

СИНТЕЗ ДВУХКАЛЬЦИЕВОГО СИЛИКАТА В ПРИСУТСТВИИ ПЫЛИ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ ЦЕМЕНТНЫХ ПЕЧЕЙ

© Н. П. Кудеярова, Н. П. Бушуева, О. А. Панова

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
E-mail: px_2011@list.ru

Поступила в Редакцию 24 декабря 2019 г.
После доработки 18 июня 2019 г.
Принята к публикации 21 февраля 2020 г.

Представлены результаты исследований влияния пыли электрофильтров цементных печей на синтез вяжущего, содержащего преимущественно двухкальциевый силикат. Присутствие щелочных оксидов калия и натрия, а также сульфат-ионов в пыли электрофильтров при обжиге карбонатно-кремнеземистой смеси способствует образованию твердого раствора на основе структуры β -модификации $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, увеличению дефектности его кристаллической решетки, сохранению в метастабильном состоянии при охлаждении и повышению активности в гидротермальных условиях твердения.

Ключевые слова: двухкальциевый силикат; пыль электрофильтров; вяжущее; синтез; гидротермальное твердение

DOI: 10.31857/S0044461820060067

При производстве вяжущих материалов происходят выбросы мелкодисперсных частиц — пыли. Основу технологического процесса производства цемента составляет обжиг портландцементного клинкера при температурах 1350–1450°C. По фазовому составу портландцементный клинкер в основном представлен силикатами кальция: до 60% трехкальциевого $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (алит C_3S) и 20–26% двухкальциевого $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (белит C_2S) силикатов. Алит и белит образуются в цементной печи в различных термических условиях и различаются гидравлическими свойствами. Наиболее энергоемкой является образование C_3S (температура образования 1400–1450°C), белитовая фаза образуется при 1200–1300°C. По гидравлическим свойствам наиболее активным является алит, который быстро гидратирует и придает максимальную прочность цементному камню. Белит характеризуется медленным схватыванием и набором прочности в естественных условиях, но в поздние сроки твердения он интенсивно набирает прочность и может превысить прочность гидратированного алита. Так, через 3 сут твердения степень гидратации белита более чем в 3 раза ниже показателя алита, через 6 мес белитовая фаза гидратирует

на 56%, что составляет 78.6% от степени гидратации алита [1, 2].

Двухкальциевый силикат ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) плавится конгруэнтно при 2130°C, характеризуется весьма сложным полиморфизмом. В интервале 20–1500°C существует шесть кристаллических форм $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ — α , α'_H , α'_L , β_H , β_L и γ , интервал устойчивости которых при нагревании и при охлаждении различен. При обжиге портландцементного клинкера возможен модификационный переход β - C_2S в устойчивую модификацию γ - C_2S , которая в естественных условиях не обладает вяжущими свойствами.

Поскольку гидравлическая активность различных модификаций двухкальциевого силиката существенно различается, проблема стабилизации β - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ является актуальной для технологий производства белитовых вяжущих и портландцементного клинкера. На процесс стабилизации оказывают влияние различные факторы: условия образования и роста зародышей, размер частиц, скорость охлаждения, температура, присутствие примесей, которые могут изоморфно замещать Ca^{2+} или Si^{4+} . Изоморфная емкость кристаллической решетки двухкальциевого силиката может составлять до 6 мас%, возможно изоморфное

замещение как в катионной, так и в анионной частях структуры. Чаще всего встречается гетеровалентный изоморфизм типа $\text{Si}^{4+} \rightleftharpoons \text{Si}^{3+} + \text{Si}^{3+}$ [3].

При производстве портландцементного клинкера отходящие газы проходят несколько ступеней очистки, собираемая пыль является отходом производства. По ступеням очистки газов в электрофильтрах пыль различается химическим составом. На первых ступенях пыль по составу близка к сырьевым компонентам, последняя ступень отличается повышенным содержанием щелочных и сернокислых соединений. В работе использована пыль 4-й ступени очистки. По своему химическому составу пыль электрофильтров содержит кроме CaO и SiO₂ оксиды Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, SO₃, R₂O и другие, присутствие которых может повлиять на процесс стабилизации той или иной модификации 2CaO·SiO₂ [4, 5].

Цель работы — исследование влияния пыли электрофильтров цементных вращающихся печей на процесс синтеза и стабилизации двухкальциевого силиката преимущественно в виде β-модификации и изучение процесса твердения вяжущего на его основе в условиях автоклавной обработки.

