УДК 678.8

Оптимизация вакуумирования сухого пакета семипрегов при формовании изделий из композитов

В.Л. ФЕДЯЕВ,
д-р техн. наук
(ИММ ФИЦ КазНЦ РАН, Казань;
КНИТУ-КАИ, Казань),
В.И. ХАЛИУЛИН,
д-р техн. наук
(КНИТУ-КАИ, Казань),
Р.Ш. ГИМАДИЕВ,
д-р техн. наук
(КГЭУ, Казань),
Н.В. ЛЕВШОНКОВ,
канд. техн. наук
(КНИТУ-КАИ, Казань)
vlfed2020@gmail.com

Рассматривается стадия вакуумирования сухого пакета семипрегов при формовании изделий из композитов. Предполагается, что вязкость паровоздушной смеси, находящейся в поровом пространстве пакета, его пористость, проницаемость и толщина зависят от плотности этой смеси. Приведены соответствующие соотношения, сформулирована задача оптимизации, где в качестве критерия оптимальности выступает время фильтрационного вакуумирования пакета семипрегов. В результате ее решения найдено значение параметра, характеризующего интенсивность отбора паровоздушной смеси, при котором время вакуумирования будет оптимальным.

Полимерные композиционные материалы, технология вакуумного формования, оптимизация вакуумирования сухого пакета семипрегов

Удельные прочностные показатели изделий из композитов зависят не только от характеристик используемой арматуры и связующего, но и в значительной степени от выбранного метода их изготовления [1–8]. Этим можно объяснить множество способов переработки композитных материалов, существенно отличающихся стоимостью и достижимым качеством.

В авиа- и ракетостроении, а также других отраслях машиностроения ключевым требованием к изделию является высокая удельная прочность и жесткость, поэтому продолжается поиск новых и совершенствование существующих технологических схем. Перспективным методом формования изделий является способ переработки композитов с использованием семипрегов [9–11]. Семипреги представляют собой слои армирующего наполнителя, частично совмещенные по толщине со связующим материалом.

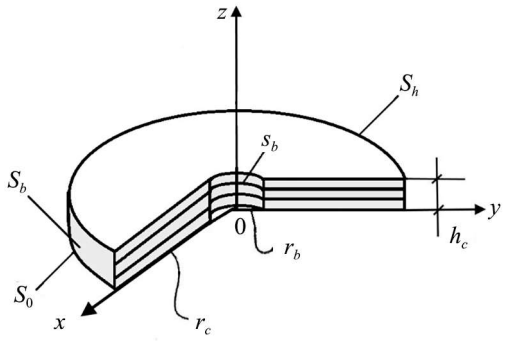
В силу своей структуры и состава сухие зоны семипрегов имеют определенную пористость слоев наполнителя, областей контакта этих слоев и связующего полимерного материала. Предполагается, что в исходном состоянии поры заполнены паровоздушной смесью, формируемой за счет двух компонентов: во-первых, воздуха (или иной газовой среды) производственных помещений; во-вторых, паров связующего материала, выделяющихся, например, вследствие уменьшения давления в порах при вакуумировании.

Возможна ситуация, когда концентрация этих паров мала либо они вообще отсутствуют. При этом следует иметь в виду, что в воздухе производственных помещений, кроме смеси газов, вполне могут находиться пары воды и других веществ. В таком случае воздух – парогазовая смесь. Теплофизические и другие характеристики рассматриваемых сред при известных концентрациях компонентов, их свойств оцениваются, в частности, с использованием положений теории смесей.

В процессе формирования изделий с помощью данного метода выделяются следующие основные стадии: выполнение подготовительных операций, вакуумирование сухого технологического пакета семипрегов, нагрев и расплавление связующего, пропитка наполнителя, отверждение полимерного материала.

