

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Новоселов А.Г., канд. техн. наук, доц.,
Класен В.К. д-р техн. наук, проф.,
Новоселова И.Н. канд. техн. наук, ст. преп.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОБЖИГА КЛИНКЕРА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОЛОСНИКОВОГО ХОЛОДИЛЬНИКА*

alexxxxey@mail.ru

В статье рассмотрено влияние эффективности работы колосникового клинкерного холодильника печи мокрого способа производства $4,5 \times 170$ м на изменение положения зоны спекания, микроструктуру и активность клинкера. Положение зоны спекания определялось по расположению максимальной температуры корпуса печи. Наибольшей прочностью 48,4 МПа обладает цемент, полученный из клинкера, обожженного при среднем положении зоны спекания и работе холодильника с максимальным коэффициентом полезного действия 80 %. Снижение эффективности работы клинкерного холодильника с 80 до 70 и 65 % и смещение максимальной температуры корпуса печи с 12 до 15 и 22 м приводит к изменению микроструктуры клинкера от отчетливой среднезернистой с равномерным распределением минералов до нечеткой, неравномерной с разрушенными гранями клинкерных минералов. Прочность цемента снижается с 48,4 до 42,1 и 37,8 МПа. Снижение коэффициента полезного действия холодильника с 80 до 75 и 70 % и смещение максимальной температуры корпуса печи с 12 до 9 и 6 м приводит к формированию мелкокристаллической структуры клинкера и снижению прочности цемента с 48,4 до 44,0 и 41,5 МПа.

Ключевые слова: коэффициент полезного действия холодильника, положение зоны спекания, микроструктура клинкера, прочность цемента.

Введение. Качество клинкера зависит в основном от двух факторов: состава и свойств сырья и режима обжига и охлаждения клинкера. При неизменном составе сырьевой смеси решающим фактором является режим обжига и охлаждения клинкера. Формирование структуры клинкера происходит в зонах спекания и охлаждения вращающейся печи и на начальном этапе охлаждения в клинкерном холодильнике [1–4]. Поэтому для получения качественного клинкера, и впоследствии цемента, необходимо обеспечить оптимальный режим его обжига и охлаждения. Оптимальный режим обжига обеспечивается рациональным сжиганием топлива во вращающейся печи [5–8]. Путем регулирования процесса горения топлива можно изменять гранулометрический состав и микроструктуру клинкера, величину обмазки в зоне спекания, повышать стойкость футеровки и производительность печи, существенно снижать удельный расход тепла. Оптимальный режим охлаждения определяется эффективностью работы клинкерного холодильника, т.е. температурой и энтальпией вторичного воздуха, возвращаемого в печь на горение топлива. Изменение эффективности работы клинкерного холодильника оказывает влияние на режим горения топлива, форму фа-

кела, удельный расход топлива и качество клинкера [9].

Методология. Влияние режима работы колосникового холодильника и положения зоны спекания на микроструктуру и активность клинкера исследовалось на вращающейся печи размером $4,5 \times 170$ м, работающей на угольном топливе. Во время испытаний обжигался сырьевой шлам с коэффициентом насыщения 1,03...1,04, силикатным модулем 1,78...1,82 и глиноземистым модулем 1,17...1,19. Повышение коэффициента полезного действия (КПД) колосникового холодильника с 65 до 70 и 80 % осуществлялось путем увеличения высоты слоя клинкера на колосниковой решетке. При этом увеличивалась температура и энтальпия вторичного воздуха. Снижение КПД холодильника с 80 до 75 и 70 % осуществлялось дополнительным сбросом горячего избыточного воздуха из холодильника в атмосферу, что приводило к увеличению температуры вторичного воздуха, но значительному снижению его объема и, следовательно, энтальпии. Положение зоны спекания оценивалось по расположению максимальной температуры корпуса печи.

