

УДК 620.22.002

А.А. ВАМБОЛЬ, М.А. ШЕВЦОВА

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ФОРМОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Рассмотрены основные этапы процесса формования изделий из полимерных композиционных материалов. Разработана методика определения рационального температурно-временного режима формования.

полимерные композиционные материалы, температурное поле, температурно-временной режим, напряженно-деформированное состояние, формование, ползучесть

Введение

Широкое внедрение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в элементы конструкций летательных аппаратов (ЛА) обеспечивающее снижение массы конструкции, а также специфические свойства (радиопрозрачность, виброустойчивость, низкую теплопроводность и т.д.), требует совершенствования технологии изготовления изделий.

Важную роль в окупаемости изделий из ПКМ играют энерго- и трудозатраты. Уменьшение времени изготовления изделия, снижение энерго- и трудозатрат является в настоящее время актуальной проблемой. Достаточно больших затрат энергии и времени в процессе изготовления изделия из ПКМ занимает процесс формования детали, в результате которого деталь получает заданную форму и свойства.

В настоящее время температурно-временные режимы, которые применяются на большинстве предприятий, энергоёмкие и продолжительные во времени, а иногда полученное изделие обладает такими остаточными напряжениями и деформациями, что дальнейшее его применение просто недопустимо.

Технологический процесс формования можно разбить на три этапа (рис. 1). На первом этапе осуществляется подъем температуры, связующее переходит в вязкотекучие состояние, а затем в твердое. Проводится дегазация формуемого пакета (удаление

летучих фракций из связующего), а также прикладывается давление формования. Второй этап характеризуется завершением отверждения связующего (чаще всего этот этап реализуется в изотермических условиях). На третьем этапе идет охлаждение изделия до конечной температуры, а также происходит снятие давления. Основным этапом процесса формования является первый, поскольку на этом этапе закладываются свойства будущего изделия, его физико-механические характеристики (ФМХ), структура и геометрия. На следующих этапах происходит фиксация полученных ФМХ, структуры, геометрии.

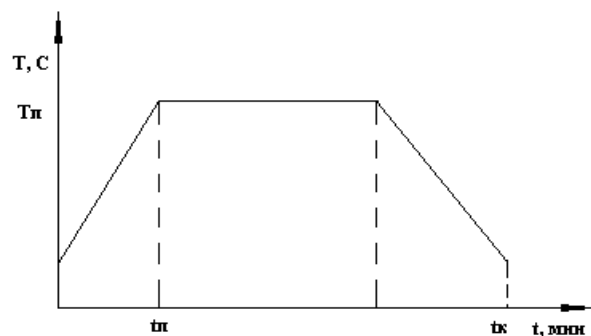


Рис. 1. Температурно-временная зависимость процесса формования изделия из полимерных композиционных материалов

Полное моделирование процесса формования в настоящее время не представляется возможным из-за сложного математического описания всех тех процессов, которые протекают в формуемой системе. Моделированием процесса формования занимались А.Н. Воронцов, В.Т. Томашевский, В.С. Яков-

лев [1, 2], однако в большинстве своем приведенные модели описывают лишь отдельные процессы.

Целью данной работы являлось определение температурно-временной зависимости $T(t)$ режима формования, который бы требовал минимальных энергозатрат, минимального времени, но в тоже время, в результате которого остаточные напряжения и деформации были бы допустимыми для эксплуатации изделия.

Из основных процессов, которые протекают в формуемом изделии, можно выделить следующие: хемовязкостные, тепловые и механические. Эти процессы можно описать математически независимо друг от друга, а их взаимное влияние учесть следующим образом: результаты, полученные по одной модели, будут являться исходными данными для расчетов по другой. Так, например, связующим звеном между хемовязкостной моделью и моделью теплового воздействия является скорость подъема температуры, между хемовязкостной моделью и моделью силового воздействия – вязкоупругие и вязкотекучие характеристики в момент приложения давления.

Следует отметить, что научные основы технологии формования должны представлять комплекс математических моделей, описывающих химические, теплофизические, а также механические процессы, протекающие в формуемом изделии при различных тепловых и силовых воздействиях. При этом необходимо отметить, что сами модели не создают оптимального технологического режима, а только лишь позволяют провести часть исследований в условиях численного эксперимента.

Этап разогрева пакета ПКМ до температуры полимеризации

Методы формования изделий из ПКМ разнообразны и их применение зависит от назначения изделия, его габаритов, типа связующего. При этом именно связующее и определяет температурно-

временной режим отверждения.

