

УДК 691.42:536

В.З. АБДРАХИМОВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА
И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОБЖИГА
КАЛЬЦИЙСОДЕРЖАЩЕЙ ЛЕГКОПЛАВКОЙ ГЛИНЫ**

Представлены исследования фазовых превращений в образцах из кальцийсодержащей легкоплавкой глины в интервале температур 950–1100 °С. Исследования показали, что при температуре обжига 950 °С образцов из кальцийсодержащей легкоплавкой глины отмечается появление гематита и жидкой фазы (стеклофазы). При повышении температуры обжига до 1000 °С появляются анортит и кристобалит. Многие исследователи считают, что керамическим материалам придает прочность анортит. Увеличение температуры обжига до 1050 °С к особым изменениям не приводит, за исключением повышения содержания кристобалита, стеклофазы и анортита. Дальнейшее увеличение температуры обжига до 1100 °С способствует повышению содержания стеклофазы – это происходит за счет перехода части железа в жидкую фазу, при этом коэффициент преломления стеклофазы возрастает с 1,475 до 1,57. При температуре обжига 1050 °С образцы из кальцийсодержащей легкоплавкой глины по прочности имеют марку М125.

Ключевые слова: легкоплавкая глина, керамический кирпич, оксид кальция, гематит, кристобалит, анортит, стеклофаза.

DOI 10.32683/0536-1052-2020-734-2-16-27

Введение. В настоящее время одной из ведущих отраслей экономики Казахстана является строительство. В связи с этим возникает высокая потребность в строительных керамических материалах, прежде всего, традиционных на основе глинистого сырья. Эта актуальность обуславливает дальнейшее развитие производства строительной керамики. Производство широко востребованного материала – керамического кирпича – возросло в последнее десятилетие XXI века. Керамический кирпич наряду с бетоном занимает второе место по использованию в строительстве и экономическим признакам.

Для производства керамического кирпича необходимо качественное сырье, особенно глинистых материалов, запасы которых значительно истощены. Для получения стеновой керамики высокого качества при использовании малоизученного, некондиционного или техногенного сырья требуется разработка: а) эффективных способов его переработки; б) возможности управления технологическими процессами производства и физико-химическими процессами при обжиге керамических материалов; в) оптимальных физико-механических показателей у готовых изделий.

Особенность современной сырьевой базы глинистого сырья (которого в кирпиче более 50 %) связана с его недостаточной изученностью, наличием в составе глины значительного количества примесей, в том числе и карбоната

© Абдрахимов В.З., 2020

кальция. Это обуславливает необходимость установления закономерностей во взаимосвязи: сырье – свойства – структура – технология переработки – применение, что предопределяет, в свою очередь, проведение исследований процессов на всех технологических стадиях, включая приготовление керамических масс, и особенно спекания, которое обеспечивает формирование фазового состава и структуры керамики.

В большинстве регионов Казахстана и России для производства керамического кирпича используются легкоплавкие глины с повышенным содержанием оксида кальция. Процессы фазообразования при обжиге легкоплавких глин, содержащих повышенное количество оксида кальция ($\text{CaO} > 10\%$), изучены недостаточно. Во многих публикациях присутствуют расплывчатые научные основы по использованию легкоплавких глин с повышенным содержанием оксида кальция для производства керамического кирпича. Недостаточно изучены фазовые превращения при обжиге легкоплавких глин различного химико-минералогического состава с повышенным содержанием CaO для разработки критериев оценки их пригодности в производстве керамического кирпича. В производстве керамических материалов вопросу фазового состава при обжиге изделий придается особое значение, так как именно он определяет эксплуатационные свойства изделий [1].

Цель работы: исследование фазового состава и физико-механических свойств при различных температурах обжига образцов из кальцийсодержащей легкоплавкой глины.

Методика исследования. Изучение фазовых превращений при обжиге кальцийсодержащей легкоплавкой глины проводили на кубиках с размером ребра 50 мм, изготовленных методом пластического формования. Высушенные образцы – кубики обжигали до влажности 5–6 % в лабораторной печи при температуре 950–1100 °С с интервалом 50 °С. Изотермическая выдержка при максимальной температуре 30 мин.

Фазовый состав определяли рентгенодифрактометрическим методом, на автоматизированном дифрактометре ДРОН-3 с $\text{Cu}_{K\alpha}$ – излучением, β -фильтр. Условия съемки дифрактограмм: $U = 35$ кВ; $I = 20$ мА; съемка $\theta - 2\theta$ (угол); детектор 2 град. · мин. Рентгенофазовый анализ на полуколичественной основе выполнен по дифрактограммам порошковых проб с помощью метода равных навесок и искусственных смесей для определения количественных соотношений кристаллических фаз. Интерпретацию дифрактограмм проводили с использованием данных картотеки ICDD: база порошковых дифрактометрических данных PDF2 (Powder Diffraction File) и дифрактограмм чистых от примесей минералов. Радикалы имеют свои собственные характеристические колебательные частоты, которые появляются в спектрах и кристаллов, и стекол, содержащих эти группы. Этот метод используется для определения строения силикатов, а также для их качественного минерального анализа.

