

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 4. С. 129–142.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (4): 129–142.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.542

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-129-142

EDN: SCHWMT

ВЛИЯНИЕ ОДНОРОДНОСТИ ХИМИКО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА

Александр Александрович Крутилин¹,
Татьяна Владимировна Крапчетова²,
Надежда Александровна Инькова¹,
Олеся Константиновна Пахомова¹

¹Себряковский филиал Волгоградского государственного
технического университета, г. Михайловка, Россия

²АО «Себряковцемент», г. Михайловка, Россия

Аннотация. Однородность химико-минералогического состава – один из основных факторов, влияющих на гидравлическую активность клинкера. С целью подтверждения данного фактора было проведено исследование клинкеров, полученных в один и тот же период на печах разного способа производства: печи мокрого способа Ø4,5×170 м и печи сухого способа Ø4,34×54 м.

Актуальность. Актуальность темы обусловлена повышенным интересом к факторам, влияющим на основной показатель качества портландцементного клинкера – его прочность. С внедрением сухого способа производства особое внимание привлечено к вопросу однородности химико-минералогического состава приготавливаемых сырьевых смесей.

Задачи исследования. Приготовление сырьевых смесей для дальнейшего получения клинкера мокрым и сухим способом производства. Определение химического состава смесей рентгенофлуоресцентным методом анализа. Определение минералогического состава полученных клинкеров методом порошковой дифракции. Изучение микрострук-

туры клинкеров петрографическим методом анализа. Сравнение полученных результатов и формулирование выводов.

Методы. Для изучения микроструктуры клинкеров был проведён петрографический анализ. Полированные шлифы рассматривались под металлографическим микроскопом МИМ-7 при увеличении 500× с использованием в качестве травителя дистиллированной воды и 0,1Н соляной кислоты.

Химический состав клинкера определялся рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре S8 TIGER. Данные о минералогическом составе исследуемых клинкеров были получены на дифрактометре D8 ENDEAVOR.

Результаты. Структура клинкера, полученного на печах сухого способа производства, гломеробластическая. В основном минералы образуют скопления, чередующиеся друг с другом. Кристаллизация клинкера среднекристаллическая, неравномерно-зернистая. Алит и белит могут образовывать как отдельные зерна, так и сростки или скопления.

Выводы. Неоднородность химического состава сырьевых смесей непосредственно влияет на минералогический состав клинкера и его микроструктуру, что сказывается на показателях гидравлической активности.

Ключевые слова: клинкер, алит, белит, печь, сростки, клинкерообразование, рентгеновский дифрактометр, микрооднородность, петрографический анализ

Для цитирования: Крутилин А.А., Крапчетова Т.В., Инькова Н.А., Пахомова О.К. Влияние однородности химико-минералогического состава сырьевых смесей на прочностные характеристики портландцементного клинкера // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 129–142. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-129-142. EDN: SCHWMT

ORIGINAL ARTICLE

THE INFLUENCE OF HOMOGENEITY OF CHEMICAL AND MINERALOGICAL COMPOSITION OF RAW MIXES ON STRENGTH PROPERTIES OF PORTLAND CLINKER

Aleksandr A. Krutilin¹, Tatiana V. Krapchetova²,
Nadezhda A. Inkova¹, Olesya K. Pakhomova¹

¹Sebryakovsk Branch of Volgograd State Technical University,
Mikhailovka, Russia

²АО "Sebryakovcement", Mikhailovka, Russia

Abstract. Factors affecting the clinker strength are of great interest. The implementation of the dry process attracts attention to the homogeneity of the chemical and mineralogical composition of raw mixes.

Purpose: One of the main factors affecting the clinker hydraulic activity is the homogeneity of its chemical and mineralogical compositions. The aim of this work is to study clinkers prepared by different production methods in furnaces using wet and dry processes.

Methodology: X-ray fluorescence analysis of chemical composition of mixes; X-ray powder diffraction analysis of clinker mineralogical composition; petrographic analysis of clinker microstructure;

Research findings: The clinker structure obtained in drying furnaces is glomeroblastic. Minerals mostly generate clusters alternating with each other. Clinker crystallization is medium-crystalline, unequigranular. Alite and belite can form both individual grains and aggregates.

Research findings: The chemical composition heterogeneity of raw mixes directly affects the clinker mineralogical composition of microstructure, that has a significant impact on its hydraulic activity.

