

УДК. 678

## Выбор режимов формования композитных конструкций ракетно-космической техники

**Е.В. Беляков, В.А. Тарасов, Р.В. Боярская**

*Разработана методика выбора оптимального технологического режима формования композита по критерию минимальной удельной работы уплотнения, обеспечивающего снижение затрат и допустимый для эксплуатации изделия уровень объемного содержания волокна. В основу методики положено комплексное математическое моделирование процессов кинетики, реологии и динамики уплотнения композита.*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, режим формования, объемное содержание волокна, оптимизация, моделирование процессов формования.

*The technique for selection of an optimum technological mode of composite formation according to the criterion of minimum specific work of the consolidation providing a decrease in expenses and a permissible fiber volume content for the product operation has been developed. The complex mathematical modeling of processes of kinetics, rheology and dynamics of the composite consolidation provides the basis for the technique.*

**Keywords:** polymeric composite materials, formation mode, fiber volume content, optimization, formation processes modeling.

Обеспечение требуемых показателей качества конструкций аэрокосмического назначения из полимерных композиционных материалов (ПКМ) во многом обусловлено применением эффективных методов изготовления, к которым относится метод контактного формования [1]. Процесс является кульминацией всех ранее выполнявшихся производственных операций и в значительной мере определяет уровень различных показателей качества композита. К наиболее важным показателям качества следует отнести объемное содержание волокна, величина которого во многом характеризует физико-механические характеристики композита [1, 2]. Себестоимость изделий из ПКМ, как правило, связана с энерго- и трудозатратами. Снижение энергозатрат при изготовлении изделий из ПКМ определяется процессом формования и является в настоящее время актуальной проблемой.

В работах [3–11], посвященных вопросам формования композитов, в значительной мере раскрыта сущность и возможность математического моделирования протекающих процессов, а также оптимизации и контроля температурно-временных режимов отверждения [11]. Разработанная автором [6] методика позволяет определять допуски на значения основных технологических параметров формования углепластиков. Однако для ее реализации необходим значительный



**БЕЛЯКОВ**  
Евгений Владимирович  
аспирант кафедры  
«Технологии  
ракетно-космического  
машиностроения»



**ТАРАСОВ**  
Владимир Алексеевич  
доктор технических наук,  
профессор, зав. кафедрой  
«Технологии  
ракетно-космического  
машиностроения»



**БОЯРСКАЯ**  
Раиса Владимировна  
кандидат технических  
наук, доцент кафедры  
«Технологии  
машиностроения»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

объем статистических данных о различных характеристиках материала, получение которых в условиях расширения компонентной базы ПКМ требует больших трудозатрат. При выборе режимов формования авторы математической модели уплотнения композита [4, 5] не рассматривают влияние кинетики и реологии процесса отверждения на изменение объемного содержания волокна режима во времени и не раскрывают вопросы практического применения модели в условиях реального производства. Предлагаемые в работе [7] рекомендации по выбору технологических режимов формования композитов и момента времени подачи давления в автоклаве относятся к материалу AS-4/3501-6, что снижает ценность этих рекомендаций при использовании других материалов.

Целью данной работы является разработка методики выбора режима изменения давления, обеспечивающего снижение затрат и одновременно допустимое для эксплуатации изделия объемное содержание волокна.

Предварительные эксперименты по формированию образцов на основе углеродной ленты ЭЛУР-0,08 и связующем ЭНФБ показали, что при 14 слоях боковой отжим связующего составляет около 50%, а при 26 слоях — 70% общего отжатого связующего. При толщинах порядка 1,5 мм основной отжим происходит в горизонтальном направлении. Поэтому основой оптимизации режима подачи давления является рассмотрение динамики уплотнения композита [12] при горячем прессовании путем отжима излишков связующего с учетом кинетики, реологии процесса отверждения термореактивной полимерной системы наполнитель — связующее.

