

УДК 004:66.011:666.11

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАМИНИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО СТЕКЛА

Земскова В.Т., Панов Ю.Т., Евдокимов С.А., Тимаков Е.А.

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, e-mail: sergej.evdokimovv@gmail.com

В современном строительстве все чаще применяют стекло в качестве строительного материала. Из-за своих прочностных и оптических характеристик свое применение в строительстве нашел триплекс (многослойное стекло). Недостатком технологий, по которым изготавливают триплекс, является высокий процент брака из-за различий в значениях адгезионной прочности на поверхности листов. Как показывает практика, одной из причин брака является цикл термообработки. Целью исследования является разработка математического описания процесса ламинирования многослойного стекла и создание модельно-компьютерного инструментария, с целью обеспечения оптимальных условий формирования многослойной композиции во время данного процесса. Для достижения поставленной цели был решен ряд задач: был рассмотрен процесс ламинирования многослойного стекла в печи; рассмотрены основные характеристики данного процесса; описан процесс ламинирования с помощью уравнений нестационарной теплопроводности; получена система дифференциальных уравнений, характеризующих изменение температуры по толщине стекла; с помощью метода конечных разностей решены дифференциальные уравнения; показана структура многослойного стекла; разработан модельно-компьютерный инструментарий, обеспечивающий решение уравнений математического описания процесса ламинирования; построены графики распределения температур по толщине стекла. Выявлено влияние толщины стекла на температуру пленки в зависимости от времени. Рассмотрено влияние скорости нагрева печи на время процесса ламинирования.

Ключевые слова: триплекс, безопасное многослойное стекло, ламинирование, математическое моделирование, полимерная пленка, температурный режим

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE PROCESS OF LAMINATION OF MULTILAYERED GLASS

Zemskova V.T., Panov Yu.T., Evdokimov S.A., Timakov E.A.

Vladimir State University, Vladimir, e-mail: sergej.evdokimovv@gmail.com

In modern construction glass is increasingly used as a building material. Because of its strength and optical characteristics triplex (laminated glass) found its application in construction. The disadvantage of technology, which is made triplex, is a high percentage of marriage due to differences in the values of adhesive strength on the surface of the sheets. As practice shows, one of the causes of marriage is the heat treatment cycle. The aim of the study is to develop a mathematical description of the lamination process of laminated glass and the creation of modeling and computer tools to ensure optimal conditions for the formation of a multilayer composition during this process. To achieve this goal, a number of tasks were solved: the process of laminating laminated glass in the furnace was considered; the main characteristics of this process were considered; the process of laminating with the help of equations of unsteady thermal conductivity was described; a system of differential equations characterizing the temperature change in the thickness of the glass is obtained; differential equations are solved using the finite difference method; the structure of multilayer glass is shown; a model-computer tool is developed that provides a solution to the equations of mathematical description of the lamination process; graphs of temperature distribution over the thickness of the glass are constructed. The influence of glass thickness on the temperature of the film depending on the time is revealed. The influence of the heating rate of the furnace at the time of the lamination process.

Keywords: triplex, safety laminated glass, lamination, mathematical modeling, polymer film, temperature

В современной архитектуре и гражданском строительстве все чаще применяют стекло в качестве строительного материала. Привычное применение стекла в архитектуре и гражданском строительстве – это заполнение проемов окон, дверей, фасадов. На сегодняшний день стекло включают в конструкции, которые используются в качестве строительных элементов, например, полы, колонны и облицовочные панели.

В связи с тем, что чаще стекло используется в общественных местах, где проходит множество людей, возрастают требования к безопасности остекления, так как при

разрушении стекло образует множество осколков с острыми углами, которые могут навредить людям. В этом случае используются многослойные стекла, или триплекс. Все основные технологические и эксплуатационные свойства в таких конструкциях достигаются за счет использования неоднородной слоистой структуры композита с промежуточным слоем в виде полимерной пленки или полимерной смолы.

На сегодняшний день в стекольном производстве идет тенденция улучшения прочностных свойств для возможности встать в один ряд с такими строительными материалами, как сталь или железобетон.

Достичь этого можно путем совершенствования оборудования и технологий для создания многослойного стекла. Но в большинстве случаев данные вопросы остаются вне поля зрения исследований, что в значительной мере тормозит исследования в данной области. Большинство исследований в данной области в основном направлены либо на повышение оптических характеристик многослойных композиций [1], либо на уменьшение воздействия УФ- и ИК-излучения на человека [2, 3]. А исследования, направленные на повышение прочностных характеристик, остаются скрытыми или нуждаются в серьезных экспериментальных и теоретических проработках.

