

носит экстремальный характер.

При изменении содержания отвердителя ниже оптимального, молекулярная структура сшитого полимера имеет неполностью прореагировавшие функциональные группы, вследствие чего снижается частота поперечных связей в полимере, что доказывается снижением теплостойкости и прочности. Избыточное содержание отвердителя также снижает теплостойкость вследствие пластифицирующего действия не вступившего в реакцию полимеризации ангидрида, хотя механические свойства остаются на высоком уровне.

Реологические характеристики связующего обеспечивают качественную пропитку армирующего волокна в течение не менее шести часов при технологической переработке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рысин Л. Комплексный подход к конструированию оптических кабелей // Кабели и провода. – 1998. – № 3 (254). – С. 3–6.
2. Пешков И.Б. Мировая кабельная промышленность: переход в новый век // Кабели и провода. – 2001. – № 4 (269). – С. 3–6.
3. ГОСТ Р 52042-2003. Крепи анкерные. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 11 с
4. 3. ГОСТ Р 51161-2003. Штанги насосные, устьевые штоки и муфты к ним. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 48 с
5. Устинов В.П., Казарновский В.С., Тихомиров В.М. и др. Экспериментальные исследования физико-механических свойств СПА и гибких связей // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2002. – Вып. 4. – С. 105–114.
6. Андрейчук В.И., Дубинин В.А., Ладыгин Ю.И., Луговой А.Н., Савин В.Ф. Результаты мониторинга ограждающих трехслойных утепленных стен с гибкими связями в девятиэтажном каменном доме // Проектирование и строительство в Сибири. – 2004. – № 6. – С. 29–32.

7. Применение полимерных изоляторов в устройствах контактной сети электрифицированных железных дорог / Под общ. ред. Горошкова Ю.И. – М.: Транспорт, 1987. – 48 с.

8. Изоляция установок высокого напряжения / Под общ. ред. Кучинского Г.С. – М.: Энергоиздат, 1987. – 368 с.

9. Волков Ю.П., Луговой А.Н., Савин В.Ф. Результаты сравнительных испытаний гибких связей из стеклопластика и базальтопластика // Проектирование и строительство в Сибири. – 2004. – № 3. – С. 16–19.

10. Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции. – М.: Химия, 1982. – 230 с.

Татаринцева Ольга Сергеевна, д-р техн. наук, доцент, зав. лабораторией материаловедения минерального сырья Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), labmineral@mail.ru, 659322, Алтайский край, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, 659322, Алтайский край, г. Бийск, ул. Декабристов, д. 10/1, кв. 36, тел. (3854) 30-58-82.

Самойленко Вячеслав Владимирович, старший научный сотрудник лаборатории материаловедения минерального сырья Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), labmineral@mail.ru, 659322, Алтайский край, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, раб. тел. (3854) 30-59-06.

Зимин Дмитрий Евгеньевич, научный сотрудник лаборатории материаловедения минерального сырья Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), labmineral@mail.ru, 659322, Алтайский край, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, тел. (3854) 30-59-06.

УДК 510.67:621.365.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПЛАВЛЕНИЯ БАЗАЛЬТА ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

О.С. Татаринцева, А.В. Литвинов

Проведено численное исследование влияния входных параметров работы высокочастотной установки по выпуску базальтового волокна на выходные, от которых зависят производительность и качество продукции. Получены зависимости, связывающие температуру расплава с количеством дозируемого сырья, температурой охлаждающей воды и мощностью теплового потока, расходуемого на нагрев и плавление базальтовой шихты.

Ключевые слова: математическое моделирование, базальт, плавление, индукционный тигель, токи высокой частоты.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее эффективным способом получения расплава из горных пород является индукционный, обеспечивающий достаточно высокую производительность, возможность автоматизации и приемлемый уровень сложности производства.