Рассмотрим хемовязкостную модель, которая используется для определения степени полимеризации вещества. Конверсионное поле, определяющее степень отверждения вещества, зависит от многих факторов (температура и время отверждения, молекулярное строение вещества и др.). В качестве параметра, описывающего процесс отверждения, зачастую принимают степень полимеризации вещества. Для определения степени полимеризации используют: уравнение Карозерса, уравнение Аррениуса, а также уравнения, полученные путем аппроксимации экспериментальных данных. К сожалению, каждая из этих методик учитывает лишь отдельные факторы.

Для определения степени полимеризации в расчетных целях зачастую принимают уравнения, которые получены в ходе аппроксимации экспериментальных данных [3]:

$$\eta = \frac{1 - e^{-\tau}}{1 + c_1 \cdot e^{-\tau}}, \quad (1)$$

где η – степень полимеризации;

τ – безразмерная величина, которая определяется следующим образом:

$$\tau \approx c_2 \cdot \frac{t - t_2}{t_n - t} \cdot \text{Exp} \left[c_3 \cdot \frac{T_n - T(r, t)}{T_2 - T(r, t)} \right], \quad (2)$$

где c_1 , c_2 , c_3 – безразмерные коэффициенты, получаемые экспериментальным путем, обычно $c_1 = 2$, $c_2 = 1$, $c_3 = 1$ [3];

t – время, мин;

t_2 – время гелеобразования, мин;

t_n – время полимеризации, мин;

$T(r, t)$ – температура, К;

T_2 – температура гелеобразования, К;

T_n – температура полимеризации, К.

Сравнивая результаты, полученные по формуле (1), с экспериментальными данными, приведенными в [4], можно сказать, что отличие в результатах не

превышает 10 – 20% в районе гелеобразования и 2 – 5% в районе полимеризации. Это даёт возможность использовать формулу (1) для определения степени отверждения вещества при определении рационального технологического процесса.

Несмотря на то, что данная температурно-временная зависимость не отображает в полной мере процесс полимеризации: не учитывает кинетику и механизм процесса отверждения, но при этом позволяет теоретически описать изменение зависимости степени полимеризации от температуры и времени.

В формуемом изделии тепловое воздействие реализуется посредством нагрева теплоносителя в соответствии с заданным температурно-временным режимом. Поскольку формуемый пакет имеет определенную толщину, то возникает неравномерное распределение температуры по толщине пакета. Неравномерное распределение температурного поля, в свою очередь, приводит к возникновению напряженно-деформированного состояния (НДС) в формуемом изделии. Помимо этого, из-за отсутствия непосредственного контакта формуемого изделия с теплоносителем (наличие дополнительных технологических слоев) возникает проблема дополнительных энергозатрат на формование изделия из ПКМ. Из уравнения теплопроводности [5] можно выразить перепад температуры

$$\Delta T = \frac{c \cdot \rho \cdot \delta^2}{\lambda} \cdot v_T, \quad (3)$$

где c – удельная теплоёмкость вещества, Дж/(кг °С);

ρ – плотность вещества, кг/м³;

δ – толщина пакета, мм;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м °С);

v_T – скорость охлаждения (разогрева), °С/мин.

Из уравнения (3) видно, что перепад температуры зависит от свойств материала, толщины формуемого пакета и от скорости подъема температуры. Характеристики материала, равно как и габариты формуемого изделия, закладываются на этапе про-

ектирования изделия, а значит, при определении рационального процесса формования изменения данных параметров является недопустимым. Поэтому, уменьшение перепада температуры возможно лишь в случае уменьшения скорости подъема температуры.

Совместив хемовязкостную модель с моделью теплового воздействия, можно говорить о том, что скорость подъема температуры на первом этапе формования для большинства связующих и при толщине формуемого пакета находится в диапазоне от 2 до 4°С/мин.

