

Акимов И.А., Фатыхов М.А.*, Еникеев Т.И.**

Кумертауский филиал Уфимского государственного авиационного технического университета,

*Башкирский государственный педагогический университет,

**Уфимский филиал Оренбургского государственного университета

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В УСТАНОВКЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЕДЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛИМЕРИЗАЦИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Приведены результаты экспериментальных исследований изменения температуры в композиционном материале, используемом для изготовления лонжерона лопасти вертолета, в результате полимеризации. Описана экспериментальная установка. Приведена методика исследований изменения температуры в полимере во времени. Установлены переходные характеристики данного динамического процесса.

Постановка задачи. Композиционные материалы обладают уникальными упругими и прочностными свойствами, превосходящими параметры металлических изделий. В связи с этим они нашли широкое применение в современной промышленности. В частности, из них изготавливаются лопасти вертолетов, ветроенов и др.[1]. Одним из способов изготовления таких материалов является метод полимеризации. В качестве основного оборудования для полимеризации служат установки автоматического ведения технологического процесса (АВТП). Кроме того, для технологии получения композиционного материала характерны, в частности, многостадийность процесса прогрева, многослойность соответствующих конструкций с различными теплофизическими свойствами и фазовые переходы. Она в общем случае может быть описана соответствующей системой уравнений, учитывающих эти характерные особенности полимеризации композиционных материалов. Однако из-за сложности технологии этот способ оказывается чрезвычайно сложным. Наиболее простым, с точки зрения анализа процесса полимеризации композиционных материалов, представляется метод переходных характеристик. Согласно этому методу, анализируя и обрабатывая экспериментальную переходную характеристику, можно определить передаточную функцию объекта управления, которым в данном случае является процесс полимеризации композиционных материалов. Однако вид и ха-

рактер ее не установлены. Между тем решение данной задачи позволило бы получить простейшую математическую модель (см., например, [2]) и выявить структуру связей между входными и выходными переменными, которые определяют развитие процесса полимеризации. С этой целью прежде всего необходимо провести экспериментальные исследования рассматриваемого в данной работе процесса, в частности изменения температуры во времени в композиционном материале, изготавливаемом в установке АВТП.

Описание экспериментальной установки АВТП. На рис. 1 представлена блок-схема экспериментальной установки, основными частями которой являются источник питания 1, устройство управления им 2, измерительно-регистрирующее 3 и исполнительное 4 устройства.

Главный элемент исполнительного устройства – пресс-форма. Она состоит из нижних и верхних плит, выполненных из металла Д16Т. Нижняя плита стационарная, верхняя – открывающаяся относительно нижней. В плитах выполнены ручки, повторяющие наружный контур требуемой детали в закрытом состоянии. По всей длине пресс-формы просверлены отверстия для контроля за изменением температуры. Кроме того, для определения скорости изменения температуры внутри изделия предусмотрен препарированный швеллер.

Для формирования внутреннего канала изготавливаемой детали и прессовки листов в пресс-формах работает система, обеспечивающая давление.

Система принудительного охлаждения применяется для ускоренного охлаждения пресс-формы после проведения режима совместной опрессовки. Она представляет собой отвод от сетевой магистрали сжатого воздуха, две трубы с отверстиями, установленные по всей длине под пресс-формой, и запорный кран. При

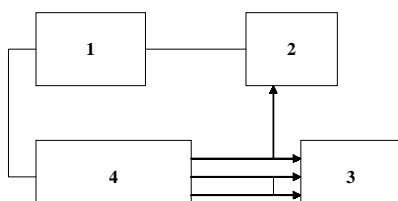


Рисунок 1. Блок-схема экспериментальной установки

использовании этой системы скорость охлаждения пресс-форм увеличивается в 1,5-2 раза.

Электронагревательные элементы изготовлены из ленточного металла марки 12Х18Н9Т, расположены в верхней и нижней частях плит вдоль всей длины пресс-формы и обеспечивают нагрев плит. Они уложены в обнаженную часть пресс-формы и прикрываются сверху П-образным профилем. Этот профиль имеет одну степень свободы для регулировки зазора между нагревателем и плоскостью обнаженной части плиты пресс-форм. Регулировка зазора производится при помощи регулировочных устройств.