Экспериментальная часть

В работе был осуществлен синтез двухкальциевого силиката в виде γ- и β-модификаций в присутствии пыли электрофильтров цементных печей из химически чистых CaCO₃ и SiO₂, а также из природных карбонатного и глинистого компонентов. Определение фазового состава проводили с помощью химического (по количеству связанных оксидов смеси) и рентгенофазового (по интенсивности дифракционных отражений кристаллов с расшифровкой межплоскостного расстояния конкретной фазы) методов исследования на рентгеновском дифрактометре ARL9900 Intellipower Workstation [6]. Обработка данных осуществлялась с помощью программных комплексов Difwin, Crystallographica Search-Match. Гидравлическую активность в гидротермальных

условиях (давление насыщенного водяного пара 0.8 МПа; температура 175°C; режим — 2 ч подъем температуры и давления, выдержка при постоянных температуре и давлении, 2 ч снижение температуры и давления) оценивали по прочности при сжатии образцов-цилиндров $d = 20$ мм, изготовленных методом полусухого прессования при давлении 20 МПа. Образцы готовили в смеси с кварцевым песком. Количество вводимого песка рассчитывали с учетом содержания CaO в свободном состоянии в продукте обжига. Расчет количества воды для затворения проводили с учетом расхода на гидратацию свободного оксида кальция, испарения при гашении и формовочной влажности смеси ($W = 6.5\%$).

При расчете соотношения исходных компонентов смесей для синтеза двухкальциевого силиката в виде γ- и β-модификаций параллельно учитывали содержание оксида кальция в свободном состоянии в продукте обжига. Приготовленные смеси обжигали в силитовой печи при температурах 1000, 1050 и 1100°C в течение 40 мин. Продукт обжига измельчали до удельной поверхности 400 м²·кг⁻¹. Пыль электрофильтров добавляли в смесь в количестве 5 мас%. Данные по химическому составу используемых материалов, составу смесей и продуктов обжига приведены в табл. 1, 2, фазовый состав продуктов обжига — в табл. 3.

В продукте обжига определяли содержание CaO в свободном состоянии этилглицератным методом, содержание SiO₂ — фотоколориметрическим методом* (табл. 4). Содержание минералов двухкальциевого силиката, алюмината и феррита кальция, а также неразложившегося CaCO₃ рассчитывали по результатам химического анализа продукта обжига (табл. 5).

Фазовый состав продукта обжига подтвержден результатами рентгенофазового анализа (рис. 1, 2). При обжиге смеси CaCO₃ и SiO₂ в температурном

* Бутт Ю. М., Тимашев В. В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. М.: Высш. шк., 1973. С. 39–41.

Таблица 1
Химический состав сырьевых материалов Белгородского цементного завода

Материал	Содержание оксидов, мас%									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	потери при прокаливании	прочие
Мел	2.35	0.50	0.19	54.22	0.24	0.01	0.10	0.04	42.18	0.17
Глина	67.47	11.76	5.15	3.90	1.73	0.75	0.21	0.22	7.15	1.66
Пыль электрофильтров	3.10	0.86	0.56	16.5	0.23	12.15	25.82	1.27	15.59	18.1

Таблица 2

Расчетный химический состав смесей и продуктов обжига карбонатно-кремнеземистой смеси

Состав смеси	Содержание оксидов, мас%									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	потери при прокаливании	прочие
CaCO ₃ + SiO ₂	23.08	—	—	43.07	—	—	—	—	33.85	—
CaCO ₃ + SiO ₂ + пыль электрофильтров	22.09	0.04	0.03	41.75	0.01	0.61	1.29	0.06	32.44	0.91
Мел + глина	17.98	3.20	1.38	42.14	0.60	0.19	0.13	0.08	33.77	0.61
Мел + глина + пыль электрофильтров	17.24	3.08	1.34	40.86	0.07	0.81	1.42	0.14	32.86	1.48
Продукт обжига										
CaCO ₃ + SiO ₂	34.88	—	—	65.12	—	—	—	—	—	—
CaCO ₃ + SiO ₂ + пыль электрофильтров	32.70	0.06	0.04	61.80	0.01	0.90	1.91	0.09	—	1.35
Мел + глина	27.16	4.84	2.08	63.63	0.9	0.28	0.19	0.13	—	0.80
Мел + глина + пыль электрофильтров	25.68	4.59	2.00	60.86	0.10	1.21	2.11	0.21	—	1.19

