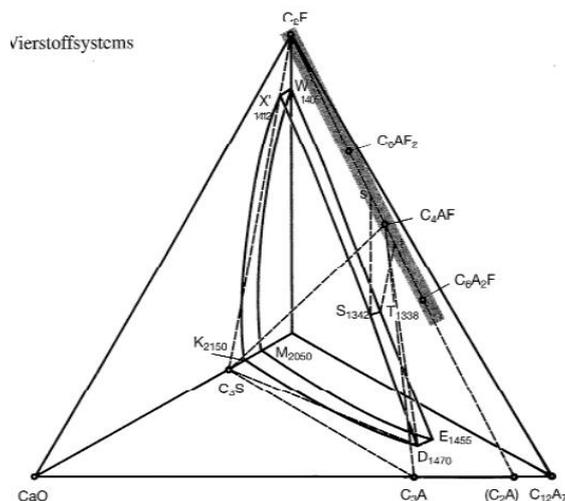


Рис. 3. CaO-угол 4-х компонентной системы CaO-SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃ [20-22].

1.2. Теплообмен и производительность печи с теплообменником.

Ниже представленные улучшенные энерготехнические показатели печей с теплообменниками при обжиге экстремально грубой сырьевой смеси подкрепляют и дополняют описанную выше модель теплообмена. Основными критериями для доказательных объяснений достигнутых успехов в промышленности при обжиге экстремально грубой сырьевой смеси являются следующие: при температуре сырьевой смеси на входе в печь около 800 °С степень кальцинирования должна составлять около 10% [19]. Однако фактическая степень кальцинирования обычно тонкомолотой исходной смеси при её температуре на входе в печь около 800 °С значительно выше и составляет 59-65%. Это связано с циркуляцией тонкодисперсной смеси между печью и теплообменником. Из этого следует, что истинную степень кальцинирования исходной смеси, на входе во вращающуюся печь определяет циркуляция в установке. Таким образом, при до 50% значительно сниженном выбросе пыли из печи [7-15] на экстремально грубой сырьевой смеси при условии неизменной эффективности теплообмена в циклонном теплообменнике следует ожидать возможным снижение степени кальцинирования материала на входе в печь до 50%, (т.е. с 59-65% до 30-33%). Поскольку степень кальцинирования экстремально грубой сырьевой смеси увеличивается примерно на 17% до 69-71%, в сравнении с 59-65% для обычно тонкомолотой, фактическое улучшение термической подготовки экстремально грубой смеси превышает ожидаемую степень кальцинирования в два раза. Это связано с улучшением теплообмена в циклонном подогревателе.

Обусловленная увеличением числа оборотов печи более высокая скорость нагрева экстремально грубой сырьевой смеси вызывает благодаря хорошо функционирующему процессу её перекачивания ещё большее увеличение интенсивности теплопередачи и, как следствие, ускорение образования минералов клинкера. Рост стабильности работы печи с повышением её периферийной скорости до 56,78 см/с при повышенной производительности по сырьевой смеси до 70 т/час на печи Ø3,4x49 м с теплообменником указывает на потенциальную возможность дальнейшего роста её производительности.

Из-за, примерно, на 25 % более высокого веса литра экстремально грубой сырьевой смеси при максимальной производительности вращающейся печи степень наполнения её падает до сравнительно низкого значения, равного 11,1 (рисунок 4). Из этого следует, что при доведении уровня заполнения печи до оптимума в 13% потенциал для дальнейшего увеличения её мощности имеется [4].

На рисунке 4 показано, насколько расчётная степень наполнения печи обжигаемым

материалом с увеличением её производительности при использовании экстремально грубой сырьевой смеси может быть снижена по сравнению с традиционно тонкомолотой смесью.