Предварительно проводился хронометраж режима работы печи и холодильника; определя-

лись параметры угольного порошка; измерялось количество воздуха, подаваемого в холодильник; температура клинкера до и после холодильника; температура вторичного и избыточного воздуха; рассчитывались энтальпия вторичного воздуха и тепловой КПД холодильника. Определялось положение максимума температуры t_{\max} корпуса от горячего обреза печи и, соответственно, положение зоны спекания. Затем отбирались для анализа пробы клинкера в количестве 6 кг. Определялся химический и минералогический составы, микроструктура клинкера и прочностные свойства цемента на его основе. Всего было проведено 5 опытов.

Основная часть. В начале эксперимента тепловой КПД колосникового холодильника составлял 65 %. Максимальная температура корпуса печи находилась на 22 метре, что соответствует дальней зоне спекания. На угольном топливе зона спекания, как правило, короткая. В

таблице 1 представлены результаты экспериментов по влиянию теплового КПД холодильника на положение зоны спекания.

Первая и вторая пробы клинкера (клинкер №1 и №2) с КН = 0,89 и 0,91 были отобраны на дальней (максимум температуры корпуса печи на 22 метре) и удаленной зоне горения (максимум температуры на 15 метре) при КПД холодильника 65 и 70 %. Чем ниже КПД холодильника, тем ниже температура вторичного воздуха, тем интенсивнее перемешивание топлива с воздухом до воспламенения, тем короче зона горения топлива. Масса литра клинкера составила 1590 и 1550 г/л.

После изменения режима работы холодильника путем перераспределения подаваемого воздуха на охлаждение клинкера и изменения высоты слоя клинкера на горячей и холодной решетках, тепловой КПД повысили до 80 %.

Таблица 1

Влияние теплового КПД холодильника на положение зоны спекания

Номер опыта	Тепловой КПД, %	Зона спекания		
		положение t_{\max} от горячего обреза печи, м	положение	длина
№1	65	22	дальнее	короткая
№2	70	15	удаленное	короткая
№3	80	12	среднее	средняя
№4	75	9	приближенное	средняя
№5	70	6	ближнее	короткая

Третья проба клинкера (клинкер №3) с КН = 0,93 и массой 1600 г/л была отобрана при максимальном тепловом КПД холодильника, равном 80 %, максимум температуры корпуса расположен на 12 метре, оптимальном расстоянии от обреза печи, что соответствует средней зоне спекания.

После изменения режима работы холодильника путем дополнительного сброса избыточного воздуха была отобрана четвертая проба клинкера (клинкер №4) при тепловом КПД холодильника, равном 75 % с КН = 0,92. Максимум

температуры корпуса печи находился на 9 метре, что соответствует приближенной средней зоне спекания. Масса литра клинкера составила 1550 г/л.

Пятая проба клинкера (клинкер №5) с КН = 0,91 была отобрана при работе на ближней зоне, масса литра клинкера равна 1480 г/л. Это несколько ниже оптимальной величины (1550...1650 г/л), и свидетельствует о недостаточной степени обжига клинкера.

В таблице 2 приведены модульная характеристика и минералогический состав клинкера.

Таблица 2

Характеристика клинкера

Клинкер	КН	Модули		Содержание минералов, масс. %			
		n	p	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
№1	0,89	2,05	1,06	56	20	6	15
№2	0,91	1,61	1,23	58	14	9	17
№3	0,93	1,72	1,16	61	12	8	19
№4	0,92	1,70	1,16	61	12	7	19
№5	0,91	1,64	1,27	58	15	9	16

Как видно, при обжиге сырьевого шлама с практически равными коэффициентом насыщения (1,03..1,04) и модулями, фактический коэффициент насыщения клинкера изменялся от 0,93 до 0,89. Содержание алита изменялось от 61 до 56 %, белита – от 12 до 20 %, трехкальциевого алюмината – от 6 до 9 % и четырехкальциевого алюмоферрита – от 15 до 19 %. Причиной таких колебаний являлось изменение в период проведения испытаний удельного расхода топлива на обжиг клинкера и количества присаживаемой к материалу золы топлива.