Итак, остановимся на понятии ламинирование многослойного стекла. Ламинирование – метод создания многослойной композиции за счет склеивания между собой по всей поверхности либо плоских, либо гнутых стекол при помощи жидких или пленочных полимерных композиций.

На сегодняшний день реализуются две технологии: заливная технология, где промежуточным слоем являются фотоотверждаемые однокомпонентные смолы; двухкомпонентные смолы, полимеризующиеся при смешивании компонентов; специальные термоотверждаемые составы [4], и пленочная технология, где в качестве связующего между слоями используется готовая полимерная пленка.

Заливная технология в связи с технологическими и эксплуатационными ограничениями нашла применение лишь в узком сегменте производства безопасного остекления.

Этого нельзя сказать о пленочной технологии. Пленочная технология в свою очередь делится на две группы: автоклавная и безавтоклавная [5]. Основные отличия заключаются в реализации технологического процесса.

Поскольку при выборе промышленного оборудования большинство смотрит на экономическую составляющую, то внимание производителей многослойных стекол направлено на безавтоклавную технологию [6].

К сожалению, серьезным недостатком обеих технологий является высокий процент брака (порядка 10–15 %).

Основными видами брака многослойных остекления является наличие «отлипов» и «пузырей» на границах раздела стекло – полимер [7]. Одна из причин этого может быть в различных значениях адгезионной прочности на поверхности листов, особенно крупных размеров. На основе этого можно сделать вывод, что основной

задачей, которая лежит в основе конструирования оборудования и оптимизации технологического процесса производства многослойного стекла, является проблема равномерности и увеличения адгезионной прочности по всей поверхности контакта стекла и полимерной пленки.

В первую очередь адгезионные свойства зависят от химического строения полимерного материала, входящего в состав многослойной композиции. Немаловажным фактором, влияющим на адгезионную составляющую, является соблюдение строгого технологического регламента подготовительных процессов, например мойки или вакуумирования. Но как показывает практика, основная причина брака заключается в цикле термообработки.

Причиной этому могут быть специфические свойства стекла, которые в свою очередь сказываются на неравномерности разогрева многослойной композиции по плоскости и толщине. Теоретические и практические работы в области нагрева стекольной продукции нашли свое отражение в работах, монографиях, диссертациях, опубликованных за последнее десятилетие. Но большинство из них направлено на изучение процессов закалки, термоупрочнения или моллирования листового стекла [6–9].

Важнейшей проблемой при производстве многослойного безопасного остекления является создание оборудования, которое способно обеспечить подходящие режимы разогрева многослойной композиции.

Поэтому настоящее исследование посвящено разработке математической модели процесса ламинирования многослойного стекла, которая будет обеспечивать оптимальные условия формирования устойчивого и равномерного по всей поверхности адгезионного контакта стекла и промежуточного полимера, с целью повышения эффективности производства многослойных композиций.

Материалы и методы исследования

Рассмотрим процесс ламинирования многослойного стекла в печи. В этом случае первоисточником тепла будет являться собственно электронагреватель, в котором при прохождении электрического тока выделяется джоулево тепло. Мощность подведенной электроэнергии (Вт):

$$Q_{эл} = U \cdot I,$$

где U – напряжение, В; I – ток, А. Это тепло будет расходоваться на нагрев «сэндвича» (стекло – пленка – стекло) и потерь тепла в окружающую среду. Стоит отметить, что внутренний корпус имеет теплоизоляцию [10].

Тепловой режим печи поддерживается программной автоматической системой регулирования по заданным законам.

Объектом исследования является процесс ламинирования, который характеризуется следующими параметрами: скоростью нагрева «сэндвича» до заданной температуры и толщиной образца. Решение данной задачи сводится к решению одномерной задачи, так как длина и ширина изделия намного больше его ширины. В соответствии с этим можно считать, что, нагрев изделия идет со сторон больших поверхностей.

Температура, до которой нагревают «сэндвич», зависит от того, проводят ли ламинирование с последующей выдержкой или без нее. Практически установлено, что продолжительность выдержки заготовок при определенной температуре зависит от вида используемой пленки и толщины «сэндвича» и составляет 10–30 мин на 1 мм толщины заготовки.