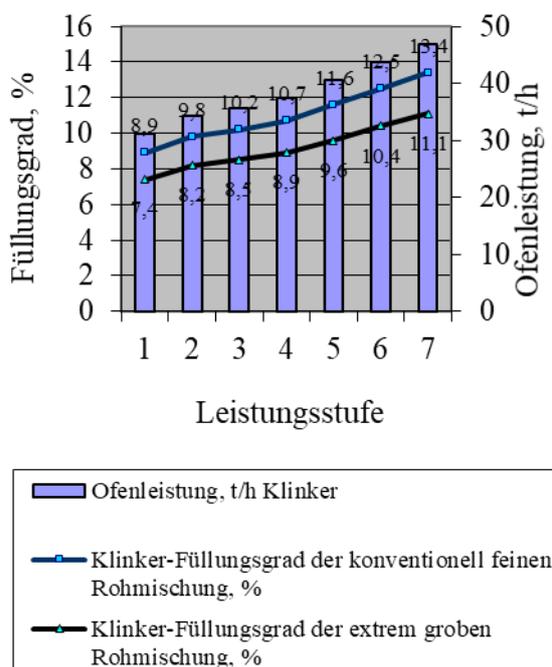


Рис. 4. Степень наполнения печи обжигаемым материалом с увеличением её производительности при использовании экстремально грубой сырьевой смеси по сравнению с традиционно тонкомолотой смесью.

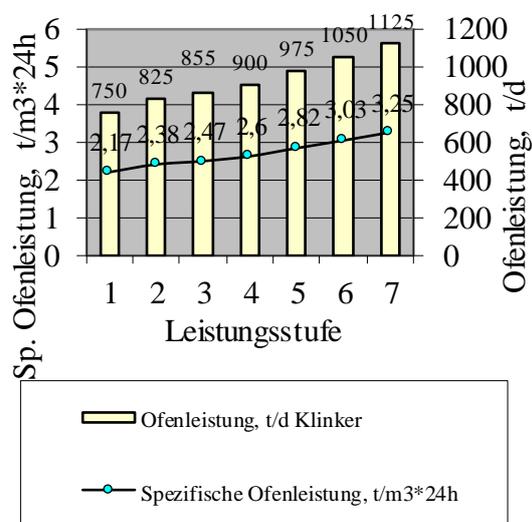


Рис. 5. Удельная производительность печи с увеличением её мощности при обжиге экстремально грубой сырьевой смеси.

Достигнутое улучшение теплообмена в циклонном подогревателе позволяет повысить производительность печной установки до 30-40% и снизить расход топлива до 15%. При использовании экстремально грубой сырьевой смеси это происходит, прежде всего, в результате повышения веса литра смеси, прекращения образования электростатически обусловленных агрегатов в циклонном подогревателе и перехода материала из флюидного состояния к хорошо функционирующему процессу его перекачивания в промежуточной зоне печи.

По опыту эксплуатации печи Ø3,4x49 м с теплообменником без кальцинатора удельная производительность по новейшим данным достигает 2,3 т / м³*24ч [4]. Это достигается путём увеличения периферийной скорости вращающейся печи до примерно 50 см/с [4, 23]. Рассчитанный объем печи Ø3,4x49 м, используемой для производства клинкера из экстремально грубой сырьевой смеси, составляет без футеровки 156,96 м³. Достигнутая производительность печи и расчётная удельная производительность печи (т/м³*24 ч) с возрастающей подачей сырьевой смеси до 75 т/ч представлены на рисунке 5. Из рисунка 5 следует, что в результате экстремально грубого помола сырьевой смеси при увеличенной периферийной скорости вращающейся печи, примерно, до 51,91-56,78 см/с известная максимальная удельная производительность печи в 2,3т/м³ *24ч значительно превышена и составляет 2,82-3,03 т/м³*24 ч.

Образование обогащённого SiO₂ расплава при на 200 °С более низких температурах и, как следствие, удлинении зоны спекания до 50% позволяет на экстремально грубой сырьевой смеси существенно сократить временной и температурный интервал между разложением

кальцита в циклонном подогревателе и кальцинаторе, с одной стороны, и образованием алита через расплав в зоне спекания печи, с другой стороны. Таким образом, минимизируется собирательная кристаллизация СаО. Дальнейшее уменьшение собирательной кристаллизации СаО может быть достигнуто за счёт увеличения числа оборотов печи. Как следует из существующего опыта эксплуатации, более высокие обороты печи при экстремально грубой сырьевой смеси благодаря хорошо функционирующему процессу её перекачивания сказывается гораздо эффективнее, чем на традиционно тонкой сырьевой смеси.