Keywords: clinker, alite, belite, furnace, intergrowths, clinker formation, X-ray diffractometer, homogeneity, petrographic analysis

For citation: Krutilin A.A., Krapchetova T.V., In'kova N.A., Pakhomova O.K. The influence of homogeneity of chemical and mineralogical composition of raw mixes on strength properties of Portland clinker. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (4): 129–142. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-129-142. EDN: SCHWMT

Введение

Неоднократно проводимые исследования о влиянии наличия крупнокристаллического кварца в составе сырьевых смесей, используемых для производства портландцементного клинкера, доказывают, что его присутствие приводит к снижению реакционной способности в процессе обжига, нарушению микроструктуры и, как следствие, в дальнейшем к падению показателей активности самого клинкера [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

С целью снижения такого отрицательного фактора чаще всего прибегают к интенсификации процесса клинкерообразования за счёт оптимизации состава сырьевых смесей путём ввода дополнительного компонента, способного убрать отрицательное влияние крупнокристаллического кварца, либо путём снижения тонкости сырьевой смеси, подаваемой на обжиг, с целью увеличения её реакционной способности [9, 10, 11, 12].

Однако опыт работы вращающихся печей мокрого и сухого способов производства показал, что клинкеру, полученному на печах сухого способа, даже в случае применения материалов, не содержащих крупнокристаллический кварц, а также оптимизации тонкости сырьевой смеси всё равно присуща неоднородность микроструктуры и её несовершенство [13]. Кроме того, при использовании одних и тех же сырьевых компонентов и смесей на их основе показатели активности клинкера печей мокрого способа производства могут быть выше на 4,0–5,0 МПа, чем клинкера печей сухого способа производства [14, 15].

Исследование химико-минералогического состава клинкеров, полученных на печах разного способа производства

Одним из основных факторов, влияющих на гидравлическую активность клинкера, является однородность его химико-минералогического состава [16, 17, 18]. Для подтверждения данного фактора было проведено исследование клинкеров, полученных в один и тот же период на печах разного способа производства: печи мокрого способа Ø4,5×170 м и печи сухого способа Ø4,34×54 м.

Повышенный интерес к факторам, влияющим на основной показатель качества портландцементного клинкера – его прочность, определяет актуальность настоящего исследования. Вопрос однородности химико-минералогического состава приготавливаемых сырьевых смесей, с внедрением сухого способа производства, привлекает особое внимание.

В ходе исследования были решены следующие задачи:

1. Приготовить сырьевые смеси для дальнейшего получения клинкера мокрым и сухим способом производства.

2. Определить химический состав смесей, используя рентгенофлуоресцентный метод анализа.

3. Определить минералогический состав полученных клинкеров методом порошковой дифракции.

4. Изучить микроструктуру клинкеров петрографическим методом анализа.

5. Сравнить полученные результаты и сделать соответствующие выводы.

Приготовленный для обжига штабель сырьевой смеси, а также бассейн сырьевого шлама анализировались в течение четырёх суток. С периодичностью в 4 ч отбирались точечные пробы, полученные данные усреднялись за каждые сутки. Характеристика химико-минералогического состава исследуемых образцов приведена в табл. 1–4. Данные химического анализа были получены на приборе производства компании Bruker – рентгенофлуоресцентном спектрометре S8 TIGER. Количественный минералогический состав был определен методом порошковой дифракции на рентгеновском дифрактометре D8 ENDEAVOR.

Таблица 1

**Химический состав сырьевой муки, подаваемой на обжиг
во вращающуюся печь сухого способа производства**

Table 1

Chemical composition of raw mix for clinker burning in rotary drying furnace

Номер пробы	Тонкость помола, %		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	N	P	KH
	Сито 009	Сито 02							
1	10,5	2,6	13,79	2,79	2,20	43,14	2,8	1,3	0,98
2	8,4	2,3	14,09	2,87	2,29	44,39	2,7	1,3	0,99
3	8,4	2,9	14,38	2,90	2,28	43,65	2,8	1,3	0,95
4	8,7	2,6	13,78	2,87	2,35	44,30	2,6	1,2	1,01

Таблица 2

**Химический состав сырьевого шлама, подаваемого на обжиг
во вращающуюся печь мокрого способа производства**

Table 2

Chemical composition of sludge for burning in rotary wet process furnace

Номер пробы	W, %	Тонкость помола, %	Растекаемость, мм	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	N	P	KH
1	42,3	2,8	42	13,71	3,35	2,70	43,77	2,3	1,2	0,97
2	42,0	2,6	42	13,72	3,25	2,78	43,82	2,3	1,2	0,98
3	42,1	3,0	43	13,73	3,25	2,77	43,99	2,3	1,2	0,98
4	43,2	3,0	44	13,73	3,29	2,67	43,85	2,3	1,2	0,98

Для проведения рентгенофазового анализа на дифрактометре D8 ENDEAVOR были выбраны следующие параметры работы прибора (рис. 1) и режим съёмки (рис. 2).