Рассмотрение кинетики и реологии процесса отверждения композита проведем в рамках комплексной модели [9], а в основу математического анализа динамики уплотнения положим модель описания межслойного движения связующего [4] на базе закона Дарси. Неотвержденный композит представляется в виде пористой нелинейной упругой среды, которая наполнена вязкой жидкостью. В результате истечения связующего происходит повышение

доли наполнителя в композите, а часть приложенной нагрузки воспринимается волокнами, что в свою очередь влечет за собой понижение давления в связующем. Процесс, при котором связующее может свободно и непрерывно вытекать из композита продолжается до тех пор, пока давление в связующем не станет равным нулю.

Рассмотрим плоский слоистый образец из непрерывных волокон с размерами  $2a \times 2b \times h_0$  (рис. 1).

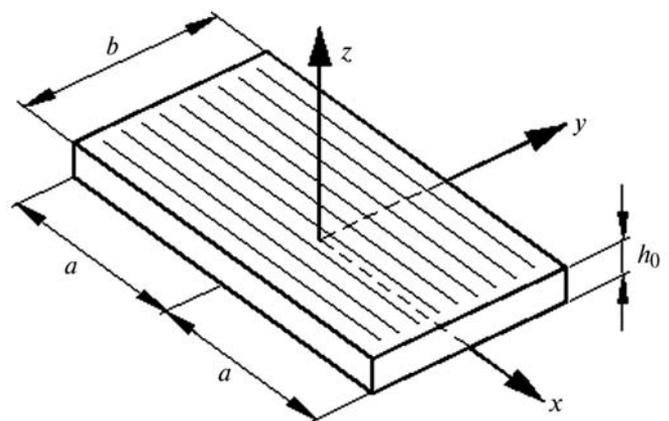


Рис. 1. Выбор геометрических параметров при расчете уплотнения композиционного материала

Выбранная декартова система координат совпадает с основными осями материала. Направление оси  $x$  соответствует направлению волокна, ось  $z$  — перпендикуляр на плоскости препрега. Считается, что давление к композиту прикладывается через пластину (цулагу) в направлении оси  $z$ , а волокна ограничены в движении в направлениях осей  $x$  и  $y$ . Уплотнение происходит в плоскости  $x$ — $y$ . Течение матрицы происходит во всех направлениях.

Полагаем, что объемная доля связующего  $V_r$  и объемная доля волокна  $V_f$  связаны соотношением

$$V_r + V_f = 1.$$

Проведем анализ баланса сил в предположении, что силы инерции малы и приложенная к препрегу нагрузка уравновешена нагрузкой,

возникающей в связующем и волокнах. Тогда внешнее давление

$$p = \sigma + p_r, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — противодействие волокон;  $p_r$  — противодействие связующего.

Воспользуемся уравнением, которое предложено в работе [4]:

$$\begin{aligned} \frac{S_1}{V_f} \frac{\partial^2 p_r}{\partial x^2} + \frac{S_2}{V_f} \frac{\partial^2 p_r}{\partial y^2} + \frac{1}{V_0^2} \frac{\partial}{\partial z} (V_f S_3 \frac{\partial p_r}{\partial z}) = \\ = \eta \frac{\partial}{\partial t} \frac{1 - V_f}{V_f}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $V_0$  — начальное значение объемного содержания волокна;  $S_1, S_2, S_3$  — проницаемость наполнителя в направлениях  $x, y, z$  соответственно;  $\eta$  — вязкость связующего.

Предложенный в работе [3] подход в неполной мере отражает технологические особенности производства композитных конструкций и требует эмпирических коэффициентов при расчете проницаемости наполнителя композиционного материала. Поэтому в представленной работе введем понятие эквивалентной проницаемости, учитывающей особенности технологической среды в условиях промышленного изготовления композитов, включая расположение волокон.

Будем определять  $S_{\text{эКВ}}$  следующим образом:

$$\frac{1}{S_{\text{эКВ}}} = \frac{1}{\gamma} \left( \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} \right), \quad (3)$$

где  $S_1$  — проницаемость вдоль волокна;  $S_2$  — проницаемость в направлении, перпендикулярном направлению волокна;  $\gamma$  — эмпирический коэффициент.

