К. т. н. **Р. В. Зубащенко** (✉)
ЗАО «ПКФ «НК», г. Старый Оскол, Россия

УДК 666.762.11:66.041.55

ФУТЕРОВКА МАЛОГАБАРИТНОЙ ТУННЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫМИ ИЗДЕЛИЯМИ НА ОСНОВЕ АЛЮМОСИЛИКАТНОГО ВОЛОКНА

Показаны структура и свойства разработанных высокоглиноземистых изделий на основе алюмосиликатного волокна. Представлены данные по промышленному применению изделий в рабочем слое футеровки малогабаритной туннельной печи.

Ключевые слова: *туннельная печь, футеровка, теплоизоляционные изделия, волокнистые материалы, кинетика спекания, огнеупоры.*

В настоящее время достаточно широко в футеровке промышленных тепловых агрегатов используются теплоизоляционные материалы. Очевидно, что применение теплоизоляционных изделий позволяет существенно снизить расход топлива и электроэнергии. Ассортимент изготавливаемых теплоизоляционных изделий делят на два типа [1]:

- изделия для защищенной изоляции;
- изделия для открытой изоляции.

Защищенная изоляция не подвергается разрушающему действию высокой рабочей температуры печи, шлаков, пыли, газов и др. В кладке печи она выполняет лишь роль теплоизолятора. Открытая изоляция является теплоизолятором, и в то же время противостоит действию всех названных агрессивных факторов.

Для создания пористой структуры в теплоизоляционных материалах применяют различные методы. Наибольшее применение нашли метод выгорающих добавок и пенокерамический [2, 3]. Известны и другие методы, в частности с применением волокнистых материалов. Такие изделия применяют в качестве теплоизоляционного материала и в качестве рабочего (незащищенного) слоя футеровки, не подвергающейся действию расплавов, агрессивных газовых сред, истиранию, механических ударов и газовых потоков со скоростью более 10 м/с [4].

В настоящее время в огнеупорной промышленности широкое распространение получили туннельные печи. Традиционные волокнистые материалы не отвечают требованиям, предъявляемым к футеровке высокотемпературных печей данной конструкции. Известно, что кристаллизация, протекающая в стеклообразных волокнах при нагревании, ограничивает температурный интервал применения изделий на их основе до 1150–1300 °С. Появляющиеся при нагреве микрокристаллические образования, соизмеримые с диаметром волокон, вызывают резкое снижение их прочности, волокна становятся хрупкими и дают усадку [2]. В процессе эксплуатации при повышенных температурах это приводит к разрушению теплоизоляционного слоя и, как следствие, к нежелательным тепловым потерям.

В ЗАО «ПКФ «НК» освоен выпуск изделий МЛЛ-1,35, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к футеровке туннельной печи. Изделия на неорганической связке изготовлены из высокоглиноземистого легковесного заполнителя, сцепленного круглыми, тонкими, извилистыми алюмосиликатными волокнами, контактирующими в отдельных точках между собой и с зернами заполнителя. Основными кристаллическими фазами изделия являются корунд, муллит и α-кристобалит.

Физико-химические свойства теплоизоляционных изделий МЛЛ-1,35:

Массовая доля, %:
- Al_2O_3, не менее.....63
- Fe_2O_3, не более.....1,0

Кажущаяся плотность, г/см^3, не более.....1,35
Остаточные изменения размеров при нагреве до 1500 °С, %, не более.....1,0
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее.....9,0
Теплопроводность при средней температуре 650±25 °С, Вт/(м·К), не более.....0,45
Максимальная температура применения, °С.....1500

Известно, что волокна могут образовывать с неорганической связкой композиции двух видов [5]: беспористые, в которых волокна армируют неорганическую матрицу, и высокопористые, в которых волокна упрочнены неорганической связкой, незначительно снижающей пористость и тепловое сопротивление волокнистого материала.

✉
Р. В. Зубащенко
E-mail: zroman7777@mail.ru

В освоенной технологии реализован второй вариант (рис. 1). Очевидно, что эксплуатационные свойства изделий во всем диапазоне пористости определяются величиной контактной поверхности. При спекании поверхность контакта заполнителя, волокон и неорганической связки возрастает. Исходя из этого, была изучена кинетика процесса спекания полученного композиционного материала.

Протекание спекания описывалось следующим уравнением [6]:

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot (1-\alpha)^n, \quad (1)$$

где α — параметр, характеризующий степень спекания материала Y/Y_{max}; Y — текущая линейная усадка образца, Y_{max} — максимально возможная усадка образца; τ — время; k_0 — предэкспоненциальный множитель; T — температура; E — энергия активации процесса; R — универсальная газовая постоянная; n — показатель степени.

На основании данных об усадке изделий, полученных при двух скоростях нагрева, были построены зависимости величины относительной усадки от температуры $\alpha = f(T)$ для изделий кажущейся плотности от 1,3 до 1,7 г/см³. Определение составов с указанным диапазоном кажущейся плотности проводили с использованием симплекс-решетчатого метода планирования эксперимента (планы Шеффе неполного третьего порядка).