ИК-спектры поглощения получены на спектрофотометре «Spekord-75JR». Образцы были приготовлены в виде суспензии порошка с вазелиновым маслом. Исследования на энергодисперсионном рентгеновском флуоресцентном спектрометре по определению элементного состава отложений с последующим определением минерального их состава были проведены на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM 6390A с приставкой рентгеноспектрального микроанализа Jeol JED-2200, в соответствии с методикой СамГТУ

«Методика определения химического состава твердых тел. Методика выполнения измерений с помощью рентгеновского энергодисперсионного спектрометра в составе растрового электронного микроскопа».

Легкоплавкая кальцийсодержащая глина. Исследование фазового состава и физико-механических свойств при различных температурах обжига проводилось на образцах, полученных из кальцийсодержащей легкоплавкой глины месторождения «Сосык», которая используется для производства кирпича на кирпичном заводе в пос. Асу-Булак Восточно-Казахстанской области [2, 3].

Из всех исследуемых ранее нами глинистых материалов глина месторождения «Сосык» содержит наибольшее количество кальция. В состав легкоплавкой глины месторождения «Сосык» входят оксиды, мас. %: SiO_2 – 54–57; Al_2O_3 – 14–15; Fe_2O_3 – 5–6; CaO – 12–15; MgO – 2–3; R_2O – 2–3; П.п.п. 9–10. Поэлементный состав: С – 3,1; О – 37,2; Na – 1,2; Mg – 1,2; Al+Ti – 11,3; Si – 31,5; К – 0,6; Са – 9,4; Fe – 4,5.

Фракционный состав легкоплавкой глины месторождения «Сосык»:

Размер частиц, мм	Фракции, %
2,9	> 0,063
16,9	0,063–0,01
21,6	0,01–0,005
29,1	0,005–0,001
29,5	< 0,001

Технологические свойства легкоплавкой глины месторождения «Сосык»: верхний предел пластичности при влажности 32,0–35,4 %; нижний – 19,2–20,8; число пластичности – 12,8–14,6; формовочная влажность – 18–20 %; общая усадка – 9,3–10,6 %; коэффициент чувствительности к сушке – 2,28–2,78.

Минералогический состав глины месторождения «Сосык» представлен следующими минералами, %: гидрослюда – 20–30, кварц 25–35, кальцит 15–20, полевой шпат 8–10, лимонит – 10–12.

Исследование фазового состава при температурах 950–1100 °С с интервалом 50 °С. На рентгенограмме порошка из образца, обожженного при 950 °С (рис. 1, б), особых изменений не происходит, за исключением исчезновения гидрослюда (общая формула гидрослюда $\text{K}_x(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_{2-3} \cdot \text{Si}_{4-x}\text{Al}_x\text{O}_{10} \cdot (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, где $x = 0,5$, $n = 1,5$), что обусловлено ее дегидратацией [4, 5] и появления гематита и жидкой фазы (стеклофазы).

Потеря гидроксидов в гидрослюдах начинается примерно при 400 °С и может продолжаться до 900 °С и выше [6]. Согласно исследованиям [4–6], структура гидрослюда может не разрушаться до 950 °С. При температуре 950 °С также происходит диссоциация карбонатов CaCO_3 .

Можно отметить появление на рентгенограмме линии гематита: 0,141, 0,251 и 0,365 нм (рис. 1, б), что подтверждается ИК-спектром, который показал характерные для гематита полосы поглощения 472, 520, 800 и 1050 см^{-1} на ИК-спектре (рис. 2, а).

Для оксида железа известны полиморфные модификации: устойчивая $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ или гематит и неустойчивая β -магнетит Fe_3O_4 [7]. $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ образуется при нагревании Fe_3O_4 в окислительной среде при 220 °С, при этом превра-

щении магнитные свойства и кристаллическая решетка исходного магнетита остаются неизменными [7, 8].