При этом аналогично работам [13, 14] применим в формуле (3)

$$S_1 \sim \frac{r_f^2 (1 - V_f)^3}{V_f^2} \text{ и } S_2 \sim \left( \sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1 \right)^{5/2} r_f^2.$$

Тогда эквивалентная проницаемость

$$S_{\text{эКВ}} = \frac{\gamma r_f^2 \left( \sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1 \right)^{5/2} (1 - V_f)^3}{\left[ \left( \sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1 \right)^{5/2} + \frac{(1 - V_f)^3}{V_f^2} \right] V_f^2}. \quad (4)$$

Отсюда уравнение (2) примет вид

$$\frac{S_1}{V_f} \frac{\partial^2 p_r}{\partial x^2} + \frac{S_2}{V_f} \frac{\partial^2 p_r}{\partial y^2} + \frac{\eta}{V_f} \frac{\partial V_f}{\partial t} = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) описывает распределение давления в связующем. Полагая  $S_1 = S_2 = S_{\text{эКВ}}$ , рассматриваемое уравнение сводится к уравнению Пуассона. По аналогии с работой [4] решение (5) для противодействия связующего представим в следующем виде:

$$\begin{aligned} p_r = \frac{16}{\pi^3} \frac{a^2 \eta}{S_{\text{эКВ}} V_f} \frac{\partial V_f}{\partial t} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^3} (-1)^{(n-1)/2} \times \\ \times \left[ 1 - \frac{\cosh(n\pi y / (2a))}{\cosh(n\pi b / (2a))} \right] \cos \left[ \frac{n\pi x}{2a} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

а противодействие волокон выразим как

$$\sigma(V_f) = A_s \frac{\sqrt{\frac{V_f}{V_0}} - 1}{\left( \sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1 \right)^4}, \quad (7)$$

где  $A_s$  — константа упругости структуры наполнителя.

В общем случае внешнее давление, прикладываемое к композиту, и вязкость терморезактивной полимерной системы являются функциями времени. Поэтому, с учетом уравнений (1), (2), (5), (6) получаем

$$\begin{aligned} p(t) = A_s \frac{\sqrt{\frac{V_f}{V_0}} - 1}{\left( \sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1 \right)^4} + \frac{1}{3} \eta(t) \frac{a^2}{V_f S_{\text{эКВ}}} \frac{\partial V_f}{\partial t} \times \\ \times \left[ 1 - \frac{192}{\pi^5} \frac{a}{b} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^5} \tanh \left[ \frac{n\pi b}{2a} \right] \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнение (8) связывает основные технологические параметры процесса формования композита: объемное содержание волокна, давление формования, вязкость терморезактивной полимерной системы, проницаемость наполнителя и время формования.

Вводя обозначение

$$J = 1 - \frac{192}{\pi^5} \frac{a}{b} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^5} \tanh \left[ \frac{n\pi b}{2a} \right]$$

представим уравнение (8) в следующем виде:

$$\frac{dV_f}{dt} = \frac{\gamma 3r_f^2 \left( \sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1 \right)^{5/2} (V_f - 1)^3}{a^2 J \left[ \left( \sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1 \right)^{5/2} + \frac{(1 - V_f)^3}{V_f^2} \right] V_f \eta(t)} \times \left[ A_s \frac{\sqrt{V_f/V_0} - 1}{\left( \sqrt{V_a/V_f} - 1 \right)^4} - P(t) \right]. \quad (9)$$

Уравнение (9) является нелинейным дифференциальным уравнением относительно объемного содержания волокна  $V_f$  и решается численными методами.

