

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

О. С. Дмитриев¹, И. В. Малков²

*Кафедра «Физика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; phys@nnn.tstu.ru (1);
кафедра «Станки, инструменты и инженерная графика», ГОУ ВПО «Луганский
государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск, Украина (2)*

Ключевые слова: намотка; полимерный композиционный материал; термообработка; технологическая схема; трубчатые элементы; углепластик; ферменные конструкции.

Аннотация: Представлены исследования влияния технологических схем и режимов термообработки на геометрические и механические характеристики углепластиковых трубчатых элементов ферменных конструкций космических аппаратов. Приведена математическая модель термообработки, на основе которой рассчитаны оптимальные режимы отверждения намотанных трубчатых элементов с учетом различных технологических схем. Дано описание статистической гипотезы о существенности влияния технологической схемы и схемы армирования на отклонение толщины стенки трубчатых элементов и их прочностные характеристики.

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ), армированные углеродными волокнами, известные как углепластики, широко применяются в различных отраслях современной техники, в том числе в конструкциях космических и перспективных летательных аппаратов [1, 2]. В частности, высокомодульные углепластики наряду с уникальными прочностными характеристиками и малой плотностью имеют высокое сопротивление усталости, меньшую чувствительность к концентрациям напряжений, низкую скорость распространения трещин, что обеспечивает повышенную долговечность конструкций из этих материалов.

Как правило матрицей для армированных углепластиков являются терморезистивные связующие на эпоксидной основе. Эти связующие обладают низкой химической усадкой и гарантируют получение полимерных композитов с наиболее высокими упруго-прочностными свойствами, что позволяет из углепластиков на их основе изготавливать размеростабильные элементы [3]. Поэтому в космических аппаратах из высокомодульных углепластиков изготавливают трубчатые элементы (ТЭ) по технологии намотки.

Технология намотки заключается в получении цилиндрических изделий способом намотки нитей, волокон, лент, жгутов или других рулонных материалов на цилиндрическую формообразующую оправку с последующей термообработкой в автоклаве или термокамере. Намотку выполняют как «сухим» методом рулонным препрегом, так и «мокрым» методом, при котором намоточный наполнитель непосредственно перед укладкой на оправку пропитывают связующим [4].

В технологии намотки существенное влияние на получаемые физико-механические характеристики армированных пластиков оказывает технологическая схема (ТС) термообработки ТЭ, то есть последовательность таких технологических операций, как обжатие, выдержка на воздухе, полимеризация, их продолжительность, очередность и сочетание. Наибольшее значение в ТС термообработки имеет процесс полимеризация или отверждения. В результате отверждения физико-механические характеристики армированных пластиков изменяются в широких пределах, что может приводить к нестабильности свойств материала в изделии. Кроме того, в процессе отверждения композитных изделий на основе терморепактивных связующих как правило протекает экзотермическая реакция. При использовании неоптимального температурно-временного режима отверждения это вызывает существенный перегрев внутренних слоев материала, деструкцию связующего, накопление внутренних напряжений, вызывающих снижение прочностных характеристик материала, коробление и изменение геометрических размеров. Устранить указанные недостатки и тем самым повысить качественные показатели и физико-механические характеристики изделий из ПКМ можно путем задания оптимального температурно-временного режима отверждения в сочетании с другими технологическими приемами. Данная задача актуальна при изготовлении длинномерных трубчатых элементов.

Определение режима термообработки трубчатых элементов

Определение технологического режима термообработки ТЭ из полимерных композитов является сложной и ответственной задачей. Оно сопряжено с существенными трудностями, вызванными отсутствием теории, описывающей процесс термообработки, включая отверждение композита. До недавнего времени оно осуществлялось методом проб и ошибок на основе выполнения большого числа длительных экспериментов или методами термического анализа, включающими дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК), термомеханический анализ (ТМА), динамический механический анализ (ДМА) и т.д. [4, 5].

Современные методы проектирования оптимальных режимов термообработки и, в частности, процесса отверждения ПКМ базируются на использовании математических моделей [6, 7]. Они заключаются в постановке и численном решении экстремальной задачи минимизации некоторого критерия оптимальности, обеспечивающего создание качественного готового изделия за минимальное время с минимальными остаточными напряжениями [8, 9]. С помощью этих методов можно определять режимы отверждения изделий из полимерных композитов любых геометрических форм и размеров, включая длинномерные трубчатые элементы и ферменные конструкции.