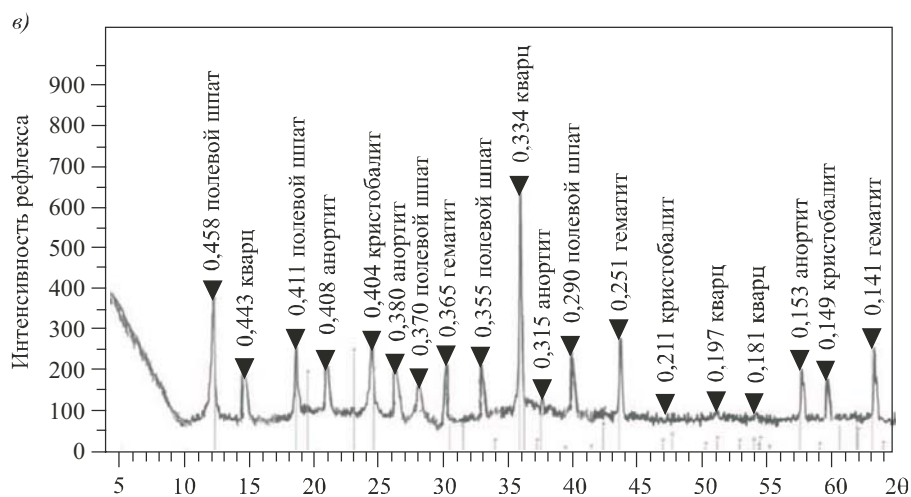
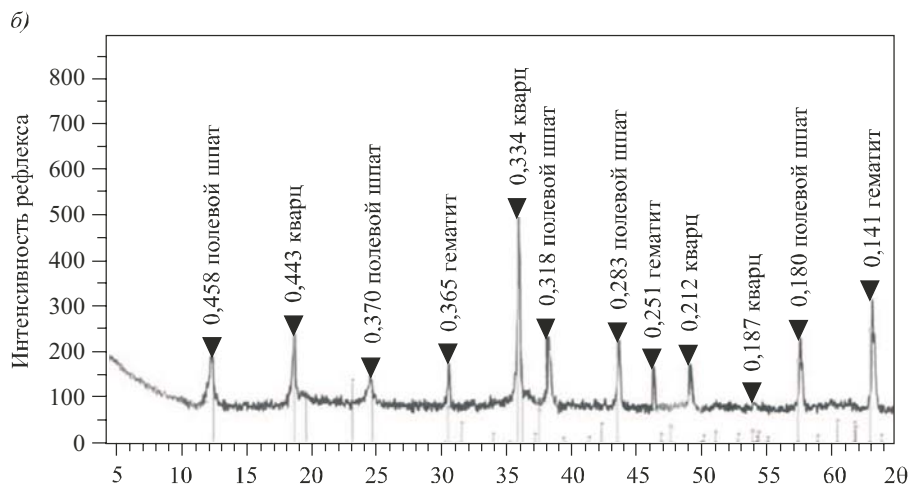
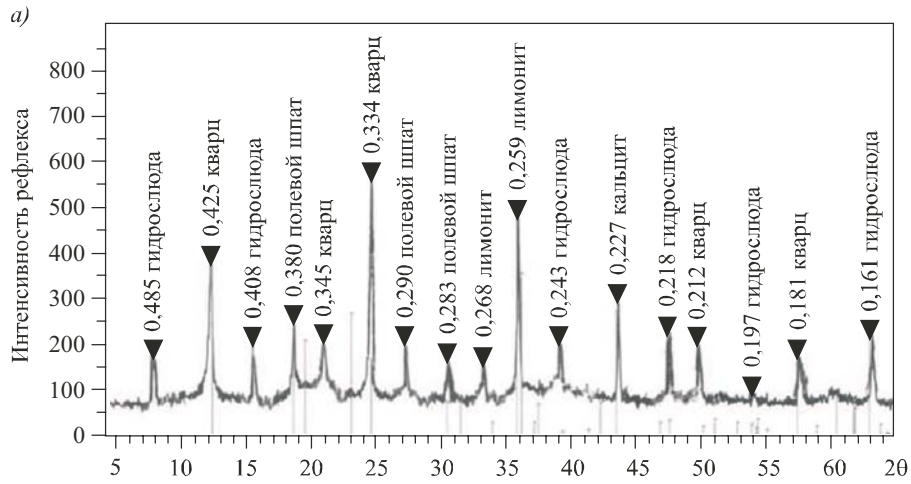
При температуре 550 °С происходят потеря магнитных свойств и изменение решетки, что связано с переходом β-фазы в устойчивую α-форму [7, 8]. Гематит кристаллизуется в гексагональной системе, плотность его 5,25 г/см³; температура плавления 1565 °С, плавится с разложением, которое начинается примерно при 1100 °С [7]. Гематит в противоположность вюстититу является низкотемпературным оксидом железа, и поэтому он может образовываться только в области низких температур (ниже 500 °С) в результате непосредственного окисления железа или более бедных кислородом оксидов FeO и Fe₂O₃. Некоторые авторы [4, 7, 8] считают, что частицы гематита, попадающие в жидкую фазу, не могут существовать в свободном виде и должны либо раскисляться до металлического железа, либо образовывать химические соединения типа ферритов кальция, браунмеллерита (4CaO · Al₂O₃ · Fe₂O₃) и др.

При температуре 950 °С образуется жидкая фаза, что подтверждается ИК-спектром, который показал характерные для стеклофазы полосы поглощения 1195 и 1170 см⁻¹ (см. рис. 2, а). Под микроскопом видны бесцветные, желтоватые и бурые стекла с показателями преломления от 1,50 до 1,54, образовавшиеся в результате плавления шпатов и глинистых образований (рис. 3, б). Появление жидкой фазы в легкоплавкой глине объясняется высоким содержанием оксида железа (Fe₂O₃) и щелочей (R₂O).