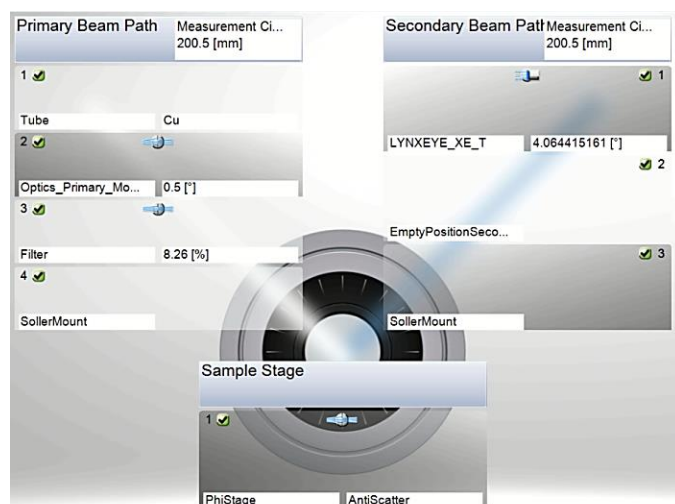


Рис. 1. Параметры работы прибора
Fig. 1. Device operating parameters

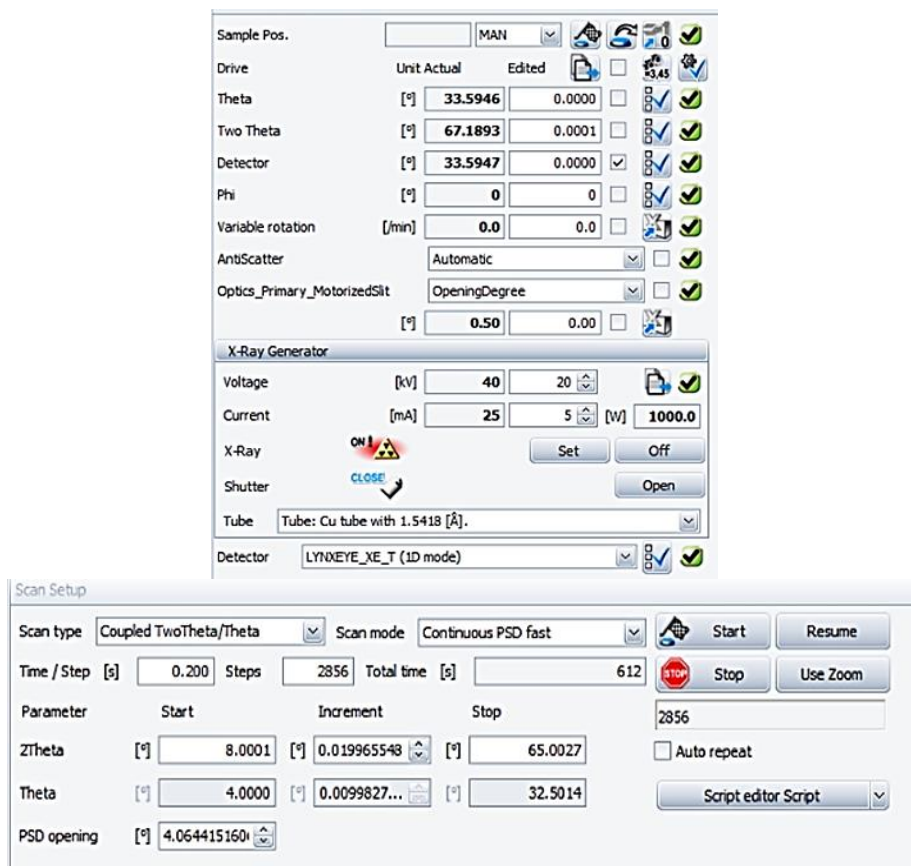
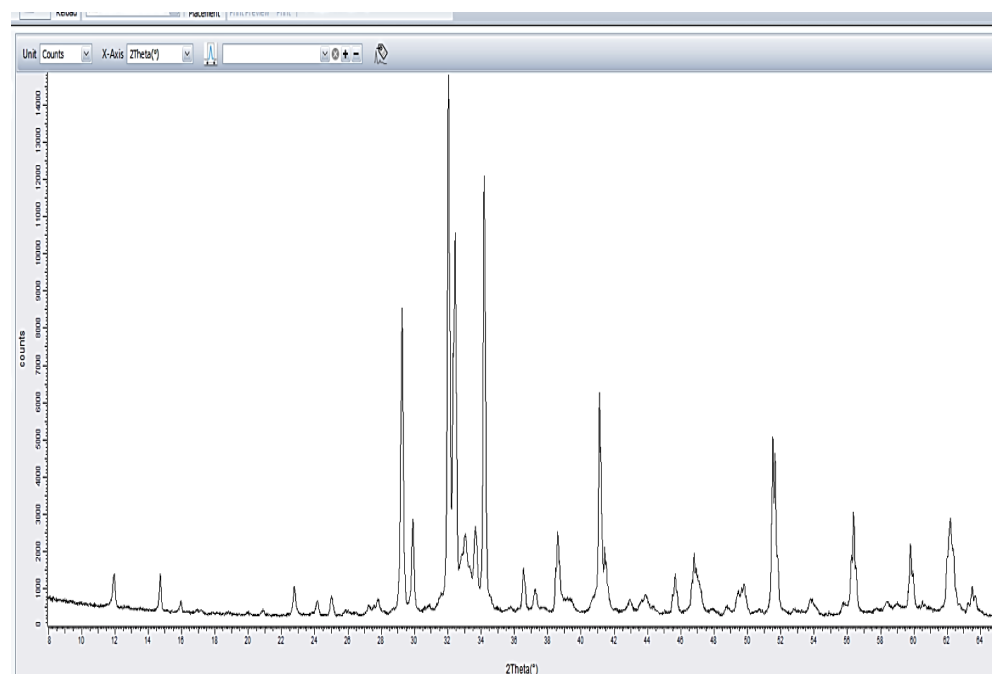