На первом этапе помимо процесса полимеризации происходит также процесс выхода летучих фракций из связующего. Летучие продукты начинают образовываться после точки гелеобразования. Скорость их образования однозначно свидетельствует об интенсивном протекании реакции, которая сопровождается изменением вязкостных свойств изделия. При этом может возникнуть такая ситуация, когда давление летучих продуктов, растворенных в отверждающемся полимере, будет больше внешнего давления. Тогда в формуемом материале образуются поры, которые приведут к ухудшению его физико-механических свойств. Количество пор зависит от внешнего давления, определяемого усилиями формования и поверхностных сил натяжения связующего. Если это давление больше давления растворенных летучих продуктов реакции, то воздушные включения в материале не будут образовываться. Поэтому уменьшения пористости можно добиться изменением температурного режима таким образом, чтобы максимальное количество летучих продуктов реакции выделялось при наименьшей вязкости связующего, а время выдержки зависит от их массы в формуемом пакете и их скорости выхода. Время изотермической выдержки можно рассчитать следующим образом:

$$\tau_{\text{вд}} = \frac{M_{\text{л}}}{V_{\text{л}}}, \quad (4)$$

где M_d – масса летучих продуктов;

V_d – скорость выхода летучих продуктов.

При более низкой температуре скорость реакции мала, поэтому и летучих продуктов выделяется меньше, а при более высоких температурах скорости реакции возрастает, но при этом происходит и увеличение вязкости вещества, в результате чего летучие вещества остаются внутри связующего.

Таким образом, оптимизация температурно-временного режима на участке подъема температуры до точки полимеризации сводится к получению материала с максимальной степенью полимеризации, минимальным значением перепада температуры по толщине, а также с минимальным содержанием летучих компонентов в нём.

Этап изотермической выдержки пакета ПКМ

Рассмотрим этап температурной выдержки формируемого изделия. Этот этап характеризуется постоянной температурой. Температура и время выдержки определяются экспериментально для каждого состава связующего. При этом необходимым условием окончания процесса изотермической выдержки является обеспечение заданной степени полимеризации, а также прогрев формируемого пакета ПКМ. Время прогрева определяется по полученной выше зависимости (3). При производстве изделий из ПКМ температура выдержки не должна превышать температуру деструкции полимера и находится как можно ближе к температуре полимеризации. Зачастую в промышленном производстве этими рекомендациями пренебрегают, выбранная температура выдержки находится гораздо ниже, чем температура полимеризации. Помимо этого при производстве изделий из ПКМ не учитываются и габариты изделия, время выдержки, как для крупногабаритных, так и для малогабаритных изделий одно и то же. Такой подход к выбору температуры выдержки в производстве приводит к увеличению времени вы-

держки, увеличению энергозатрат и увеличению трудоемкости производства изделия. Так, например, проведение температурной выдержки при температуре на 15 градусов ниже температуры полимеризации приводит к увеличению времени выдержки с 45 – 65 мин. до 120 – 150 мин., т.е., в 2 – 2,5 раза.

Поэтому возникает задача рационализировать данный этап формования, входными параметрами которого остаются экспериментальные данные для связующего: температура и время гелеобразования, температура и время полимеризации, а также геометрические, массовые и тепловые характеристики формируемого изделия.

Этап охлаждения пакета ПКМ до конечной температуры

Заключительным этапом процесса формования является этап охлаждения до конечной температуры. Скорость охлаждения до конечной температуры при режиме формования изделий из ПКМ в технологических инструкциях зачастую регламентируется как величина 2 – 3°С/мин. Однако, в некоторых случаях использование данных значений в технологическом процессе являются просто недопустимым. Прежде всего, это связано с возникновением такого напряженно-деформированного состояния НДС в формируемом изделии, которое может привести либо к разрушению изделия, либо к возникновению деформаций, значения которых выше допустимых. Возникновение подобного НДС обусловлено неравномерным распределением температурного поля по толщине изделия, и как следствием этого, возникновением перепада температуры по толщине пакета (3). НДС возникает как на этапе охлаждения, так и на этапе разогрева пакета ПКМ в районе точки полимеризации, когда материал перешел из вязкотекучего состояния в твердое.

Основными источниками остаточных напряжений для конструкций из ПКМ являются различия теплофизических и упругих свойств компонентов

материала, а превалирующей стадией их формирования при изготовлении – процесс охлаждения.

В качестве объекта будем рассматривать пластину, поскольку именно этот класс конструкций наиболее часто встречается при производстве изделий для ЛА. Пластину будем рассматривать как свободноопертую. Систему координат выбираем, как показано на рис. 2, температурное поле, действующее в процессе формования на пластину, принимаем равномерным в плоскости (ХОУ).