Рассмотрим далее только стадию вакуумирования сухого пакета семипрегов, удаления из него паровоздушной смеси. Математические модели соответствующих процессов приводятся в работах [12, 13]. В качестве основных принимаются следующие допущения. Технологический пакет состоит из N горизонтально расположенных на твердой основе круглых в плане слоев семипрегов, плотно закрытых сверху пленкой. Отбор паровоздушной смеси из герметичного вакуумного мешка осуществляется через дренажную скважину, находящуюся в центре пакета.

Расчетная схема круглого в плане пакета семипрегов с отбором паровоздушной смеси из центра с использованием «дренажной скважины» приведена на рисунке. Здесь: (x, y, z) – декартова прямоугольная система координат; h_c, r_c – толщина и радиус пакета; r_b, s_b – радиус дренажной скважины и ее боковая поверхность; S_0, S_h – нижняя и верхняя поверхности; S_b – боковая поверхность пакета.



Предполагается, что слои наполнителя семипрегов тканые, изготовлены из некрученных нитей с достаточно большим количеством непрерывных углеродных микроволокон. Первоначальная пористость данных слоев обусловлена, во-первых, микропорами каналов между прижатыми друг к другу микроволокнами диаметром 5...10 мкм; во-вторых, более крупными макропорами, находящимися между нитями ткани, нитями и поверхностями слоев полимерного связующего.

При условии что движение паровоздушной смеси осуществляется как в макро-, так и микропорах (капиллярах), различается фильтрация в макропорах под действием перепада давления [12] и капиллярный перенос паровоздушной смеси в микропорах вследствие диффузии [13]. Модели движения паровоздушной смеси, результаты решения соответствующих задач представлены в работах [14, 15] в предположении, что вязкость паровоздушной смеси, толщина сухого пакета семипрегов, пористость, проницаемость материала наполнителя в процессе вакуумирования принимают некоторые средние значения. Однако в действительности при уменьшении плотности паровоздушной смеси, давления в ней указанные параметры изменяются из-за разрежения паровоздушной среды, сжатия слоев тканого наполнителя. В настоящем исследовании, в отличие от ранее опубликованных результатов [12, 13], учтены изменения указанных параметров. Это позволяет предположить наличие режима вакуумирования, обеспечивающего оптимальное время удаления паровоздушной смеси из сухого пакета семипрегов.

Таким образом, целью настоящей работы является математическое описание изменения вязкости паровоздушной смеси, пористости, проницаемости материала тканого наполнителя, толщины сухого пакета семипрегов в зависимости от плотности паровоздушной смеси, уменьшающейся во времени вследствие отбора ее из пакета; формулировка и решение оптимизационных задач, определение технологических режимов, параметров семипрегов, обеспечивающих оптимальное время фильтрационного вакуумирования.

Принимая во внимание то обстоятельство, что процесс фильтрации паровоздушной смеси при вакуумировании наиболее значимый, для оценки изменения вязкости паровоздушной смеси в поровом пространстве слоя сухого наполнителя, его пористости, проницаемости и толщины выделим в материале пакета плоский контрольный объем (сравнительно небольшую часть объема тела достаточно простой формы, располагающуюся на удалении от его границ) с толщиной h и макропористостью m. Так как по мере удаления из порового пространства паровоздушной смеси в силу действия на рассматриваемый объем поперечных сжимающих нагрузок, обусловленных перепадом давления $\Delta p = p_a - p$ (p_a – давление воздуха, других газов вне вакуумного мешка), вязкость μ, толщина h, макропористость m будут функциями плотности ρ: $\mu = \mu(\rho)$, $h = h(\rho)$, $m = m(\rho)$. Определим последовательно каждую из этих зависимостей.