Рис. 2. Параметры режима съёмки
Fig. 2. Recording parameters

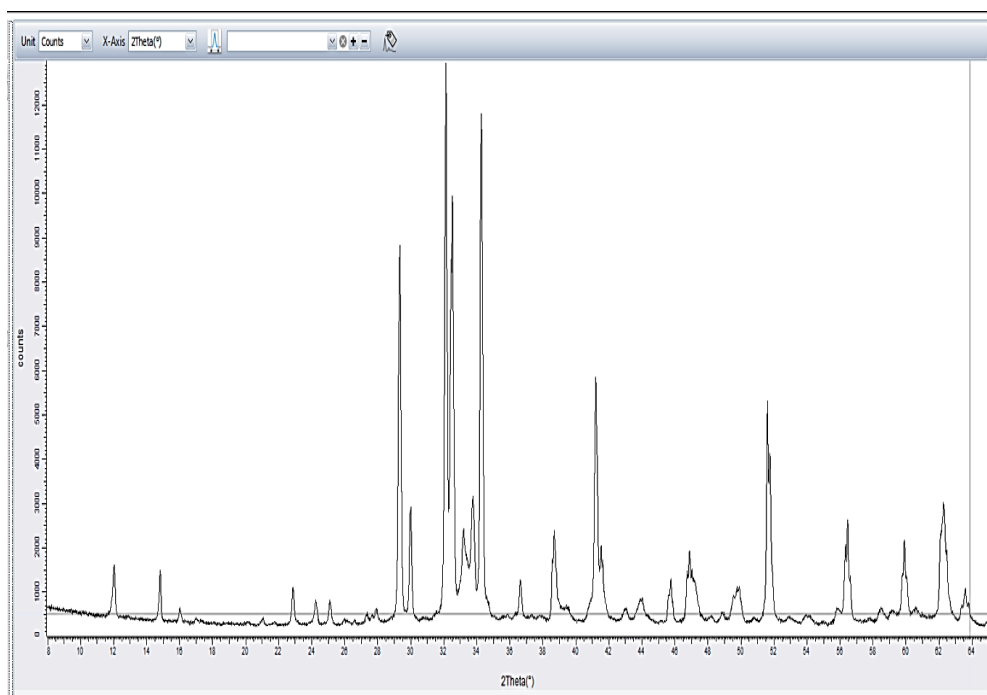
Результаты

Полученные дифрактограммы исследуемых клинкеров свидетельствуют о его составе (рис. 3, 4).



Alite_M1	19.55 %	Ferrite	9.74 %
Alite_M3	55.23 %	Lime	1.08 %
Alite_Sum	74.78 %	Portlandite	0.05 %
Fraction_M1	26.14 %	fCaO_XRD	1.12 %
Alite_CS	194.5 nm	Periclase	0.42 %
Belite_Sum	8.30 %	Quartz	0.01 %
Belite_alpha	1.49 %	Arcanite	0.00 %
Belite_alpha_H	2.90 %	Aphthitalite	0.03 %
Belite_beta	3.91 %	Langbeinite	0.06 %
Belite_gamma	0.00 %	Thenardite	0.09 %
Alum_cubic	0.31 %		
Alum_ortho	1.80 %		
Alum_mono	3.07 %		
Alum_Sum	5.18 %		

Рис. 3. Дифрактограмма клинкера, полученного в печах сухого способа производства
Fig. 3. XRD pattern of clinker obtained in drying furnace



Alite_M1	30.00 %	Ferrite	13.34 %
Alite_M3	48.26 %	Lime	0.39 %
Alite_Sum	78.25 %	Portlandite	0.10 %
Fraction_M1	38.33 %	fCaO_XRD	0.46 %
Alite_CS	205.4 nm	Periclase	0.32 %
Belite_Sum	1.96 %	Quartz	0.04 %
Belite_alpha	0.15 %	Arcanite	0.07 %
Belite_alpha_H	0.78 %	Aphthitalite	0.13 %
Belite_beta	1.03 %	Langbeinite	0.05 %
Belite_gamma	0.00 %	Thenardite	0.08 %
Alum_cubic	0.85 %		
Alum_ortho	1.79 %		
Alum_mono	2.23 %		
Alum_Sum	4.86 %		

Рис. 4. Дифрактограмма клинкера, полученного в печах мокрого способа производства

Fig. 4. XRD pattern of clinker obtained in wet process furnace

Все полученные дифрактограммы характеризовались одинаковым набором клинкерных фаз. Характеристика по количеству основных минералов приведена в табл. 3, 4.