Источник питания состоит из понижающего силового трансформатора, трехфазного тиристорного выпрямителя и схемы управления ими. Понижающий трансформатор предназначен для снижения напряжения на нагревательных элементах пресс-форм до безопасных пределов. Применение тиристорного выпрямителя необходимо для обеспечения возможности регулирования выходной мощности в процессе прессования. Кроме того, трехфазная схема обеспечивает меньшую величину пульсаций выходного напряжения, что положительно сказывается на уменьшении погрешности измерений температуры. Она также обеспечивает равномерную нагрузку по фазам сети, что немало важно при большой потребляемой мощности.

Блоки защиты, сигнализации, импульсного регулирования, импульсно-фазового управления и выходных усилителей управляются тиристорами.

В установке возможны два режима системы управления: автоматическое и ручное. Автоматическое регулирование температуры осуществляется по упрощенной следящей системе с принципом регулирования по отклонениям. Для ручного регулирования в непосредственной близости от регулируемой пресс-формы установлен пульт, который содержит кнопки включения и выключения, а также регулятор напряжения, подсоединенные к вольтметру и амперметру.

Измерительно-регистрирующие устройства представляют собой систему, включающую соответствующие электроизмерительные приборы, потенциометры и манометры.

Для измерения, регистрации и регулирования температуры служат потенциометры КСП-4. Они работают в комплексе с одним или несколькими термоэлектрическими преобразователями стандартных градуировок. Многоканальные приборы рассчитаны на работу с пре-

образователями одной градуировки с одинаковыми пределами измерений.

В целях помехозащиты измерительной цепи потенциометра включен двойной Т-образный фильтр.

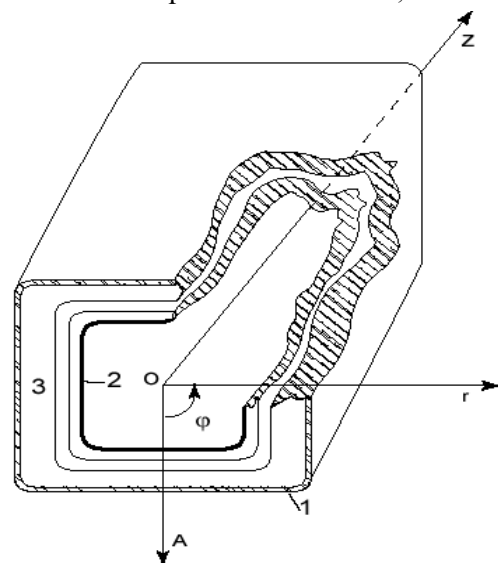
В качестве датчиков температуры используются термопары. Число контролируемых точек в пресс-форме – 10, а в препарированном изделии – 12.

Все термопары соединены с приборами КСП-4 компенсационными проводами. Незадействованные каналы замкнуты на температуру окружающей среды.

Для регистрации давления в пресс-форме используется самопишущий прибор типа МТС-1 с пределом измерения 0-16 кГ/см² и скоростью движения диаграммы 15 угловых градусов за час.

Методика эксперимента. На рис. 2 приведена геометрия узла для получения композиционного материала в результате полимеризации, используемого для изготовления лонжерона лопасти вертолета r, ϕ, z (цилиндрические координаты). Эта технология заключается в следующем.

Наборы листов из композиционного материала собираются в пакеты и предварительно опрессованные укладываются при открытой верхней плите в нижний ручей совместно с резиновой пресс-камерой (технологическим мешком). Затем закрывают при помощи спецключей верхнюю плиту, совмещая плоскость разреза нижней плиты с верхней. Верхняя плита крепится при помощи болтов и затягивается гайками до зазора по плоскости разреза не более 0,3 мм.



1 – нагреватель – матрица, 2 – технологический мешок, 3 – многослойный композиционный материал
Рисунок 2. Геометрия узла установки для получения композиционных материалов в разрезе

С концевой сечению резиновая пресс-камера вытягивается дальше торца пресс-формы и глушится специальным пяточком. На торце комлевого сечения пресс-формы вставляется торцевой фланец и затягивается гайками. К торцевому фланцу подходит система, обеспечивающая давление внутри канала пресс-камеры, и в свою очередь формирует внутренний канал изготавливаемой детали.

После выполнения операций закладки пакетов изделия в пресс-форму и подготовки к работе пресс-форма включается на обогрев, выводится на заданный температурный режим, параллельно включается система, обеспечивающая давление в резиновой пресс-камере. Нагружение последней сжатым воздухом производится плавно. После завершения прессования (полимеризации) изделия пресс-форма раскрывается при помощи спецключей. Предварительно перед раскрытием обязательно сбрасывается давление с пресс-камеры через клапан.

