

ИДК666.155.5.001.4

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НАГРЕВА СТЕКЛА ПРИ ЗАКАЛКЕ

А. И. Шутов, А. В. Маматов

БТИСМ

Нагрев стекла — одна из наиболее ответственных технологических операций в производстве закаленного стекла, определяющая характеристики технологического процесса в целом и оказывающая существенное влияние на качество продукции.

Для обеспечения высокой производительности закалочного оборудования и равномерной закалки стекла необходимо, чтобы продолжительность нагрева стекла до закалочной температуры была минимальна, а градиент температур по площади и толщине стекла при этом не превышал заданного значения. Сокращение продолжительности нагрева может быть достигнуто за счет повышения интенсивности теплового воздействия, однако при этом увеличивается градиент температур по толщине стекла, что может привести к неравномерности закалки и даже к разрушению стеклоизделий [1].

Наиболее приемлемым является радиационный способ нагрева (воздействие электромагнитным излучением с длиной волны 0,35 — 3,5 мкм), так как он позволяет выровнять интенсивности нагрева поверхностных и внутренних слоев стекла, что приводит к снижению градиента температур по его толщине [2].

Экспериментально установлено [3], что в промышленных печах нагрев стекла происходит значительно медленнее процесса, соответствующего модели абсолютно черного тела, и более точно описывается моделью из класса линейных динамических систем

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv_1}{dv} &= \frac{v_n - v_1}{\tau_1}, \\ \frac{dv_2}{dv} &= \frac{v_1 - v_2}{\tau_2}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где v_n — температура источника излучения;

v_1 — температура поверхностного слоя;

v_2 — температура срединного слоя;

τ_1, τ_2 — постоянные времени.

В соответствии с указанными требованиями сформулируем задачу оптимизации процесса нагрева стекла.

Необходимо найти такой закон изменения температуры источника излучения, при котором стеклянная пластина с начальной температурой, равной температуре окружающей среды

$$v_1(0) = v_2(0) = v_0, \quad (2)$$

нагревается до закалочной температуры

$$v_1(t_3) = v_3 \quad (3)$$

за минимальное время

$$(t_3) \rightarrow \min. \quad (4)$$

При этом должны выполняться следующие ограничения:

$$v_1(t) - v_2(t) \leq \Delta v_{\max}; \quad (5)$$

$$v_n(t) \leq v_{n \max}. \quad (6)$$

Ограничение (6) обусловлено тем, что температура источника излучения в реальном технологическом процессе ограничена сверху термостойкостью оборудования печи.

Сформулированная задача известна в теории оптимального управления как задача максимального быстродействия с ограничением фазовых координат [4]. В соответствии с принципом максимума Понтрягина оптимальным по быстродействию будет следующий закон изменения температуры источника излучения:

$$v_n(t) = \sup v_n \quad (7)$$

где $v_n \in \Omega(t)$;

$\Omega(t)$ — множество значений температуры источника излучения, при которых выполняются ограничения (5), (6).

Полученное выражение имеет ясный физический смысл. Для того чтобы нагреть стеклянную пластину до закалочной температуры за минимальное время при соблюдении заданных ограничений, необходимо, чтобы в каждый момент времени в процессе нагрева температура источника излучения имела максимально допустимое при заданных ограничениях значение.

Для построения оптимального закона изменения температуры источника излучения воспользуемся методом фазовой плоскости [5]. Выражение, описывающее фазовые траектории для системы (1), получаем делением первого уравнения системы на второе

$$\frac{dv_1}{dv_2} = \frac{\tau_1(v_1 - v_2)}{\tau_2(v_n - v_1)}$$

Построим семейства фазовых траекторий (рис. 1) для граничного значения неравенства (6). Для этого