Определение режима термообработки ТЭ проводили в два этапа, сначала методами математического моделирования и оптимизации и затем эмпирическим перебором различных технологических схем. На первом этапе проводили исследование свойств материала, которые являются параметрами математической модели, и рассчитывали оптимальные режимы отверждения. На втором, рассчитанные оптимальные режимы отверждения дополняли различными технологическими приемами, которые невозможно математически смоделировать, и проводили исследование влияния полученного комбинированного режима термообработки на геометрические характеристики и размеростабильность углепластиковых ТЭ [10].

Приведем основные задачи, которые необходимо решить при расчете оптимального режима отверждения трубчатых элементов из ПКМ, гарантирующие высокое качество и низкую себестоимость изделий, следующие [4, 8]:

- снижение температурно-конверсионной неоднородности материала ТЭ;
- полное отверждение связующего в готовом ТЭ;
- снижение продолжительности режима термообработки и энергозатрат;
- уплотнение композита до заданных размеров и геометрии ТЭ.

Особенностью процесса намотки ТЭ является высокая пористость изделий, получаемых по этой технологии, вызванная захватом воздуха намоточным материалом в процессе намотки. Для уменьшения пористости намотанного изделия намотку армирующего наполнителя осуществляют под определенным усилием. В результате силовой намотки каждый наматываемый с натяжением виток создает определенное «контактное» давление на нижележащие слои неотвержденного ПКМ. На этапе намотки и удаления летучих соединений при нагреве и размягчении связующего, выдержке и обжиге происходят межслойная фильтрация связующего к наружным слоям и перемещение в обратном направлении армирующего наполнителя [4]. На этапе горячего отверждения в автоклаве перераспределения связующего внутри ТЭ практически не происходит, и поэтому нет необходимости учитывать в математической модели массоперенос и локальное изменение коэффициента наполнения композита.

Математическая модель процесса термообработки и отверждения ТЭ в термокамере при нагреве потоком греющего воздуха представляет собой систему дифференциальных уравнений:

- теплопроводности

$$C_i \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q_{ni} \frac{\partial \beta_i}{\partial \tau}; \quad (1)$$

$$T \equiv T(r, \tau), \quad 0 \leq r_{i-1} < r < r_i, \quad 0 < \tau \leq \tau_k, \quad i = 1, 2;$$

$$C_1 \equiv C_1(T), \quad \lambda_1 \equiv \lambda_1(T), \quad Q_{n1} = 0;$$

$$C_2 \equiv C_2(T, \beta), \quad \lambda_2 \equiv \lambda_2(T, \beta), \quad Q_{n2} \neq 0;$$

$$T(r, 0) \equiv f(r), \quad 0 \leq r_0 \leq r \leq r_2; \quad (2)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \alpha [T_B(\tau) - T(r_0, \tau)], \quad 0 < \tau \leq \tau_k; \quad (3)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = \alpha [T_B(\tau) - T(r_2, \tau)], \quad 0 < \tau \leq \tau_k; \quad (4)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_i-0} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_i+0}, \quad 0 < \tau \leq \tau_k, \quad i = 1, 2; \quad (5)$$

$$T(r, \tau) \Big|_{r=r_i-0} = T(r, \tau) \Big|_{r=r_i+0}, \quad 0 < \tau \leq \tau_k, \quad i = 1, 2; \quad (6)$$

- кинетики отверждения

$$\frac{\partial \beta}{\partial \tau} = \begin{cases} \varphi(\beta) \exp \left[-\frac{E(\beta)}{RT} \right], & \beta < 1, \\ 0, & \beta = 1, \end{cases} \quad (7)$$

$$\beta \equiv \beta(r, \tau), \quad 0 \leq r_1 < r < r_2, \quad 0 < \tau \leq \tau_k;$$

$$\beta(r, 0) = \beta_0(r), \quad 0 \leq r_1 < r < r_2; \quad (8)$$

$$h = r_2 - r_1, \quad (9)$$

где C – объемная теплоемкость, Дж/(м³·К); E – энергия активации отверждения, Дж/моль; f – начальное распределение температуры, К; h – толщина стенки ТЭ, м; Q_n – полный тепловой эффект, Дж/м³; i – номер слоя (слои: 1 – формообразующая оправка, 2 – ТЭ из ПКМ); R – универсальная газовая постоянная; r – эквивалентный радиус, м; T – температура, К; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); β – степень отверждения; φ – кинетическая функция, 1/с; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); τ , τ_k – время и конечное время процесса соответственно, с.

