

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

О.С. Дмитриев¹, А.А. Живенкова¹, А.О. Дмитриев²

*Кафедры: «Физика» (1); phys@nnn.tstu.ru;
«Управление качеством и сертификация» (2),
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»*

Ключевые слова и фразы: интегро-функциональное уравнение; модуль поддержки принятия решений; обратная задача теплопроводности; объемная теплоемкость; оптимальный режим отверждения; сглаживающий кубический сплайн; температурное поле; теплопроводность; фильтр Калмана.

Аннотация: Предложена интеллектуальная информационно-измерительная система для определения теплофизических характеристик полимерных композиционных материалов. Система позволяет определять объемную теплоемкость и теплопроводность материалов, в том числе и в процессе отверждения композитов. Для нахождения теплофизических характеристик разработан ряд методов и алгоритмов, основанных на интегральном представлении решения обратной задачи теплопроводности с применением аппарата сглаживания кубическими сплайнами и интегрирования по квадратурным формулам, а также на использовании фильтра Калмана. В состав системы входит модуль поддержки принятия решений, помогающий выбрать оптимальный алгоритм расчета теплофизических характеристик в зависимости от условий проведения и результатов эксперимента. Основой аппаратного обеспечения системы является измерительное устройство, реализующее необходимые условия нагрева и отверждения образцов. Система может быть использована как самостоятельно, так и в составе программно-технического комплекса расчета оптимальных режимов отверждения композитов.

Введение

На современном этапе развития техники интенсивно ведутся разработки в области получения новых материалов, в частности полимерных композитов. В связи с расширением диапазона применения этих материалов требуется улучшение характеристик существующих и вновь разрабатываемых полимерных композиционных материалов (ПКМ) и совершенствование методов и технологии их получения [1].

В технологической схеме изготовления ПКМ процессы тепловой обработки материалов являются важнейшими технологическими операциями, во многом определяющими качество готовой продукции. Качественные показатели изделий из полимерных композитов зависят от многих факторов, частности от однородности температурного поля в процессе проведения отверждения и отсутствия при этом превышения температуры начала термической деструкции связующего. Таким образом, важной задачей является проектирование оптимальных технологических режимов отверждения изделий из ПКМ с требуемыми характеристиками.

Расчету оптимальных режимов предшествует построение математической модели отверждения и идентификация параметров этой модели [1]. Одними из ключевых параметров модели отверждения ПКМ являются теплофизические характеристики (ТФХ), особенно в процессе отверждения, имеющие важнейшее значение при расчете оптимальных режимов отверждения изделий из полимерных композитов.

Существует множество методов определения ТФХ, имеющих свои преимущества и недостатки. Однако до сих пор не предложен универсальный метод, дающий одинаково хорошие результаты определения ТФХ для любых материалов, в любом диапазоне и в любых условиях, включая процесс отверждения. В связи с этим, актуальной является задача разработки интеллектуальной информационно-измерительной системы (ИИС), использующей математический аппарат, состоящий из набора различных методов и алгоритмов определения ТФХ, как отвержденных ПКМ, так и в процессе отверждения, и способной, анализируя условия проведения эксперимента, рекомендовать пользователю ИИС применение оптимального алгоритма, дающего минимальную погрешность определения ТФХ.

Аппаратное обеспечение ИИС

Исследование ТФХ полимерных композитов целесообразно проводить с помощью специальных образцов в экспериментальной установке, имитирующей технологические режимы нагрева и отверждения и способной создать специальные граничные условия, необходимые для упрощения алгоритмов обработки экспериментальных данных и получения результатов требуемой точности.

Для проведения исследований ТФХ в экспериментальной установке воспроизводится одномерный, односторонний нагрев образца плоской формы. Односторонний нагрев образца с тепловой изоляцией противоположной стороны позволяет вдвое уменьшить расход исследуемых материалов, а тепловая изоляция боковой поверхности – создать температурное распределение в образце конечных размеров близкое к температурному полю неограниченной пластины.

Основой аппаратно-технического обеспечения ИИС является измерительное устройство, реализующее необходимые условия нагрева и отверждения исследуемых образцов. Измерительное устройство через блок предварительного усиления и адаптеры ввода/вывода соединяется с персональным компьютером (ПК) системы. Измерительное устройство представляет собой микропресс, моделирующий однонаправленный, односторонний нагрев образца в адиабатических условиях при заданном технологическом давлении прессования. Экспериментальный образец имеет вид пластины размером $100 \times 100 \times (5 \dots 30)$ мм, набранной из отдельных слоев препрега. Конструкция измерительной ячейки позволяет проводить исследование образцов в диапазоне температур $20 \dots 250$ °С под давлением до 2 МПа [1, 2]. На рисунке 1 приведена структурная схема аппаратного обеспечения ИИС исследования процесса отверждения полимерных композитов.