Выводы

1. Самой узкой ступенью, которая ограничивает производительность печи, является промежуточная зона. Причинами этому является следующее: Псевдофлюидизированный материал из обычно тонкой смеси протекает промежуточную зону печи быстро без достаточного обновления его поверхности. Поэтому наружная поверхность обжигаемого слоя материала нагревается, а внутренние слои остаются холодными. Обжигаемый материал поступает в зону спекания термически неравномерно нагретый. Это приводит к образованию сульфоспурит - содержащего кольца и, как следствие, уменьшению производительности печи, увеличению содержания СаО_{св.} в клинкере и росту расхода топлива.

2. Лучшее заполнение объёма пустот экстремально грубой смеси приводит к увеличению плотности обжигаемого материала. Это вызывает увеличение числа реакционно-контактных точек между частицами и улучшение теплопроводности в обжигаемом материале и передачи тепла между печными газами и материалом в промежуточной зоне печи.

3. Насыпная плотность сырьевой смеси увеличивается от 800-1000 г/л для обычно тонкой до 1200-1400 г/л для экстремально грубой смеси. Поэтому теплопроводность в слое материала значительно возрастает и экстремально грубый обжигаемый материал не может быть введён в состояние текучести. В хорошо функционирующем процессе перекачивания в промежуточной зоне печи происходит интенсивное обновление и увеличение поверхности слоя материала. Это улучшает теплообмен между печными газами и материалом. Обжигаемый материал поступает в зону спекания печи термически равномерно подготовленным и нагретым до более высокой температуры. Между частицами и гранулами происходит бесчисленное количество столкновений, что ускоряет ход твёрдофазовых реакций. Это является отличной предпосылкой для более высокой производительности печи. Образующий при более низких температурах обогащённый SiO₂ расплав позволяет удлинить зону спекания печи до 40-50%.

4. При перемещении материала по печи Ø5x185 м мокрого способа от 55 м до 91 м средневзвешенный диаметр его гранул из экстремально грубой смеси непрерывно возрастает, а из обычно тонкомолотой смеси непрерывно уменьшается. Вес литра и температура материала из экстремально грубой смеси во всех точках отбора проб (40, 55, 91 м) соответственно примерно на 10% и 7-9% выше, чем из обычно тонкомолотой смеси. Это, несмотря, на снижение температуры отходящих печных газов примерно на 20-30 °С, и, несмотря, на уменьшение до 50% в области 91 м, осаждённого материала из экзотермической зоны. Все это связано с улучшением процесса перекачивания гранул экстремально грубой смеси.

5. В начале промежуточной зоны печи истинная степень кальцинирования смеси определяется циркуляцией её тонких фракций. Степень кальцинирования на 91 метре печи Ø5x185 м мокрого способа возрастает с 20,4% при обычной тонкомолотой смеси до 24,1% при экстремально грубой смеси, то есть на 18,14% за счёт улучшения теплообмена, несмотря на снижение циркуляции её тонких фракций до 50%. При предположительно равной эффективности теплообмена, было бы верно рассчитывать на снижение степени

кальцинирования экстремально грубой смеси на 91 м до 50%, т. е. с 20,4% до 10,2%. Отсюда следует, что термическая подготовка экстремально грубой смеси более чем в 2 раза выше ожидаемой.

6. Степень кальцинирования материала при переходе из теплообменника в печь возрастает с 59-65% при обычной мелкозернистой смеси до 69-71% при экстремально грубой смеси, т. е. на 17%. Установленное улучшение теплообмена при экстремально грубой смеси обусловлено прекращением образования агрегатов в циклонном подогревателе и хорошо функционирующим процессом перекачивания материала в печи. Это позволяет повысить производительность печи до 30-40% и снизить расход топлива до 15%.