Проведя графическое дифференцирование по времени изменения величины относительной усадки α, определили изменение скорости процесса спекания $d\alpha/d\tau = f(\tau)$.

Энергию активации процесса определяли исходя из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \omega_1 = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_1}\right) \cdot (1-\alpha)^n; \\ \omega_2 = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_2}\right) \cdot (1-\alpha)^n, \end{cases} \quad (2)$$

где ω_1 и ω_2 — скорости исследуемого процесса.

В данной системе k_0, E и $(1-\alpha)^n$ для обоих уравнений равны (α = idem). Поделив первое уравнение на второе и логарифмируя полученное уравнение, определили энергию активации

$$E = \frac{R \cdot \ln(\omega_1/\omega_2)}{1/T_2 - 1/T_1}. \quad (3)$$

С этой целью по данным зависимостей $\alpha = f(T)$, $\tau = f(T)$ и $d\alpha/d\tau = f(\tau)$ в неизотермических условиях для различных значений ω были определены температуры и соответствующие им скорости

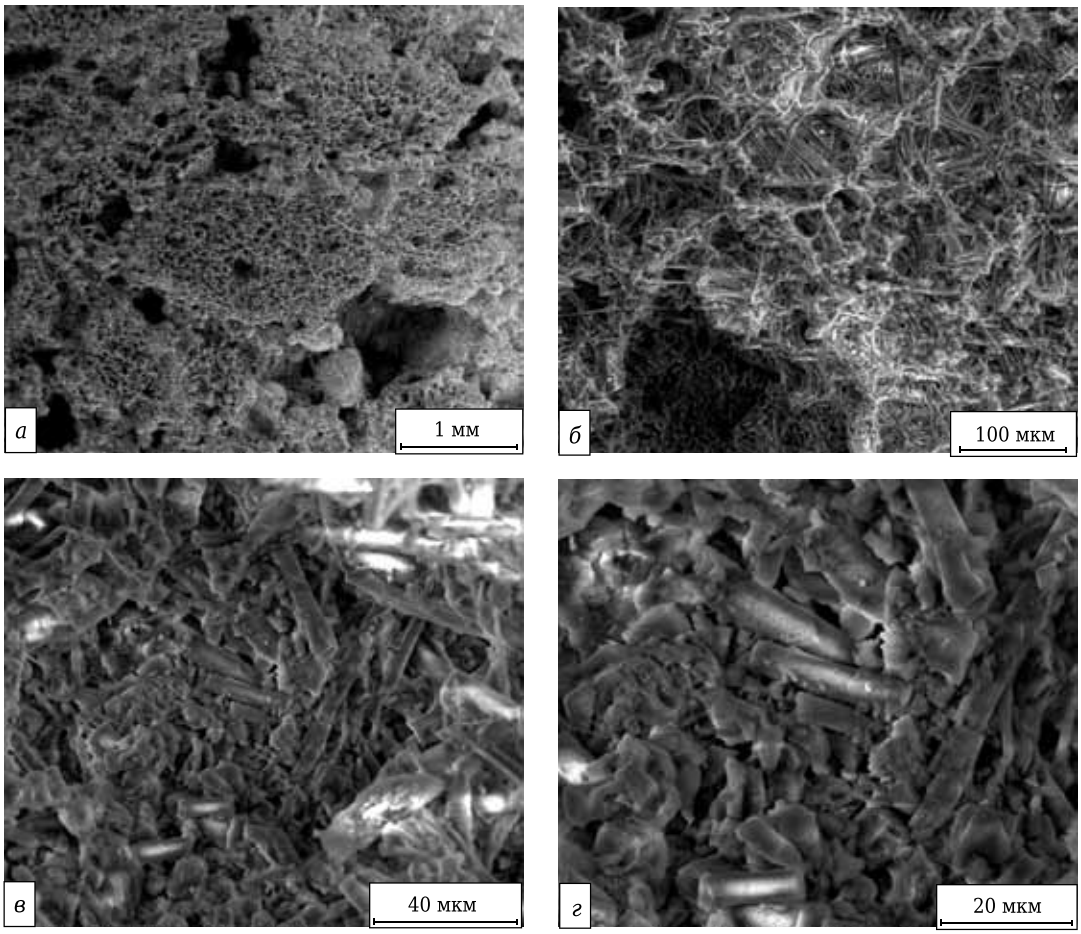

Рис. 1. Микроструктура изделий МЛЛ-1,35 при различном увеличении: *а* — ×70; *б* — ×600; *в* — ×2040; *г* — ×3790

процесса спекания, на основании которых проведено вычисление значений энергии активации.