Таблица 3

Расчетный фазовый состав продукта обжига карбонатно-кремнеземистой смеси

Состав смеси	Содержание минерала, мас%					
	2CaO·SiO ₂	CaO·Al ₂ O ₃	2CaO·Fe ₂ O ₃	CaSO ₄	CaO	MgO
CaCO ₃ + SiO ₂	100	—	—	—	—	—
CaCO ₃ + SiO ₂ + пыль электрофильтров	93.74	0.06	0.07	1.04	—	0.01
Мел + глина	77.86	7.50	3.54	0.48	8.82	0.60
Мел + глина + пыль электрофильтров	73.62	7.11	3.40	2.06	8.15	0.10

Таблица 4

Химический состав продукта обжига карбонатно-кремнеземистой смеси

Состав смеси	Температура обжига, °C	Содержание, мас%				
		CaO _{своб}	SiO ₂ своб	потери при прокаливании	∑ оксидов в свободном состоянии	∑ оксидов в связанном состоянии
CaCO ₃ + SiO ₂	1000	36.10	19.35	10.86	55.45	19.87
	1050	24.61	13.19	9.56	37.80	40.47
	1100	17.19	9.26	9.08	26.53	52.83
CaCO ₃ + SiO ₂ + 5% пыли электрофильтров	1000	23.60	12.40	8.79	36.00	44.12
	1050	18.28	8.85	8.04	27.13	54.01
	1100	14.34	7.32	7.16	21.66	62.07
Мел + глина	1050	24.05	10.35	11.86	34.40	39.31
	1100	11.72	3.60	11.08	15.32	60.44
Мел + глина + 5% пыли электрофильтров	1050	8.54	1.53	7.55	10.07	76.15
	1100	4.05	1.27	6.29	5.27	80.06

Таблица 5
Фазовый состав продукта обжига карбонатно-кремнеземистой смеси

Состав смеси	Температура обжига, °С	Содержание минералов, мас%					
		2CaO·SiO ₂	CaO·Al ₂ O ₃	2CaO·Fe ₂ O ₃	CaCO ₃	CaO	α-тридимит
CaCO ₃ + SiO ₂	1000	19.87	—	—	24.68	36.10	19.35
	1050	40.47	—	—	21.73	24.61	13.19
	1100	52.83	—	—	20.64	17.27	9.26
CaCO ₃ + SiO ₂ + 5% пыли электрофильтров	1000	43.18	0.06	0.06	19.98	23.60	12.40
	1050	54.45	0.06	0.06	18.27	18.28	8.85
	1100	61.88	0.06	0.06	16.27	14.34	7.32
Мел + глина	1050	29.65	7.01	2.65	26.95	24.05	10.35
	1100	50.02	7.28	3.14	24.24	11.75	3.60
Мел + глина + 5% пыли электрофильтров	1050	64.79	8.23	3.13	17.16	8.54	1.53
	1100	69.11	7.92	3.03	14.30	4.05	1.27

интервале 1000–1100°С в течение 40 мин 20–25% CaCO₃ остается в неразложившемся состоянии (табл. 4), продукт содержит оксиды CaO и SiO₂ в свободном состоянии и двухкальциевый силикат в виде β- и γ-модификаций (рис. 1, *a* — *d*, Å: 3.01, 2.788, 2.755, 2.614, 2.194).

Установлено [7], что чем мельче кристаллы β-2CaO·SiO₂, тем менее вероятно образование зародышей γ-формы, в этом случае стабилизируется β-модификация. Повышение температуры обжига приводит к снижению содержания CaCO₃, оксидов в свободном состоянии, повышению количества 2CaO·SiO₂.

Кристаллохимическая стабилизация основана на образовании твердых растворов 2CaO·SiO₂ с некоторыми добавками. Катионы (анионы) Na⁺,

K⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, присутствующие в пыли, входят в кристаллическую решетку 2CaO·SiO₂, которая при этом претерпевает изменения, приводящие к ее стабилизации. Одновременно добавки могут оказывать влияние на реакционную способность соединения. Добавки-стабилизаторы в одних случаях значительно повышают, в других — резко снижают гидратационную активность. «Второстепенные» примесные оксиды (Na₂O, K₂O, MgO, SO₃ и др.), которые всегда содержатся в исходных сырьевых материалах, создают благоприятные условия для образования фаз с комплексом изоморфных замещений в их решетках, снижают при этом температуру синтеза минералов. Хорошо известны кристаллохимические особенности этих фаз; применительно к 2CaO·SiO₂ твердые растворы носят название белиты.