Известно, что тугоплавкие оксиды при плавлении становятся электропроводными. Базальтовые породы в основном состоят из оксидов, поэтому они также обладают ионной проводимостью в пределах 10^{-2} – 10^{-3} Ом·м при плавлении, что позволяет использовать для их нагрева и плавления электроустановки с частотами в диапазоне 10^5 – 10^7 Гц. Нагревание и расплавление силикатов сопровождается понижением вязкости, поверхностного натяжения и электрического сопротивления, в результате чего расплав становится электропроводным. При индуцировании токов высокой частоты в нем возникают быстро меняющиеся электрические токи, обеспечивающие дальнейшее его разогревание и гомогенизацию.

Работа высокочастотной индукционной печи основана на поглощении энергии электромагнитного поля расплавом, которое происходит в определенном объеме перегретого пограничного слоя, служащего поставщиком тепловой энергии для всего объема расплава, где за счет конвекционных сил он перемешивается. Для сохранения расплава используется тигель, установленный внутри катушки-индуктора, подключенной к нагрузочному контуру генератора.

Процесс плавления подвергается как внешним, так и внутренним возмущающим воздействиям. Главная задача в этих условиях – стабилизация температуры и расхода расплава на заданном уровне корректировкой расхода базальтовой шихты с использованием ЭВМ или цифровых регуляторов. Для управления технологическим процессом необходимо установление зависимостей между его входными и выходными параметрами, которое

возможно посредством математического моделирования.

ПОСТРОЕНИЕ И ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

При построении математической модели плавления рассматривалось как физический тепловой процесс без учета возможных физико-химических явлений, протекающих в индукционном тигле (рисунок 1).

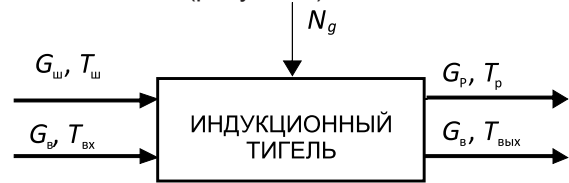


Рисунок 1 – Общая структурная схема процесса плавления базальта

Здесь $T_{ш}^0$ – температура дозируемой шихты, К; G_p , $G_в$ – расход расплава и охлаждающей воды, кг/с; $T_{вх}$, $T_{вых}$ – температура охлаждающей воды на входе и выходе, К; N_g – мощность высокочастотного генератора, подводимая к индуктору, Вт.

Мощность генератора можно рассматривать как мощность теплового потока, подводимого к тиглю. Она расходуется на плавление дозируемой шихты с разогревом расплава; нагрев охлаждающей воды; потери, связанные с лучистым излучением с поверхности расплава в тигле; потери с поверхности расплава за счет конвективного теплообмена с окружающей средой; потери в самом индукторе [1].

Введя обозначения: γ_p , $\gamma_в$ – объемы расплава и охлаждающей воды в тигле, м³; γ_p , $\gamma_в$ – удельные плотности расплава и охлаждающей воды, кг/м³; C_p , $C_{ш}$, $C_в$ – удельные теплоемкости расплава, шихты и охлаждающей воды, Дж/(кг·К), и предполагая равенство расходов шихты и расплава (отсутствие потерь), запишем уравнения энергетического баланса:

$$V_p \gamma_p C_p \frac{dT_p}{dt} = N_g - G_{ш} (C_p T_p - C_{ш} T_{ш}^0) - K_n (T_p - T_{вх}) - \alpha (T_p - T_{oc}); \tag{1}$$

$$V_в \gamma_в C_в \frac{dT_{вх}}{dt} = K_n (T_p - T_{вх}) - G_в (T_{вх} - T_{вх}^0) C_в \tag{2}$$

Здесь α – суммарный коэффициент лучистой и конвективной теплоотдачи, кВт/К; K_n – коэффициент теплоотдачи охлаждающей воды, кВт/К; t – время, с; T_{oc} – температура окружающей среды, К.

Система этих уравнений представляет собой математическую модель процесса плавления базальтовой шихты в холодном тигле, рассматриваемом как объект управления ре-

жимными параметрами. При установившемся состоянии процесса, когда все параметры можно считать постоянными, уравнения (1), (2) принимают следующий вид:

$$N_g^0 - G_{ш}^0 (C_p T_p^0 - C_{ш} T_{ш}^0) - K_n (T_p^0 - T_{вых}^0) - \alpha (T_p^0 - T_{oc}^0) = 0 ; \quad (3)$$

$$K_n (T_p^0 - T_{вых}^0) - G_B (T_{вых}^0 - T_{вх}^0) C_B = 0 \quad (4)$$

Верхние индексы означают, что соответствующие значения входящих в формулы величин относятся к условиям стационарности процесса.