При термообработке в автоклаве отверждаемый ТЭ (слой 2) с внешней стороны нагревается потоком обогриваемого воздуха при температуре $T_B(\tau)$. Тепло к внутренней поверхности ТЭ подводится через формообразующую оправку (слой 1) обогриваемым потоком воздуха. В результате на внешней поверхности ТЭ и внутренней поверхности оправки имеет место вынужденный конвективный теплообмен по закону Ньютона, то есть осуществляется граничное условие третьего рода. Температура греющего воздуха $U(\tau) = T_B(\tau)$ является управляющим воздействием, при помощи которого отверждаемый материал ТЭ подвергается температурному нагружению по определенному строго заданному режиму.

Предложенная математическая модель, дополненная конкретными характеристиками композита, была использована для расчета режима отверждения ТЭ.

Необходимые для решения уравнений математической модели характеристики композита определяются из опытов с использованием специальных методов и установок, воспроизводящих условия, близкие к технологическому процессу намотки. Разработаны ряд методов, алгоритмов и информационно-измерительная система (ИИС) исследования процесса отверждения полимерных композитов [9], которая позволяет исследовать в процессе отверждения следующие характеристики ПКМ: теплофизические (объемную теплоемкость $C(T, \beta)$ и теплопроводность $\lambda(T, \beta)$ в зависимости от температуры T и степени отверждения β), мощность тепловыделений $W(\tau)$, полный тепловой эффект отверждения Q_n); кинетические (энергию активации процесса отверждения $E(\beta)$, кинетическую функцию $\varphi(\beta)$, включающую в себя скорость и порядок химической реакции). Остальные параметры материала и изделия, такие как толщина одного слоя связующего, плотность, масса, число слоев углеродного волокна в изделии задаются из проектной документации или определяются по стандартным методикам. Исследованные с помощью ИИС характеристики ПКМ служат информационной основой для компьютерного моделирования различных ситуаций в процессе отверждения и расчета оптимальных режимов отверждения углепластиковых ТЭ [8, 9].

Математическая постановка задачи оптимизации процесса отверждения ТЭ заключается в поиске температурно-временного режима греющего воздуха $U(\tau) = T_B(\tau)$, являющегося управляющим воздействием, который доставляет минимум некоторому критерию оптимальности $I_{\tau_k} = \min_{U(\tau; \tau_k)} \int_0^{\tau_k} d\tau$ и обеспечивает

создание качественного готового изделия с минимальной продолжительностью процесса τ_k при выполнении связей в виде математической модели (1) – (9), соответствующей рассматриваемой технологии намотки и термообработки, а также ограничениям в виде неравенств, налагаемых на процесс с учетом допустимых оборудованием температурно-временных режимов.

Найдем ступенчатый температурно-временной режим

$$U_j(\tau) = \begin{cases} \tilde{T}_{j-1} + \tilde{K}_j \tau, & \tau_{j-1} < \tau < \tau_{n_j}, \\ \tilde{T}_j, & \tau_{n_j} \leq \tau \leq \tau_j, \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, k_{\text{ст}},$$

где \tilde{K}_j – скорость нагрева поверхности ТЭ, К/с; $k_{ст}$ – число ступеней нагрева; \tilde{T}_j – температура изотермической выдержки на j -й ступени нагрева, К.

Численные значения ограничений, выражающие связь с механическими характеристиками композита, определены экспериментально. Для исследованного типа углепластика на основе эпоксидного связующего ЭДТ-10, армированного углеродным жгутом УКН-5000, выполнен численный расчет температурно-конверсионных полей при отверждении и расчет оптимальных режимов отверждения ТЭ с учетом различных технологических схем. В результате получена возможность исследовать различные технологические схемы изготовления ТЭ, используя рассчитанные оптимальные режимы [10].

Исследование влияния технологических схем термообработки трубчатых элементов на их геометрические и механические характеристики

Важными геометрическими характеристиками ТЭ являются толщина стенки, от которой существенным образом зависит размеростабильность изделий в условиях эксплуатации, при наличии постоянно действующих силовых нагрузок и термоциклов «нагрев – охлаждение» [3]. Кроме того, механические упругопрочностные характеристики, такие как прочность при растяжении, модуль упругости при растяжении, разрушающее напряжение при сжатии, также зависят от толщины стенки и влияют на размеростабильность ТЭ.