Зола топлива в процессе обжига клинкера реагирует с материалом и становится его составной частью. Температура плавления угольной золы находится в интервале 1050...1250 °С, т.е. в пламени она обычно в расплавленном состоянии. Большая часть золы усваивается материалом в конце зоны декарбонизации и в зоне обжига. Чем выше удельный расход топлива, тем больше золы присаживается к материалу, тем ниже будет коэффициент насыщения клинкера. В период испытаний зольность изменялась незначительно, всего от 13 до 14 %. Химико-минералогический состав клинкера изменялся от количества присаживаемой золы, т.е. от удельного расхода топлива на обжиг клинкера.

Как видно (табл. 2), с увеличением теплового КПД холодильника с 65 до 80 % снижается удельный расход топлива, что подтверждается увеличением КН клинкера с 0,89 до 0,93. При снижении теплового КПД и увеличении расхода топлива на обжиг клинкера увеличилась присадка золы и, следовательно, снизился его КН до 0,91 и масса литра клинкера с 1600 до 1480 г/л.

Как известно [10], кристаллизация, форма, размер и распределение клинкерных минералов в промышленном клинкере определяются:

– количеством образовавшейся при обжиге жидкой фазы и временем пребывания клинкера в зоне высоких температур;

– скоростью охлаждения клинкера. При быстром охлаждении клинкера в печи уменьшается степень взаимодействия клинкерного расплава с уже образовавшимися кристаллами, что задерживает их рост; при медленном охлаждении клинкера происходит срастание кристаллов с образованием более крупных зерен;

– тонкостью помола сырьевых компонентов. Грубый помол сырьевых материалов способствует неравномерному распределению минералов и образованию крупнокристаллического алита и белитовых участков возле пор.

На микроструктуру клинкера, полученного при использовании угольного топлива, влияет количество присаживаемой золы и тонкость помола угля. Поэтому результаты петрографического анализа, при использовании угольного топлива, позволяют судить не только о качестве обжига клинкера, но и о режиме технологического процесса в целом.

Кристаллизация клинкера №1 (рис. 1) нечеткая, структура неравномерно зернистая, распределение минералов неравномерное. Кристаллы алита размером 50...60 мкм с нечеткими разрушенными гранями. Встречается много мелких кристаллов неправильной формы и сросшихся кристаллов алита. Белит представлен округлыми кристаллами с разрушенными гранями. Промежуточного вещества достаточно.

Кристаллизация минералов клинкера №2 отчетливая, структура неравномерно зернистая, распределение минералов неравномерное. Форма алитовых зерен разнообразная, встречаются алит в виде шестигранников, призм, иногда участки мелкокристаллической структуры. Большие кристаллы алита содержат включения белита. Кристаллы белита в основном округлые.

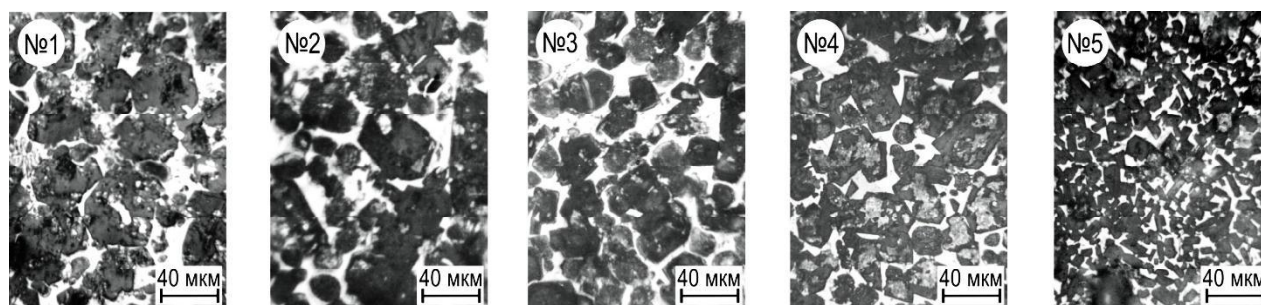


Рис. 1. Изменение микроструктуры клинкера в зависимости от положения зоны спекания и КПД холодильника

Кристаллизация минералов клинкера №3 отчетливая, среднезернистая, пористость образца умеренная, распределение минералов равномерное, форма алитовых кристаллов разнообразная с четкими гранями, размер 35...50 мкм.