С целью изучения влияния на качество изготовления изделия параметров режима и внешних воздействий и определения возможности их автоматизации были сняты характеристики процесса полимеризации изделия из композиционного материала, а также определены статические, динамические, тепловые и энергетические характеристики пресс-формы.

Снятие характеристик проводилось в автоматическом режиме в трех вариантах: в пустой пресс-форме – с контролем температуры термомпарами типа ХК₆₈ в теле пресс-формы; при закладке препарированного изделия без давления и с давлением – с контролем температуры в теле пресс-формы и изделия. В первом и третьем случаях контроль температуры производится в 10 точках, во втором случае – по 22 точкам. Показания отсчитываются при помощи указателя по шкале потенциометра и записываются на диаграммной ленте. В нашем случае при проведении экспериментов в приборе применялась наименованная диаграммная лента с равномерной сеткой, поэтому для считывания записанного температурного поля пользовались шкалой прибора. Для регистрации применялись двенадцатиканальные приборы с термоэлектрическими преобразователями ТХК. Кроме того, проводилось снятие характеристик пресс-форм при реакции на единичное воздействие определенной мощности, распределение температуры по длине пресс-формы без внешних воздействий со стороны оператора.

Минимальная мощность силового агрегата для обеспечения требуемой скорости нагрева составила для пресс-формы 500-700 кВт, мощность для поддержания режима – 20-35%.

Мощность, необходимая для поддержания температурного режима, сильно зависит от степени теплоизоляции пресс-формы, температуры окружающего воздуха и скорости движения воздуха. Распределение температуры по длине пресс-формы определяется этими же параметрами, а также положением нагревательных элементов, их изоляцией и точностью геометрической формы.

Анализ результатов экспериментальных исследований. Особенности изменения температуры в композиционном материале являются результатом действия многообразных физических закономерностей, определяющих процесс полимеризации. Зависимость ее от времени и представляет собой переходную характеристику. Анализируя и обрабатывая ее, можно определить вид и характер передаточной функции ([3, 4]) процесса полимеризации. Характерными параметрами этой функции являются τ – время запаздывания, c ; θ – постоянная времени, c ; k – коэффициент передачи. Для определения этих параметров было получено 20 циклограмм, представляющих собой зависимость изменения температуры во времени при полимеризации материала лонжерона лопасти вертолета. На рис. 3 приведена одна из таких экспериментальных циклограмм, где t – время, ч; T – температура, °С.

Как видно из данного рисунка, в нем можно выделить три этапа изготовления композиционного материала.

Первый этап соответствует режиму предварительного разогрева полимера, который можно разделить на два периода. Сначала полимер нагревается до температуры $T_1 = 60^\circ \text{C}$. При этом скорость изменения температуры не превышает $1,5\text{-}2^\circ \text{C}/\text{мин}$. В этот период, который продолжается около 1,5 ч, происходит размягчение, уплотнение полимеризующейся массы, удаление воздушных пузырей и излишней влаги. Второй период режима предварительного нагрева длится около получаса.

Анализируя режим предварительного разогрева полимера, определяем, что в данном случае процесс полимеризации аппроксимируется последовательным соединением звена запаздывания с передаточной функцией $W(p) = \exp(-\tau p)$ и апериодического звена первого порядка

$$W(p) = \frac{k}{1 + \theta p},$$

где p – параметр передачи.

Параметры τ, k, θ сначала определялись для каждого сечения τ_s, k_s, θ_s (их было 10 шириной в 1 мм), затем усреднялись для каждого цикла $\tau_{cp}, k_{cp}, \theta_{cp}$ и для всех циклов, разделив их сумму на число сечений и циклов соответственно. На рис. 4 продемонстрирована методика определения экспериментальных значений τ_s, k_s, θ_s , где $k_s = \operatorname{tg} \alpha$, α – угол между касательной к кривой температуры и осью абсцисс.

Обработывая результаты экспериментальных исследований, представленных в виде рис. 3, получим, что параметры этих звеньев имеют такие значения: $\tau = 115c, k = 1,16, \theta = 1200c$.