Из опыта производства углепластиковых ТЭ известно, что указанные характеристики находятся в зависимости от технологической схемы их изготовления, включая режим термообработки, и схемы армирования. В целях проверки влияния различных технологических схем изготовления углепластиковых трубчатых элементов на их геометрические и механические характеристики разработаны и реализованы четыре технологические схемы, приведенные в табл. 1.

Оценено влияние схем армирования на геометрические и механические характеристики ТЭ при варьировании соотношения числа продольных s_1 и кольцевых s_2 слоев в намотанном ТЭ, то есть текстурный коэффициент $m = \frac{s_1}{s_1 + s_2}$.

Исследованы ТЭ квадратного сечения (50×50) мм с номинальной толщиной стенки 1,5 мм, изготовленного из углепластика УКН-5000/ЭДТ-10 «мокрым» способом методом автоматизированной намотки на станке с числовым программным

Таблица 1

Технологические схемы изготовления трубчатых элементов

№ ТС	Технологическая схема	Номер ТЭ
1	Н + ПБО/2 ч + ПСО/6 ч	88, 90, 92, 94, 96, 98, 101, 102, 103, 110, 111
2	Н + В/(9-17) ч + ПБО/2 ч + О + ПСО/6 ч	89, 91, 93, 95, 99, 100, 104, 105, 106, 108, 109
3	Н + В/(2-45) ч + О + ПСО/8 ч	97, 107, 113, 117, 118, 119, 121, 127
4	Н + О + ПСО/8 ч	112, 114, 115, 116, 120, 122, 123, 124, 125, 126

Примечание: Операции: Н – намотки; ПБО – полимеризации без обжатия; ПСО – полимеризации с обжатием; О – обжатия; В – выдержки на воздухе.

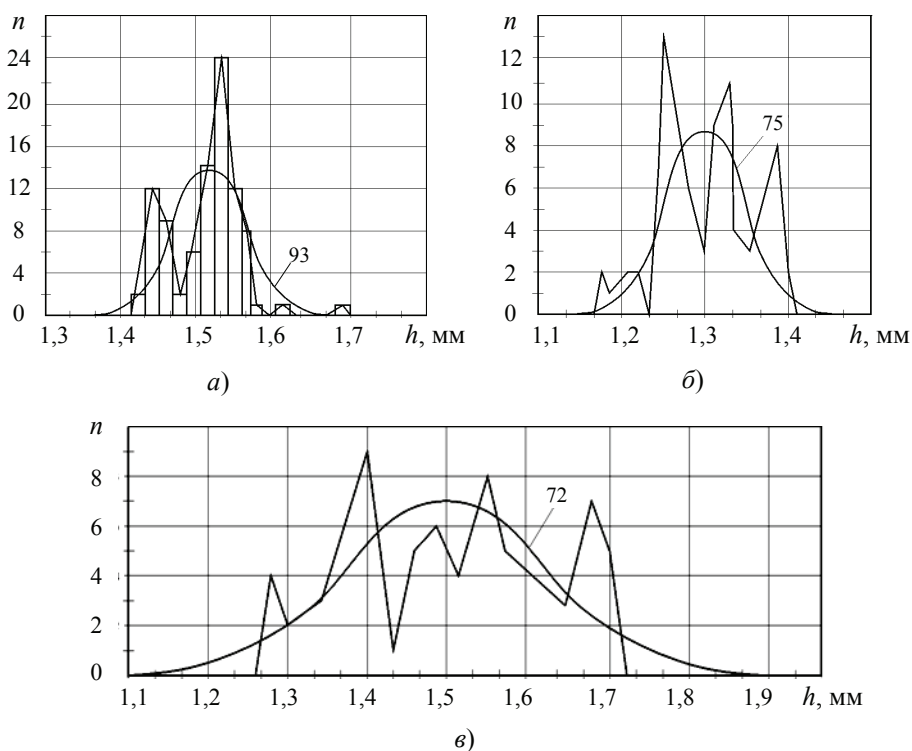


Рис. 1. Гистограмма, полигон и кривая распределения толщины стенки ТЭ из углепластика УКН-5000/ЭДТ-10:
 а – $h_{\text{ср}} = 1,52$ мм; схема армирования: $5/0^\circ + 3/90^\circ$; $N = 93$ шт.;
 б – $h_{\text{ср}} = 1,31$ мм; схема армирования: $5/0^\circ + 2/90^\circ$; $N = 75$ шт.;
 в – $h_{\text{ср}} = 1,50$ мм; схема армирования: $6/0^\circ + 2/90^\circ$; $N = 72$ шт.