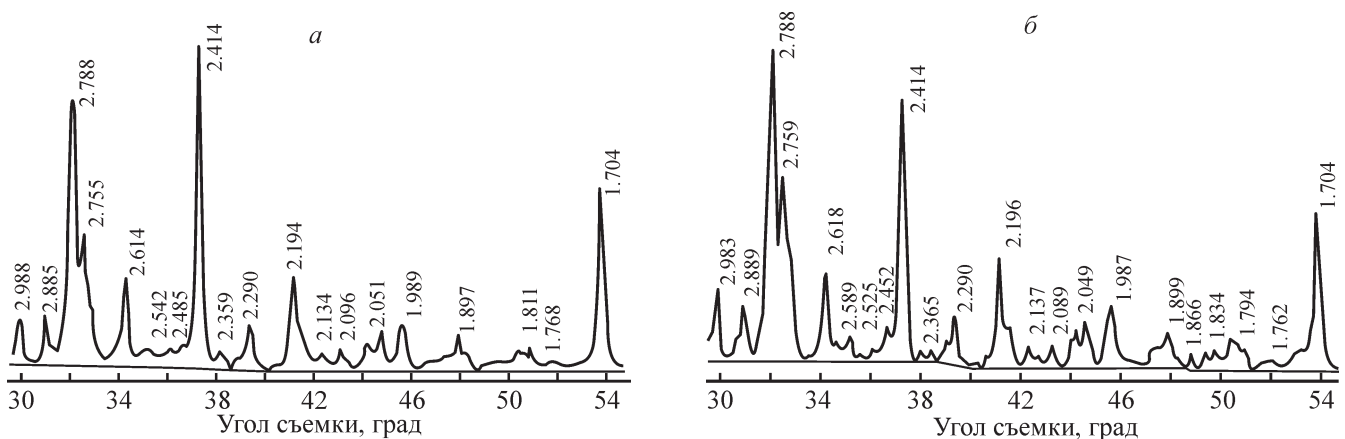


Рис. 1. Рентгенограммы продукта обжига смесей.
a — CaCO₃ + SiO₂, *б* — CaCO₃ + SiO₂ + 5 мас% пыли электрофильтров при *T* = 1100°С.

Установлено [8], что метастабильную β -модификацию $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ стабилизирует внедрение при синтезе в его структуру различных по заряду ионов (гетеровалентный изоморфизм). Обязательным условием осуществления замещений данного типа является компенсация заряда. Изоморфные элементы в решетках матричных минералов могут занимать различные позиции. Так, ионы Na^+ , K^+ , Mg^{2+} в $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, как правило, замещают ионы Ca^{2+} , а в тетраэдрах $[\text{SiO}_4]$ вместо Si^{4+} могут быть ионы S^{6+} . В работе [9] определено, что чем больше пар гетеровалентных изоморфных замещений присутствует в структуре минерала, тем большие искажения претерпевает структура. За счет деформации кристаллической решетки могут быть значительно изменены свойства минералов и материалов, их содержащих (например, характеристики гидратации и твердения). В связи с относительно малым объемом элементарной ячейки β - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (0.343 нм^3) в сравнении с объемами других высокотемпературных модификаций этого соединения (например, у α' - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ — 1.08 нм^3) объясним факт стабилизации меньшим количеством примесей [10]. Содержание примесных ионов в кристаллической решетке β - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, которые могут внедриться в его структуру и замещать матричные ионы, может составлять $\sim 4\text{--}6 \text{ мас}\%$.

Введение в состав смеси пыли электрофильтров, содержащей значительное количество оксидов R_2O (R — щелочной металл), MgO и SO_3 , приводит к интенсификации не только процесса декарбонизации карбоната кальция, но и процесса взаимодействия CaO с кремнеземом [11]. Двухкальциевый силикат (рис. 2, б — d , Å: 2.788, 2.759, 2.618, 2.196) содержится только в виде β -модификации, саморассыпания, характерного для перехода в γ -форму, не происходит.