В процессе эксперимента ИИС измеряет температуру по направлению градиента в нескольких точках образца и на его поверхностях, напряжение основного нагревателя, регистрирует время, осуществляет тестирование и контроль блоков системы. Результаты экспериментов регистрируются в базе данных ИИС и служат для расчета теплофизических свойств [1, 2].

Канал измерения температуры (см. рис. 1), являющийся основным источником информации о процессе, включает в себя соответствующие термопары, 10 усилителей постоянного тока (УПТ) и многоканальный адаптер аналогового ввода, состоящий из мультиплексора и аналого-цифрового преобразователя. Усилители постоянного тока предназначены для усиления напряжения до стандартного уровня $0 \dots 10$ В. Восемь из них имеют коэффициент усиления $K_y = 1000$. Причем семь усилителей предназначены для усиления сигналов измерительных термопар и один усилитель – для усиления сигнала моста постоянного тока, измеряющего

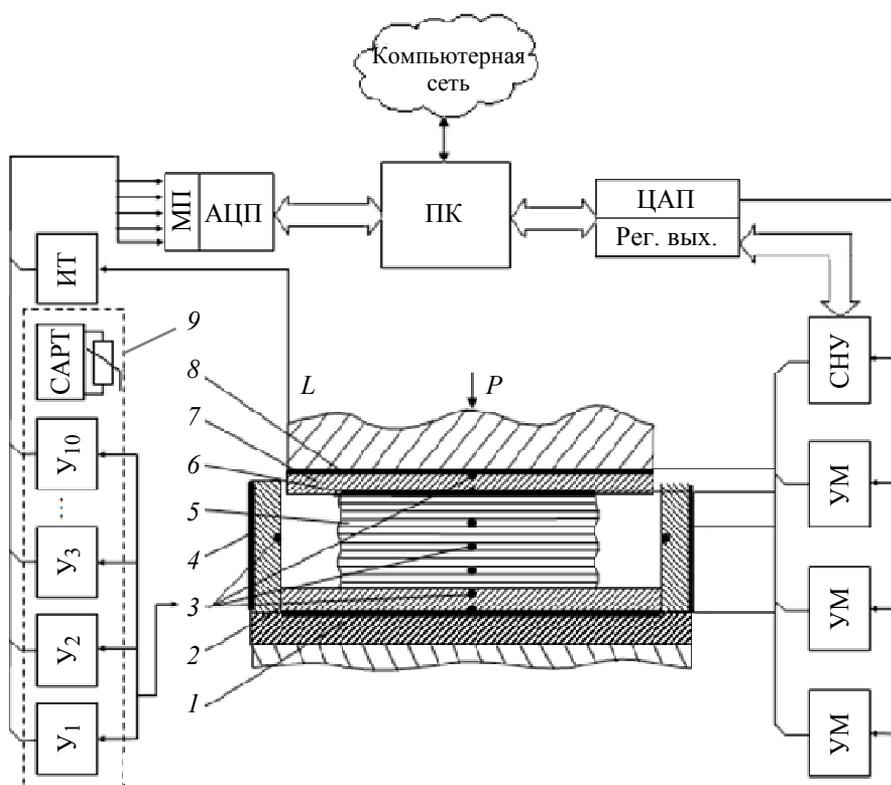


Рис. 1. Структурная схема аппаратного обеспечения ИИС:

АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ИТ – измеритель толщины; МП – мультиплексор; ПК – персональный компьютер; Рег. вых. – регистр выходной; САРТ – система автоматического регулирования температуры; СНУ – стабилизатор напряжения управляемый; У – усилитель постоянного тока; УМ – усилитель мощности; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; 1 – нижний охранный нагреватель; 2 – подложка нижнего нагревателя; 3 – точки заделки термопар; 4 – боковой охранный нагреватель; 5 – исследуемый образец; 6 – основной нагреватель; 7 – подложка верхнего нагревателя; 8 – верхний охранный нагреватель; 9 – термостат усилителей