управлением. Намотанные по соответствующей схеме армирования ТЭ подвергали технологическим операциям в соответствии с разработанными технологическими схемами. По каждой ТС были изготовлены серии ТЭ.

После термообработки трубчатых элементов, изготовленных по каждой технологической схеме, измеряли толщину стенки h каждого ТЭ, выполняя по три замера с каждой стороны, и рассчитывали среднюю величину $h_{\text{ср}}$. Толщину стенки ТЭ измеряли ультразвуковым толщиномером УДТ-40 с погрешностью измерения не более 0,005 мм. Распределение толщины стенки h в зависимости от схемы армирования представлено на рис. 1 и в табл. 2.

Таблица 2

Влияние схем армирования на геометрические и прочностные свойства ТЭ

Схема армирования	Текстурный коэффициент, m	Сухой вес ТЭ $G_{\text{сух}}$, г/м	Толщина стенки h , мм	Разрушающая нагрузка на сжатие P_p , Н	Удельная прочность P/G , кгм/г
$6/0^\circ + 2/90^\circ$	0,75	291,2	1,50	34 730	11,93
$5/0^\circ + 2/90^\circ$	0,71	256,0	1,31	30 180	11,79
$5/0^\circ + 3/90^\circ$	0,63	296,0	1,52	47 620	16,09
$7/0^\circ + 2/90^\circ$	0,78	326,4	1,61	44 200	13,54
$5/0^\circ + 4/90^\circ$	0,56	336,0	1,88	65 800	19,58

Из числа изготовленных по каждой технологической схеме и с различной схемой армирования ТЭ делали выборку и измеряли их прочностные характеристики, то есть разрушающую нагрузку на сжатие P_p и удельную прочность P/G . Результаты прочностных испытаний ТЭ приведены в табл. 2.

Очевидно, что при $m < 0,71$ указанные параметры для ТЭ из углепластика зависят от изменения числа кольцевых слоев s_2 при неизменном числе продольных слоев s_1 , а при $m > 0,71$ – от изменения числа продольных слоев при неизменном числе кольцевых слоев.

По результатам выполненных измерений толщины и прочностных характеристик ТЭ статистическими методами выполнили оценку существенности влияния ТС и режимов термообработки на геометрические и физико-механические свойства углепластиков в структуре ТЭ. Проверку статистической гипотезы о существенности влияния технологической схемы на толщину стенки трубчатого элемента и его прочность при сжатии выполнили методом дисперсионного анализа. Для этого были проведены четыре серии опытов. Свойства ТЭ из различных серий сравнивали между собой. Для этого выборку объемом n_1 извлекали из первой нормальной совокупности, определяли среднюю величину толщины стенки ТЭ, как случайную величину $h_{ср1}$ и дисперсию S_1^2 . Другую выборку объемом n_2 извлекали из второй нормальной совокупности и соответственно определяли $h_{ср2}$ и S_2^2 и т.д.

Измерены четыре выборки ТЭ с различным числом образцов каждая, которые после обработки дали результаты, представленные в табл. 3.

При анализе полученных результатов на первом этапе проверена гипотеза равенства дисперсий выборок. Предположительно предложены нулевая H_0 : $S_1^2 = S_2^2$ и альтернативная H_1 : $S_1^2 \neq S_2^2$ гипотезы. Если верна гипотеза H_0 , то статистика представляет собой F -распределение с $k_1 = n_1 - 1$ и $k_2 = n_2 - 1$ степенями свободы с бóльшей выборочной дисперсией в числителе

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \text{ при } S_1^2 > S_2^2; \quad (10)$$

$$F = \frac{S_2^2}{S_1^2} \text{ при } S_1^2 < S_2^2. \quad (11)$$

Если $F \leq F_1 - \alpha/2$, где α – уровень значимости критерия, который принимают обычно равным 0,05, то принимают гипотезу о равенстве генеральных дисперсий, то есть H_0 ($S_1^2 = S_2^2$).