В соответствии с кинетической теорией газов [14] вязкость i-го газа смеси μ_i описывается соотношением

$$\mu_i = \rho_i \left(v_{ci} l_i / 3 \right),$$

где ρ_i – плотность i-го газа; $v_{ci} = 2\sqrt{2R_\mu T / \left(\pi m_{\mu i}\right)}$ – средняя скорость движения молекул газа, $R_\mu = R / N_A$ – постоянная Больцмана, N_A – число Авогадро, T – температура по шкале Кельвина, $m_{\mu i}$ – масса одной

молекулы; $l_i = R_\mu T \Big/ \left(\pi\sqrt{2} p_i d_{\mu i}^2\right)$ – длина свободного пробега (средняя длина пути, проходимого молекулой газа между двумя ближайшими соударениями); p_i – парциальное давление; $d_{\mu i}$ – диаметр молекулы газа. После ряда преобразований получим:

$$\mu_i = \zeta_{\mu i}\left(T, p_i\right)\rho_i ,$$

где $\zeta_{\mu i} = \zeta_{\mu i}\left(T, p_i\right) = \xi_{\mu i}\left(T^{3/2}/p_i\right)$, $\xi_{\mu i}$ – коэффициент, характеризующий в среднем массу молекул и их диаметр.

Далее, учитывая, что рассматриваемая паровоздушная смесь n газообразных компонентов является гомогенной, предложим два подхода к оценке зависимости вязкости паровоздушной смеси от плотности. Первый состоит в том, что соотношение для определения $\mu = \mu(\rho)$ имеет вид

$$\mu = \xi_\mu\left(T^{3/2}/p\right)\rho .$$

Здесь давление смеси $p = \sum_{i=1}^{n} p_i$; плотность $\rho = \sum_{i=1}^{n}\left(x_i\rho_i\right), x_i = \left(M_i/m_i\right)\Big/\sum_{i=1}^{n}\left(M_i/m_i\right)$ – молярная концентрация, M_i – масса, m_i – молекулярный вес i-го газа; ξ_μ – коэффициент, зависящий от средних молекулярного веса и диаметра молекул смеси. При этом смесь считается газовой средой с так называемыми эффективными параметрами, характеризующими ее свойства.

Согласно второму подходу вязкость смеси определяется по формуле [15]

$$\mu = \sum_{i=1}^{n}\left(x_i\mu_i \Big/ \sum_{j=1}^{n}\left(x_j\Phi_{ij}\right)\right),$$

где Φ_{ij} – функции, зависящие от молекулярной концентрации (мольной доли i-го компонента) x_i, молекулярной массы m_i, вязкости μ_i компонентов смеси, которая, в свою очередь, определяется плотностью ρ_i этих компонентов. Следовательно, принимая дополнительные допущения (например, множители $\mu_i = \mu_i\left(p_i\right) = \xi_{\mu i}\left(T^{3/2}/p_i\right)$ приблизительно равны среднему значению $\mu_0 = \mu_0\left(p\right) = \sum_{i=1}^{n}\mu_i/n$), найдем:

$$\mu = \mu_0(p)\rho .$$

Отсюда зависимость $\mu = \mu\left(\rho\right)$ имеет вид

$$\mu = \mu(\rho) = \mu_0\left(p(\rho)\right)\rho .$$

Полагая, что процесс вакуумирования изотермический ($T \approx T_0 = \text{const}$), уравнение состояния среды [16]:

$$p = p_0\left(\rho/\rho_1\right)^{\kappa^*} ,$$

где $\kappa^* = c_p/c_v$, c_p, c_v – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении и объеме; ρ_1 – множитель, определяемый экспериментально; p_0 – характерное давление.

В соответствии с оценкой, полученной с помощью первого подхода, соотношение для безразмерной вязкости газа $\mu^* = \mu/\left(\tau_0 p_0\right)$ (τ_0 – характерное время) представим следующим образом:

$$\mu^* = \zeta_\mu^*\left(\rho^*\right)^{\left(1-\kappa^*\right)}, \qquad (1)$$

где $\rho^* = \rho/\rho_0$ – безразмерная плотность газа (ρ_0 – характерная плотность); $\zeta_\mu^* = \xi_\mu T_0^{3/2}(\rho_1/\rho_0)^{\kappa^*}\left(\rho_0/\left(\tau_0 p_0^2\right)\right)$.

