

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ОТРАБОТАННОЙ КВАРЦИТОВОЙ ФУТЕРОВКИ ИНДУКЦИОННОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ РЕНТГЕНОВСКИМИ МЕТОДАМИ

Приведены результаты исследования фазового состава отработанной кварцевой футеровки индукционной тигельной печи промышленной частоты методами рентгенофазового анализа. В состав футеровки входили кварцит, борная кислота и электрокорунд. Выявлены зоны футеровки и их фазовый состав. Установлены изменения параметров кристаллической решетки фазовых составляющих каждой зоны футеровки.

Ключевые слова: индукционная тигельная печь промышленной частоты (ИЧТ), рентгенофазовый анализ (РФА), кварцит, слой футеровки.

Активное использование индукционной тигельной печи промышленной частоты (ИЧТ) для выплавки чугуна в СССР началось в 70-е годы прошлого столетия. В те времена чугун, в соответствии с требованиями разработчиков этих печей, получали из металлозавалки, состоящей из литейных, передельных чугунов, возврата собственного производства, жидкого остатка в печи (1/3 от ее вместимости), чугунного лома и стального лома, доля которого составляла 10–15 %. Температура получения расплава в печи ограничивалась 1450 °С — при такой металлозавалке она выше и не требовалась. Кроме того, это соответствовало рекомендациям изготовителя печи.

Для футеровки индукционных печей (ИЧТ6–ИЧТ10) на таких заводах, как ГАЗ, ВАЗ и ЗИЛ, применяли первоуральский кварцит, который предварительно прокаливали при 800 °С в течение 6–8 ч для сушки и повышения термической стабильности. Количество влаги допускалось не более 0,3 %. Для этого в проектах литейных цехов предприятий предусматривалось оборудование, необходимое для выполнения этой технологической операции. В дальнейшем технология прокалики, необходимая для сушки кварцита, предусматривалась при проектировании новых литейных цехов. Стойкость такой футеровки составляла 250–350 плавов. Позже появилось понятие «синтетический чугун» — это чугун, выплавленный на металлозавалке, в

которой содержание стальных отходов составляло уже 30 %. Стойкость футеровки при этом снизилась, так как пришлось работать при температурах до 1550 °С.

В России чугун на общепринятой завалке получить было невозможно, поскольку исчез чугунный лом; при этом производство литейных и передельных чугунов сократилось и резко подорожало, в том числе за счет транспортных перевозок. По этой причине на многих производствах доля стального лома в металлозавалке составляла 70–80 %. Соответственно повысился температурный режим плавки, и стойкость футеровки начала значительно снижаться.

Стойкость футеровки повышается при введении в ее состав электрокорунда, который увеличивает сопротивляемость футеровки истирающему воздействию жидкого расплава при работе на металлозавалке и при повышенных температурных режимах. Кроме того, на свойства футеровки влияет технология сушки кварцита. Применяемая технология использования кварцита в составе футеровки была основана на том, что после сушки и охлаждения кварцита никаких изменений в нем не происходит. В дальнейшем в процессе спекания (подъем температуры по специальному графику, который зависит от вместимости печи) и выдержки при 1450–1470 °С в кварците происходят фазовые изменения; в полуспеченной зоне он превращается в тридимит, в спеченной — в кристобалит (рис. 1). Для кварцевой футеровки фазовые изменения, в результате которых кварцит превращается в тридимит, благоприятны, так как он может обеспечивать стабильный объем футеровки при большом числе теплосмен. В то



В. А. Кукарцев

E-mail: sarabernar777@mail.ru

же время кристобалит позволяет снизить напряжения в футеровке и способствует уменьшению ее роста, особенно при высоких температурах [1].