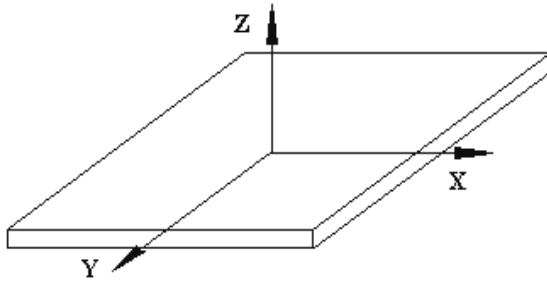


Рис. 2. Расположение осей координат

Определять НДС системы будем, используя энергетический метод [6]. Функцию прогиба (в нашем случае пластина свободноопертая) представим в виде следующего степенного ряда:

$$w = (x^2 + y^2) \cdot (f_1 + f_2 \cdot x^2 + f_3 \cdot y^2), \quad (5)$$

где f_1, f_2, f_3 – некоторые коэффициенты.

Энергию деформации пластины представим следующим образом:

$$U = \iint_S \int_0^h (\sigma_x \cdot \varepsilon_x + \sigma_y \cdot \varepsilon_y + \tau_{xy} \cdot \gamma_{xy}) dz dS, \quad (6)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ – внутренние напряжения пластины;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ – деформации пластины;

h – толщина пластины;

S – площадь пластины.

Деформации, возникающие в пластине, определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \varepsilon_x^o + \chi_x \cdot z; & \varepsilon_y &= \varepsilon_y^o + \chi_y \cdot z; \\ \gamma_{xy} &= \gamma_{xy}^o + \chi_{xy} \cdot z, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\varepsilon_x^o, \varepsilon_y^o, \gamma_{xy}^o$ – деформации в срединной плоскости;

$\chi_x, \chi_y, \chi_{xy}$ – кривизны, которые находятся следующим образом:

$$\chi_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad \chi_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \quad \chi_{xy} = -2 \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \quad (8)$$

Подставив формулы деформаций (7) в уравнение энергии (6) и проинтегрировав по толщине, получаем уравнение энергии в следующем виде:

$$U = \iint_S (N_x \cdot \varepsilon_x^o + N_y \cdot \varepsilon_y^o + N_{xy} \cdot \gamma_{xy}^o + M_x \cdot \chi_x + M_y \cdot \chi_y + M_{xy} \cdot \chi_{xy}) dS, \quad (9)$$

где N_x, N_y, N_{xy} – усилия, действующие в пластине [6];

M_x, M_y, M_{xy} – моменты, действующие в пластине [6].

Поскольку решаемая задача является температурной, то нет смысла искать работу внешних сил, а значит, полная энергия системы будет равна потенциальной. Подставив уравнение прогиба (5) в уравнение энергии и проинтегрировав, получим зависимость энергии деформирования от коэффициентов в виде

$$U = U(f_1, f_2, f_3). \quad (10)$$

Зависимость (10) является функционалом, а ее минимум будет достигнут в том случае, когда все производные полной энергии по коэффициентам ряда (5) обратятся в ноль, т.е., разрешающая система уравнений будет иметь вид:

$$\frac{\partial U}{\partial f_1} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial f_2} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial f_3} = 0. \quad (11)$$

Данная система представляет систему линейных алгебраических уравнений, причем количество этих уравнений всегда будет равно количеству коэффициентов. Найденные коэффициенты подставляются в (5) и тем самым получаем полное решение задачи.

В качестве примера определим прогиб в панели из ПКМ размерами 100×100 мм, с симметричной укладкой слоёв ($0^\circ; 90^\circ$), выполненной в трех вари-

антах: 1) стеклоткань с толщиной монослоя 0,25 мм, 2) органоткань с толщиной монослоя 0,2 мм, 3) углеткань с толщиной монослоя 0,1 мм. Расчет проводили для трех различных скоростей – 1, 2, 3°C/мин. В ходе расчета были получены следующие значения прогибов для данных конструкции (табл. 1).

По полученным данным можно сказать, что при скорости охлаждения более чем в 1,5°C/мин прогиб в пластине на основе стеклоткани является недопустимым (допускаемый прогиб не должен превышать 1 – 2% от габаритов изделия, в нашем случае прогиб должен быть не более 1 – 2 мм). Для органопластика значение скорости охлаждения должно быть не более 0,75°C/мин. Для углепластика охлаждения в заданном диапазоне скоростей не вызывает недопустимых прогибов.