температуру холодных спаев термопар. Два других усилителя предназначены для усиления сигналов дифференциальных термопар и имеют коэффициент усиления $K_y = 20000$. Все усилители построены по схеме модулятор-демодулятор, обладающей минимальным дрейфом нуля. Усиленные сигналы термопар поступают на вход адаптера аналогового ввода и затем в компьютер. Подобная последовательность обработки сигналов термопар, то есть сначала усиление, а затем коммутирование, позволяет значительно уменьшить влияние на полезный сигнал соизмеримых по величине напряжений утечек переходов электронных мультиплексоров и тем самым повысить точность измерения температуры. Тем не менее при длительном проведении экспериментов (до 10 ч) возникает значительный прогрев аппаратуры, что смещает настройки нулей УПТ и вызывает дополнительные систематические погрешности измерения температуры, особенно каналов усиления сигналов дифференциальных термопар. Для уменьшения влияния температуры внутри блока усиления и температуры окружающей среды на измерения, УПТ помещены в теплоизолированный термостат, внутри которого поддерживается температура на уровне 40 °С. Для этого в ИИС введен дополнительный аналоговый канал автоматического ПИ-регулятора САРТ. Аналоговый принцип построения автоматического регулятора термостата позволяет проводить автоном-

ный прогрев системы в течение 20 мин без запуска программы управления. Для измерения температуры внутри термостата применен терморезистор. Блок регулирования вместе с терморезистором, усилителем, автоматическим регулятором и тиристорным усилителем мощности смонтирован на отдельной плате и размещен внутри термостата, что также повышает термостабильность канала измерения температуры.

Программное обеспечение ИИС

Программное обеспечение ИИС производит предварительную обработку экспериментальных данных, выполняет расчет ТФХ на основе предложенных математических методов и разработанных программных алгоритмов, обеспечивает выбор алгоритма расчета, исходя из конкретных заданных и полученных условий проведения эксперимента, и включает [1, 3]:

- модуль сбора, хранения и графического отображения данных, полученных экспериментально;

- модуль математического обеспечения расчета ТФХ, содержащий комплекс алгоритмов, решающих обратные задачи теплопроводности (**ОЗТ**);

- модуль поддержки принятия решений (**МППР**), позволяющий решать задачу выбора алгоритма определения ТФХ, обладающего устойчивостью и имеющего минимальную среди других алгоритмов погрешность расчета ТФХ при заданных условиях проведения и полученных результатах эксперимента.

Модуль, отвечающий за сбор, хранение и графическое отображение данных работает с базой данных системы, осуществляя выборку хранящихся в ней данных об экспериментах, а также запись новых экспериментальных данных. Модуль также осуществляет визуализацию экспериментально полученных и рассчитанных величин в виде графиков.

Модуль математического обеспечения расчета ТФХ, включает следующие алгоритмы:

- расчета временной зависимости ТФХ по температурам внутри образца и его поверхностей;

- расчета временной зависимости ТФХ по температурам только поверхностей образца;

- расчета температурной зависимости ТФХ, основанный на решении интегро-функциональных уравнений [4–6];

- расчета временной зависимости ТФХ, использующий фильтр Калмана [7].

Рассмотрим общие принципы построения методов и алгоритмов определения ТФХ, применяемых в ИИС.

В основе методов лежит математическая модель нагрева образца, представленная дифференциальным уравнением теплопроводности с граничными условиями второго рода, соответствующая модели неограниченной пластины:

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right);$$

$$T \equiv T(x, t), \quad 0 < x < L, \quad 0 < t \leq t_k;$$

$$T(x, 0) = f_0(x), \quad 0 \leq x \leq L; \tag{1}$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_0(t), \quad 0 < t \leq t_k;$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = q_L(t), \quad 0 < t \leq t_k,$$

где $C(T)$ – объемная теплоемкость, Дж/(м³·К); f – начальное распределение температуры, К; q_0, q_L – тепловые потоки на поверхностях образца, Вт/м²; L – толщина образца, м; t, t_k – текущее и конечное время эксперимента соответственно, с; T – температура, К; x – координата по толщине образца, м; $\lambda(T)$ – теплопроводность, Вт/(м·К).

В первом методе и алгоритме расчета ТФХ используются интегральное преобразование уравнения модели и допущение о временной зависимости ТФХ с соотношением времени t к среднеинтегральной температуре $T_{cp}(t)$. Расчет ТФХ ведется на основе температурного поля $T(x, t)$ по формулам [4]:

$$C \equiv C(t) \equiv C(T_{cp}(t)) = \frac{q_L(t) - q_0(t)}{\frac{d}{dt} \int_0^L T(x, t) dx} = \frac{q_L(t) - q_0(t)}{\theta'(t)}; \quad (2)$$

$$\lambda \equiv \lambda(t) \equiv \lambda(T_{cp}(t)) = \frac{Lq_L(t) - C(t) \frac{d}{dt} \int_0^L xT(x, t) dx}{T_0(t) - T_L(t)}, \quad (3)$$

где $T_{cp}(t) = \frac{1}{L} \int_0^L T(x, t) dx$ – среднеинтегральная температура; $\theta(t) = \int_0^L T(x, t) dx$ – интегральная характеристика температуры.