Спекание многих видов керамики, в том числе и керамического кирпича, идет с участием жидкой фазы, от свойств которой во многом зависят процесс формирования структуры материала и его свойства. Повышение реакционной способности жидкой фазы в керамических материалах по отношению к тугоплавким их составляющим дает возможность интенсифицировать процесс спекания, что позволит уменьшить расход топлива [5, 9]. В других работах [10, 11] утверждается, что появление жидкой фазы на ранних стадиях залечивает дефекты кристаллических решеток и затрудняет спекание. Б.И. Виноградов [12] указывает, что расплав первоначально появляется на границе частиц различного химического состава за счет образования легкоплавких эвтектик, основой которых является K₂O, Na₂O и FeO.

При повышении температуры обжига до 1000 °С на рентгенограмме образцов из легкоплавкой глины появляются линии анортита: 0,153; 0,315, 0,380 и 0,408 нм, что свидетельствует о начале его кристаллизации (см. рис. 1, в). Образование анортита при температуре 1000 °С подтверждается ИК-спектром, который показал характерные для гематита полосы поглощения 490 и 870 см⁻¹ (см. рис. 2, б).

Анортит – полевой шпат CaO · Al₂O₃ · 2SiO₂, являющийся конечным членом плагиоклазов, обладает всеми свойствами, присущими полевошпатовым минералам, и в составе неметаллических материалов встречается только в устойчивой модификации [7]. Описание процессов формирования кристаллических новообразований анортита и его влияния на рост прочности при обжиге керамических материалов в литературе встречается крайне редко [4, 9]. В работах [5–7] приводятся данные о влиянии золошлаковых материалов на рост прочности керамического материала, полученного на основе традици-



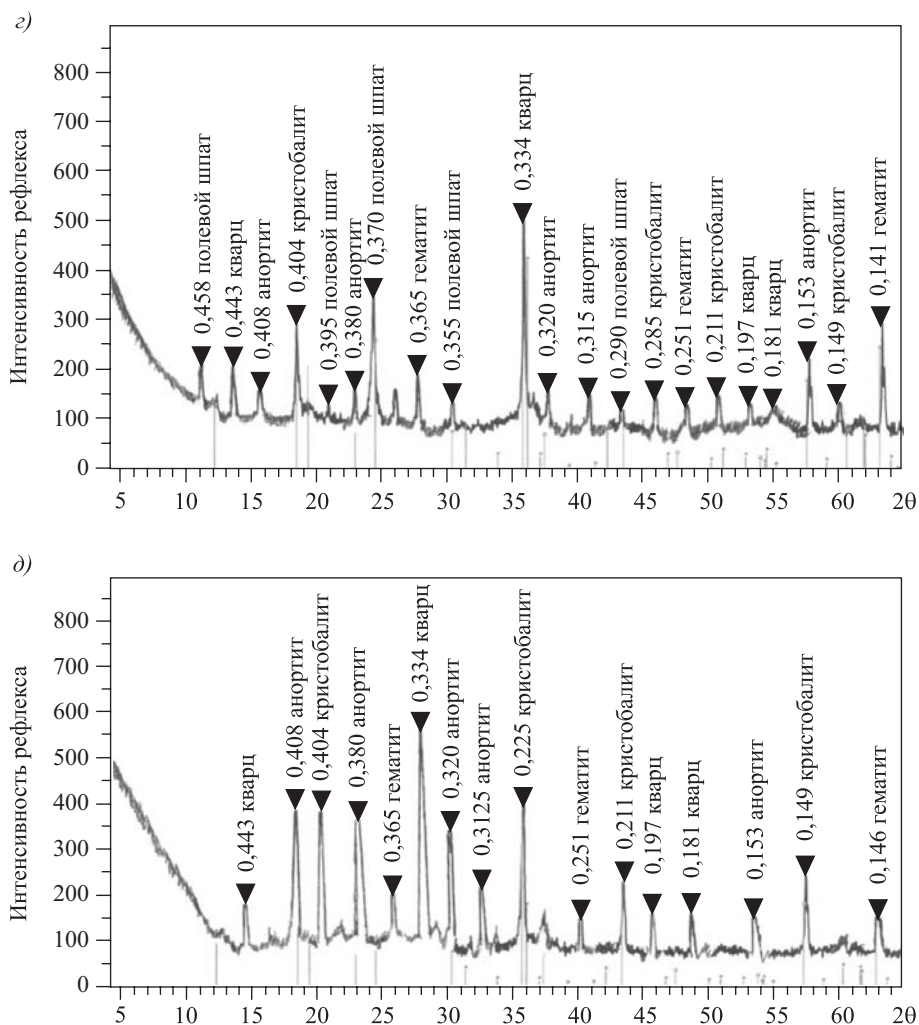


Рис. 1. Рентгенограммы образцов

a – глина месторождения «Сосык»; при температуре обжига, °С: *b* – 950; *в* – 1000; *г* – 1050; *д* – 1100

онных природных глин при обжиге в интервале температур 1000–1100 °С. Рост прочности связывается с образованием анортита.

При повышении температуры обжига до 1000 °С на рентгенограмме образцов из легкоплавкой глины появляются линии кристобалита: 0,149; 0,211 и 0,404 нм, что свидетельствует о начале его кристаллизации (рис. 1, *в*). Образование кристобалита при температуре 1000 °С подтверждается ИК-спектром, который показал характерные для гематита полосы поглощения 618, 1090 и 1110 см⁻¹ (см. рис. 2, *б*).