Таблица 1
Зависимость прогиба в многослойной пластине из ПКМ от скорости охлаждения, мм

Слой V_m , °C/мин	Стеклоткань	Органоткань	Углеткань
3	3,2	6,7	0,38
2	2,1	4,5	0,25
1	1	2,3	0,12

Так же в ходе охлаждения изделия до конечной температуры необходимо учитывать и реономные свойства материалов конструкции, поскольку, в процессе охлаждения в материале изделия наблюдаются процессы ползучести и релаксации. Для описания обобщенных кривых объёмной ползучести (релаксации) часто используют аппарат дробно-экспоненциальных функций [7]. Кривые ползучести можно представить в следующем виде:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E} \cdot \left[\sigma(t) + \lambda \cdot \int_0^t \mathcal{E}_\alpha(-\beta, t - \tau) \sigma(\tau) d\tau \right], \quad (12)$$

а кривые релаксации записываются таким образом:

$$\sigma(t) = E \cdot \left[\varepsilon(t) - \lambda \cdot \int_0^t \mathcal{E}_\alpha(-\beta - \lambda, t - \tau) \varepsilon(\tau) d\tau \right]. \quad (13)$$

Следует отметить, что аналитический учет реономных свойств в изделии упрощается для частных

видов изотермических нагружений: ползучесть при $\sigma = \text{const}$ (давление формования присутствует) и релаксация при $\varepsilon = \text{const}$ (давление формования отсутствует) [7]. Тогда выражение (12) запишется в виде:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_o \cdot \left[1 + \lambda \cdot \int_0^t \mathcal{E}_\alpha(-\beta, t - \tau) d\tau \right], \quad (14)$$

где $\varepsilon(t)$ – деформация ползучести;

ε_o – мгновенная деформация;

λ, β – эмпирические коэффициенты;

\mathcal{E}_α – функция Работнова,

а выражение (13) – в виде:

$$\sigma(t) = \sigma_o \cdot \left[1 - \lambda \cdot \int_0^t \mathcal{E}_\alpha(-\beta - \lambda, t - \tau) d\tau \right], \quad (15)$$

где $\sigma(t)$ – напряжение релаксации;

σ_o – температурные напряжения.

Использование (14) и (15) для практического расчета вызывает определенные трудности, поэтому подынтегральную функцию аппроксимируют и тогда выражения (14) и (15) можно записать в следующем виде:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_o \left\{ 1 + \frac{\lambda}{\beta} \left[1 - \text{Exp}(-\gamma \cdot \beta \cdot t^{1+\alpha}) \right] \right\}; \quad (16)$$

$$\sigma(t) = \sigma_o \left\{ 1 - \frac{\lambda}{\beta + \lambda} \left[1 - \text{Exp}(-\gamma(\beta + \lambda) \cdot t^{1+\alpha}) \right] \right\}, \quad (17)$$

где α, β, λ – эмпирические коэффициенты;

t – время, час;

γ – безразмерный коэффициент, который определяется следующим образом:

$$\gamma = (1 - \alpha)^{1+\alpha}. \quad (18)$$

В качестве примера определим деформации и напряжения в многослойной панели, выполненной из стеклоткани, на основе связующего ЭДТ-10 (табл. 2, 3).

Из полученных результатов видно, что деформация ползучести дает существенное увеличение деформации на участке охлаждения, а значит, увеличивается и прогиб в изделии.

Таблица 2

Зависимость отношения величины деформации ползучести к мгновенной деформации от температуры и времени выдержки

Время, час.	1	2	3	4	5
Температура					
125	1,21	1,23	1,23	1,3	1,3
100	1,28	1,31	1,31	1,32	1,32
80	1,37	1,47	1,51	1,54	1,55
20	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05

Таблица 3

Зависимость отношения величины напряжения релаксации к температурным напряжениям от температуры и времени выдержки

Время, час.	1	2	3	4	5
Температура					
125	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81
100	0,77	0,76	0,76	0,76	0,76
80	0,71	0,66	0,65	0,64	0,64
20	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95

Однако при этом происходит уменьшение величины напряжений в охлаждаемом изделии за счет перераспределения напряжений. Поэтому в некоторых случаях целесообразно проводить поэтапное (ступенчатое) охлаждение изделия.

В случае с многослойной панелью ступенчатое охлаждение неприемлемо без применения давления формования, поскольку такой режим приведет к дополнительному увеличению прогиба и не даст существенного снижения напряжений.

На основании вышеизложенной методики определения технологических параметров процесса формования, может быть реализован следующий алгоритм (рис. 3).