Кристаллы белита округлые, шероховатые, более светлые по краю, размер 35...50 мкм. Промежуточного вещества достаточно.

Кристаллизация клинкера №4 отчетливая, форма алита правильная с четкими гранями,

размер 35...50 мкм. Кристаллы белита с шероховатой поверхностью распределены равномерно, размером 25...35 мкм. Промежуточного вещества достаточно.

Кристаллизация клинкера №5 отчетливая, структура равномерно зернистая, распределение минералов в образце неравномерное. Кристаллы алита размером 5...20 мкм чаще удлиненной формы с четко выраженными гранями. Форма белита округлая, плотная, размер 5...15 мкм. Промежуточное вещество представлено в виде светлой и темной массы, содержится в достаточном количестве. Встречаются корольки железа и $\text{CaO}_{\text{св}}$. Такая кристаллизация минералов характерна для близкой зоны спекания. Времени для полного обжига клинкера при работе на такой зоне спекания недостаточно, поэтому, зачастую, преобладает мелкокристаллическая структура.

На рисунке 2 и в таблице 3 представлены результаты влияния режима работы колосникового холодильника и положения зоны спекания на удельный расход топлива, коэффициент насыщения клинкера (при использовании угольного топлива) и прочностные свойства цемента.

Как видно наименьшую прочность в 3 и 28 суток, равную 23,4 и 37,8 МПа, показал цемент из клинкера №1, отобранного на дальней короткой зоне, при минимальном КПД холодильника 65% с КН, равным 0,89.

Приближение зоны спекания в результате повышения КПД холодильника до 70% привело к повышению КН клинкера №2 до 0,91, изменению микроструктуры и, как следствие, к увеличению прочности на сжатие цемента в 3 и 28 суток до 27,6 и 42,1 МПа.