Из уравнения (3), решив его относительно температуры расплава, получим зависимость температуры расплава от расхода шихты:

$$T_p^0 = \frac{N_g^0 + G_{ш}^0 C_{ш} T_{ш}^0 + K_n T_{вых}^0 + \alpha T_{oc}^0}{G_{ш}^0 C_p + K_n + \alpha} \quad (5)$$

Переходя к использованию понятия «отклонение от установившихся значений» и при-

нимая $T_{oc} = T_{oc}^0$, а $T_{ш} = T_{ш}^0$, введем соответствующие обозначения для отклонений:

$$T_{вых} - T_{вых}^0 = \delta T_{вых}; \quad G_{ш} - G_{ш}^0 = \delta G_{ш};$$

$$T_p - T_p^0 = \delta T_p; \quad N_g - N_g^0 = \delta N_g;$$

$$T_{вх} - T_{вх}^0 = \delta T_{вх}; \quad G_B - G_B^0 = \delta G_B$$

При небольших отклонениях от установившегося состояния, раскладывая нелинейности уравнений (1) и (2) в ряд Тейлора и отбрасывая члены разложения выше первого порядка малости [2, 3], запишем:

$$V_p \gamma_p C_p \frac{d\delta T_p}{dt} = -(C_p G_{ш}^0 + K_n + \alpha) \delta T_p + K_n \delta T_{вых} - (C_p T_p^0 - C_{ш} T_{ш}^0) \delta G_{ш} + \delta N_g ; \quad (6)$$

$$V_B \gamma_B C_B \frac{d\delta T_{вых}}{dt} = -(K_n + G_B^0 C_B) \delta T_{вых} + K_n \delta T_p - C_B (T_{вых}^0 - T_{вх}^0) \delta G_B + G_B^0 C_B \delta T_{вх} \quad (7)$$

Из решений этих уравнений могут быть найдены отклики (изменения) температуры расплава δT_p и охлаждающей воды $\delta T_{вых}$ на

ступенчатое возмущение по расходам шихты $\delta G_{ш} = +\delta G_{ш}^0$ и воды $\delta G_B = +\delta G_B^0$:

$$\delta T_p = -\frac{C_p T_p^0 - C_{ш} T_{ш}^0}{C_p G_{ш}^0 + K_n + \alpha} \delta G_{ш}^0 [1 - \exp(-\frac{C_p G_{ш}^0 + K_n + \alpha}{V_p \gamma_p C_p} t)] ; \quad (9)$$

Установившиеся значения δT_p^* , $\delta T_{вых}^*$ (при $t \rightarrow \infty$) равны:

$$\delta T_p^* = -\frac{C_p T_p^0 - C_{ш} T_{ш}^0}{C_p G_{ш}^0 + K_n + \alpha} \delta G_{ш}^0 ; \quad \delta T_{вых}^* = -\frac{C_B (T_{вых}^0 - T_{вх}^0)}{K_n + G_B^0 C_B} \delta G_B^0 \quad (10)$$

Из уравнений (8) и (9) следует, что динамические характеристики соответствующих каналов могут быть аппроксимированы апериодическими звеньями первого порядка с постоянными времени $\tau_{G_{ш}, T_p}$ и $\tau_{G_B, T_{вых}}$, соответственно равными:

$$\tau_{G_{ш}, T_p} = \frac{V_p \gamma_p C_p}{C_p G_{ш}^0 + K_n + \alpha} ; \quad \tau_{G_B, T_{вых}} = \frac{V_B \gamma_B C_B}{K_n + G_B^0 C_B} \quad (11)$$

Проверка адекватности модели состояла в нахождении расчетных значений 10 %-ного увеличения и уменьшения входных характеристик и сравнении их с экспериментальными данными. При этом рассматривались следующие параметры: расход шихты – температура расплава; расход входящей воды – температура выходящей воды; подводимая к индуктору мощность – температура расплава.