Рядом исследований [4, 9, 13] установлено, что превращение кремнезема не происходит по схеме Феннера. Первой ступенью превращения кварца всегда является не тридимит, а кристобалит. Образовавшийся за счет кремнезема в стабильной области из тридимита (870–1470 °С) кристобалит отличается от β-кристобалита отсутствием оптической изотропии. Он был назван Д.С. Белянкиным метакристобалитом [14]. И.С. Кайнарский [15] пишет, что в зависимости от температуры образования метакристобалита он может быть

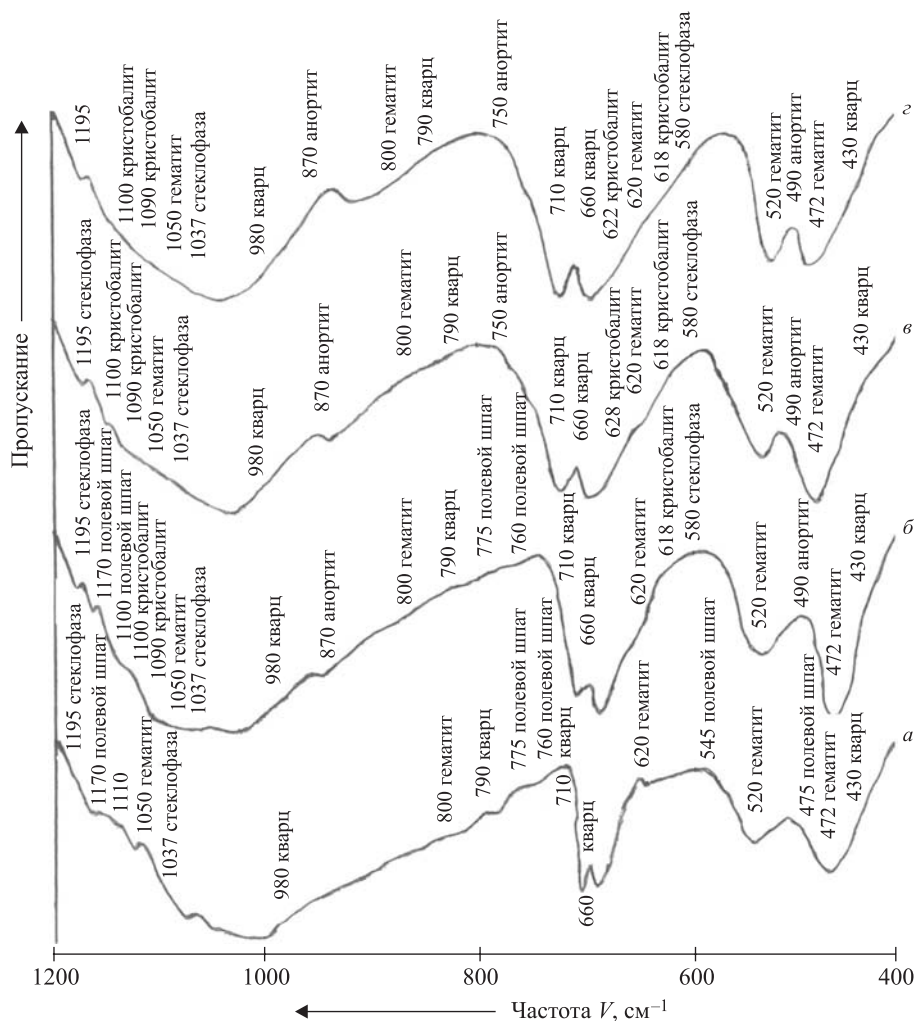


Рис. 2. ИК-спектры поглощения для легкоплавкой глины при температуре обжига, °С
 а – 950; б – 1000; в – 1050; з – 1100

во внешней бесструктурной форме при температуре 1000–1250 °С и в чешуйчатой форме – при 1250–1450 °С. Скорость образования кристобалита как промежуточной фазы значительно больше, чем скорость последующего превращения метастабильного кристобалита в тридимит.

В литературе имеются различные данные о температуре превращения α -кварца в α -кристобалит [10, 11, 13]. И.С. Кайнарский и И.Г. Орлова [15] указывают, что интенсивное превращение кварца в кристобалит начинается при температуре 1000 °С и при длительных выдержках оно усиливается при 1250–1450 °С.

В.Ф. Павловым [13, 16] было установлено, что превращения SiO_2 , содержащегося в глинистом сырье, зависят от химического и минерального составов глин.