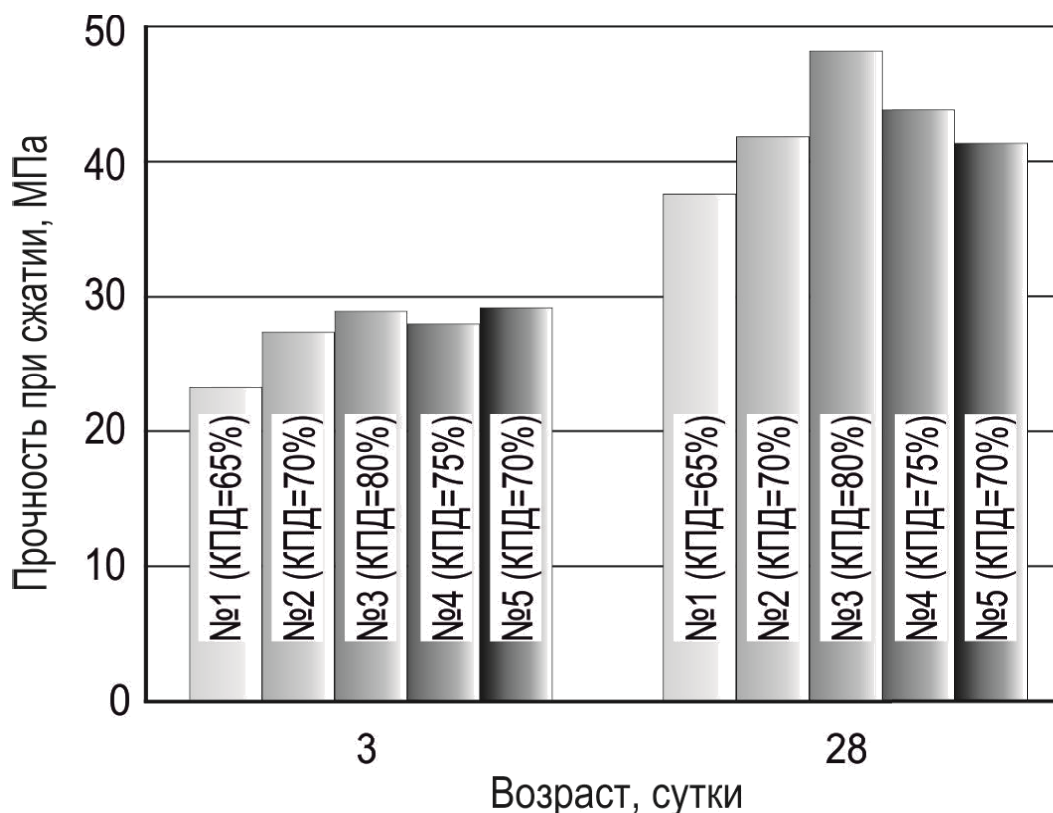


Рис. 2. Влияние КПД холодильника на прочность цемента

Наибольшую прочность как в 3 (29,2 МПа), так и в 28 суток (48,4 МПа) имеет цемент из клинкера №3, отобранного при наиболее высоком КПД холодильника и оптимальном расположении зоны спекания, имеющего, поэтому более высокий КН, равный 0,93 и более отчетливую среднезернистую микроструктуру с равномерным распределением минералов.

У цемента №4 прочность на сжатие в 3 суток – 28,2 МПа, к 28 суткам твердения прочность составляет 44 МПа.

Цемент №5, приготовленный из клинкера с КН = 0,91 и отобранного на ближней зоне спе-

кания, в 3 суток показал высокую прочность сжатия, 29,4 МПа, что обусловлено мелкой кристаллизацией минералов. В 28 суток прочность цемента составила на сжатие всего 41,5 МПа.

Таким образом, повышение теплового КПД холодильника снижает удельный расход топлива, оптимизирует положение и длину зоны спекания, улучшает микроструктуру промышленного клинкера, при использовании угольного топлива повышает КН клинкера и качество цемента на его основе.

Влияние режима работы холодильника и положения зоны спекания на коэффициент насыщения клинкера и прочность цемента

Параметр	Номер опыта				
	№1	№2	№3	№4	№5
Тепловой КПД холодильника, %	65	70	80	75	70
Расстояние максимума температуры корпуса от обреза, м	22	15	12	9	6
Коэффициент насыщения клинкера	0,89	0,91	0,93	0,92	0,91
Прочность цемента при сжатии в 28 суток, МПа	37,8	42,1	48,4	44,0	41,5

Выводы

1. В промышленных условиях исследовалось влияние изменения КПД холодильника на положение зоны спекания в печи, микроструктуру клинкера и его гидратационную активность. При повышении КПД холодильника с 65 до 70 и 80% температурный максимум на кривой корпуса печи смещается с 22 до 15 и 12 м, положение зоны спекания смещается от дальнего до удаленного и оптимального. Снижение теплового КПД холодильника от 80 до 75 и затем до 70% смещает температурный максимум корпуса печи с 12 до 9 и 6 м и положение зоны спекания от оптимального до приближенного и ближнего.

2. Повышение КПД клинкерного холодильника до максимального значения способствует снижению расхода угольного топлива и увеличению коэффициента насыщения клинкера от 0,89 до 0,93.

3. При повышении КПД холодильника с 65 до 70 и 80 % и приближении зоны спекания к горячему обрезу печи происходит изменение микроструктуры клинкера: от неравномерно зернистой с крупными сросшимися кристаллами алита и белита размером до 60 мкм с нечеткими и разрушенными гранями, до отчетливой среднезернистой с равномерным распределением клинкерных минералов. Прочность цемента на сжатие повышается от 37,8 до 42,1 и 48,4 МПа.