Присутствие оксидов MgO , K_2O , SO_3 приводит к кристаллохимической стабилизации β -модификации $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, дифракционный максимум, характерный для γ -модификации 3.01 Å , отсутствует. Содержание значительного количества K_2O ($\sim 25\%$) в пыли электрофильтров могло бы обеспечить кристаллохимическую стабилизацию β -модификации $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ без участия других оксидов [12]. Смещение дифракционных отклонений, характерных для β -модификации, в сторону больших углов свидетельствует о внедрении в структуру двухкальциевого силиката ионов калия K^+ взамен Ca^{2+} , S^{6+} взамен Si^{4+} , что является рентгенографическим признаком увеличения параметров элементарной ячейки и находится в хорошем соответствии с размерными характеристиками взаимно замещающихся ионов ($r_{\text{Ca}^{2+}} = 1.04 \text{ Å}$, $r_{\text{K}^+} = 1.33 \text{ Å}$, $r_{\text{Si}^{4+}} = 0.39 \text{ Å}$, $r_{\text{S}^{6+}} = 0.29 \text{ Å}$). Разница в размерах радиусов ионов Ca^{2+} и K^+ 21.8% , Si^{4+} и S^{6+} — 25.6% , а также содержание в пыли электрофильтров значительного количества K_2O в сравнении с SO_3 объясняет смещение дифракционных максимумов для β - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ в сторону больших, а не меньших углов что в целом повышает дефектность кристаллической структуры фазы β - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ и ее гидратационную активность [13].

В продукте обжига на основе мела и глины с добавкой и без пыли электрофильтров кроме β - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (d , Å: 2.784, 2.637, 2.194) обнаружены алюминат (d , Å: 2.988, 2.578), феррит кальция $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (d , Å: 2.79, 2.698), CaO в свободном состоянии (d , Å: 2.414, 1.702) (рис. 2, а, б), что подтверждает данные расчета фазового состава по результатам химического анализа. С введением в смесь пыли электрофильтров на рентгенограмме продукта обжига наблюдается увеличение интен-

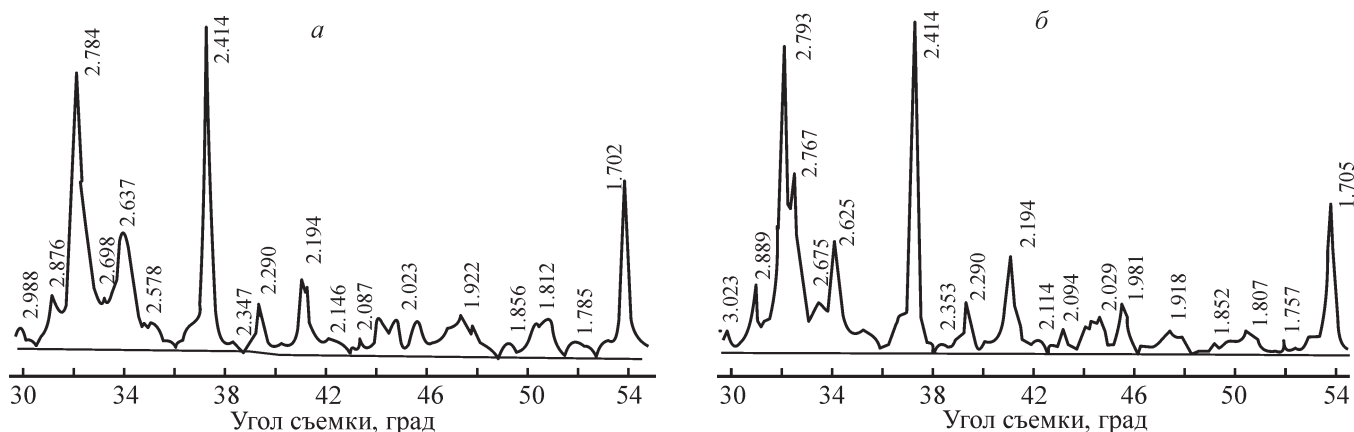


Рис. 2. Рентгенограммы продукта обжига смесей.

а — мел + глина, б — мел + глина + 5 мас% пыли электрофильтров при $T = 1100^\circ\text{C}$.