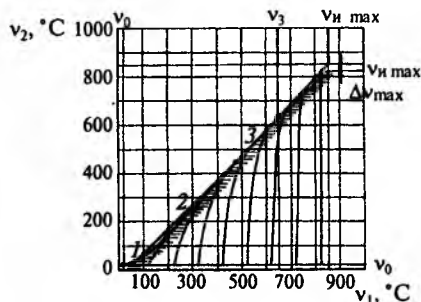


Рис. 1. Фазовые траектории процесса нагрева стекла

зададим численные значения переменных в выражениях (1) – (7). В качестве примера выбран процесс нагрева листового стекла толщиной 6 мм в печи ПН-900: $\tau_1 = 49$ с, $\tau_2 = 3,6$ с, $v_0 = 20^\circ\text{C}$, $v_3 = 650^\circ\text{C}$, $\Delta v_{\text{max}} = 30^\circ\text{C}$, $v_{\text{н max}} = 850^\circ\text{C}$.

Согласно выражению (7) оптимальная фазовая траектория состоит из отрезков, расположенных на границе области (5), и из отрезков, совпадающих с участками фазовых траекторий для граничного значения неравенства (6). По условию задачи система (1) должна быть переведена из исходного состояния (2) в состояние (3). По отрезкам строим оптимальную фазовую траекторию, начинающуюся в точке 2 и заканчивающуюся на прямой 3 фазовой плоскости (см. рис. 1). Закон изменения температуры источника излучения, соответствующий оптимальной фазовой траектории, будет решением сформулированной задачи оптимизации процесса нагрева стекла (рис. 2).

Таким образом, для минимизации времени нагрева стекла до закалочной температуры при ограничениях, накладываемых на градиент температур по толщине стекла и на температуру источника излучения, процесс нагрева должен включать в себя следующие стадии:

нагрев при максимальной температуре источника излучения до выхода градиента температур по толщине стекла на предельный уровень;

стабилизация градиента температур по толщине стекла на предельном уровне за счет изменения температуры источника излучения от минимального до максимального значения с постоянной скоростью;

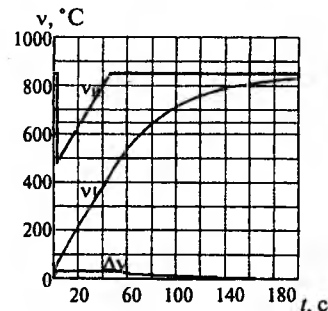


Рис. 2. Временные диаграммы оптимального процесса нагрева стекла

нагрев стекла до закалочной температуры при максимальной температуре источника излучения.

Для реализации указанных стадий нагрева достаточно изменить скорость перемещения стекла и температурные режимы по секциям. Продолжительность нагрева стекла при использовании рассмотренного способа сокращается по сравнению с применяемым на практике способом со 105 до 80 с, т. е. приблизительно на 20%. При этом перепад температур между поверхностным и срединным слоями остается равным 30°C .

Таким образом, изменение параметров технологического процесса позволяет повысить производительность печи нагрева линии закалки, не нарушая при этом ограничений на градиент температур по толщине стекла, и сократить количество брака за счет увеличения скорости транспортирования листов в размягченном состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мазурин О. В., Белоусов О. В. Отжиг и закалка стекла / МИСИ и БТИСМ — 1984. — 114 с.
2. Параметры нагрева и охлаждения стекол при закалке / С. В. Иняхин, И. П. Казакова, И. В. Потапов, А. И. Шутов // Стекло и керамика. — 1981. — № 11. — С. 14–15.
3. McMaster H. A. The Handbook of Glass Manufacture. — New York, 1974. — V. 2.
4. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Л. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, К. Ф. Мищенко. — М.: Физматгиз, 1961.
5. Байтман М. М. Синтез оптимальных траекторий на плоскости — Рига: Зинатне, 1971.

Уважаемые читатели!

Не забудьте своевременно оформить подписку на журнал
“СТЕКЛО И КЕРАМИКА”
 на первое полугодие 1995 г.

Сведения о журнале Вы найдете в каталоге издательства “Известия”
 в разделе “Издания Центрального агентства “Роспечать”
 по зарубежным изданиям (ЦАЗИ)”.

Индекс журнала “Стекло и керамика” 70881