Наличие кристобалита снижает механическую прочность изделий, а образование его из аморфного кремнезема, выделившегося в результате муллитизации, обуславливает проницаемость изделий [4–9, 11, 13, 16]. Кри-

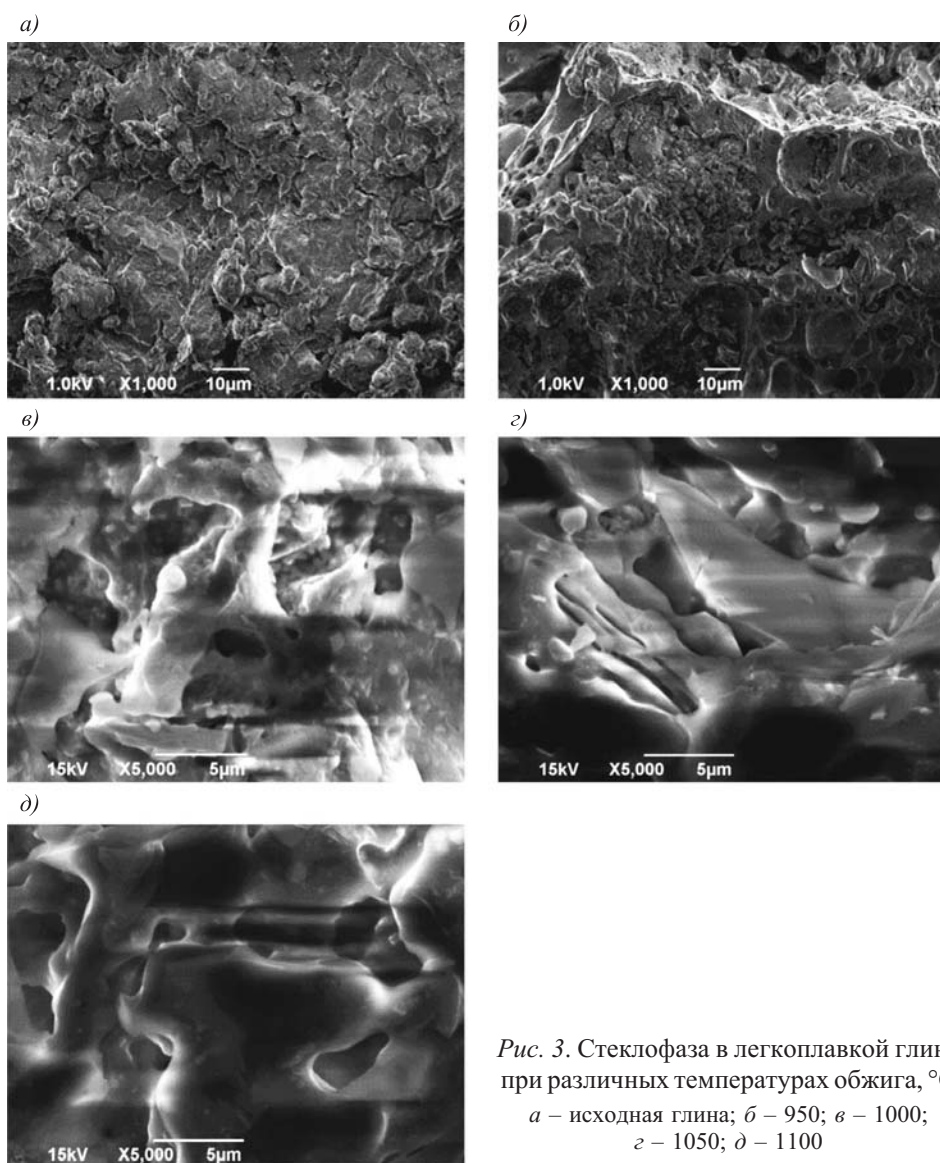


Рис. 3. Стеклофаза в легкоплавкой глине при различных температурах обжига, °С
 а – исходная глина; б – 950; в – 1000;
 г – 1050; д – 1100

сталлизация кристобалита обычно отмечается по трещинам на краях зерен кварца.

Увеличение температуры обжига до 1050 °С к особым изменениям не приводит, за исключением увеличения содержания кристобалита, анортита (увеличение пиков, см. рис. 1, г) и стеклофазы (рис. 3, г). Уменьшение содержания полевого шпата связано с переходом части его в стекло (см. рис. 1, г). Коэффициент преломления у SiO_2 равен 1,475, а у стеклофазы исследуемых образцов из легкоплавкой глины (см. рис. 3, г) 1,57, что свидетельствует об образовании в исследуемом материале щелоче-железистого стекла.

Дальнейшее повышение температуры обжига до 1100 °С приводит к значительному увеличению стекла, которое вызывает искривление изделия. Содержание анортита и кристобалита увеличивается, гематита снижается, а полевой шпат исчезает, вероятно, переходит в стекло (см. рис. 1, д).

Физико-механическая характеристика образцов из легкоплавкой глины месторождения «Сосык»

Огнеупорность, °С	Температура обжига, °С	Общая усадка, %	Водопоглощение, %		Плотность, г/см ³	Предел прочности, МПа	
			на холоде	при кипячении		при сжатии	при изгибе
1170–1180	950	11,3–13,2	8,8–10,5	9,5–13,1	1,90-1,93	9,4	1,5
	1000	11,5–14,0	7,8–9,3	9,4–14,6	–	10,2	1,8
	1050	13,4–15,5	6,6–8,2	4,0–6,6	1,97–2,11	12,8	2,6
	1100	14,2–15,0	2,5–3,4	3,5–4,4	Деформация изделий		
	1150	Оплавление					

В таблице представлены физико-механические характеристики образцов из исследуемой кальцийсодержащей легкоплавкой глины, обожженных в интервале температур 950–1100 °С.