Для учета особенностей технологической среды в условиях промышленного изготовления композитов эмпирические коэффициенты  $\gamma$  и  $A_s$  определялись следующим образом. Уравнение (9) записывалось в виде

$$x_1 x_3 = A_s x_1 x_2 - \xi x_4 x_5, \\ \text{где } x_1 = 3r_f^2 \left( \sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1 \right)^{5/2} (V_f - 1)^3; \\ x_2 = \left( \sqrt{\frac{V_f}{V_0}} - 1 \right) / \left( \sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1 \right)^4; \quad x_3 = P(t); \\ x_4 = a^2 J \left[ \left( \sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1 \right)^{5/2} + \frac{(1 - V_f)^3}{V_f^2} \right] V_f \eta(t); \quad x_5 = \frac{dV_f}{dt};$$

$$\xi = 1/\gamma.$$

Период изменения объемного содержания волокна  $V_f(t)$  разбивался на  $p$  равных частей и каждому значению  $t_m$  ( $m = 1, 2, \dots, p$ ) ставилось в соответствие значение  $V_f(t_m), P(t_m), \left. \frac{dV_f}{dt} \right|_{t_m}, \eta(t_m)$ .

Для  $k$  зависимостей изменения объемного содержания волокна  $V_f(t)$  получалась система

$$\begin{cases} [x_1(t_1)]_k [x_3]_k = \\ = A_s [x_1(t_1)]_k [x_2(t_1)]_k - \xi x_4(t_1)_k x_5(t_1)_k; \\ [x_1(t_2)]_k [x_3]_k = \\ = A_s [x_1(t_2)]_k [x_2(t_2)]_k - \xi x_4(t_2)_k x_5(t_2)_k; \\ \dots \\ [x_1(t_m)]_k [x_3]_k = \\ = A_s [x_1(t_m)]_k [x_2(t_m)]_k - \xi x_4(t_m)_k x_5(t_m)_k. \end{cases} \quad (10)$$

Методом наименьших квадратов из выражения

$$\sum_{i=1}^{p \cdot k} (x_{1i} x_{3i} - A_s x_{1i} x_{2i} - \xi x_{4i} x_{5i})^2 \rightarrow \min$$

определялись искомые величины  $\xi$  и  $A_s$ .

С учетом модели, предложенной в работе [9], и уравнения (9) была сформирована система

$$\begin{cases} \frac{\partial V_f}{\partial t} = \frac{\gamma 3r_f^2 \left( \sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1 \right)^{5/2} (V_f - 1)^3}{a^2 J \left[ \left( \sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1 \right)^{5/2} + \frac{(1 - V_f)^3}{V_f^2} \right] V_f \eta(t)} \times \\ \times \left[ A_s \frac{\sqrt{\frac{V_f}{V_0}} - 1}{\left( \sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1 \right)^4} - P(t) \right]; \\ \frac{d\alpha}{dt} = F(\alpha) \exp \left[ \frac{-E(\alpha)}{RT(t)} \right] (1 - \alpha)^n; \\ \eta(t, \alpha) = \eta_\infty(\alpha) \exp \left[ \frac{E_\eta(\alpha)}{RT(t)} \right]; \\ \text{tg} \delta(t, \alpha) = \xi(\alpha) \exp \left[ \frac{\theta(\alpha)}{RT(t)} \right]. \end{cases} \quad (11)$$

Эта система связывает основные технологические параметры изготовления композита: искомую диаграмму изменения давления, режимы термообработки препрега в процессе уплотнения, кинетику и реологию процесса отверждения, а также технологические характеристики наполнителя.

При известных функциях  $F(\alpha), E(\alpha), \eta_\infty(\alpha), T(t), P(t)$ , параметрах  $n, r_f, A_s, V_0, V_a, \gamma$  и размерах композита  $a, b$  с помощью системы (11) можно моделировать изменение объемного содержания волокна  $V_f(t)$  при заданных технологических режимах формования (температурно-временном режиме отверждения  $T(t)$  и диаграмме изменения давления  $P(t)$ ) с учетом времени гелеобразования  $t_{\text{gel}}$ , степени отверждения  $\alpha(t)$  вязкости  $\eta(t)$ .