Однако проведенный анализ режимов проковки кварцита показал, что в кварците, прокованном при 800 °С, а затем охлажденном до температуры окружающей среды, изменения все-таки происходят [2]. Размеры ячейки кристаллической решетки не меняются, однако наблюдаются сдвиг угла межплоскостных расстояний и изменение размеров межплоскостных расстояний. В дальнейшем эти изменения приводят к тому, что после спекания и дальнейшей эксплуатации футеровки кварцит приобретает фазовый состав, соответствующий тридимиту. В кварците, высушенном при 200 °С, таких изменений не происходит, и после спекания и дальнейшей эксплуатации футеровки он приобретает фазовый состав, соответствующий кристобалиту. Эти данные были получены при исследовании чистого кварцита, а не футеровки в целом.

Цель настоящей работы — исследование фазовых превращений, произошедших в различных слоях футеровки после ее эксплуатации. Для этого был отобран образец футеровки, который состоял из трех зон (слоев): сыпучей, полуспеченной и спеченной. В состав футеровки кроме кварцита и борной кислоты входил электрокорунд. Исследования проводили на рентгеновском дифрактометре BRUKERD8 ADVANCE с фокусировкой по Брэггу–Брентано. Для проведения температурных экспериментов на дифрактометре применяли высокотемпературную камеру НТК 16. Использовали рентгеновскую трубку с медным анодом, регистрация дифракционного спектра осуществлялась с применением высокоскоростного позиционно-чувствительного детектора VANTEC-1. Съемку про-

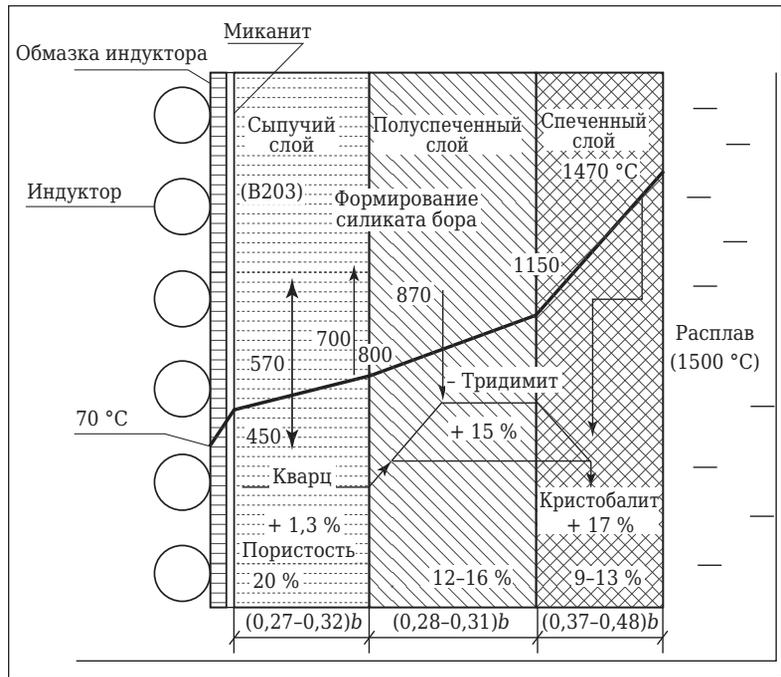


Рис. 1. Оптимальное (по толщине) расположение слоев и их фазовый состав в стенке кварцитового тигля; *b* — толщина футеровки