сивности дифракционного максимума 2.79 \AA , характерного для $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, что свидетельствует о значительно большем содержании минерала белита. Следовательно, использование пыли электрофильтров цементных печей позволяет при относительно низких температурах получить вяжущее, содержащее двухкальциевый силикат в виде β -модификации.

Полученные результаты характерны для белитовых клинкеров, производство которых с учетом их низкой гидратационной активности в настоящее время

отсутствует. В работе для активизации белитовой составляющей клинкера использовалось гидротермальное твердение при температуре 175°C , характерное для известково-песчаных смесей [14]. После автоклавной обработки и сушки образцы испытывали на прочность при сжатии, определяли содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в свободном состоянии (табл. 6), фазовый состав оценивали по результатам рентгенофазового анализа (рис. 3).

Известково-кварцевое вяжущее, традиционно используемое при производстве изделий автоклавного

Таблица 6
Состав и свойства вяжущего гидротермального твердения

Вяжущее, содержащее			кварцевый песок, %	Ca(OH) _{своб.} , %	Прочность при сжатии, МПа
продукт обжига, полученный					
из смеси	при температуре, °C	количество, %			
CaCO ₃ + SiO ₂	1000	73.48	26.52	5.38	17.45
	1050	80.25	19.75	2.62	26.08
	1100	85.27	14.73	1.55	34.18
CaCO ₃ + SiO ₂ + 5% пыли электрофильтров	1000	80.91	19.09	1.90	29.10
	1050	84.55	15.45	0.81	40.08
	1100	87.46	12.54	0.25	51.00
Мел + глина	1050	80.61	19.39	—	35.65
	1100	89.49	10.51	—	60.95
Мел + глина + 5% пыли электрофильтров	1050	92.13	7.87	—	48.36
	1100	96.11	3.89	—	66.65
CaO	—	50	50	9.30	10.86

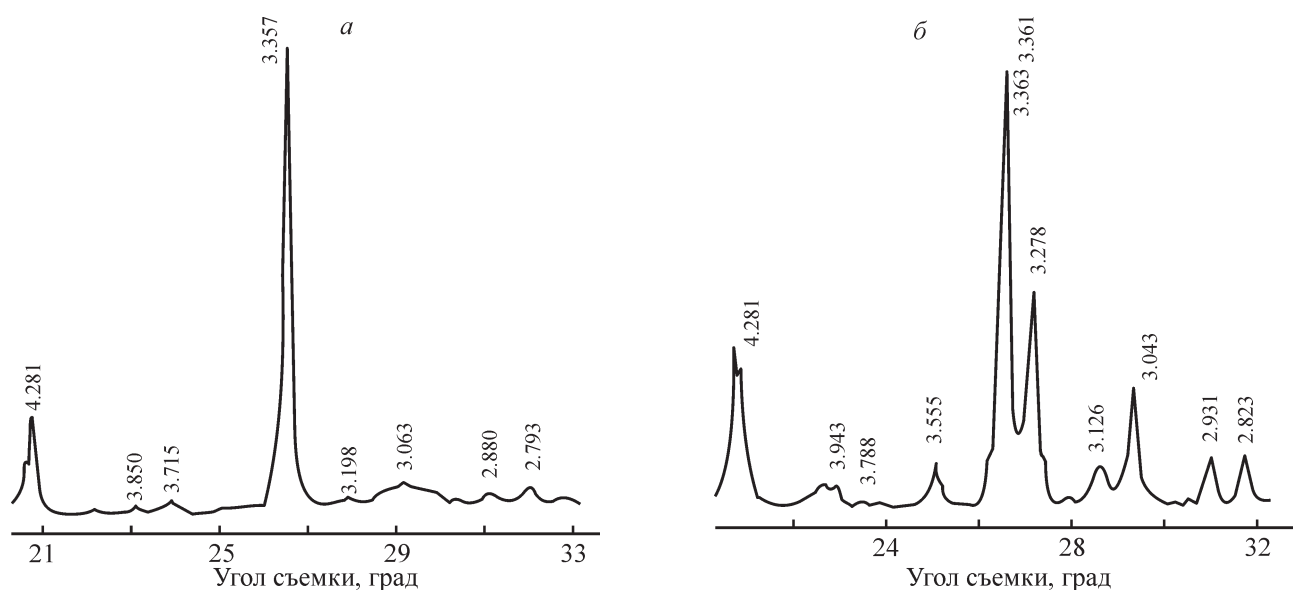


Рис. 3. Рентгенограммы гидратированного продукта обжига.