Как уже было сказано выше – основная причина брака заложена в цикле, поэтому математическая модель должна позволить изучить распределение температур по толщине многослойной композиции. Процесс нагрева многослойной композиции при заданных законах изменения температуры в печи описывается уравнением нестационарной теплопроводности вида

$$\frac{\partial T(h, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(h, \tau)}{\partial h^2} \quad (1)$$

при заданных начальных и граничных условиях:

$$T(h, 0) = 20^\circ\text{C}; T(0, \tau) = T_{\text{печ}}(\tau); T(H, \tau) = T_{\text{печ}}(\tau).$$

В уравнении (1) обозначено: h , τ – текущая толщина изделия и время нагрева; $a = \lambda/(c \cdot \rho)$ – температуропроводность стекла, $\text{м}^2/\text{с}$; λ – теплопроводность стекла, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; c – теплоемкость стекла, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ – плотность стекла, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Дифференциальное уравнение в частных производных (1) может быть решено с использованием метода конечных разностей, который позволяет свести его к системе обыкновенных дифференциальных уравнений (задача Коши). На рис. 1 показана структура многослойного стекла толщиной H , разбитой на 6 элементарных слоев, толщиной Δh . Вводим следующие

допущения: температура поверхности ($T_{\text{пов}}$) стекла равна температуре печи, следовательно, получаем семь граней: $T_{\text{пов}}, T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_{\text{пов}}$. Число уравнений составит: $7 - 2 = 5$ [10].

Полученная система дифференциальных уравнений имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dT_1}{d\tau} = \frac{a}{\Delta h^2} (T_{\text{пов}}(\tau) - 2T_1 + T_2), \\ \frac{dT_2}{d\tau} = \frac{a}{\Delta h^2} (T_1 - 2T_2 + T_3), \\ \frac{dT_3}{d\tau} = \frac{a}{\Delta h^2} (T_2 - 2T_3 + T_4), \\ \frac{dT_4}{d\tau} = \frac{a}{\Delta h^2} (T_3 - 2T_4 + T_5), \\ \frac{dT_5}{d\tau} = \frac{a}{\Delta h^2} (T_4 - 2T_5 + T_{\text{пов}}(\tau)), \end{cases} \quad (2)$$

где $T_{\text{печ}}(\tau)$ – законы изменения температур в печи. $\Delta h = H/n$ элементарная толщина слоя; H – полная толщина изделия, n – число слоев.

Результаты исследования и их обсуждение

На основе всего вышесказанного был разработана Matlab-программа, записанная на М-языке. На основании этой программы можно рассчитать распределение температур в различных сечениях образца.

На рис. 2 представлен график распределения температур со следующими характеристиками процесса: скорость нагрева $V_{\text{нагр}} = 1,5$ град/мин, температура выдержки $T_{\text{нагр}} = 90^\circ\text{C}$; время выдержки при температуре выдержки $t_{\text{выд}} = 30$ мин; конечная температура процесса $T_{\text{кон}} = 130^\circ\text{C}$ и толщина триплекса $l = 0,004$ м. Температурный режим выстраивался относительно пленки.