Для количественной оценки величин из выражений (10), (11) необходимо определить значения K_n и α в предположении, что все остальные параметры, входящие в уравнения (3) и (4), известны. В общем случае K_n и α могут быть некоторыми функциями от режимных параметров, но для стационарного режима и небольших отклонений допустимо считать их постоянными. С учетом усредненных экспериментальных данных значения рассчитанных из (3) и (4) коэффициенты составили: $K_n = 14,9 \cdot 10^{-3}$ Вт/К; K_n и $\alpha = 3,29 \cdot 10^{-3}$ Вт/К. При $\delta G_{\text{ш}}^0 = 6,94 \cdot 10^{-3}$ кг/с; $T_{\text{ш}}^0 = 294$ К; $T_p^0 = 2223$ К; $C_{\text{ш}} = 866,1$ Дж/(кг·К); $C_p = 1435$ Дж/(кг·К); $T_{\text{вх}}^0 = 308$ К; $G_{\text{в}}^0 = 0,93$ кг/с; $\delta G_{\text{ш}} = 0,694 \cdot 10^{-3}$ кг/с (10 %-й скачок по расходу шихты) и $\delta G_{\text{в}} = 0,093$ кг/с (10 %-й скачок по расходу воды) из (10) находим: $\delta T_p^* = -72,2$ градусам; $\delta T_{\text{вх}} = -0,7$ градусам.

Таким образом, 10 %-ное увеличение расхода шихты при условии постоянства других параметров приводит к снижению температуры расплава примерно на 70 градусов, а

такое же увеличение расхода охлаждающей воды вызывает снижение температуры отходящей воды на 0,7 градуса.

При 10 %-ном уменьшении входных параметров отклики по величине будут равны приведенным выше, но обратны по знаку.

Экспериментальные данные по изменению температуры расплава в случае 10 %-ного скачка составили $(+69 \pm 3)$ и (-70 ± 3) градусов, а по изменению температуры охлаждающей воды $(+0,6 \pm 0,2)$ и $(-0,6 \pm 0,2)$ градуса, что подтверждает адекватность модели по этим параметрам.

При $\gamma_p = 0,0046$ м³ (диаметр тигля 0,22 м, высота расплава 0,10–0,12 м), $\gamma_p = 2700$ кг/м³, $\gamma_{\text{в}} = 0,0004–0,0006$ м³ (количество трубок с охлаждающей водой 24, внутренний диаметр трубки 0,01 м, высота 0,2–0,3 м), $\gamma_{\text{в}} = 1000$ кг/м³ из уравнений (11) найдено: $\tau_{G_{\text{ш}}, T_p} = 633$ с; $\tau_{G_{\text{в}}, T_{\text{вх}}} = 0,4–0,6$ с.

В соответствии с постоянными времени время перехода к δT_p^* составляет 1800 с, а для $\delta T_{\text{вх}}$ оно не превышает 1 с, что также не противоречит результатам эксперимента.

Аналогично можно получить оценки реакции системы на ступенчатое возмущение по мощности, подводимой к индуктору $\delta N_g = \delta N_g^0$, и по входной температуре воды $\delta T_{\text{вх}} = \delta T_{\text{вх}}^0$.

$$\delta T_p = \frac{\delta N_g^0}{G_{\text{ш}}^0 C_p + K_n + \alpha} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_{\text{ш}}^0 C_p + K_n + \alpha}{V_p \gamma_p C_p}\right) \right]; \quad (12)$$

$$\delta T_{\text{вх}} = \frac{C_{\text{в}} G_{\text{в}}^0}{K_n + C_{\text{в}} G_{\text{в}}^0} \delta T_{\text{вх}}^0 \left[1 - \exp\left(-\frac{K_n + C_{\text{в}} G_{\text{в}}^0}{V_{\text{в}} \gamma_{\text{в}} C_{\text{в}}}\right) \right] \quad (13)$$

С учетом приведенных выше данных найдено, что $\delta T_{\delta}^* = 192$ градусам, т.е. при повышении мощности, подводимой к индуктору, на 5400 Вт (10%) температура расплава повысится примерно на 190 градусов.