а — на основе извести и песка мела, *б* — на основе мела, глины и пыли электрофильтров.

твердения (силикатный кирпич, ячеистые автоклавные изделия), характеризуется относительно низкой прочностью при сжатии 10.86 МПа, при этом значительное количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$ остается в свободном состоянии. Вяжущее, содержащее продукт обжига ($\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$), после гидротермального твердения отличается значительным повышением прочности до 26.8 и 34.18 МПа при температурах 1050 и 1100°C. Наибольшие показатели прочности имеет вяжущее с добавкой пыли электрофильтров до 51.0 МПа при температуре 1100°C, причиной этого является повышенное содержание двухкальциевого силиката в виде β -модификации (до 61.88%) (табл. 5) в результате ускоренной гидратации β - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ при гидротермальной обработке (в сравнении с нормальными условиями твердения) и взаимодействия свободного оксида кальция с кремнеземом песка с образованием гидросиликатов кальция.

Дефектность структуры является фактором, влияющим на химические свойства минерала β - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$. Замещение некоторого количества ионов Ca^{2+} на ионы K^+ и Na^+ , а также Si^{4+} на S^{6+} позволяет не только стабилизировать β -модификацию двухкальциевого силиката, но и значительно повысить его гидравлическую активность [13]. Активность вяжущего, синтезированного из природного сырья с использованием пыли электрофильтров цементных печей, превышает 60 МПа, и при его гидратации весь гидроксид кальция усваивается. Фазовый состав гидратированного продукта представлен гидросиликатами кальция, что подтверждается результатами рентгенофазового анализа (рис. 3, а, б). При использовании продукта обжига на основе мела, глины с добавкой пыли электрофильтров гидратная фаза клинкерной составляющей представлена как низкоосновными $\text{CSH}(\text{B})$ (d , Å: 3.043, 2.823), так и высокоосновными $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$ (d , Å: 4.22, 3.943, 3.555, 3.278) гидросиликатами кальция (рис. 3, б). Гидратация β - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ происходит одновременно с гидратацией алюминатов и ферритов кальция ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ и $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$), что приводит к образованию гидроалюмината (d , Å: 3.126, 2.30) и гидроферрита кальция (d , Å: 4.048, 2.069), которые способствуют упрочнению структуры вяжущего. Гидроксид кальция, образующийся при гидратации CaO , полностью связывается кремнеземом в гидросиликаты кальция с отношением $\text{CaO}/\text{SiO}_2 < 1.5$, что повышает количество низкоосновных высокопрочных гидросиликатов кальция типа $\text{CSH}(\text{B})$ (частично закристаллизованный тоберморито-подобный гидросиликат кальция с отношением $\text{CaO}:\text{SiO}_2 < 1.5$ и переменным количеством воды) [13].

Использование вяжущего, содержащего преимущественно β - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, позволяет значительно повысить прочностные характеристики. Фазовый состав вяжущего, полученного из природного сырья с добавкой 5 мас% пыли цементных вращающихся печей, свидетельствует о возможности получения белитовых клинкеров при относительно низких температурах обжига в сравнении с производимыми в настоящее время алитовыми клинкерами. Совместная гидратация белитовой фазы и взаимодействие свободного оксида кальция продукта обжига с кремнеземом песка позволяют увеличить количество гидратных фаз после гидротермального твердения и получить на этой основе вяжущее высокой прочности. Ускоренная гидратация двухкальциевого силиката при повышенных температуре и давлении способствует увеличению гидратных фаз.

Выводы

Теоретически обоснована и экспериментально установлена интенсификация процесса образования белитовой фазы в виде β -модификации при относительно низких температурах в результате замещения некоторого количества ионов Ca^{2+} на ионы K^+ и Na^+ , а также Si^{4+} на S^{6+} , содержащиеся в пыли электрофильтров вращающихся цементных печей. Увеличение дефектности структуры двухкальциевого силиката β - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ при наличии комплекса примесей значительно повышает гидравлическую активность этого минерала в гидротермальных условиях. Прочность автоклавированного вяжущего на основе белитового клинкера в шесть раз превышает прочностные показатели известково-песчаного вяжущего при постоянных условиях твердения в результате ускоренной гидратации белитовой фазы и образования большего количества гидратной фазы типа высокопрочных низкоосновных гидросиликатов кальция.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам Центра высоких технологий Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова за определение химического состава используемых сырьевых материалов, а также Межкафедральной лаборатории рентгенофазового анализа проб продуктов синтеза и гидратации вяжущего за проведение анализов исследуемых образцов, особая благодарность кафедре технологии цемента и композиционных материалов за предоставление

установок для определения технологических свойств вяжущих материалов.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках программы развития опорного университета на базе Белорусского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова, а также в рамках НИР № 532-2018-НИР от 12.06.2018 г.