7. Повышенная скорость вращения печи при обжиге экстремально грубой смеси вызывает рост интенсивности передачи тепла и дальнейшее увеличение производительности печи. Рост стабильности работы печи с повышением её периферийной скорости при уже значительно повышенной производительности вращающейся печи указывает на наличие потенциала дальнейшего роста её производительности.

8. Примерно, на 25% более высокий вес литра экстремально грубой смеси позволяет снизить степень наполнения печи при её значительно повышенной производительности до оптимального уровня в 13%.

9. Экстремально грубая сырьевая смесь позволяет при увеличенной периферийной скорости вращающейся печи значительно превзойти её максимальную известную удельную производительность.

Список литературы

1. Тейлор Х.Ф.У. Химия цементов. М.: Стройиздат, 1969, 406 с.
2. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. М.: Высшая школа, 1980, 471с.
3. Locher Friedrich W. Cement: Grundlagen der Herstellung und Verwendung. Düsseldorf, VBT, 2000. 522 p.
4. Дуда В. Цемент. М.: Стройиздат, 1981, 464 с.
5. Ludwig U. Einflüsse auf das Sinterverhalten von Zementrohmehl. ZKG, 1981, Nr. 4, (34), P. 175-185.
6. Grigel W., Oberheuser G., Wolter A. Untersuchungen zur Heterogenität von Rohmaterialien und Rohmehlen und ihre Aussage hinsichtlich des Brennverhaltens. ZKG, 1985, Nr. 10, (38), P. 589-590.
7. Lörke P. Energiesparende Zementherstellung durch Optimierung der Rohmehlaufbereitung. „ibausil“ Weimar, 2003, P. 1-949 – 1-966.
8. Lörke P. Energieeffiziente gesteuerte Klinkerbildung durch Optimierung der C-, S-, A- und F-Verhältnisse nach Rohmehlfraktionen beim extremen Grobmahlen. „ibausil“ Weimar, 2006, P. 1-849 – 1-866.
9. Lörke P. Energieeffiziente gesteuerte Klinkerbildung durch Optimierung der C-, S-, A- und F-Verhältnisse nach Rohmehlfraktionen beim extremen Grobmahlen. „ibausil“ Weimar, 2009, P. 1-949 – 1-876.
10. Lörke P. Innovative, energy-efficient manufacture of cement by means of controlled mineral formation – Part 1. ZKG International, 2011, № 1, P. 48-58.
11. Lörke P. Innovative, energy-efficient manufacture of cement by means of controlled mineral formation – Part 2. ZKG International, 2011, № 2, P. 55-63.
12. Lörke P., Röck, R., Herzinger E. Energy efficient cement production using an extremely coarse raw mix – Part 1. ZKG International, 2013, № 3, P. 50-58.
13. Lörke P., Röck R., Herzinger E. Energy efficient cement production using an extremely coarse raw mix – Part 2. ZKG International, 2013, № 6, P. 62-70.
14. Lörke P. Innovative, energy-efficient manufacture of cement by means of controlled mineral formation. ALITinform, 2014, No. 3 (35), P. 16-31.

15. Лёрке П.П., Чукмарёв А.Н., Коробков П.Ф. Промышленный опыт энергосберегающего производства цемента из экстремально грубой сырьевой смеси // Цемент и его применение, 2014, №3, С. 76-85.
16. Zurakowski S. Design Parameters of Cyclonic Heat Exchangers. Przemysl Chemiczny [Chemical Industry], 1957, no. 8, P. 474-479.
17. Бутт И.М., Тимашев В.В. Портландцемент. М.: Стройиздат, 1967, 303 с.
18. Rutle J. Investigation of Material Transport in Wet Process Rotary by Radio Isotops Pit and Quarry, ZKG, 1955, no.7, P. 120-136.
19. Vogel R., Schwerdtfeger, I. Schlussfolgerungen aus thermischen Wirkungsgraden von Schwebegaswärmetauschern. ZKG, 1968, №3, P. 120-123.
20. Swayze M.A.: Ein Bericht über Untersuchungen des ternären Systems CaO-C5A3-C2F. Am. J. Sci. 244, 1946, No. 1, P. 1-30.
21. Swayze M.A.: Ein Bericht über Untersuchungen des quaternären Systems CaO-C5A3-C2F-C2S. Am. J. Sci. 244, 1946, No. 2, P. 65-78.
22. Swayze M.A.: Ein Bericht über Untersuchungen des durch 5% Magnesia modifizierten quaternären Systems (Eng.). Am. J. Sci. 244, 1946, No. 2, P. 79-94.
23. Deusner K. Generalbericht bei KHD-Tagung Industrieanlagen AG, Written communication. Köln, 1990, P. 18-26.