Устойчивость операции численного дифференцирования достигается сглаживанием экспериментального температурного распределения $T(x, t)$ кубическими сплайнами [5]. Для вычисления значений интегралов в формулах (2), (3) применяется аппарат квадратурных формул, дающий лучшие результаты расчета при наличии трех и более экспериментальных точек по пространственной координате x .

Второй метод и алгоритм расчета ТФХ также используют интегральное преобразование уравнения модели и допущение о временной зависимости ТФХ, но формулы расчета адаптированы для случая, когда измерения температуры производятся только на двух поверхностях образца $T_0(t)$ и $T_L(t)$ [6]:

$$C(T_{cp}(t)) = \frac{q_0(t) - q_L(t)}{L \frac{d}{dt} \left(\frac{q_L(t)[T_L(t) + 2T_0(t)] + q_0(t)[T_0(t) + 2T_L(t)]}{3[q_L(t) + q_0(t)]} \right)}; \quad (4)$$

$$\lambda(T_{cp}(t)) = \frac{Lq_L(t) + L^2 C(T_{cp}(t)) \frac{d}{dt} \left(\frac{3q_L(t)[T_L(t) + T_0(t)] + q_0(t)[5T_L(t) + T_0(t)]}{12[q_L(t) + q_0(t)]} \right)}{T_0(t) - T_L(t)}. \quad (5)$$

Третий метод и алгоритм основан на интегральном представлении решения ОЗТ в виде интегро-функционального уравнения и построения итерационной процедуры. В качестве первого приближения теплоемкости и теплопроводности используются значения, рассчитанные по формулам (2) – (5). Расчет ТФХ производится на основе температурного поля $T(x, t)$ по алгоритмам [4]:

$$J_C^{[n]}(T_L(t_j)) = J_C^{[n-1]}(T_L(t_j)) + \frac{q_L(t_j) - q_0(t_j) + \frac{d}{dt} \int_0^L [J_C^{[n-1]}(T(x_i, t_j)) - J_C^{[n-1]}(T(x_i, 0))] dx}{V(T_L(t_j), t_j)}; \quad (6)$$

$$\lambda(T_L(t)) = \lambda(T_0(t)) \frac{T'_0(t)}{T'_L(t)} + \frac{1}{T'_L(t)} \left(\frac{d}{dt} \int_{T_0(t)}^{T_L(t)} T^{\{n-1\}}(s,t) V(s,t) C(s) ds - L q'_L(t) \right), \quad (7)$$

где $C(T) = \frac{dJ_C(T)}{dT}$; $J_C^{[0]}(T(x,t)) = \int_{T(0,t)}^{T(x,t)} C^{[0]}(s) ds$, $x \in [0, L]$ – первое приближение;

$V(T_L(t_j), t_j) = \frac{\partial T^{\{n-1\}}(T_L(t_j), t_j)}{\partial t_j}$ – скорость движения изотермической поверхно-

сти; n – номер итерации, $n = 1, 2, 3, \dots, N$; x_i – дискретное значение координаты по толщине образца; t_j – дискретное время.

Четвертый метод и алгоритм основан на применении фильтра Калмана [7], позволяющего на основе математической модели процесса теплопереноса (1) и аналитического решения уравнения теплопроводности [8] по экспериментальным измерениям температурного поля $T(x, t)$ построить оптимальные оценки [9]:

– теплоемкости

$$\hat{C}'_j = \hat{C}'_{j-1} + \frac{q_L(t_j) t_j R_j}{L D_0} \left(\bar{T}_j - \frac{q_L(t_j) t_j}{L} \hat{C}'_{j-1} \right), \quad (8)$$

где $\frac{1}{R_j} = \frac{1}{R_{j-1}} + \frac{q_L^2(t_j) t_j^2}{L^2 D_0}$; $\bar{T}_j = T_j - T_0(L) - \frac{q_L(t_j) L}{3 \lambda_j}$; $\hat{C}'_j = \frac{1}{C_j}$;