Информация об авторах

Кудеярова Нина Петровна, к.т.н., проф. Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова, кафедра технологии цемента и композиционных материалов; научное направление «Оптимизация производства низкообжиговых вяжущих и силикатных материалов автоклавного твердения с использованием техногенных продуктов производств»,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0724-664X>

Бушуева Наталья Петровна, к.т.н., доцент Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова, кафедра технологии стекла и керамики; научное направление «Физическая химия силикатных и тугоплавких неметаллических материалов»,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1738-8510>

Панова Ольга Александровна, вед. инж. Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова, кафедра технологии стекла и керамики; научное направление «Энергосберегающие процессы при обжиге портландцементного клинкера»,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4643-6403>

Список литературы

- [1] *Тейлор Х.* Химия цемента. М.: Мир, 1996. С. 150–152.
- [2] *Gareev R. R., Korolev A. S., Shaimov M. Kh., Trofimov B. Ya.* A composite refractory binder based on stabilized belite // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2006. V. 47. N 6. P. 381–385.
<https://doi.org/10.1007/s11148-007-0012-x>
- [3] *Wang Y. G., Zou B. S., Kuo K. H. X.* High-resolution electron microscopy study of belite // *J. Mater. Sci*. 1989. V. 24. P. 877–880.
<https://doi.org/10.1007/BF01148771>
- [4] *Нурымбетов Б. Ч., Туремуратов Ш. Н., Жуков А. Д., Асаматдинов М. О.* Влияние тонкодисперсного наполнителя на процессы образования силикатов кальция // *Вестн. МГСУ*. 2017. Т. 12. № 4 (103). С. 446–451.
<https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.4.446-451>
- [5] *Александров А. В., Немчинова Н. В.* Роль полиморфных модификаций двухкальциевого силиката нефелиновых спеков при производстве глинозема // *Вестн. Иркутского гос. техн. ун-та*. 2016. Т. 20. № 11. С. 170–183.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-11-170-183>
- [6] *Чижов П. С.* Анализ фазового и элементного состава сырьевых материалов и полупродуктов процесса производства чугуна и стали с использованием аналитической системы ARL 9900 workstation // *Литье и металлургия*. 2011. № 2 (60). С. 172–174.
- [7] *Бойкова А. И.* Цементные минералы сложного состава // *Химия силикатов и оксидов*. Л.: Наука, 1982. С. 255–274.
- [8] *Бойкова А. И.* Кристаллохимия твердых растворов минералов цементного клинкера // *Цемент*. 1982. № 9. С. 7–10.
- [9] *Бойкова А. И.* Влияние примесей на фазовые соотношения, состав и кристаллохимическое соотношение фаз в многокомпонентных клинкерных системах // *Цемент*. 1992. № 2. С. 17–19.
- [10] *Шманина Е. А.* Сравнительная характеристика электронного строения структурных фрагментов двухкальциевого силиката в различных полиморфных модификациях // *Научный поиск. Технические науки: Материалы третьей науч. конф. аспирантов и докторантов. Юж.-Урал. гос. ун-т. Т. 2. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2011. С. 191–195.*
- [11] *Ермоленко Е. П., Классен В. К.* Щелочные соединения в производстве цемента // *Сб. докл. «Алтинформ»*. 2012. № 3. С. 44–53.
- [12] *Gutt W., Osborn E. F.* The effect of potassium on the hydraulicity of dicalcium silicate // *Cement Technol*. 1970. V. 1. N 4. P. 121–125.
- [13] *Бикбай М. Я.* Кристаллическая структура и полиморфизм двухкальциевого силиката // *Цемент и его применение*. 2006. № 5. С. 64–67.
- [14] *Бутт Ю. М., Раишкович Л. Н.* Твердение вяжущих при повышенных температурах. М.: Стройиздат, 1965. С. 197–201.