

## ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НЕСИММЕТРИЧНОГО НАГРЕВА ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЫ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА

В.Г.Руданов, А.В.Мазатов

Нагрев является составной частью большинства химических-технологических процессов. Динамика нагрева оказывает существенное влияние на показатели технологического процесса в целом. Так, при высокой интенсивности нагрева внутри вещества возникают значительные температурные градиенты, оказывающие, как правило, отрицательное влияние на качество продукции. Низкая же интенсивность нагрева приводит к увеличению времени теплотехнологических операций.

В производстве закаленного стекла для обеспечения высокой производительности закалочного оборудования и равномерной закалки стекла необходимо, чтобы время нагрева стекла до закалочной температуры было минимальным, а градиент температуры по толщине стекла при этом не превышал заданного значения. Сокращение времени нагрева может быть достигнуто за счет повышения интенсивности теплового воздействия, однако при этом увеличивается градиент температуры по толщине стекла, что может привести к неравномерности закалки и даже к разрушению стеклоизделия. Кроме того, интенсивность теплового воздействия ограничена эксплуатационными характеристиками оборудования печи.

Основным средством при решении задач оптимизации режимов термообработки листового стекла являются аналитические методы расчета нестационарного температурного поля в стеклянной пластине при ее нагреве и охлаждении. Согласно указанным методам рассматривается процесс конвективно-кондуктивно-радиационного теплообмена в плоском слое селективного ослабляющего материала, расположенном в газовой среде между двумя плоскими источниками излучения. Уравнение динамики сложного теплообмена при этом подучают на основе решения одномерных задач теплопроводности и переноса энергии излучения для плоской пластины:

$$\frac{dT(s,t)}{dt} = - \frac{1}{\rho c} \left( \eta_c(s,t) + \eta_r(s,t) \right),$$

где  $c$  - теплоемкость среды, Дж/(кг·К);  $\rho$  - плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta_c$  - объемная плотность потока кондуктивной составляющей теплообмена, Вт/м<sup>3</sup>,  $\eta_r$  - объемная плотность радиационной составляющей теплообмена, Вт/м<sup>3</sup>.

Полученное интегро-дифференциальное уравнение сложного теплообмена позволяет исследовать динамику нагрева стекла и осуществлять выбор рациональных режимов термообработки стекломатериала при отжиге и закалке. Однако вследствие сложности уравнения конвективно-кондуктивно-радиационного теплообмена в стеклянной пластине его непосредственное использование для формального синтеза оптимальных по некоторому критерию режимов нагрева оказывается невозможным.

С целью обеспечения возможности использования формальных методов теории оптимального управления для синтеза режимов термообработки стекла была разработана модель сложного теплообмена в форме пространства состояний:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu + C(x)u^2 + D(u)u^2.$$

где  $x$  - вектор температур элементарных слоев пластины;  $u$  - вектор температур источников излучения и прилегающих к поверхности пластины слоев газовой среды;  $A, B$  - основные матрицы состояния и управления, определяемые свойствами стекла и газовой среды;  $C, D$  - дополнительные матрицы состояния и управления, определяемые свойствами стекла и источников излучения.

На основе разработанной модели решена задача оптимального управления процессом нагрева стекла при закалке. В качестве критерия оптимальности была указана продолжительность нагрева заготовки до закалочной температуры, при этом учитывались ограничения на температуру источников тепла и на градиент температуры по толщине стекла. Синтез оптимального алгоритма управления процессом нагрева, осуществляемый при помощи принципа максимума Понтрягина, позволил выявить следующие стадии оптимального процесса, в соответствии с которыми определяются оптимальные законы изменения температур источников во времени:

- нагрев при максимальной температуре источников до выхода градиента температуры по толщине стекла на предельный уровень;
- поддержание максимального допустимого значения градиента температуры за счет соответствующего изменения температур источников;
- нагрев при максимальной температуре источников до достижения заготовкой заданной температуры закалки.