Таблица 3

Влияние технологической схемы на толщину стенки ТЭ

№ серии опыта	Технологическая схема	Среднее значение толщины стенки $h_{ср}$, мм	Число образцов n_i	Дисперсия S_i^2
1	ТС-1	1,57	11	$4,0 \cdot 10^{-4}$
2	ТС-2	1,56	11	$2,5 \cdot 10^{-3}$
3	ТС-3	1,53	8	$1,0 \cdot 10^{-4}$
4	ТС-4	1,53	10	$1,0 \cdot 10^{-4}$

Основные результаты расчетов представлены в табл. 4 для $\alpha = 0,05$. Образцы ТЭ второй, третьей и четвертой серий опытов неоднородны с первой серией, так как для них гипотеза о равенстве дисперсий отклоняется. Это говорит о наличии значимого различия в дисперсиях толщин стенок указанных групп образцов, то есть можно принять, что толщины стенок ТЭ неравноценны в смысле однородности технологических схем.

Проведем сравнение средних значений двух малых выборок ($n < 30$). Для этого определим, существуют ли различия между средними значениями нескольких различных генеральных совокупностей толщин стенок ТЭ. Предположим, что справедлива нулевая $H_0: h_{cp1} = h_{cp2}$ или альтернативная $H_1: h_{cp1} \neq h_{cp2}$ гипотезы. Сравним средние значения нормально распределенных величин по t -критериям Стьюдента. Для этого в случае однородности выборок, когда дисперсии равны ($S_1^2 = S_2^2$), вычислим сводную дисперсию

$$S^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}, \quad (12)$$

и величину

$$t = \frac{h_{cp1} - h_{cp2}}{S \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}. \quad (13)$$

Если величина $|t| \leq t_{1-\alpha/2}$, то принимают гипотезу о равенстве средних (H_0). В противном случае $h_{cp1} \neq h_{cp2}$, то есть гипотеза H_0 отвергается. Гипотезы проверяли при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Величину доверительной вероятности $P = 1 - \alpha$ выбирали в пределах $0,9 \dots 0,95$, число степеней свободы k определяли из выражения $k = n_1 + n_2 - 2$.

В том случае, когда гипотеза о равенстве дисперсий отвергается $S_1^2 \neq S_2^2$, задача сводится к классу задач Беренса–Фишера и величину t вычисляют на основе следующей формулы

$$t = \frac{h_{cp1} - h_{cp2}}{S \sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}, \quad (14)$$

при этом число степеней свободы k определяют из выражения

$$\frac{1}{k} = \frac{c^2}{n_1 - 1} + \frac{(1-c)^2}{n_2 - 1}, \quad (15)$$

Таблица 4

Проверка гипотез равенства дисперсий выборок, $\alpha = 0,05$

№ серии опыта	Число степеней свободы, $(n_i - 1)$	Статистика		Гипотеза	
		F	$F_{кр} = F_{1-\alpha/2}$	$H_0: S_1^2 = S_2^2$	$H_1: S_1^2 \neq S_2^2$
1	10	–	–	–	–
2	10	6,25	2,97	–	H_1
3	7	4	3,63	–	H_1
4	9	4	3,13	–	H_1

Проверка гипотез равенства средних толщин

№ серии опыта	Число степеней свободы k , при $S_1^2 \neq S_2^2$	Статистика		Гипотеза	
		T	$t_{кр}$	$H_0: h_{cp1} = h_{cp2}$	$H_1: h_{cp1} \neq h_{cp2}$
1	–	–	–	–	–
2	13,120	0,616	2,145	H_0	–
3	15,450	5,720	2,120	–	H_1
4	14,996	5,870	2,145	–	H_1

где

$$c = \frac{S_1^2}{n_1(S_1^2 - S_2^2)}. \quad (16)$$

При $|t| \leq t_1 - \alpha/2$ принимают гипотезу H_0 ($h_{cp1} = h_{cp2}$). В противном случае ($h_{cp1} \neq h_{cp2}$) гипотеза H_0 отвергается. Результаты расчетов для $\alpha = 0,05$ представлены в табл. 5.

Таким образом, средняя толщина стенки по ТС-1 и ТС-2 статистически неотличима, а ТС-3 и ТС-4 по среднему показателю толщины стенки отличаются от них, что свидетельствует о существенности влияния технологических схем, отличающихся режимами термообработки. Необходимо провести дополнительные исследования по выбору оптимальной технологической схемы.

Выводы

1. Проведен анализ современного состояния создания размеростабильных трубчатых элементов и возникающих при их производстве технологических проблем.