При условии что безразмерная плотность $\rho^* < 1$, из формулы (1) найдем приближенное соотношение для оценки вязкости газовой среды:

$$\mu^* \approx \beta_0 - \beta_1 \rho^*, \tag{2}$$

где коэффициенты $\beta_0 = \kappa^* \zeta_\mu^*$; $\beta_1 = \left(\kappa^* - 1\right)\zeta_\mu^*$.

Согласно соотношению (2) при малых значениях плотности паровоздушной смеси вязкость $\mu^* \approx \kappa^* \zeta_\mu^*$, а при $\rho^* \approx 1$ порядка ζ_μ^*, т. е. уменьшается ($\kappa^* > 1$).

Известно [17], что при достаточно больших внешних сжимающих нагрузках p_a, действующих на слой пористого материала, осадка слоя s, равная разнице между первоначальной толщиной h_s и толщиной h после сжатия, определяется соотношением

$$s = h_s - h = a_k h_s \ln\left(p_a/p\right)/\left(1 + m_a\right),$$

где a_k – экспериментальный коэффициент компрессии; m_a – пористость материала контрольного объема до его вакуумирования, когда давление паровоздушной смеси в порах порядка p_a; p – текущее давление в порах. Отсюда следует, что безразмерная толщина $h^* = h/r_b$ (r_b – радиус «дренажной скважины») равна

$$h^* = h_s^*\left(1 + \tilde{a}_k \ln\left(p^*/p_a^*\right)\right),$$

где $h_s^* = h_s/r_b$; $\tilde{a}_k = a_k/\left(1 + m_a\right)$; $p^* = p/p_0$ – безразмерное давление в порах; $p_a^* = p_a/p_0$ – давление, действующее извне на поверхность контрольного объема.

Поскольку заведомо давление $p^* < p_a^*$, приближенно

$$h^* \approx h_s^*\left(1 - \tilde{a}_k\left(1 - p^*/p_a^*\right)\right).$$

Полагая, кроме того, что безразмерная плотность газовой среды ρ^* меньше единицы, найдем:

$$h^* \approx \gamma_0 + \gamma_1 \rho^*, \tag{3}$$

где $\gamma_0 = h_s^*\left(1 - \tilde{a}_k\left(1 + \left(\kappa^* - 1\right)\sigma_k\right)\right)$; $\gamma_1 = h_s^* \tilde{a}_k \kappa^* \sigma_k$, $\sigma_k = \left(\rho_0/\rho_1\right)^{\kappa^*}/p_a$. Видно, что при малой плотности паровоздушной смеси толщина слоя наполнителя будет минимальной. Если плотность газовой среды возрастает, то толщина увеличивается и при $\rho^* \approx 1$ достигает максимального значения $h_s^*\left(1 - \tilde{a}_k\left(1 - \sigma_k\right)\right)$. Объясняется это тем, что в соответствии с уравнением состояния при малой плотности паровоздушной смеси давление в порах мало, как следствие, пористый материал под действием сжимающей нагрузки сжимается сильнее, толщина слоя уменьшается. Наоборот, при возрастании плотности паровоздушной смеси увеличивается давление в порах, возникает эффект расширения материала, толщина слоя увеличивается.

Согласно имеющимся в литературе экспериментальным данным макропористость сжимаемых слоев оценивается следующим образом:

$$m = m_a - \left(1 + m_a\right)\left(1 - h^*/h_s^*\right). \tag{4}$$

Подставив в формулу (4) соотношение (3), получим приближенно

$$m = \delta_0 + \delta_1 \rho^* , \tag{5}$$

где $\delta_0 = m_a - a_k \left(1 + \left(\kappa^* - 1\right)\sigma_k\right)$; $\delta_1 = \kappa^* a_k \sigma_k$.