References

1. Tejlor H.F.U. Himija cementov. M.: Strojizdat, 1969, 406 s.
2. Butt Ju.M., Sychev M.M., Timashev V.V. Himicheskaja tehnologija vjazhushhih materialov. M.: Vysshaja shkola, 1980, 471s.
3. Locher Friedrich W. Cement: Grundlagen der Herstellung und Verwendung. Düsseldorf, VBT, 2000. 522 p.
4. Duda V. Cement. M.: Strojizdat, 1981, 464 s.
5. Ludwig U. Einflüsse auf das Sinterverhalten von Zementrohmehl. ZKG, 1981, Nr. 4, (34), P. 175-185.
6. Grigel W., Oberheuser G., Wolter A. Untersuchungen zur Heterogenität von Rohmaterialien und Rohmehlen und ihre Aussage hinsichtlich des Brennverhaltens. ZKG, 1985, Nr. 10, (38), P. 589-590.
7. Lörke P. Energiesparende Zementherstellung durch Optimierung der Rohmehlaufbereitung. „ibasil“ Weimar, 2003, P. 1-949 – 1-966.
8. Lörke P. Energieeffiziente gesteuerte Klinkerbildung durch Optimierung der C-, S-, A- und F-Verhältnisse nach Rohmehlfractionen beim extremen Grobmahlen. „ibasil“ Weimar, 2006, P. 1-849 – 1-866.
9. Lörke P. Energieeffiziente gesteuerte Klinkerbildung durch Optimierung der C-, S-, A- und F-Verhältnisse nach Rohmehlfractionen beim extremen Grobmahlen. „ibasil“ Weimar, 2009, P. 1-949 – 1-876.
10. Lörke P. Innovative, energy-efficient manufacture of cement by means of controlled mineral formation – Part 1. ZKG International, 2011, № 1, P. 48-58.
11. Lörke P. Innovative, energy-efficient manufacture of cement by means of controlled mineral formation – Part 2. ZKG International, 2011, № 2, P. 55-63.
12. Lörke P., Röck, R., Herzinger E. Energy efficient cement production using an extremely coarse raw mix – Part 1. ZKG International, 2013, № 3, P. 50-58.
13. Lörke P., Röck R., Herzinger E. Energy efficient cement production using an extremely coarse raw mix – Part 2. ZKG International, 2013, № 6, P. 62-70.
14. Lörke P. Innovative, energy-efficient manufacture of cement by means of controlled mineral formation. ALITinform, 2014, No. 3 (35), P. 16-31.

15. Ljorke P.P., Chukmarjov A.N., Korobkov P.F. Promyshlennyj opyt jenergosberegajushhego proizvodstva cementa iz jekstremal'no gruboj syr'evoj smesi // Cement i ego primenenie, 2014, №3, S. 76-85.
16. Zurakowski S. Design Parameters of Cyclonic Heat Exchangers. Przemysl Chemiczny [Chemical Industry], 1957, no. 8, P. 474-479.
17. Butt I.M., Timashev V.V. Portlandcement. M.: Strojizdat, 1967, 303 s.
18. Rutle J. Investigation of Material Transport in Wet Process Rotary by Radio Isotops Pit and Quarry, ZKG, 1955, no.7, P. 120-136.
19. Vogel R., Schwerdtfeger, I. Schlussfolgerungen aus thermischen Wirkungsgraden von Schwebegaswärmetauschern. ZKG, 1968, №3, P. 120-123.
20. Swayze M.A.: Ein Bericht über Untersuchungen des ternären Systems CaO-C5A3-C2F. Am. J. Sci. 244, 1946, No. 1, P. 1-30.
21. Swayze M.A.: Ein Bericht über Untersuchungen des quaternären Systems CaO-C5A3-C2F-C2S. Am. J. Sci. 244, 1946, No. 2, P. 65-78.
22. Swayze M.A.: Ein Bericht über Untersuchungen des durch 5% Magnesia modifizierten quaternären Systems (Eng.). Am. J. Sci. 244, 1946, No. 2, P. 79-94.
23. Deusner K. Generalbericht bei KHD-Tagung Industrieanlagen AG, Written communication. Köln, 1990, P. 18-26.