Для нахождения предэкспоненциального множителя k_0 и показателя степени n кинетического уравнения уравнение (1) преобразовали к следующему виду:

$$\ln\left[\omega \cdot \exp\left(\frac{E}{RT}\right)\right] = \ln k_0 + n \cdot \ln(1 - \alpha). \quad (4)$$

Для двух фиксированных значений ω_1 и ω_2, которым соответствуют T_1 и T_2, а также α_1 и α_2, составили логарифмическую систему уравнений:

$$\begin{cases} \ln\left[\omega_1 \cdot \exp\left(\frac{E}{RT_1}\right)\right] = \ln k_0 + n \cdot \ln(1 - \alpha_1); \\ \ln\left[\omega_2 \cdot \exp\left(\frac{E}{RT_2}\right)\right] = \ln k_0 + n \cdot \ln(1 - \alpha_2). \end{cases} \quad (5)$$

На основании рассчитанных данных были построены графики зависимости $\ln[\omega \cdot \exp(E/RT)]$ от $\ln(1 - \alpha)$. На аппроксимированной прямой были выбраны две точки, конкретные координаты которых подставляли в систему уравнений (5). Решив полученные системы уравнений, определили значения k_0 и n.

Решение кинетических уравнений позволило установить влияние соотношения компонентов шихты на энергию активации и температуру спекания изделий и определить область составов, в наибольшей степени удовлетворяющих необходимым требованиям.

Разработанные изделия были установлены в рабочем слое зоны обжига высокотемпературной малогабаритной туннельной печи ЗАО «ПКФ «НК», работающей при максимальной температуре 1480 °С (рис. 2). Печь используется преимущественно для обжига теплоизоляционных алюмосиликатных изделий [7, 8]. До установки волокнистых изделий МЛЛ-1,35 рабочий слой футеровки выполняли из корундовых изделий марки КСП (ТУ1595-008-00188162–96).

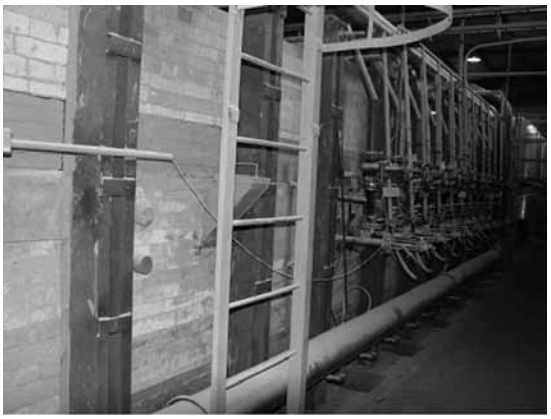

Рис. 2. Высокотемпературная туннельная печь ЗАО «ПКФ «НК»

Теплотехнический расчет показал, что удельный тепловой поток после замены плотных корундовых изделий на изделия МЛЛ-1,35 снизился примерно на 20 %. Туннельная печь после изменения структуры футеровки эксплуатируется с 2012 г. Замечаний при работе печи в течение всего срока эксплуатации не было. Таким образом, результаты проведенной работы позволяют рекомендовать освоенные изделия для рабочего (незащищенного) слоя футеровки подобных тепловых агрегатов.

Библиографический список

1. ***Мамыкин, П. С.*** Огнеупорные изделия (свойства, технология, изготовление и служба в промышленных печах) / *П. С. Мамыкин*. — Свердловск. : Металлургиздат, 1955. — 487 с.

2. ***Алленштейн, Й.*** Огнеупорные материалы. Структура, свойства, испытания : справочник / *Й. Алленштейн* и др. ; под ред. Г. Роучка, Х. Вутнау ; пер. с нем. — М. : Интермет Инжиниринг, 2010. — 392 с.

3. ***Стрелов, К. К.*** Технология огнеупоров / *К. К. Стрелов, И. Д. Кащеев, П. С. Мамыкин*. — М. : Металлургия, 1988. — 528 с.

4. ГОСТ 23619–79. Материалы и изделия огнеупорные теплоизоляционные муллитокремнеземистые стекловолокнистые. Технические условия.

5. ***Кац, С. М.*** Высокотемпературные теплоизоляционные материалы / *С. М. Кац*. — М. : Металлургия, 1981. — 274 с.

6. ***Гропянов, В. М.*** Неизотермический метод исследований кинетики спекания материалов, контролируемой двумя механизмами / *В. М. Гропянов, В. Г. Аббакумов* // Порошковая металлургия. — 1976. — № 7. — С. 36–41.

7. ***Зубащенко, Р. В.*** Алюмосиликатные энерго- и ресурсосберегающие огнеупорные изделия / *Р. В. Зубащенко* // Новые огнеупоры. — 2011. — № 3. — С. 147–149.

Zubashchenko, R. V. Aluminosilicate energy- and resource-saving refractory articles / *R. V. Zubashchenko* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2011. — Vol. 52, № 2. — P. 143–145.

8. ***Зубащенко, Р. В.*** Теплоизоляционные изделия ЗАО «ПКФ «НК» / *Р. В. Зубащенко* // Новые огнеупоры. — 2013. — № 7. — С. 19–21. ■

Получено 29.08.16
© Р. В. Зубащенко, 2017 г.