Второй этап соответствует режиму полимеризации. При этом фронт полимеризации продвигается внутрь собранной многослойной конструкции и достигает внешней поверхности технологического мешка. Температура полимеризации 160-170° С по техпроцессу. Время экспозиции 6 часов. Темп нагрева также 1,5-2° С/мин. Участок циклограммы, соответствующий данному режиму, может быть представлен интегрирующим звеном, в котором передаточная функция имеет вид:

$$W(p) = \frac{k}{p}.$$

Параметр k определяется по результатам анализа циклограмм, соответствующих второму этапу нагрева полимера, из которых имеем значение $k = 1,21$.

Третий этап – это режим охлаждения. В соответствии с техпроцессом охлаждение осуществляется естественным способом без подвода дополнительного потока воздуха. Темп охлаждения не должен превышать 2° С/мин.

На этом участке объект управления представлен инерционным звеном. При этом передаточная функция: $W(p) = \frac{k}{\theta p + 1}$.

Для определения k и θ использовались результаты обработки циклограммы охлаждения, представленные на рис. 3. Из них следовало, что $k = 0,53; \theta = 11544,5c$.

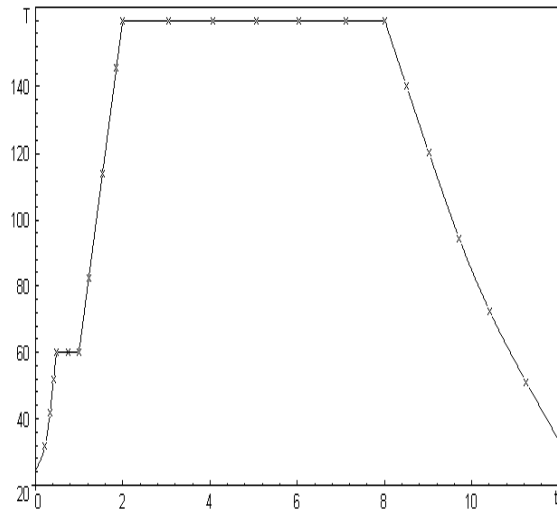


Рисунок 3.

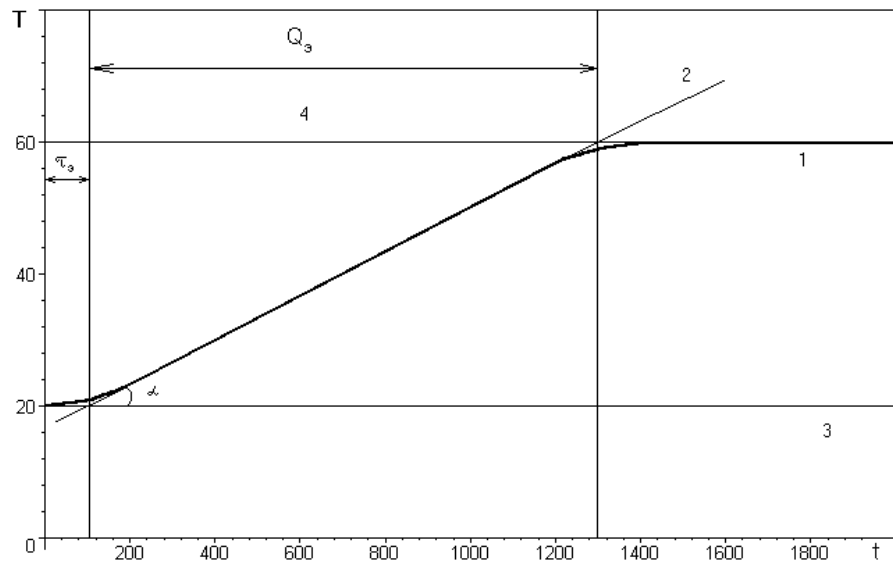


Рисунок 4. Изменение температуры в материале во времени на этапе предварительного нагрева 1 – кривая, 2 – касательная к кривой 1, 3 – изотерма, соответствующая начальной температуре, 4 – изотерма $T = 60^\circ \text{C}$.

Список использованной литературы:

1. Тюков Н.И., Акимов И.А., Акимов А.И. Методология проектирования и автоматизации теплофизических процессов. Уфа, 2001.
2. Воронов А.А. Теория автоматического управления. – М.: Высшая школа, 1977.
3. Волков Н.И., Милловзоров В.П. Электрические устройства автоматики: Учебник для вузов. М., 1986.
4. Алексаков Г.Н., Гаврилин В.В., Федоров В.А. Структурные модели динамических процессов. М., 1989.