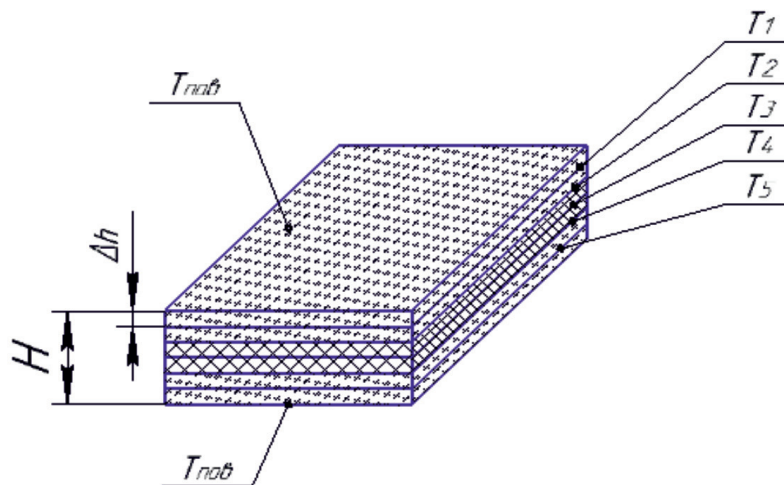


Рис. 1. Структура многослойного стекла

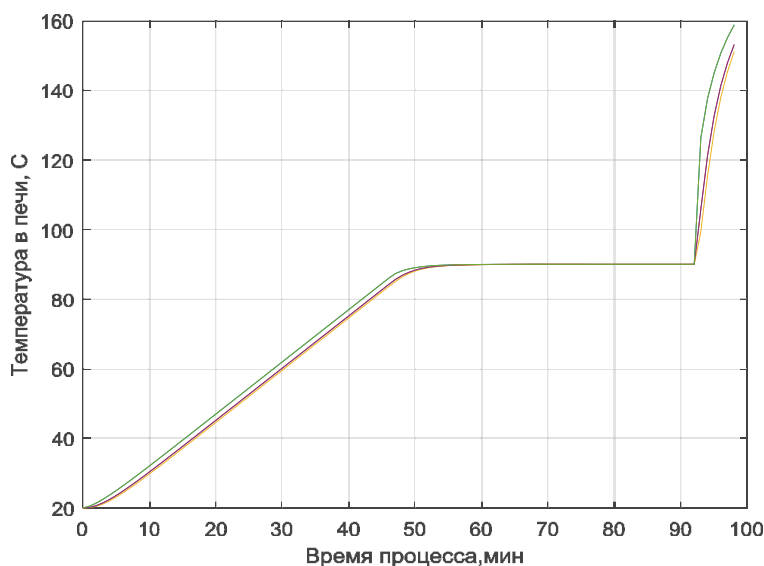


Рис. 2. График распределения температур при скорости нагрева $V_{нагр} = 1,5$ град/мин и толщине триплекса $l=0,004$ м. Зеленая линия соответствует T_1 и T_5 (температура поверхности стекла); Фиолетовая линия соответствует T_2 и T_4 ; Оранжевая линия соответствует T_3 (температура пленки)

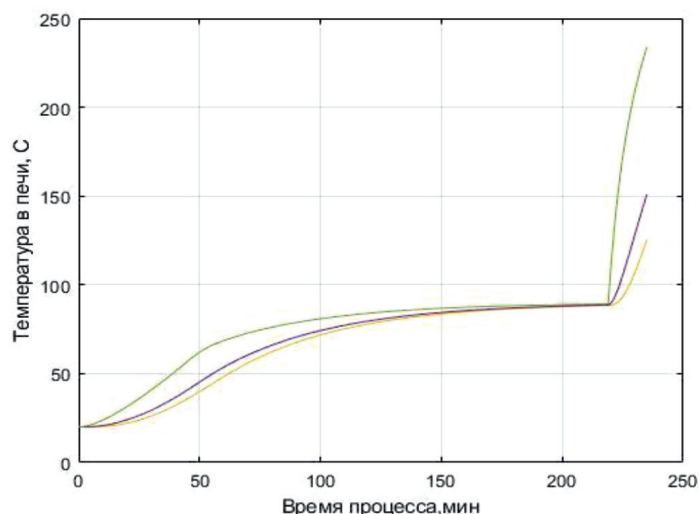


Рис. 3. График распределения температур при скорости нагрева $V_{нагр} = 1,5$ град/мин и толщине триплекса $l = 0,016$ м. Зеленая линия соответствует T_1 и T_5 (температура поверхности стекла); Фиолетовая линия соответствует T_2 и T_4 ; Оранжевая линия соответствует T_3 (температура пленки)

На рис. 3 представлен график распределения температур со следующими характеристиками процесса: скорость нагрева $V_{нагр} = 1,5$ град/мин, температура выдержки $T_{выд} = 90$ град; время выдержки при температуре выдержки $t_{выд} = 30$ мин; конечная температура процесса $T_{кон} = 130$ град и толщине триплекса $l = 0,016$ м. Температурный режим выстраивался относительно пленки.

Как видно из рис. 3, время процесса приблизительно составляет 245 мин. На основе этого можно сделать вывод о том, что про-

цесс является энергозатратным, и поэтому встает вопрос о снижении энергозатрат для данного процесса.

На рис. 4 представлен график распределения температур со следующими характеристиками процесса: скорость нагрева $V_{нагр} = 2$ град/мин, температура выдержки $T_{нагр} = 90$ °С; время выдержки при температуре выдержки $t_{выд} = 30$ мин; конечная температура процесса $T_{кон} = 130$ °С и толщине триплекса $l = 0,016$ м. Температурный режим выстраивался относительно пленки.