Таблица 3

**Минералогический состав клинкера,
полученного во вращающейся печи сухого способа производства**

Table 3

Mineralogical composition of clinker obtained in rotary drying furnace

Номер пробы	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO _{св}
1	71,9	10,0	6,1	9,6	0,88
2	73,9	8,2	5,8	9,9	0,91
3	70,0	12,2	5,6	10,1	0,69
4	68,6	13,6	5,2	10,5	0,73

Таблица 4

**Минералогический состав клинкера,
полученного во вращающейся печи мокрого способа производства**

Table 4

Mineralogical composition of clinker obtained in rotary wet process furnace

Номер пробы	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO _{св}
1	77,0	2,7	5,5	12,1	0,60
2	76,5	3,5	4,9	13,5	0,49
3	76,4	3,3	5,1	13,4	0,48
4	77,9	2,3	5,1	13,0	0,52

Как видно из данных, приведённых выше, колебания содержания алита в клинкере печи сухого способа составляют 5,3 % против 1,5 % для клинкера печи мокрого способа производства. В то же время подаваемая на обжиг сырьевая мука также характеризуется большими колебаниями значений химического состава и модулей, чем сырьевой шлам. Её коэффициент насыщения варьирует в пределах 0,95–1,01, в то время как у шлама он остается стабильным в течение всего времени.

Для изучения микроструктуры клинкеров был проведён петрографический анализ. Полированные шлифы рассматривались под металлографическим микроскопом МИМ-7 при увеличении 500× с использованием в качестве травителя дистиллированной воды и 0,1Н соляной кислоты.

Структура клинкера, полученного на печах сухого способа производства, гломеробластическая. В основном минералы образуют скопления, чередующиеся друг с другом. Кристаллизация клинкера среднекристаллическая, неравномерно-зернистая. Алит и белит могут образовывать как отдельные зерна, так и сростки или скопления (рис. 5–7).

Алит представлен в основном кристаллами неправильной многоугольной формы (рис. 6). Белит образует скопления зерен (рис. 7). Скопления могут быть равномерно рассредоточены или образовывать крупные гнёзда вокруг поры. Разделение зёрен отсутствует и выглядит сростком. Форма зёрен белита непра-

вильная округлая, искажена. Края зерна могут быть ровными или волнистыми и зазубренными, местами рваные. Штриховка у белита отсутствует. Преобладающий размер соответствует среднекристаллической структуре и варьирует от 5 до 40 мкм. Промежуточная составляющая представлена светлым и тёмным веществом в малом количестве, т. к. кристаллы в основном образуют тесные скопления и сростки.

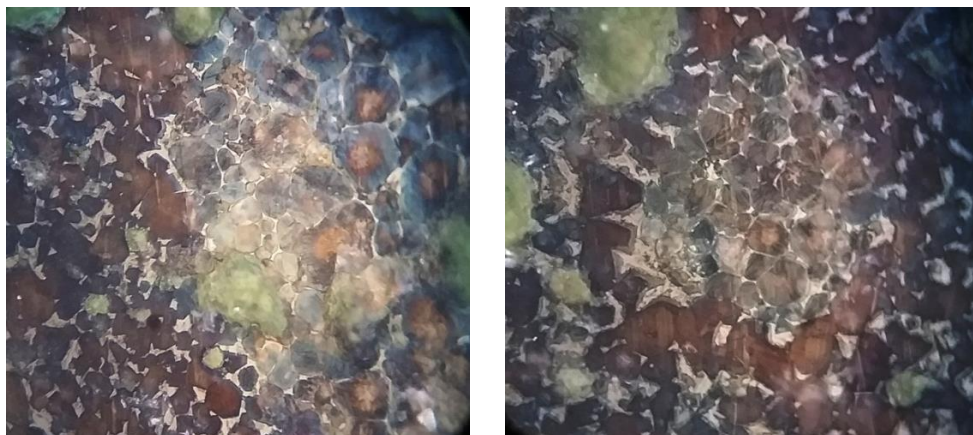


Рис. 5. Скопления алита и белита отдельными участками
Fig. 5. Alite and belite aggregations



Рис. 6. Сростки алита
Fig. 6. Alite agglomerations

Наблюдаются кристаллы свободной извести. Они образуют в основном групповые скопления в виде мелкокристаллических округлых зёрен на фоне мелкокристаллического алита или его сростков (рис. 8).