В основу оптимизации режима формования положим описание динамики уплотнения ком-

позита. Температурно-временной режим  $T(t)$  может быть выбран по результатам предварительных исследований по кинетике процесса отверждения, с учетом рекомендаций разработчиков связующего или на основе работ [5, 9–11].

Изменение объемного содержания волокна от времени определим по формуле [14]

$$V_f(t) = \frac{h_0 V_0}{h(t)},$$

где  $h_0$  — толщина образца в начальный момент времени;  $h(t)$  — изменение толщины композита от времени.

Для согласованного выбора режимов изменения температуры и давления, обеспечивающих требуемый уровень объемного содержания волокна в технологическом процессе изготовления композитных конструкций методом контактного формования, в данной работе предложены: принцип динамического программирования [15], обеспечивающего минимум удельной работы уплотнения препрега

$$Q(t) = \int_0^{t^*} P(t) \dot{h}(t) dt,$$

и математические условия, необходимые для поиска решения:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m \Delta Q_i \rightarrow \min; \\ V_f^{\min} \leq V_f(t^*) \leq V_f^{\max}; \\ P_j^{\min} \leq P_j(t) \leq P_j^{\max}; \\ t \in [0; t^*], \end{cases} \quad (12)$$

где  $\dot{h}$  — скорость уплотнения композита;  $t$  — текущее время;  $t^*$  — момент времени, отражающий состояние термореактивной полимерной системы (время гелеобразования или стеклования);  $V_f^{\min}, V_f^{\max}$  — значения нижней и верхней границы допуска на долю наполнителя в объеме композиционного материала.

В разработанной программе расчета, реализующей условия (12), совокупность искомым диаграмм изменения рабочего давления определялась в виде

$$P(t) = \begin{cases} \hat{P}_j + \hat{B}t & \text{при } t_{j-1} \leq t \leq t_j^{**}, \\ \hat{P}_j & \text{при } t_j^{**} \leq t \leq t_j, \end{cases} \quad j=1, 2, \dots, \chi_{\text{ст}},$$

где  $\hat{B}$  — скорость подъема давления;  $\hat{P}$  — значение давления на  $j$ -й ступеньке;  $t_j^{**}$  — время пересечения линий подъема и постоянного значения давления  $j$ -й ступени;  $\chi_{\text{ст}}$  — число ступеней в искомой диаграмме изменения давления.

Ограничением на режим изменения давления является условие

$$P_j^{\min}(t) \leq P_j(t) \leq P_j^{\max}(t),$$

где  $P_j^{\min}(t), P_j^{\max}(t)$  — верхний и нижний пределы изменения давления на  $j$ -й ступеньке. Значения  $\hat{B}, P_1^{\min}(t)$  и  $P_j^{\max}(t)$  определяются возможностями оборудования.

При проведении расчетов выполнялось разбиение на  $m$  частей временного интервала  $[0; t^*]$  так, что  $m \gg \chi_{\text{ст}}$ . Тогда  $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ , где  $\Delta t = t^* / m$ . Для интервала  $[t_i; t_{i+1}]$  определялись следующие значения: давления  $P_i = P[t_i + h / 2]$ ;

$$\text{изменения толщины } \Delta h_i = V_0 h_0 \left[ \frac{1}{V_f^i} - \frac{1}{V_f^{i+1}} \right];$$

изменения удельной работы уплотнения  $\Delta Q_i = P_i \Delta h_i$ , где  $i=1, 2, \dots, m$ .

При реализации расчета использовались следующие исходные данные: зависимость вязкости термореактивной полимерной системы  $\eta(t)$  при известном температурно-временном режиме  $T(t)$ ; константы наполнителя  $r_f, \gamma$  и  $A_s$ ; характеристика препрега  $V_0$  и требования к объемному содержанию волокна  $V_f^{\max}$  и  $V_f^{\min}$ ; параметры режима изменения давления  $P_j^{\min}(t), P_j^{\max}(t)$  и  $\hat{B}$ ; количество ступенек изменения давления  $\chi_{\text{ст}}$ .