В блоке ввода данных задаются характеристики конструкции, связующего, армирующего материала, оборудования и т.п. В следующем блоке задаются массивы возможных скоростей подъема температуры и охлаждения. Определяется температура первой изотермической выдержки, также рассчитывается время.

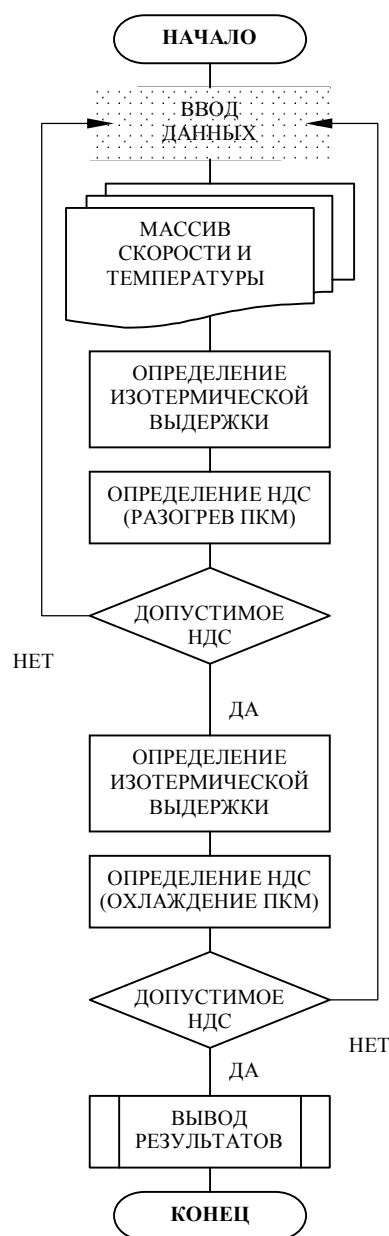


Рис. 3. Алгоритм определения температурно-временного режима формования

Следующим шагом является определение НДС, возникающее в конструкции.

Результатом расчета НДС является массив напряжений, деформаций и прогибов для соответствующих значений массива скорости разогрева пакета ПКМ.

В случае недопустимого значения НДС происходит возвращение в блок ввода данных и изменение параметров, если НДС является допустимым, про-

исходит расчет параметров второй изотермической выдержки, после чего происходит расчет и сравнение НДС на этапе охлаждения аналогично этапу разогрева. Результатом расчета является температурно-временная кривая процесса формования.

Заключение

Представленная методика позволяет определять технологические параметры процесса формования с учетом как связующего, так и армирующего материала, а также учитывать реономные свойства материала. Технологические параметры температурно-временного режима, полученные при помощи приведенной методики, позволят получать изделия с заданными геометрическими, физико-механическими параметрами.

В дальнейшем планируется уточнить данную методику, проведя исследования по определению влияния температуры на свойства компонентов ПКМ и пакета в целом, а также провести исследования по возможному контролю и управлению технологическими параметрами в ходе процесса формования изделий из ПКМ.

Литература

1. Захватов А.С., Томашевский В.Т., Яковлев В.С. Моделирование неизотермических процессов отверждения и влияние конструктивно-технологических факторов на монолитность изделий из полимерных композиционных материалов // *Механика композиционных материалов*: Всесоюзный научно-теоретический журнал. – 1990. – № 1. – С 158-166.
2. Благоннадежин В.Л., Воронцов А.Н., Мурханов Г.Х. Технологические задачи механики конструкций из композиционных материалов // *Механика композиционных материалов*: Всесоюзный научно-теоретический журнал. – 1987. – № 5. – С 859-877.
3. Гузь А.Н., Томашевский В.Т., Шульга Н.А., Яковлев В.С. Технологические напряжения и деформации в композитных материалах. – К.: Выща шк., 1988. – 270 с.
4. Вамболь А.А. О возможностях проектирования процесса отверждения при производстве изделий из композиционных материалов // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*: Сб. научн. тр. – Х.: Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2001. – Вып. 26 (3). – С. 137-139.
5. Шевцова М.А., Вамболь А.А. Определение скорости разогрева при формовании изделий из полимерных композиционных материалов // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*: Сб. научн. тр. – Х.: Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2003. – Вып. 35 (4). – С. 104-107.
6. Васильев В.В. Механика конструкционных композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1988. – 271 с.
7. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкции. – М.: Наука, 1966. – 752 с.

Поступила в редакцию 30.05.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Е. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.