2. Показано, что наряду с эмпирическими методами исследования влияния различных технологических схем на размеростабильность трубчатых элементов, полезным является использование для термообработки оптимального температурно-временного режима. На его основе выбирается оптимальная технологическая схема.

3. Предложена математическая модель процесса термообработки трубчатых элементов методом намотки, показаны пути оптимизации режима отверждения углепластиковых ТЭ.

4. Выполнен численный расчет температурно-конверсионных полей при отверждении и расчет оптимальных режимов отверждения трубчатых элементов с учетом различных технологических схем.

5. Методом дисперсионного анализа проверена статистическая гипотеза о существенности влияния технологической схемы и схемы армирования на толщину стенки трубчатого элемента.

6. Статистически доказана существенность влияния технологических схем, отличающихся режимами термообработки, на среднюю величину толщины стенки трубчатого элемента из углепластика.

Список литературы

1. Каблов, Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года / Е. Н. Каблов // *Авиац. материалы и технологии.* – 2012. – № 5. – С. 7 – 17.

2. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов / Г. М. Гуняев [и др.] // Конверсия в машиностроении. – 2004. – № 4. – С. 65 – 69.
3. Гаврюсов, В. И. Размерная стабильность материалов и элементов конструкций / В. И. Гаврюсов. – Л. : ЦНИИ «Румб», 1990. – 113 с.
4. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / М. Л. Кербер [и др.] ; под ред. А. А. Берлина. – СПб. : Профессия, 2008. – 560 с.
5. Алексашин, В. М. Применение методов термического анализа для исследования клеевых композиций / В. М. Алексашин, Н. В. Антюфеева // Клеи, герметики, технологии. – 2005. – № 12. – С. 28 – 31.
6. Дмитриев, О. С. Математическое моделирование процесса отверждения изделия из полимерных композиционных материалов методом горячего прессования / О. С. Дмитриев, С. В. Мищенко, С. В. Пономарев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1998. – Т. 4, № 4. – С. 390 – 399.
7. Тепломассообмен и кинетика отверждения полимерного композиционного материала при автоклавном вакуумном формовании изделий / О. С. Дмитриев [и др.] // Инжен. физика. – 2010. – № 9. – С. 3 – 12.
8. Определение оптимальных режимов отверждения толстостенных изделий из полимерных композитов / О. С. Дмитриев [и др.] // Тепловые процессы в технике. – 2013. – № 10. – С. 467 – 475.
9. Интегрированная информационно-измерительная система исследования свойств и расчета режимов отверждения полимерных композитов / О. С. Дмитриев [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 2. – С. 230 – 240.
10. Оптимизация технологии формообразования намоткой размеростабильных трубчатых элементов / И. В. Малков [и др.] // Материалы 5-й Моск. Междунар. конф. «Теория и практика технологии производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ)», МГУ, 24 – 27 апр. 2007 г. / ред. К. В. Фролов, О. С. Сироткин, В. С. Боголюбов, – М. : Знание, 2008. – С. 403 – 408.

Influence of Heat Treatment Modes on Geometric and Mechanical Characteristics of Carbon Composite Tubular Elements

O. S. Dmitriev¹, I. V. Malkov²

*Department “Physics”, TSTU, Tambov, Russia; phys@nnn.tstu.ru (1);
Department “Machines, Tools and Engineering Graphics”, Vladimir Dal Lugansk
State University, Lugansk, Ukraine (2)*

Keywords: carbon composite; heat treatment; polymer composite material; technology system; trusses; tubular elements; winding.

Abstract: The paper studies the influence of process schemes and heat treatment modes on the geometrical and mechanical characteristics of carbon composite tubular elements truss structures of spacecraft. The mathematical model of heat treatment is developed, and on its basis the optimal curing modes of the wound tubular elements given the various process schemes are calculated. Statistical hypothesis regarding the significance of the process scheme and reinforcement in the wall thickness deviation of the tubular elements and their strength characteristics is verified.