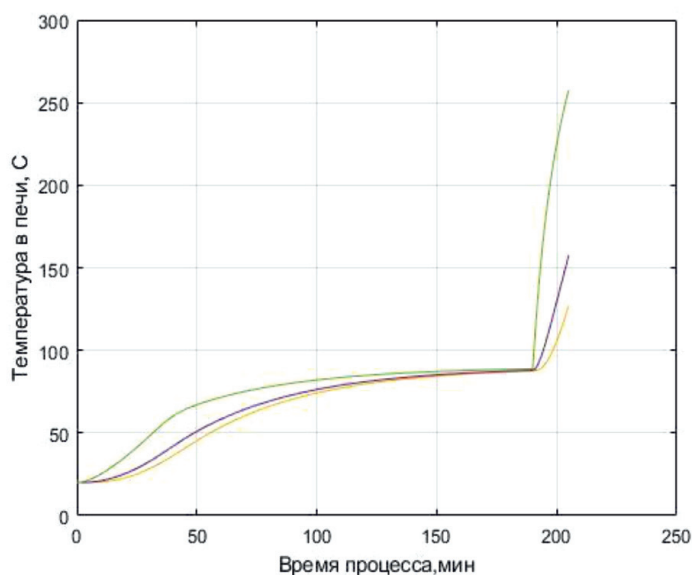


Рис. 4. График распределения температур при скорости нагрева $V_{нагр} = 2$ град/мин и толщине триплекса $l = 0,016$ м. Зеленая линия соответствует T_1 и T_5 (температура поверхности стекла); Фиолетовая линия соответствует T_2 и T_4 ; Оранжевая линия соответствует T_3 (температура пленки)

Как видно из рис. 4, при увеличении скорости нагрева печи время процесса сокращается до 205 мин. На основе этого можно сделать вывод о том, что при увеличении скорости нагрева печи наблюдается уменьшение времени процесса.

Заключение

Основным результатом исследования является разработка модельно-компьютерного инструментария, предназначенная для расчёта распределения температур в различных сечениях образца многослойного стекла. Данный модельный инструментарий можно применить:

а) для любого вида стекла (достаточно лишь знать характеристики стекла);

б) для любой полимерной пленки (достаточно лишь знать температурный режим, при котором производится процесс ламинирования с данной пленкой).

Также было установлено, что увеличение скорости нагрева сокращает процесс ламинирования.

Список литературы

1. Комацу Р., Сасаки Д., Ивамото Т. Промежуточный слой для многослойного стекла и многослойное стекло // Патент № 2666563. Патентообладатель Секисуй Кемикал Ко., ЛТД. 2018. Бюл. № 26.

2. Акимов А.А., Ковтун А.Ф., Парусов Е.Н., Перцев С.Ф. Многослойное стекло для остекления транспорт-

ных средств // Патент № 2436748. Патентообладатель Федеральное государственное учреждение «12 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации». 2011. Бюл. 35.

3. Фишер У.К. Поглощающая инфракрасное излучение (ик) поливинилбутиральная композиция, изготовленный из нее слой и содержащее его многослойное стекло // Патент № 2294944. Патентообладатель Солотиа инк. 2007. Бюл. № 7.

4. Нистратова В.Д. Технологические принципы и свойства заливочных составов для травмобезопасных, светопрозрачных, труднообрабатываемых триплексов и строительных конструкций: дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2005. 112 с.

5. Коновалова Е.О. Технология производства современных бронестекел // Современные материалы, техника и технология. 2017. С. 180–183.

6. Ламинирование стекла // Интернет сайт Belmar-ltd.com [Электронный ресурс]. URL: <https://belmar-ltd.com/oborudovanie-dlya-laminirovaniya-stekla> (дата обращения: 14.04.2019).

7. ГОСТ 30826-2014. Стекло многослойное. Технические условия. М.: ОАО «Институт стекла», 2016. 28 с.

8. Макаров Р.И. Управление моллирования в производстве многослойных стекол автомобильных стекол // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2015. № 3. С. 57–61.

9. Полунина О.В. Информационный анализ процесса моллирования в производстве безопасного многослойного стекла // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2014. № 3. С. 43–49.

10. Барабанов Н.Н., Земскова В.Т. Исследование влияния скорости нагрева и толщины изделия на распределение температуры при прессовании изделий // Владимирский государственный университет. 2003. [Электронный ресурс]. URL: <http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/876/3/038.pdf> (дата обращения: 14.04.2019).