Иная картина наблюдается в клинкере, полученном в печи мокрого способа производства (рис. 9). Структура более приближена к равномерно-зернистой. Исследуемые участки чаще представлены зёрнами алита и белита, рассеянными поодиночке, не образующими каких-либо скоплений. Размер кристаллов крупнее, их форма имеет более чёткие грани (рис. 10).



Рис. 7. Скопления зёрен белита

Fig. 7. Belite grain clusters



Рис. 8. Свободный оксид кальция на поверхности кристаллов алита в протравленном и непротравленном шлифе

Fig. 8. Free calcium oxide on alite crystal surface in etched and non-etched sections

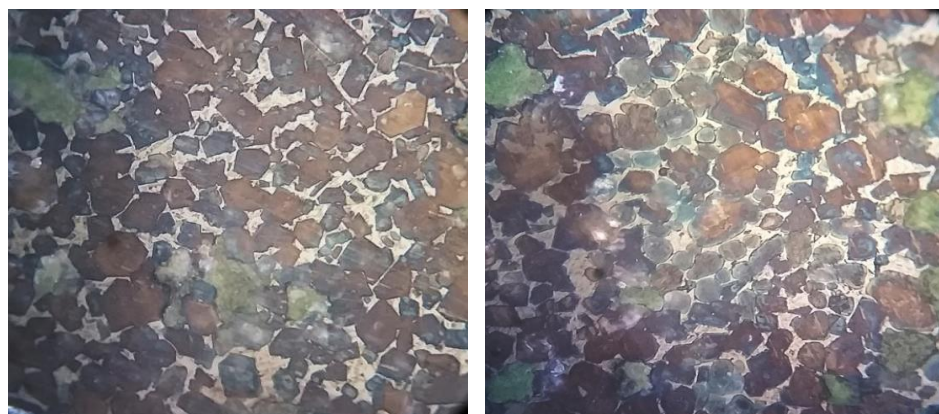


Рис. 9. Структура клинкера печи мокрого способа производства

Fig. 9. Clinker structure obtained in wet process furnace

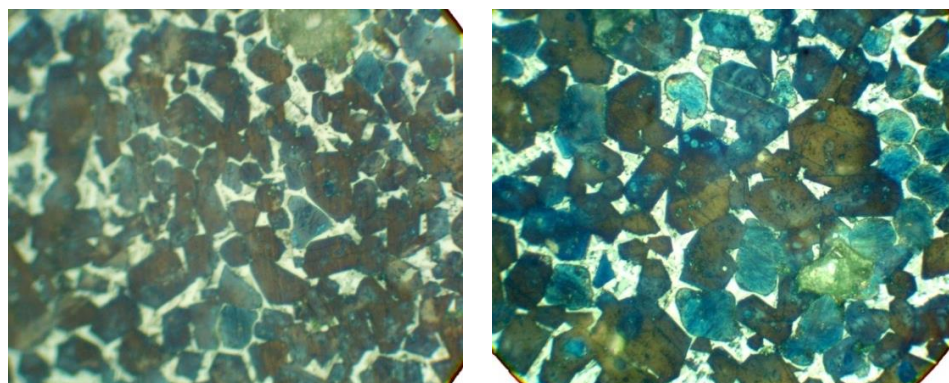


Рис. 10. Кристаллы алиита

Fig. 10. Alite crystals

Очевидно, что степень микрооднородности получаемого клинкера зависит от особенностей физико-химических процессов обжига в агрегатах различных конструкций.

При мокром способе производства в процессе сушки сырьевого шлама образуются гранулы, однородность химического состава которых определяется стабильностью состава подаваемого на обжиг шлама.

При обжиге сырьевой смеси в печах сухого способа производства прохождение порошкообразного материала через систему циклонных теплообменников обуславливает снижение однородности сырьевого потока на входе во вращающуюся часть печи. Это, по-видимому, объясняется двумя факторами: уносом из системы тонкодисперсных фракций, преимущественно карбонатного компонента, а также избирательной агрегацией глинистой составляющей, обладающей повышенной склонностью к слипанию.

Проведенные физико-механические испытания клинкера, отобранного в течение четырёх суток, показали, что наибольшей прочностью при сжатии характеризуется клинкер из печей мокрого способа производства (табл. 5).

Таблица 5

Физико-механические испытания клинкеров

Table 5

Physical and mechanical test results

Наименование пробы	Активность, МПа		Удельная поверхность, см ² /г	Тонкость помола, %	Норм. густота, %	Начало схватывания, мин
	2 сут	28 сут				
Усреднённая проба клинкера печи мокрого способа производства	19,6	56,1	3308	5,8	23,9	155
Усреднённая проба клинкера печи сухого способа производства	21,6	52,3	3288	6,9	23,8	185

Помол клинкера для физико-механических испытаний осуществлялся в шаровой лабораторной мельнице. Время помола составило 48 мин. Для проведения сравнительного анализа клинкеров пробы по каждой печи были усреднены в одну.