Согласно формулам (3), (5) поведение функций $h = h(\rho)$, $m = m(\rho)$ в зависимости от плотности является синхронным. Отметим также, что соотношения (2), (3), (5) являются приближенными и характеризуют, в первую очередь, закономерности изменения параметров μ, h, m в зависимости от степени вакуумирования контрольного объема.

Обратимся далее к результатам, представленным в работах [12, 13]. Показано [13], что безразмерное время вакуумирования сухого пакета семипрегов τ_k^*, при котором первоначальная масса паровоздушной смеси $M_{\text{н}}$ в макропорах пакета уменьшится до минимума, определяется соотношением

$$\tau_k^* = 0,72 \bar{M}_{\text{н}}^2 \Big/ \left(\bar{\lambda} \bar{b}\, \bar{h}_c \bar{\chi}\right), \tag{6}$$

где $\tau_k^* = \tau_k / \tau_0$; $\bar{M}_{\text{н}} = M_{\text{н}} \Big/ \left(\rho_0 r_b^3\right)$; $\bar{\lambda}$ – безразмерный коэффициент, характеризующий темп отбора паровоздушной смеси из порового пространства пакета; $\bar{b} = \left(1 - 0,25\bar{r}_e^2 + 2\bar{r}_e^2 \ln\left(\bar{r}_e\right)\right)\left(1 - \bar{r}_e^2\right)^2$, $\bar{r}_e = r_e / r_b$; $\bar{h}_c = h_c / r_b$ – безразмерная средняя толщина пакета семипрегов за время фильтрационного вакуумирования, $h_c = N\left(h_a + h_f\right)$ (h_a, h_f – толщина слоев наполнителя, несжимаемого полимерного связующего); $\bar{\chi} = r_b^2 \chi \Big/ \left(\tau_0 \rho_0^{\kappa^*}\right)$, $\chi = \left(1 + \kappa\right) \bar{\mu} \bar{m} \rho_1^{\kappa^*} \Big/ \bar{k}_0$, $\kappa = 1/\kappa^*$; $\bar{\mu}$, $\bar{m}$, $\bar{k}_0$ – средние значения вязкости паровоздушной смеси, пористости, проницаемости материала наполнителя в пакете.

Для упрощения последующего анализа в соотношении (6) для оценки влияния на время вакуумирования τ_k^* темпа отбора паровоздушной смеси из порового пространства, сжатия слоев наполнителя пакета необходимо заменить средние значения $\bar{\mu}$, $\bar{h}_c$, $\bar{m}$ на показатели, определяемые с помощью формул (2), (3), (5). При этом предварительно входящую в $\bar{\chi}$ среднюю проницаемость пористой среды $\bar{k}_0$ следует выразить через пористость $\bar{m}$. Воспользовавшись формулой Козени [9], найдем:

$$\bar{k}_0 = k_c d_c^2 \bar{m}^3 \Big/ \left(\left(1 - \bar{m}^2\right) g \bar{\rho}\right), \tag{7}$$

где k_c – определяемый экспериментально размерный поправочный множитель $\left(k_c = k_c\left(\bar{\mu}, \bar{m}\right)\right)$; d_c – характерный размер твердых фракций материала наполнителя (диаметр его нитей); $\bar{\rho}$ – средняя плотность паровоздушной смеси; g – ускорение свободного падения. Учитывая зависимость (7), представим переменную $\bar{\chi}$ в виде

$$\bar{\chi} = \chi_k \left(1 - \bar{m}^2\right) \bar{\mu}^* \Big/ \bar{m}^2 ,$$

где $\chi_k = \left(1 + \kappa\right) g \rho_0 \left(r_b / d_c\right)^2 \left(\rho_1 / \rho_0\right)^{\kappa^*} \bar{\rho}^* / k_c$. Как и ранее, $\bar{\mu}^* = \bar{\mu} / \left(\tau_0 p_0\right)$, $\bar{\rho}^* = \bar{\rho} / \rho_0$ – безразмерные средние значения вязкости, плотности паровоздушной смеси .