Как видно из таблицы, при температуре обжига 1050 °С образцы по прочности имеют марку М125.

Выводы. 1. Обжиг керамических образцов из кальцийсодержащей легкоплавкой глины в интервале температур 950–1100 °С показал, что при температуре обжига 950 °С отмечается появление жидкой фазы и гематита.

2. При повышении температуры обжига до 1000 °С появляются анортит и кристобалит. Многие исследователи считают, что керамическим материалам придает прочность анортит. Исследования показали, что превращение кварца в кристобалит начинается не при температурах 1250–1450 °С, а при 1000 °С.

3. Увеличение температуры обжига до 1050 °С к особым изменениям не приводит, за исключением повышения содержания кристобалита, стеклофазы и анортита.

4. Дальнейшее увеличение температуры обжига до 1100 °С способствует повышению содержания стеклофазы за счет перехода части железа в жидкую фазу, так как коэффициент преломления стеклофазы возрастает с 1,475 до 1,57.

5. Исследования показали, что при температуре обжига 1050 °С образцы из кальцийсодержащей легкоплавкой глины по прочности имеют марку М125.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Будников П.П., Балкевич В.Л., Бережной А.С., Булавин И.А., Куколев Г.В., Полубояринов Д.Н., Попильский Г.Я. Химическая технология керамики и огнеупоров. М.: Стройиздат, 1972. 553 с.
2. Абдрахимов В.З., Тайжанов С.С. Превращение кремнезема при обжиге некоторых глинистых материалов Восточного Казахстана // Вестн. ВКТУ. 1998. № 2. С. 72–74.
3. Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Влияние ориентации глинистых частиц на усадочные процессы при обжиге лессовидных суглинков // Изв. вузов. Строительство. 2000. № 6. С. 63–66.

4. Сулейменов С.Т. Физико-химические процессы структурообразования в строительных материалах и минеральных отходах промышленности. М.: Манускрипт, 1996. 298 с.
5. Сайбулатов С.Ж. Исследование влияния состава зол на фазовые превращения в золокерамике // Комплексное использование минерального сырья. 1985. № 11. С. 78–81.
6. Кулибаев А.А., Дян А.Н., Шевандо В.В., Калиева Ж.Е., Смаилова Б.О., Идрисов Д.А., Сайбулатов С.Ж. Физико-химические процессы, протекающие при обжиге золошлакокерамических материалов // Строительные материалы. 2009. № 9. С. 54–56.
7. Литвинова Г.И., Пирожкова В.П. Петрография неметаллических включений. М.: Металлургия, 1972. 184 с.
8. Пашенко А.А., Мясников А.А., Мясникова У.А., Старчевская Е.А., Гумен В.С., Круглицкая В.Я., Шевченко Л.А., Городов В.С., Алексеенко Н.В., Сербин В.П. Физическая химия силикатов. М.: Высш. шк., 1986. 368 с.
9. Сайбулатов С.Ж., Сулейменов С.Т., Ралко А.В. Золокерамические стеновые материалы. Алма-Ата: Наука, 1982. 292 с.
10. КукOLEV Г.В. Химия кремния и физическая химия силикатов. М.: Высш. шк., 1965. 364 с.
11. Августиник А.И. Керамика. Л.: Лениздат, 1975. 591 с.
12. Виноградов Б.И. Петрография искусственных пористых заполнителей. М.: Стройиздат, 1972. 135 с.
13. Павлов В.Ф. Особенности превращения кремнезема, содержащегося в глинах // Тр. ин-та НИИстройкерамики. 1973. Вып. 38. С. 3–11.
14. Белянкин Д.С., Иванов Б.В., Лапин В.В. Петрография технического камня. М.: АН СССР, 1952. 582 с.
15. Кайнарский И.С., Орлова Н.Г. Физико-химические основы керамики. М.: Наука, 1956. 128 с.
16. Павлов В.Ф. Физико-химические основы обжига изделий строительной керамики. М.: Стройиздат, 1977. 272 с.

Абдрахимов Владимир Закирович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: 3375892@mail.ru
Самарский государственный экономический университет

Получено после доработки 27.01.2020

Abdrakhimov Vladimir Zakirovich, DSc, Professor; E-mail: 3375892@mail.ru
Samara State University of Economics, Russia

RESEARCH OF PHASE COMPOSITION, PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES AT DIFFERENT FURNACE TEMPERATURES FOR LIGHT-MELTING CLAY WITH CALCIUM

Studies of samples' phase transformations, containing low-melting clay with calcium in the temperature range of 950–1100 °C are presented in the article. The studies have shown that the appearance of hematite and a liquid phase (glass phase) from firing temperature of 950 °C samples of calcium-containing low-melting clay is pointed out. Anorthite and cristobalite appear with an increase in firing temperature to 1000 °C. Many researchers believe that anorthite gives strength to ceramic materials. An increase in the firing temperature to 1050 °C does not lead to special changes, with the exception of an increase

in cristobalite, glass phase, and anorthite content. A further increase in the firing temperature to 1100 °C contributes to an increase in the glass phase content – this occurs due to the transition of iron part to the liquid phase, while the refractive index of the glass phase increases from 1,475 to 1,57. Samples of calcium-containing low-melting clay are M125 in strength at a firing temperature of 1050 °C.