Заключение

В связи с расширением объема производства цемента по сухому способу задача повышения активности получаемого клинкера в печных агрегатах с циклонными теплообменными устройствами продолжает оставаться актуальной.

Для решения этой задачи необходимо прежде всего уделить особое внимание однородности химико-минералогического состава сырьевых смесей, подаваемых на обжиг. Комплексное исследование методами рентгенографической дифракции и петрографическим изучением микроструктуры позволяет выявить явное влияние этого фактора на прочностные характеристики получаемого клинкера. Для достижения высокой гидравлической активности и стабильности основных показателей качества в первую очередь необходимо наличие однородной микроструктуры и отчётливой её кристаллизации.

Таким образом, показано, что неоднородность химического состава сырьевых смесей непосредственно влияет на минералогический состав клинкера и его микроструктуру, что отражается на показателях гидравлической активности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бойкова А.И. Химия, структура и свойства клинкеров // Наука и технология силикатных материалов – настоящее и будущее : труды Международной научно-практической конференции. Москва, 2003. Т. I. С. 107–126.
2. Калюжнов И.В., Нураков Е.С. Повышение активности клинкера на бухтарминском цементном заводе // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, 2015. С. 202–207.
3. Классен В.К., Михин А.С. Анализ изменения активности клинкера на ОАО «Себряков-цемент» // Фундаментальные исследования. 2006. № 2. С. 90–91.
4. Козлова В.К., Григорьев В.Г., Малова Е.Ю., Божок Е.В., Мануйлов Е.В. Сравнительные результаты определения фазового состава и микроструктуры клинкеров методами физико-химического анализа // Цемент и его применение: научно-технический и производственный журнал. 2013. № 3. С. 34–38.
5. Крутилин А.А., Крапчетова Т.В., Пахомова О.К., Инькова Н.А. Влияние структуры портландцементного клинкера на его гидравлическую активность // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 139–152.
6. Куляев П.В., Сизов Ю.В. Влияние гранулометрии частиц и активности цемента и добавок на механические характеристики растворов и бетонов // Инновации и моделирование в строительном материаловедении и землеустройстве : материалы V Международной научно-технической конференции. Тверь, 2021. С. 91–99.
7. Малова Е.Ю., Мануйлов Е.В., Козлова В.К., Маноха А.М., Вольф А.В. Определение минералогического состава клинкеров комбинированным методом анализа // Ползуновский вестник. 2011. № 1. С. 79–83.
8. Никитина М.А., Ерыгина А.О., Тимошенко Т.И. Оптимизация состава сырьевой смеси Серебрянского цементного завода // Строительные материалы и изделия. 2018. Т. 1. № 4. С. 13–20.
9. Андреева Н.А. Химия цемента и вяжущих веществ. Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2011. 67 с.

10. Кузнецова Т.В., Кудряшов И.В., Тимашев В.В. Физическая химия вяжущих материалов. Москва : Высшая школа, 1989. 384 с.
11. Лугинина И.Г. Химия и химическая технология неорганических вяжущих материалов. Ч. 1. Белгород : Белгор. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова, 2004. 239 с.
12. Шеин А.Л. Оптимизация дисперсности и химического состава сырьевой смеси при получении малоэнергоёмкого клинкера : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1994. 10 с.
13. Перескок С.А. Интенсификация обжига цементного клинкера в печах сухого и комбинированного способов производства : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород, 2007. 19 с.
14. Бойкова А.И. Микрорентгеноспектральный анализ в химии цемента // Строительные материалы. 2007. № 3. С. 79–84.
15. Бойкова А.И. Особенности минералогии клинкерных композиций и их практическое значение // XX Всероссийское (IV Международное) совещание начальников лабораторий цементных заводов. Москва, 2002. С. 165–172.
16. Тейлор Х. Химия цемента. Москва : Мир, 1996. 560 с.
17. Усов Б.А. Химия и технология цемента. Москва, 2015. 158 с.
18. Шмитко Е.И., Крылова А.В., Шаталова В.В. Химия цемента и вяжущих веществ. Санкт-Петербург : Проспект науки, 2006. 205 с.