В качестве примера на рис. 2 приведена совокупность допустимых кусочно-линейных диаграмм изменения давления (линии 1–6), которые соответствуют известному температурно-временному режиму отверждения и позволяют обеспечить требуемый уровень объемной доли наполнителя [16] в композиционном материале  $V_f \in [0,6; 0,7]$ .

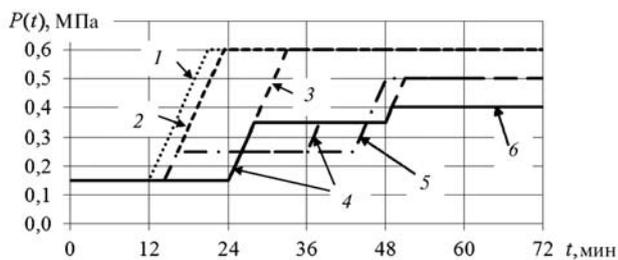


Рис. 2. Совокупность допустимых диаграмм изменения давления  $P(t)$  во времени  $t$  для различного количества ступенек изменения  $\chi_{ст}$  ( $\chi_{ст} = 3, 5, 6$ )

Здесь  $3(Q=1,1 \cdot 10^6)$ ,  $6(Q=6 \cdot 10^5)$  — кусочно-линейные функции  $P(t)$  для  $\chi_{ст} = 3$ ;  $2(Q=1,2 \cdot 10^6)$ ,  $5(Q=5,5 \cdot 10^5)$  — кусочно-линейные функции  $P(t)$  для  $\chi_{ст} = 5$ ;  $1(Q=1,3 \cdot 10^6)$ ,  $4(Q=5,4 \cdot 10^5)$  — кусочно-линейные функции  $P(t)$  для  $\chi_{ст} = 6$ .

Расчеты проведены для условий изготовления композитных конструкций на основе связующего ЭНФБ и углеродной ткани арт. 3692 методом автоклавного формования при 3, 5, и 6 ступеньках кусочно-линейной функции  $P(t)$ .

Значение времени  $t^*$  выбрано соответствующим температуре стеклования  $T_c = 165^\circ\text{C}$ , и равным  $t^* = 72$  мин. Температурно-временной режим отверждения  $T(t)$  предусматривал нагрев со скоростью  $2^\circ\text{C}/\text{мин}$  до  $170^\circ\text{C}$  и выдержку при заданной температуре не менее 6 ч. Вязкость терморезактивной полимерной системы определялась с помощью динамического механического анализа. Были приняты следующие числовые значения параметров и коэффициентов:  $\dot{V} = 0,5 \cdot 10^5 \text{ Па}/\text{мин}$  — скорость подъема давления,  $\gamma = 10152$  — эмпирический коэффициент,  $r_f = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  и  $A_s = 3286 \text{ Па}$  — соответственно радиус волокна и коэффициент упругости волокон,  $V_0 = 0,47$  — начальное значение объемного содержания волокна в препреге. При этом предполагалось, что была выбрана ортотропная схема армирования композиционного материала, а размеры изделия были приняты равными  $a = b = 1 \text{ м}$ , количество слоев — 8. Условия изменения рабочего давления: диапазон изменения  $P_j \in [0,1; 0,6] \text{ МПа}$ , шаг изменения давления  $\Delta P_j = 0,05 \text{ МПа}$ .

Анализ диаграмм изменения давления  $P(t)$  позволил установить функциональную связь (рис. 3) между объемным содержанием наполнителя  $V_f$  и удельной работой уплотнения пре-