4. Снижение КПД клинкерного холодильника от 80 до 75 и 7 % и приближении зоны спекания к горячему обрезу печи приводит к образованию недостаточно сформированной мелкокристаллической микроструктуры клинкера со средним размером кристаллов алита и белита до 15...20 мкм. Прочность цемента снижается с 48,4 до 44,0 и 41,5 МПа.

**Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № НК-14-41-08031 р_офи_м.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Классен В.К. Технология и оптимизация производства цемента. Белгород, Изд. БГТУ, 2012. 308 с.
2. Новоселов А.Г., Классен В.К., Коломацкий А.С. Влияние режима охлаждения на активность клинкера с различным содержанием C_3A // Современные проблемы науки и образования. 2012. №6. [Электронный ресурс]. URL: www.science-education.ru/106-7819.
3. Оно М., Нагашима Н. Влияние условий охлаждения клинкера на прочность цемента // Шестой международный конгресс по химии цемента, 1976. Т.1. С. 170–173.
4. Sylla H.-M. Influence of clinker composition and clinker cooling on cement properties // VDZ KONGRESS. 1993. P. 135–145.
5. Классен В.К., Коновалов В.М., Новоселов А.Г. Повышение стойкости футеровки в цементных вращающихся печах рациональным сжиганием топлива // Огнеупоры и техническая керамика. 2014. №10. С. 17–20.
6. Schloder K.-P. Process optimization by application of the MPC technology at Dyckerhoff AG's Lengerich cement works // Cement International. 2006. №6. P. 54–56, 58–61.
7. Alexander H. Incremento de la eficiencia en la produccion de cement utilizando analisis de la llama y NMPC // Cem.-hormigon. 2008. 915 P. 44–54.
8. Boasheng Y., Xiushui M. Using heuristic dynamic programming for optimal control systems burning of cement clinker // Jisuanji gongcheng yu yingyong. 2012. №4. P. 222–224.
9. Новоселов А.Г., Классен В.К. Исследование процесса теплообмена в колосниковом холодильнике // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2008. №2. С. 60–63.
10. Кузнецова Т.В., Самченко С.В. Микроскопия материалов цементного производства. М.: МИКХиС, 2007. 304 с.

Novosyolov A.G., Klassen V.K., Novoselova I.N.**SPECIFICITY CLINKER BURNING PROCESS CHANGING EFFICIENCY GRATE COOLER**

The article considers the influence of the efficiency of the clinker grate cooler rotary kiln 4,5×170 m at repositioning of the burning zone, microstructure and clinker activity. Position zone sintering was determined by the location of the maximum temperature of the furnace body. The greatest strength of 48,4 MPa has cement produced from clinker burned at the average position of the burning zone and the cooler with a maximum efficiency of 80%. Reduced effectiveness of the clinker cooler from 80 to 70 and 65 % and offset the maximum temperature of the furnace body from 12 to 15 and 22 m causes a change in the microstructure of clinker by a distinct medium-grained with a uniform distribution of minerals to the fuzzy, uneven with ruined faces clinker minerals. The strength of the cement is reduced from 48,4 to 42,1 and 37,8 MPa. Reduced efficiency of the refrigerator 80 to 75 and 70 % and the displacement at maximum temperature of the furnace body 12 and 6 to 9 m leads to the formation of clinker fine crystalline structure and a reduction in strength of cement from 48,4 to 44,0 and 41,5 MPa.

Key words: *the efficiency of the cooler, the position of the burning zone, the microstructure of the clinker, cement strength.*

Новоселов Алексей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов.

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

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: alexxxxkey@mail.ru

Классен Виктор Корнеевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии цемента и композиционных материалов.

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

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Новоселова Инна Николаевна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии цемента и композиционных материалов.

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

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.