– теплопроводности

$$\hat{\lambda}'_j = \hat{\lambda}'_{j-1} + \frac{q_L(t_j) L R_j}{3 D_0} \left(\bar{T}_j - \frac{q_L(t_j) L}{3} \hat{\lambda}'_{j-1} \right), \quad (9)$$

где $\frac{1}{R_j} = \frac{1}{R_{j-1}} + \frac{q_L^2(t_j) L^2}{9 D_0}$; $\bar{T}_j = T_j - T_0(L) - \frac{q_L(t_j) t_j}{C_j L}$; $\hat{\lambda}'_j = \frac{1}{\lambda_j}$; D_0 – погреш-

ность измерительного прибора; R_j – апостериорная оценка дисперсии; j – индекс дискретного времени.

На рисунке 2 представлены графики расчета ТФХ, полученные четырьмя алгоритмами на основе имитационного моделирования при наложении шума

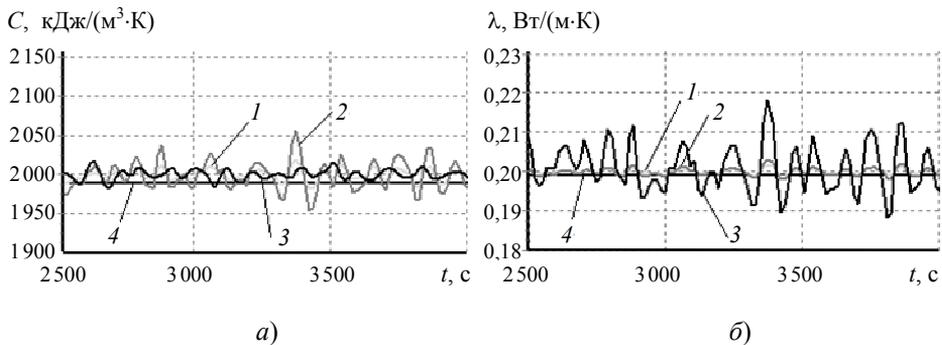


Рис. 2. Сравнение результатов работы алгоритмов определения ТФХ ПКМ:

a – теплоемкости C ; b – теплопроводности λ ;

- 1 – алгоритм расчета временной зависимости ТФХ по температурам внутри образца и его поверхностей; 2 – алгоритм расчета временной зависимости ТФХ по температурам поверхностей образца; 3 – алгоритм, основанный на интегральном представлении решения ОЗТ; 4 – алгоритм, использующий фильтр Калмана

на температуру образца $\pm 0,1$ К. Различия в полученных графиках дают представление о том, что рассмотренные методы и алгоритмы расчета имеют различную точность и устойчивость в зависимости от условий проведения эксперимента.

В результате анализа изменения погрешности (рис. 3) и устойчивости расчета ТФХ с помощью описанных алгоритмов, проведенном на основе имитационного моделирования и отработанного на обширном экспериментальном материале, а также в результате выделения математических и логических ограничений применения алгоритмов расчета получены данные для построения МППР ИИС [3].

Модуль поддержки принятия решений ИИС построен на основе метода анализа иерархий (МАИ), предназначенного для решения многокритериальных задач с конечным множеством возможных векторов. Его применение основано на экспериментальной информации об относительной важности критериев в виде матрицы парных сравнений [10].

Целью построения МППР является повышение точности расчетов ТФХ путем выбора оптимального алгоритма расчета, имеющего минимальную погрешность. Таким образом, имеется набор альтернатив, с помощью которых можно добиться поставленной цели. В качестве альтернатив выступают четыре алгоритма расчета ТФХ.

Альтернативы сравниваются между собой по отдельным критериям с целью определения наиболее удачной. Критерии также сравниваются между собой с целью градации их по степени важности. В качестве критериев применительно к задаче выбора оптимального метода и алгоритма расчета ТФХ в конкретных условиях проведения эксперимента целесообразно использовать перечень этих условий и оценивать фактическую работоспособность алгоритма и погрешность в зависимости от критерия. Построенный перечень критериев K_m примет вид:

- толщина образца (K_1);
- перепад температуры ($T_L(t) - T_0(t)$) по толщине образца (K_2);
- время эксперимента (K_3);
- количество термопар, проводящих замеры по толщине образца (K_4);
- погрешность измерения температуры (K_5).