REFERENCES

1. Boikova A.I. Chemistry, structure and properties of clinkers. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Present and Future Science and Technology of Silicate Materials'*, Moscow, 2003. V. 1. Pp. 107–126. (In Russian)
2. Kalyuzhnov I.V., Nurakov E.S. Increase in clinker activity at the Bukhtarma Cement Plant. In: *Proc. Int. Sci. Conf. of Young Scientists*. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2015. Pp. 202–207. (In Russian)
3. Klassen V.K., Mikhin A.S. Analysis of changes in clinker activity at AO "Sebryakovcement". *Fundamental'nye issledovaniya*. 2006; (2): 90–91. (In Russian)
4. Kozlova V.K., Grigoriev V.G., Malova E.Yu., Bozhok E.V., Manuilov E.V. Physicochemical analysis of phase composition and microstructure of clinkers. *Tsement i ego primeneniye*. 2013; (3): 34–38. (In Russian)
5. Krutinin A.A., Krapchetova T.V., Inkova N.A., Pakhomova O.K. Structure influence of Portland cement clinker on its hydraulic activity. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (4): 139–152. (In Russian)
6. Kulyaev P.V., Sizov Yu.V. Particle size and cement and additive effect on mechanical properties of mortars and concrete. In: *Proc. 5th Int. Sci. Conf. 'Innovations and Modeling in Materials Science in Construction and Land Management'*. 2021. Pp. 91–99. (In Russian)
7. Malova E.Yu., Manuilov E.V., Kozlova V.K., Manokha A.M., Wolf A.V. Combined method of analysis of clinker mineralogical composition. *Polzunovsky vestnik*. 2011; (1): 79–83. (In Russian)
8. Nikitina M.A., Erygina A.O., Timoshenko T.I. Optimization of raw mix composition at the Serebryansky Cement Plant. *Stroitel'nye materialy i izdeliya*. 2018; 1 (4): 13–20. (In Russian)
9. Andreeva N.A. Chemistry of cement and binders. Saint-Petersburg, 2011. 67 p. (In Russian)
10. Kuznetsova T.V., Kudryashov I.V., Timashev V.V. Physical chemistry of binding materials. Moscow: Vysshaya shkola, 1989. 384 p. (In Russian)
11. Luginina I.G. Chemistry and chemical technology of inorganic binding materials. Part 1. Belgorod, 2004. 239 p. (In Russian)
12. Shein A.L. Optimization of dispersion and chemical composition of raw mix in low energy-intensive clinker production. PhD Abstract. Moscow, 1994. 10 p. (In Russian)
13. Pereskok S.A. Intensification of clinker burning using dry and combined processes. PhD Abstract. Belgorod, 2007. 19 p. (In Russian)
14. Boikova A.I. X-ray microanalysis in cement chemistry. *Stroitel'nye materialy*. 2007; (3): 79–84. (In Russian)

15. Boikova A.I. Clinker composition mineralogy and practical significance. In: *Proc. 20th All-Russian Meeting of Laboratory Heads of Cement Plants*. Moscow, 2002. Pp. 165–172. (In Russian)
16. Taylor H.F.W. Cement chemistry. Moscow: Mir, 1996. 560 p. (Russian translation)
17. Usov B.A. Chemistry and technology of cement. Moscow, 2015. 158 p. (In Russian)
18. Shmitko E.I., Krylova A.V., Shatalova V.V. Chemistry of cement and binders. Saint-Petersburg: Prospect nauki, 2006. 205 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Крутилин Александр Александрович, канд. техн. наук, доцент, Себряковский филиал Волгоградского государственного технического университета, 403343, Волгоградская область, г. Михайловка, ул. Мичурина, 21, kotyga84@bk.ru

Крпачетова Татьяна Владимировна, инженер-аналитик, АО «Себряковцемент», 403342, Волгоградская область, г. Михайловка, ул. Индустриальная, 2, iwankra@mail.ru

Инькова Надежда Александровна, ст. преподаватель, Себряковский филиал Волгоградского государственного технического университета, 403343, Волгоградская область, г. Михайловка, ул. Мичурина, 21, coyote@bk.ru

Пахомова Олеся Константиновна, ст. преподаватель, Себряковский филиал Волгоградского государственного технического университета, 403343, Волгоградская область, г. Михайловка, ул. Мичурина, 21, pahomovaolesia@yandex.ru

Authors Details

Alexander A. Krutinin, PhD, A/Professor, Sebyakovsk Branch of Volgograd State Technical University, 21, Michurin Str., 403343, Volgograd region, Mikhailovka, Russia, kotyga84@bk.ru

Tatyana V. Krapchetova, Analytical Engineer, AO "Sebyakovtsement", 2, Industrial'naya Str., 403342, Volgograd region, Mikhailovka, Russia, iwankra@mail.ru

Nadezhda A. Inkova, Senior Lecturer, Sebyakovsk Branch of Volgograd State Technical University, 21, Michurin Str., 403343, Volgograd region, Mikhailovka, Russia, coyote@bk.ru

Olesya K. Pakhomova, Senior Lecturer, Sebyakovsk Branch of Volgograd State Technical University, 21, Michurin Str., 403343, Volgograd region, Mikhailovka, Russia, pahomovaolesia@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.04.2023
Одобрена после рецензирования 01.05.2023
Принята к публикации 16.06.2023

Submitted for publication 15.04.2023
Approved after review 01.05.2023
Accepted for publication 16.06.2023