П.П. Лёрке^{1*}, В.Ф. Вернер²

¹Т.ғ.д., профессор, Linotec зерттеу орталығы, Кельн, Германия

²Т.ғ.д., профессор, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан

*Корреспондент авторы: paul-loerke@web.de

ОСНОВЫ УЛУЧШЕНИЯ ТЕПЛОБМЕНА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КРУПНОЙ СМЕСИ В ПЕЧИ

Түйін

Цемент клинкерін өндіру кезінде Шикізат қоспасының кәдімгі жұқа қабатынан (електегі қалдық 90 мкм 50%) артық қатты шикізат қоспасын (електегі қалдық 90 мкм 14%) пайдаланудан артықшылығының эксперименттік және термиялық дәлелдері келтіріледі.

Экстремалды өрескел қоспаның жаппай тығыздығын 1200-1400 г/л дейін арттыру нәтижесінде оның жылу өткізгіштігі жоғарылайды және айналмалы пешке домалату процесі айтарлықтай күшейеді. Бұл қарқынды жаңаруды және күйген қабаттың бетін агломерация аймағына дейін ұлғайтуды тудырады. Сондықтан жылу беру және реакциялық байланыс нүктелерінің саны артады. Шамадан тыс өрескел қоспаның литрінің жоғары салмағы жоғары өнімділік кезінде пештерді толтыру дәрежесін 13% оңтайлы мәнге дейін төмендетуге және перифериялық жылдамдықтың жоғарылауымен пештің жұмысын едәуір тұрақтандыруға мүмкіндік береді. Мұның бәрі пештің өнімділігін 30-40% - ға арттыруға және отын шығынын 15% - ға дейін төмендетуге мүмкіндік береді.

Кілттік сөздер: айналмалы пеш, түйіршіктеу, күйдіру дәрежесі, айналу жылдамдығы, көлемдік тығыздық, жылу беріліс беті.

P.P. Lyorke¹, V.F. Werner²

¹Dr.Tech.Sci., Professor, Linotec Research Center, Cologne, Germany

²Dr.Tech.Sci., Professor, M. Auezov South Kazakhstan State University, Shymkent, Kazakhstan

*Corresponding author's email: paul-loerke@web.de

PRINCIPLES OF IMPROVING HEAT TRANSFER WITH AN EXTREMELY COARSE MIXTURE IN A KILN

Abstract

Experimental and thermal proofs of the advantages of using an extremely coarse raw material mixture

(90 microns 50% residue on a sieve) over conventional fine-ground (90 microns 14% residue on a sieve) raw material mixture in the production of cement clinker are presented.

As a result of increasing the bulk density of an extremely coarse mixture to 1200-1400 g/l, its thermal conductivity increases and the rolling process in a rotating furnace is significantly intensified. This causes intensive renewal and an increase in the surface of the fired layer to the sintering zone. Therefore, heat transfer and the number of reaction contact points increases. The higher weight of a liter of extremely coarse mixture makes it possible, with higher productivity, to reduce the degree of filling of the furnaces to an optimal value of 13% and significantly stabilize the operation of the furnace at an increased peripheral speed. All this makes it possible to increase the productivity of the furnace by 30-40% and reduce fuel consumption by up to 15%.

Keywords: rotary kiln, granulation, calcination degree, rotation speed, bulk density, heat transfer surface.