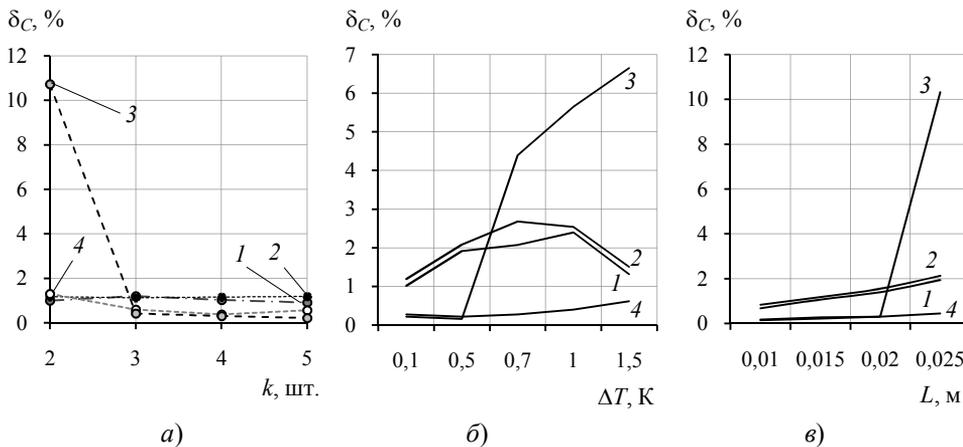


Рис. 3. Анализ погрешностей δ_C расчета теплоемкости различными алгоритмами в зависимости от условий эксперимента:

- a – числа термопар k ; $б$ – погрешности температуры ΔT ; $в$ – толщины образца L ;
- 1 – алгоритм расчета временной зависимости ТФХ по температурам внутри образца и его поверхностей; 2 – алгоритм расчета временной зависимости ТФХ по температурам поверхностей образца; 3 – алгоритм, основанный на интегральном представлении решения ОЗТ;
- 4 – алгоритм, использующий фильтр Калмана

Проводится имитационное моделирование путем плавного последовательного изменения значений одного критерия при фиксации значений остальных и получения погрешностей всех алгоритмов расчета. После завершения расчетов с изменением значения одного критерия переходим к следующему и так далее. В результате получаем набор диапазонов значений по каждому критерию и соответственный набор значений погрешностей расчетов четырьмя алгоритмами. Полученные данные оформляются в виде набора правил базы знаний в формате:

$$\begin{aligned} &\text{ЕСЛИ } K_1 \in [e_1^1, e_2^1], \text{ ТО } p_1^1, p_2^1, p_3^1, p_4^1 \\ &\text{ЕСЛИ } K_1 \in [e_3^1, e_4^1], \text{ ТО } p_1^2, p_2^2, p_3^2, p_4^2 \\ &\dots \\ &\text{ЕСЛИ } K_1 \in [e_{z_1-1}^1, e_{z_1}^1], \text{ ТО } p_1^{z_1/2}, p_2^{z_1/2}, p_3^{z_1/2}, p_4^{z_1/2} \\ &\dots \\ &\text{ЕСЛИ } K_m \in [e_{z_m-1}^m, e_{z_m}^m], \text{ ТО } p_1^{z_m/2}, p_2^{z_m/2}, p_3^{z_m/2}, p_4^{z_m/2}, \end{aligned}$$

где K_1, \dots, K_m – символьные обозначения критериев; $[e_{z_m-1}^m; e_{z_m}^m]$ – диапазоны значений каждого из критериев; $p_1^{z_m/2}, p_2^{z_m/2}, p_3^{z_m/2}, p_4^{z_m/2}$ – значения погрешности расчета каждым из четырех методов при попадании критерия в указанный диапазон.

Таким образом, при наступлении конкретных условий эксперимента мы можем получить оценку каждого метода по всем критериям, используя правила, хранящиеся в базе знаний f_α^β (α – номер критерия, β – номер альтернативы). После этого строим суммарную оценку каждого метода по всем критериям

$$S^\beta = \sum_{\alpha=1}^m w_\alpha f_\alpha^\beta, \quad (10)$$

где w_α – веса, характеризующие сравнительную важность критериев.

Веса определяются на основе МАИ путем построения матрицы парных сравнений. Выбирается один из критериев, с которым удобнее всего сравнивать все остальные. Далее эксперту предлагается определить, во сколько раз вес первого критерия больше веса второго. Далее сравнить первый критерий с третьим и так далее. После таких сравнений будут получены числа $a_{11}=1, a_{12}, \dots, a_{1m}$. Остальные элементы матрицы парных сравнений определяются по формуле [10]:

$$a_{\alpha\beta} = \frac{a_{1\beta}}{a_{1\alpha}}, \quad \alpha, \beta = 2, \dots, m. \quad (11)$$

Далее определяются веса, характеризующие сравнительную важность критериев:

$$w_\alpha = \frac{a_{1m}}{a_{1\alpha}}, \quad \alpha = 1, \dots, m-1, \quad w_m = 1, \quad (12)$$

где a – элемент матрицы парных сравнений.