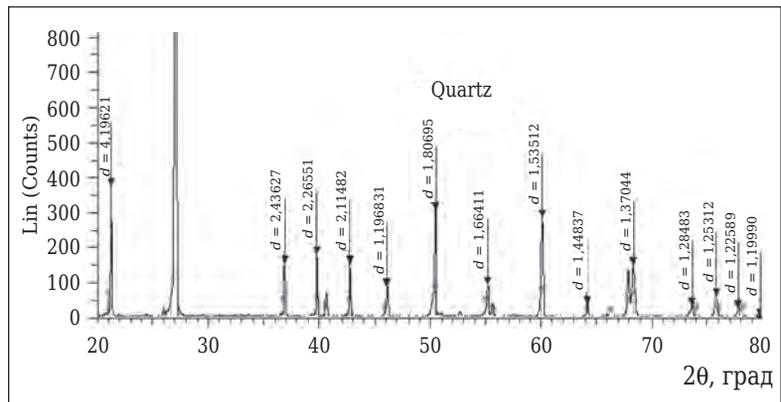


Рис. 2. Дифрактограмма сыпучего слоя футеровки, снятая при 25 °С: ■ — кварцит

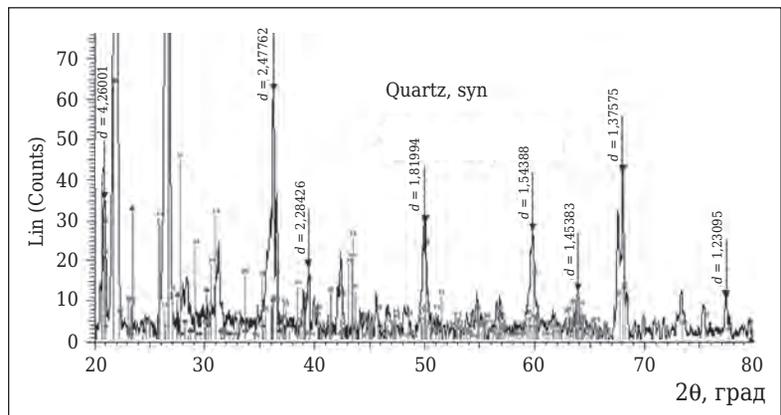


Рис. 3. Дифрактограмма полуспеченного слоя футеровки, снятая при 25 °С: ■ — кварцит; ● — тридимит; ► — силикат Dumortierite ($\text{Si}_{2,98}\text{Al}_{6,81}\text{B}_{96}\text{O}_{18}$)

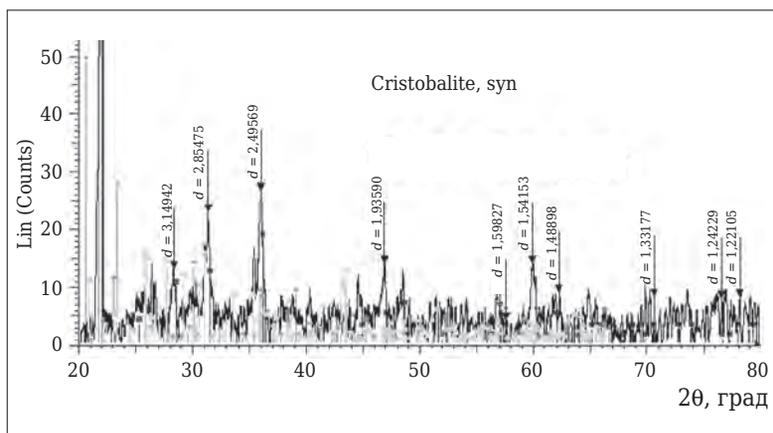


Рис. 4. Дифрактограмма спеченного слоя футеровки, снятая при 25 °С: ◆ — тридимит; ■ — кристобалит; ● — силикат Dumortierite ($\text{Si}_{2,98}\text{Al}_{6,81}\text{B}_{96}\text{O}_{18}$)

водили на углах сканирования $2\theta = 10 \div 90^\circ$ с шагом $0,007^\circ$.