References

1. Kablov E.N. [Strategical Areas of Developing Materials and Their Processing Technologies for the Period up to 2030], *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2012, no. 5, pp. 7-17. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Gunyaev G.M., Krivonos V.V., Rumyantsev A.F., Zhelezina G.F. [Polymer composite materials in the construction of aircraft], *Konversiya v mashinostroenii* [Conversion in engineering], 2004, no. 4, pp. 65-69. (In Russ.)
3. Gavryusev V.I. *Razmernaya stabil'nost' materialov i elementov konstruksii* [Dimensional stability of materials and construction elements], Leningrad: TsNII "Rumb", 1990, 113 p. (In Russ.)
4. Kerber M.L., Vinogradova V.M., Golovkin G.S., Kryzhanovskii V.K. Berlin A.A. *Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya* [Polymeric composites: structure, properties, technology], St. Petersburg: Professiya, 2008, 560 p. (In Russ.)
5. Aleksashin V.M., Antyufeeva N.V. [Application of thermal analysis to study the adhesive compositions], *Klei, germetiki, tekhnologii* [Klei. Germetiki. Tekhnologii], 2005, no. 12, pp. 28-31. (In Russ.)
6. Dmitriev O.S., Mishchenko S.V., Ponomarev S.V. [Mathematical modeling of solidification products from polymeric composite materials by hot pressing], *Transactions of Tambov State Technical University*, 1998, vol. 4, no. 4, pp. 390-399. (In Russ.)
7. Dmitriev O.S., Kirillov V.N., Mishchenko S.V., Dmitriev A.O. [Heat and mass transfer and kinetics of the curing polymer composite material in a vacuum autoclave molding products], *Inzhenernaya fizika* [Engineering Physics], 2010, no. 9, pp. 3-12. (In Russ.)
8. Dmitriev O.S., Kirillov V.N., Dmitriev A.O., Zuev A.V. [Determination of the optimal curing conditions of thick-walled articles made of polymer composites], *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2013, no. 10, pp. 467-475. (In Russ.)
9. Dmitriev O.S., Mishchenko S.V., Dmitriev A.O., Kasatonov I.S., Dmitriev C.O. [Integrated Computer Aided Measurement for Research into Properties and Calculation of Curing Cycles of Polymer Composites], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 2, pp. 230-240. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Malkov I.V., Tarasov Yu.M., Rybakov V.N., Voskoboinikov V.I. *Materialy 5-i Mosk. Mezhdunar. konf. "Teoriya i praktika tekhnologii proizvodstva izdelii iz kompozitsi-onnykh materialov i novykh metallicheskih splavov (TPKMM)"* [Proceedings of the 5th Mosk. Intern. Conf. "Theory and Practice of products production technology of composite materials and new metal alloys (TPKMM)"], MGU, 24-27 April, 2007, Moscow: Znanie, 2008, pp. 403-408. (In Russ.)

Einfluss der Regimes der Wärmebearbeitung auf die geometrischen und mechanischen Charakteristiken der Carbonfaserrohrelemente

Zusammenfassung: Es sind die Forschungen des Einflusses der technologischen Schemen und der Regimes der Wärmebehandlung auf die geometrischen und mechanischen Charakteristiken der Carbonfaserrohrelemente der Konstruktionen der Raumschiffe dargelegt. Es ist das mathematische Modell der Wärmebearbeitung gebracht, auf deren Grundlage die optimalen Regimes der Hartung der aufgewickelten

Rohrelemente unter Berücksichtigung der verschiedenen technologischen Schemen berechnet sind. Es ist die Beschreibung der statistischen Hypothese über die Wichtigkeit des Einflusses des technologischen Schemas und des Schemas der Bewehrung auf die Abweichung der Dicke der Wand der Rohrelemente und ihre Festigkeitscharakteristiken gegeben.

Influence des régimes du traitement thermique sur les caractéristiques géométriques et mécaniques des éléments tubulaires hydrocarbonés en matière plastique

Résumé: Sont présentées les études de l'influence des schémas technologiques sur les caractéristiques géométriques et mécaniques des éléments tubulaires hydrocarbonés en matière plastique des constructions à treillis des appareils spatiaux. Est cité un modèle mathématique du traitement thermique à la base duquel sont calculés les régimes optimaux due au durcissement des éléments tubulaires enroulés en tenant compte des différents schémas technologiques. Est donnée la description de l'hypothèse statistique sur la matérialité de l'influence du schéma technologique et du schéma de ferrailage sur l'épaisseur des éléments tubulaires et leurs caractéristiques de résistance.

Авторы: *Дмитриев Олег Сергеевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Малков Игорь Владиславович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Станки, инструменты, инженерная графика», ГОУ ВПО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск, Украина.

Рецензент: *Баронин Геннадий Сергеевич* – доктор технических наук, профессор, директор НОЦ ТамбГТУ-ИСМАН «Твердофазные технологии», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.