Полученные по формуле (12) веса нормируются и подставляются в формулу (10). После чего выбирается тот алгоритм расчета ТФХ, оценка которого принимает минимальное значение.

Наличие в ИИС процедуры поддержки принятия решений по выбору оптимального алгоритма дает возможность получения минимальных погрешностей расчета ТФХ пользователям, не имеющим специальных знаний о принципах работы методов и алгоритмов расчета и условиях их применения, что расширяет возможности пользовательского интерфейса ИИС. Все алгоритмы расчета ТФХ в ИИС и описания их применения в модуле поддержки принятия решения представлены отдельными независимыми процедурами. Такая архитектура построения программного обеспечения ИИС дает возможность в будущем наращивать количество алгоритмов, повышая тем самым точность расчета ТФХ.

Выводы

Рассмотрена интеллектуальная ИИС, позволяющая рассчитывать ТФХ ПКМ в процессе нагрева и отверждения различными алгоритмами, автоматически выбираемыми с помощью модуля поддержки принятия решений. МППР позволяет решать задачу выбора алгоритма определения ТФХ, обладающего устойчивостью и имеющего минимальную среди других алгоритмов погрешность расчета ТФХ при заданных условиях и полученных результатах эксперимента, снижая тем самым степень ответственности, возложенную на пользователя ИИС.

Интеллектуальная ИИС может работать как самостоятельное программно-техническое обеспечение, так и в составе более сложного комплекса по расчету оптимального режима отверждения композитов, обеспечивая снижение погрешности в расчетах ТФХ по сравнению с использованием единственного алгоритма.

Список литературы

1. Измерительно-вычислительная система для исследования свойств клеевых препрегов и расчета режимов отверждения ПКМ на их основе / О.С. Дмитриев [и др.] // Клеи, герметики, технологии. – 2009. – № 6. – С. 22–28.
2. Повышение точности измерения температуры в информационно-измерительной системе исследования процесса отверждения полимерных композитов / О.С. Дмитриев [и др.] // Теплофизические исследования и измерения в энерго- и ресурсосбережении, при контроле и управлении качеством процессов, продукции и услуг : материалы VIII междунар. теплофиз. шк., Таджикистан, 8–13 окт. 2012 г. / Таджик. техн. ун-т. – Душанбе, 2012. – С. 411–412.
3. Черепихина, А.А. Интеллектуальная информационно-измерительная система для определения теплофизических характеристик полимерных композитов в процессе отверждения / А.А. Черепихина, О.С. Дмитриев, В.Н. Кириллов // Современные методы и средства исследования теплофизических свойств веществ : материалы II междунар. науч.-техн. конф., г. Санкт-Петербург, 28–30 нояб. 2012 г. / Ин-т холода и биотехнологий. – СПб., 2012. – С. 167–168.
4. Дмитриев, О.С. Технология определения теплофизических характеристик полимерных композитов, основанная на использовании математического аппарата интегро-функциональных уравнений / О.С. Дмитриев, А.А. Черепихина // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент : материалы III междунар. науч.-инновац. молодеж. конф., г. Тамбов, 2011 г. / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2011. – С. 333–335.
5. Черепихина, А.А. Применение сглаживающего кубического сплайна для аппроксимации температурных полей при решении обратной задачи теплопроводности / А.А. Черепихина // Научный электронный архив. – Режим доступа : <http://econf.rae.ru/article/4813>. – Загл. с экрана.
6. Черепихина, А.А. Выбор метода определения теплофизических характеристик полимерных композитов в процессе отверждения / А.А. Черепихина, О.С. Дмитриев // Математические методы в технике и технологиях : материалы XXV междунар. науч. конф., г. Саратов, 29–31 мая 2012 г. / Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов, 2012. – Т. 6 – С. 130–133.
7. Мацевитый, Ю.М. Идентификация в задачах теплопроводности / Ю.М. Мацевитый, А.В. Мултановский. – Киев : Наук. думка, 1982 – 240 с.
8. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков – М. : Высшая школа, 1967 – 599 с.