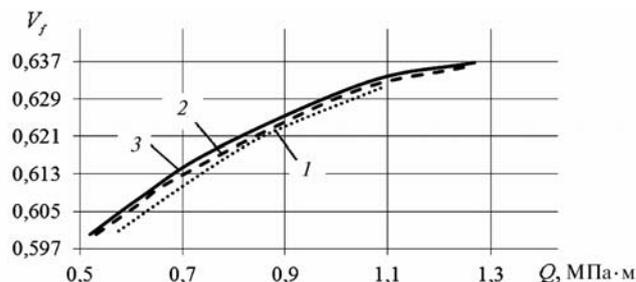


Рис. 3. Зависимости изменения объемного содержания волокна от удельной работы уплотнения для различных значений  $\chi_{ст}$ . Кривые 1, 2, 3 соответствуют значениям  $\chi_{ст} = 3, 5, 6$

прега  $Q$ . Показано, что снижение затрат на формование композитных конструкций следует ожидать в окрестности нижней границы допустимых значений  $V_f^{\text{мин}}$ .

Другим важным следствием установленной связи является снижение удельной работы уплотнения препрега при увеличении числа ступеней  $\chi_{ст}$  (рис. 4), что показывает стремление к непрерывной и монотонно изменяющейся кривой кусочно-линейной функции  $P(t)$ , соответствующей наименьшему значению удельной работы уплотнения препрега.

Результаты изготовления по указанным в таблице режимам при выборе условий уплотнения препрега раскрывают эффективность применения критерия  $Q(t)$  (образцы изготавливались в соответствии с линиями 3 и 6, см. рис. 2). Удельная работа уплотнения композита, которая коррелирует с затратами на изготовление, в рассматриваемых случаях различалась в 1,8 раза.

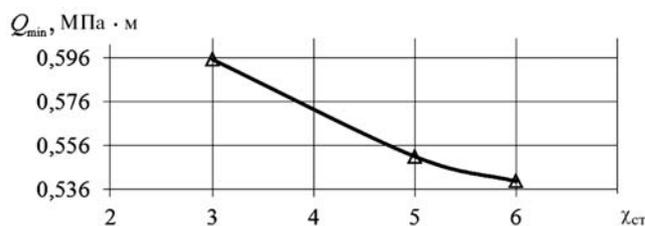


Рис. 4. Зависимость изменения минимальной удельной работы  $Q_{\text{мин}}$  от  $\chi_{ст}$

Показано, что выбор режима изменения давления на базе разработанной методики расчета обеспечивает требуемый уровень физико-механических характеристик, необходимый для эксплуатации изделия, объемное содержание волокна и одновременно снижение затрат.

Предложенный подход, основанный на знании модели  $V_f = F(S_{\text{экр}}, \eta, \alpha)$ , позволяет учесть

Таблица

Режим формования	Физико-механические характеристики			Компонентный состав	
	$\sigma^0$ , МПа	$E^0$ , МПа	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$V_f$ , %	$\Pi$ , %
	Требования к уровню свойств				
	>750	>65000	1,54—1,6	0,6—0,63	<2
Линия 3	773	67400	1,59	0,62	1
Линия 6	760	66187	1,55	0,614	1,2

Примечание.  $\sigma^0$  — предел прочности при растяжении;  $E^0$  — модуль упругости при растяжении;  $\rho$  — плотность;  $\Pi$  — пористость.

индивидуальные особенности партии конкретного сырья, которые характеризуются возможными отклонениями  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\eta$ ,  $\Delta S_{\text{экв}}$  от номинальных значений технологических, кинетических и реологических параметров процесса уплотнения препрега. В этом случае в качестве проектного значения объемной доли наполнителя  $V_f^{\text{пр}}$ , обеспечивающего минимально допустимый уровень удельной работы уплотнения препрега  $Q_{\text{мин}}$ , следует выбрать

$$V_f^{\text{пр}} = \frac{\partial V_f}{\partial S_{\text{экв}}} \Delta S_{\text{экв}} + \frac{\partial V_f}{\partial \eta} \Delta \eta + \frac{\partial V_f}{\partial \alpha} \Delta \alpha + V_f^{\text{мин}},$$

где частные производные можно найти из модели численными методами. В таком случае исключается возможность появления брака по допустимому уровню объемной доли наполнителя при производстве композитных конструкций.