Эти результаты подтверждены экспериментальными данными, полученными при измерении температуры расплава на входе его в летку: с увеличением N_g примерно на 5000 Вт T_p повышается на (170 ± 15) градусов.

Для охлаждающей воды $\delta T_{\text{вх}} = 0,996 \times$,

т.е. изменения температуры входящей воды практически целиком передаются выходящей, что также подтверждено результатами эксперимента.

Из соотношений (12) и (13) следует, что постоянные времени каналов по параметрам возмущения равны постоянным времени каналов по параметрам управления, приведенным в формулах (11), т.е. $\tau_{N_g, T_p} = \tau_{G_{\text{ш}}, T_p}$, а $\tau_{T_{\text{вх}}, T_{\text{вх}}} = \tau_{G_{\text{в}}, T_{\text{вх}}}$.

При одновременном снижении дозировки шихты и мощности, подводимой к индук-

тору, в соответствии с уравнениями (8) и (11) получено:

$$\delta T_p = \left[\frac{(C_p T_p^0 - C_{ш} T_{ш}^0)}{G_{ш}^0 C_p + K_n + \alpha} \delta G_{ш}^0 - \frac{\delta N_g^0}{G_{ш}^0 C_p + K_n + \alpha} \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{G_{ш}^0 C_p + K_n + \alpha}{V_p \gamma_p C_p}\right) \right]. \quad (14)$$

Из (14) вычислено установившееся значение $\delta T_{\delta}^* = -97$ градусам. Время переходного процесса остается тем же и составляет примерно три постоянных времени канала. Экспериментальные данные дают результат уменьшения температуры расплава на (95 ± 5) градусов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенное математическое описание процесса плавления базальтовой шихты в индукционном тигле позволяет дать количественные оценки влияния отдельных параметров на температуру расплава и выходную температуру охлаждающей воды и может использоваться при выборе и уточнении оптимальных режимов работы индукционной печи и настроечных коэффициентов высокочастотного генератора.

УДК 691.618.93

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПЕНОСИЛИКАТА НА ОСНОВЕ БАЗАЛЬТОВОЙ ЧЕШУИ

Н.Н. Ходакова, О.С. Татаринцева

Представлены результаты экспериментальных исследований по созданию экологически чистого теплоизоляционного ячеистого материала с использованием в качестве основного наполнителя базальтовой чешуи. Подобраны режимы термического вспучивания гранулята, и определено необходимое содержание в нем влаги для получения мелкоячеистой структуры. Показано, что введение в жидкостекольную композицию тонкодисперсного карбоната кальция и ступенчатый режим термообработки приводят к значительному повышению водостойкости образцов.

Ключевые слова: пеносиликат, жидкостекольная композиция, базальтовая чешуя, микрокальцит, гранулят, вспучивание, термообработка.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время строительная индустрия проявляет большой интерес именно к экологически чистым, негорючим и высокоэффективным теплоизоляционным материалам, среди которых последнее место занимают пеносиликаты, имеющие жесткую ячеистую

структуру, достаточно низкую плотность и теплопроводность, температуру эксплуатации до 400-450 °С. Пеносиликаты не горят и не поддерживают горение. В случае превышения температуры эксплуатации материал оплавляется, не выделяя в окружающую среду вредные вещества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров Ю. Б., Ратников Д. Г. Холодные тигли. – М.: Металлургия, 1972. – 112 с.
2. Х. Квакернаак, Р. Сиван. Оптимальные системы управления. – М.: Мир, 1977. – 650 с.
3. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учебное пособие для вузов. – Л.: Химия, 1987. – 576.

Татаринцева Ольга Сергеевна, д-р техн. наук, доцент, зав. лабораторией материаловедения минерального сырья Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), labmineral@mail.ru, 659322, Алтайский край, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, 659322, Алтайский край, г. Бийск, ул. Декабристов, д. 10/1, кв. 36, тел. (3854) 30-58-82.