9. Черпахина, А.А. Адаптивный фильтр температурных измерений теплофизического эксперимента / А.А. Черпахина, О.С. Дмитриев, Г.В. Романенко // Теплофизические исследования и измерения в энергосбережении, при контроле, управлении и улучшении качества продукции, процессов и услуг : материалы VII междунар. теплофиз. шк., Тамбов, 2010 г. / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2010 – Ч. II. – С. 104–108.

10. Ногин, В.Д. Принятие решений при многих критериях : учеб.-метод. пособие / В.Д. Ногин. – СПб. : ИУТАС, 2007 – 104 с.

Intelligent Computer-Measuring System for Determining the Thermophysical Properties of Polymer Composites

O.S. Dmitriev, A.A. Zhivenkova, A.O. Dmitriev

*Department "Physics", TSTU;
phys@nnn.tstu.ru*

Key words and phrases: decision support module; integro-functional equation; inverse heat conduction problem; the Kalman filter; optimal curing mode; smoothing cubical spline; temperature field; volumetric heat capacity.

Abstract: Intelligent computer-measuring system for determining the thermophysical properties of polymer composites is proposed. The system allows calculating the volumetric heat capacity and thermal conductivity of samples, including during curing. For determination of thermophysical properties are developed several methods that are based on the integral representation of the inverse heat conduction problem with the use of a cubic spline smoothing technique and integration by quadrature formulas, and the use of the Kalman filter. The system includes a decision support module, which helps to choose the best method for calculating the thermophysical properties depending on the experimental conditions. The main part of the system hardware is a measuring device that implements the necessary conditions of heating and curing of the experimental samples. The system can be used both independently and as part of software of the computer-measuring system for calculate of optimum curing cycles of composites.

Intellektuelles Informationsmeßsystem für die Bestimmung des thermophysikalischen Eigenschaften von Polymerverbundwerkstoffen

Zusammenfassung: Es ist das intellektuelle Informationsmeßsystem für die Bestimmung der thermophysikalischen Eigenschaften von Polymerverbundwerkstoffen vorgeschlagen. Das System berechnet die volumenbezogene Wärmekapazität und thermischen Leitfähigkeit der Proben, einschließlich während des Aushärtens. Zur Bestimmung der thermophysikalischen Eigenschaften sind mehrere Methoden, die auf der integrierten Darstellung des inversen Wärmeleitung Problem bei der Verwendung eines kubischen Spline Glättungstechnik und Integration durch Quadratur Formeln, und die Verwendung des Kalman-Filters basierend entwickelt. Das System enthält ein Entscheidungshilfemodul, welches die beste Methode für die Berechnung der thermophysikalischen Eigenschaften in Abhängigkeit von den experimentellen Bedingungen wählen kann. Der Hauptteil der Systemhardware ist eine Messeinrichtung,

die die erforderlichen Bedingungen zum Erhitzen und Aushärten der experimentellen Proben implementiert. Das System kann sowohl unabhängig als auch als Teil der Software des Informationensystems zur Berechnung der optimalen Aushärtezyklen von Polymerverbundwerkstoffen verwendet werden.

Système intellectuel d'information et de mesure pour la détermination des propriétés thermiques et physiques des composites polymères

Résumé: Est proposé le système intellectuel d'information et de mesure pour la détermination des propriétés thermiques et physiques des composites polymères. Le système permet de calculer la capacité calorifique volumique et la conductibilité thermique des échantillons, y compris pendant le durcissement. Pour la détermination des propriétés thermophysiques sont élorées plusieurs méthodes qui sont basées sur la représentation intégrale du problème inverse de la conductibilité de la chaleur avec l'utilisation d'une technique de lissage spline cubique et l'intégration par les formules de quadrature, ainsi qu'avec l'utilisation du filtre de Kalman. Le système comprend un module de l'aide à la décision, ce qui permet de choisir la meilleure méthode pour le calcul des propriétés thermophysiques en fonction des conditions expérimentales. La partie principale du matériel du système est un dispositif de mesure qui réunit les conditions du chauffage et du durcissement des échantillons expérimentaux. Le système peut être utilisé à la fois indépendamment et en tant que partie du logiciel du système informatique de mesure pour calculer des cycles optimaux du durcissement des composites.

Авторы: *Дмитриев Олег Сергеевич* – доктор технических наук, профессор, научный руководитель кафедры «Физика», декан факультета АТФ; *Живенкова Анна Александровна* – аспирант кафедры «Физика»; *Дмитриев Андрей Олегович* – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Управление качеством и сертификация», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Жуков Николай Павлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидравлика и теплотехника», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