На дифрактограмме сыпучего слоя было обнаружено, что в кварците никаких изменений не произошло. Кристаллическая решетка — гексагональная с $a = b = 4,90300 \text{ \AA}$ и $c = 5,39300 \text{ \AA}$, а усредненный размер межплоскостного расстояния $d_{\text{ср}} = 1,83124 \text{ \AA}$ (рис. 2). Дифрактограмма полуспеченного слоя показала следующее: кроме чистого кварцита появилась фаза тридимита и силиката, образовавшегося при соединении его с бором и алюминием (рис. 3). Из всей условной площади сформировавшихся фаз кварцит составляет 39 %, тридимит 38 %, силикат 23 %. Кварцит имеет гексагональную решетку с $a = b = 4,91344 \text{ \AA}$ и $c = 5,40524 \text{ \AA}$, $d_{\text{ср}} = 1,73088 \text{ \AA}$, т. е. размеры ячейки увеличились примерно на 2 %, а объем примерно на 0,65 %. Тридимит имеет гексагональную решетку с $a = b = 9,94000 \text{ \AA}$, $c = 40,92000 \text{ \AA}$ и $d_{\text{ср}} = 4,16195 \text{ \AA}$. Силикат находится в виде орторомбической решетки с $a = 11,80000 \text{ \AA}$, $b = 20,22190 \text{ \AA}$, $c = 4,69900 \text{ \AA}$ и $d_{\text{ср}} = 1,96521 \text{ \AA}$ [3]. Для сформировавшихся фаз полуспеченного слоя $d_{\text{ср}} = 2,26396 \text{ \AA}$. За счет того, что 61 % кварцита находится в виде новых

Библиографический список

1. **Платонов, Б. П.** Индукционные печи для плавки чугуна / Б. П. Платонов, А. Д. Акименко, С. М. Багуцкая [и др.]. — М. : Машиностроение, 1976. — 176 с.
2. **Кукарцев, В. А.** Исследование рентгеновскими методами влияния температуры на межплоскостные расстояния кристаллической решетки первоуральского кварцита, используемого для футеровки индукционных печей / В. А. Кукарцев, А. К. Абкарян // Новые огнеупоры. — 2013. — № 10. — С. 44–46.

Kukartsev, V. A. Study by X-Ray methods of the effect of temperature on crystal lattice interplanar

фазовых составляющих, а именно в виде тридимита и силиката, плотность полуспеченного слоя увеличилась на 23 %. По этой причине этот слой хорошо защищает футеровку от проникновения по микротрещинам жидкого металла.

Дифрактограмма спеченного слоя футеровки показала (рис. 4), что он состоит из аморфной составляющей, включающей не сформировавшиеся фазы тридимита, силиката ($\text{Si}_{2,98}\text{Al}_{6,81}\text{B}_{96}\text{O}_{18}$), а также кристобалита. Кристобалит имеет тетрагональную решетку с $a = b = 4,97100 \text{ \AA}$, $c = 6,91800 \text{ \AA}$, $d_{\text{ср}} = 2,04865 \text{ \AA}$ и составляет условную площадь $8,023 \text{ \AA}^2$, что соответствует примерно 70 % всего спеченного слоя футеровки (рис. 4). Так как $d_{\text{ср}}$ спеченного слоя по сравнению с полуспеченным уменьшился за счет присутствия только одной хорошо окристаллизованной и однородной фазы в виде кристобалита, плотность всего слоя снизилась на 10 %. Это позволяет сделать вывод о том, что в нем появились микротрещины, в которые может проникать жидкий расплав.

Таким образом, установлено, что кварцит, подвергнутый сушке при 200°C , позволяет получить футеровку, которая после эксплуатации содержит в полуспеченном слое тридимит и силикат, а в рабочем слое — кристобалит. Дальнейшая эксплуатация такой футеровки становится опасной из-за уменьшения ее плотности и появления микротрещин. Применение электрокорунда приводит к образованию силиката в виде соединения $\text{Si}_{2,98}\text{Al}_{6,81}\text{B}_{96}\text{O}_{18}$, имеющего более высокую плотность, так как его величина $d_{\text{ср}}$ на 12 % больше, чем у кварцита. Кроме того, электрокорунд имеет более высокую температуру плавления, поэтому повышает огнеупорность футеровки и ее устойчивость к истирающему воздействию жидкого расплава.

distances of pervoural'sk quartzite used for induction furnace lining / V. A. Kukartsev, A. K. Abkaryan // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 413–415.

3. **Бетехтин, А. Г.** Курс минералогии : учебное пособие / А. Г. Бетехтин. — М. : КДУ, 2007. ■

Получено 08.06.14

© В. А. Кукарцев, А. К. Абкарян, В. Г. Бабкин, 2014 г.