Предложенная методика согласованного выбора диаграммы изменения давления и температурного режима формования была использована в ОАО «ОНПП «Технология» при разработке технологических процессов изготовления изделий ракетно-космической техники из ПКМ на основе связующего ЭНФБ и углеродных наполнителей арт. 3692, арт. 4510, арт. 4510 соответственно. При этом было достигнуто снижение времени и количества препрега на отработку технологического процесса по сравнению с прежними методиками, а также обеспечен требуемый уровень объемного содержания волокна в изделиях и улучшены физико-механические характеристики некоторых композитных конструкций.

Таким образом, представленная методика выбора режима изменения давления учитывает основные процессы уплотнения композита при формовании и технологические характеристики наполнителя, обеспечивает снижение затрат

и одновременно допустимое для эксплуатации изделия объемное содержание волокна. Предложенная методика может применяться для отработки режимов формования ПКМ в современных условиях активно расширяющейся компонентной базы.

## Литература

1. Комков М.А., Тарасов В.А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 431 с.
2. Labronici M., Ishida H. Effect of degree of cure and fiber content on the mechanical and dynamic mechanical properties of carbon fiber reinforced PMR-15 polyimide composites // Polymer Composites. 1999. Vol. 20. N 4. P. 515—523.
3. Consolidation Experiments for Laminate Composites/ T.G. Gutowski, Z. Cai, S. Bauer et al. // Journal of Composite Materials. 1987. Vol. 21. July. P. 650—669.
4. Gutowski T.G., Morigaki T., Cai Z. The Consolidation of Laminate Composites // Journal of Composite Materials. 1987. Vol. 21. February. P. 172—188.
5. Loos A.C., Springer G.S. Curing of Epoxy Matrix Composites // Journal of Composite Materials. 1983. Vol. 17. March. P. 135—169.
6. Семенова Е.Г. Основы моделирования и диагностики антенных устройств бортовых комплексов. СПб.: Политехника, 2003. 186 с.
7. Campbell F.C. Manufacturing processes for advanced composites. Elsevier Science. 2004. 532 p.
8. Математическое моделирование процесса отверждения изделий из полимерных композиционных материалов методом вакуумного автоклавного формования в технологическом пакете / С.В. Мищенко, О.С. Дмитриев, А.В. Шаповалов и др. // Вестник ТГТУ. 2001. Т. 7. № 1. С. 7—19.
9. Тарасов В.А., Беляков Е.В. Математическое моделирование процесса неизотермического отверждения полимерных композитных конструкций РКТ // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. 2011. № 1. С. 113—120.
10. Метод расчета оптимальных режимов отверждения крупногабаритных толстостенных панелей из полимерных композитов / Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ): Труды 4-й междунар. конф. 26—29 апреля 2005. М.: Изд-во «Знание», 2006. С. 507—512.
11. Дмитриев О.С. Интенсификация процессов отверждения изделий из полимерных композитов на основе автоматизированного контроля и коррекции технологических режимов. Автореф. дис. ... д-ра. Тамбов: ТГТУ, 2000.
12. Беляков Е.В., Тарасов В.А. Динамика уплотнения композиционного материала при горячем прессовании // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 12. С. 53—57.
13. Simulations and Experiments on Low-Pressure Permeation of Fabrics: Part II. The Variable Gap Model and Prediction of Permeability/ M.T. Senoguz, F.D. Dungan, A.M. Sastry et al. // Journal of COMPOSITE MATERIALS. 2001. Vol. 35. N 14. P. 1285—1322.
14. Gutowski T.G. Resin A. Flow/Fiber Deformation Model for Composites // SAMPE Quarterly. 1985. Vol. 16. N 3. July. P. 58—64.
15. Струченков В.И. Методы оптимизации в прикладных задачах. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2012. 320 с.
16. Composite materials for aircraft structures / Edited by Alan Baker, Stuart Dutton, and Donald Kelly.: American Institute of Aeronautics and Astronautics. (Education series). 2004. P. 597.

Статья поступила в редакцию 07.03.2012