Key words: fusible clay, ceramic brick, calcium oxide, hematite, cristobalite, anorthite, glass phase.

REFERENCES

1. Budnikov P.P., Balkevich V.L., Berezhnoy A.S., Bulavin I.A., Kukolev G.V., Poluboyarinov D.N., Popil'skiy G.Ya. *Khimicheskaya tekhnologiya keramiki i ogneuporov* [Chemical technology of ceramics and refractories]. Moscow, Stroyizdat, 1972. 553 p. (in Russian)
2. Abdrakhimov V.Z., Taizhanov S.S. *Prevrashchenie kremnezema pri obzhige nekotorykh glinistykh materialov Vostochnogo Kazakhstana* [Silica conversion in the process of some clay materials firing in East Kazakhstan]. *Vestnik VKTU* [Vestn. EKTU]. 1998. No. 2. Pp. 72–74. (in Russian)
3. Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z. *Vliyanie orientatsii glinistykh chastits na usadochnye protsessy pri obzhige lessovidnykh suglinkov* [Effect of clay particles orientation on shrinkage processes during loess-like loams firing]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2000. No. 6. Pp. 63–66. (in Russian)
4. Suleimenov S.T. *Fiziko-khimicheskie protsessy strukturoobrazovaniya v stroitel'nykh materialakh i mineral'nykh otkhodakh promyshlennosti* [Physico-chemical processes of structure formation in building materials and mineral waste industry]. Moscow, 1996. 298 p. (in Russian)
5. Saibulатов S.Zh. *Issledovanie vliyaniya sostava zol na fazovye prevrashcheniya v zolokeramike* [Investigation of ash composition effect on phase transformations in gold-ceramic]. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya* [Integrated use of mineral raw materials]. 1985. No. 11. Pp. 78–81. (in Russian)
6. Kulibayev A.A., Dyan A.N., Shevando V.V., Kaliyeva Zh.E., Smailova B.O., Idrisov D.A., Saibulатов S.Zh. *Fiziko-khimicheskie protsessy, protekayushchie pri obzhige zoloshlakokeramicheskikh materialov* [Physico-chemical processes that occur during the firing of ash and slag-ceramic materials]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials]. 2009. No. 9. Pp. 54–56. (in Russian)
7. Litvinova G.I., Pirozhkova V.P. *Petrografiya nemetallicheskih vklyucheniy* [Petrography of non-metallic inclusions]. Moscow, 1972. 184 p. (in Russian)
8. Pashchenko A.A., Myasnikov A.A., Myasnikova U.A., Starchevskaya E.A., Gumen V.S., Kruglitskaya V.Ya., Shevchenko L.A., Gorodov V.S., Alekseenko N.V., Serbin V.P. *Fizicheskaya khimiya silikatov* [Physical chemistry of silicates]. Moscow, 1986. 368 p. (in Russian)
9. Saibulатов C.Zh., Suleimenov S.T., Raiko A.V. *Zolokeramicheskie stenovye materialy* [Gold-ceramic wall materials]. Alma-Ata: Nauka, 1982. 292 p. (in Russian)
10. Kukolev G.V. *Khimiya kremniya i fizicheskaya khimiya silikatov* [Silicon chemistry and physical chemistry of silicates]. Moscow, 1965. 364 p. (in Russian)
11. Augustinik A.I. *Keramika* [Ceramics]. Leningrad, 1975. 591 p. (in Russian)
12. Vinogradov B.I. *Petrografiya iskusstvennykh poristykh zapolniteley* [Petrography of artificial porous aggregates]. Moscow, 1972. 135 p. (in Russian)

13. P a v l o v V.F. Osobennosti prevrashcheniya kremnezema, soderzhashchegosya v glinakh [Features of the conversion of silica contained in clays]. Tr. in-ta NIIsstroykeramiki [Tr. Institute of Institute of Ceramics]. 1973. Vol. 38. Pp. 3–11. (in Russian)
 14. B e l y a n k i n D.S., I v a n o v B.V., L a p i n V.V. Petrografiya tekhnicheskogo kamnya [Petrography of a technical stone]. Moscow, 1952. 582 p. (in Russian)
 15. K a i n a r s k i y I.S., O r l o v a N.G. Fiziko-khimicheskie osnovy keramiki [Physico-chemical foundations of ceramics]. Moscow, 1956. 128 p. (in Russian)
 16. P a v l o v V.F. Fiziko-khimicheskie osnovy obzhiga izdeliy stroitel'noy keramiki [Physico-chemical basis of firing products of building ceramics]. Moscow, Stroyizdat, 1977. 272 p. (in Russian)
-