Полагая, что $\bar{m}$ – малая величина и заменяя среднюю толщину пакета $\bar{h}_c$ на безразмерную толщину одного слоя наполнителя в пакете $\bar{h}^*$, из формулы (6) найдем оптимизируемое безразмерное время вакуумирования сухого пакета семипрегов:

$$\tau_k^* = \Theta_k F\left(\bar{\mu}^*, \bar{h}^*, \bar{m}\right), \tag{8}$$

где $\Theta_k = 0,72 \bar{M}_{\text{н}}^2 \Big/ \left(\bar{\lambda} \bar{b} \chi_k\right)$; $F = \bar{m}^2 \Big/ \left(\bar{\mu}^* \bar{h}^*\right)$.

Из соотношения (8) видно, что безразмерная величина τ_k^* (при условии, что с течением времени вакуумирования изменение вязкости паровоздушной смеси, толщины пакета семипрегов, пористости не учитывается) прямо пропорциональна квадрату первоначальной массы паровоздушной смеси, квадрату макропористости, обратно пропорциональна темпу отбора паровоздушной смеси из порового пространства пакета семипрегов, его толщине.

Далее целесообразно ввести малый параметр $\xi = \lambda p_b / p_a = \lambda p_b^* / p_a^*$, характеризующий давление вакуумирования (уменьшения) p_b, нагрузку p_a, действующую на вакуумный мешок извне, а также величину, обратную интенсивности отбора паровоздушной смеси из пор наполнителя (множитель $\lambda = 1/\bar{\lambda}$). Принимая во внимание уравнение состояния паровоздушной смеси, учитывая, что безразмерная плотность ее $\rho^* < 1$, запишем:

$$\rho^* = \omega\xi \left(\omega = \rho_1 \left(p_a^* \right)^{\kappa} / \rho_0 = 1/\sigma_k^{\kappa} \right).$$

Следовательно, приближенно согласно формулам (2), (3), (5) безразмерная вязкость μ^*, толщина слоя наполнителя h^*, пористость m будут:

$$\mu^* \approx \mu_0^* + k_\mu (1-\xi);$$
$$h^* \approx h_0^* + k_h (1-\xi);$$
$$m \approx m_0 + k_m (1-\xi),$$

где $\mu_0^* = \beta_0 - \omega\beta_1$; $k_\mu = \omega\beta_1$; $h_0^* = \gamma_0 + \omega\gamma_1$; $k_h = \omega\gamma_1$; $m_0 = \delta_0 + \omega\delta_1$, $k_m = \omega\delta_1$.

Предполагая, что в соотношении (8) для времени τ_k^* входящий в формулу для χ_k поправочный множитель k_c по-прежнему зависит от средних значений вязкости $\bar{\mu}$ и пористости $\bar{m}$, а в функции F заменив $\bar{\mu}^*$, $\bar{h}^*$, $\bar{m}$ на переменные μ^*, h^*, m, найдем:

$$F = F(\xi) \approx (\tilde{m}_0 + \tilde{m}_1\xi) / (\tilde{\mu}_0 + \tilde{\mu}_1\xi), \tag{9}$$

где $\tilde{m}_0 = (m_0 - k_m)^2$; $\tilde{m}_1 = 2k_m(m_0 - k_m)$; $\tilde{\mu}_0 = \mu_0^* h_0^* - \mu_0^* k_h + k_\mu (h_0^* - k_h)$; $\tilde{\mu}_1 = k_h(\mu_0^* + k_\mu) - k_\mu(h_0^* - k_h)$. Приближенно $\tilde{m}_0 \approx m_0^2 - 2m_0k_m$; $\tilde{m}_1 \approx 2m_0k_m$; $\tilde{\mu}_0 \approx \mu_0^* h_0^* + h_0^* k_\mu - \mu_0^* k_h$; $\tilde{\mu}_1 \approx \mu_0^* k_h - h_0^* k_\mu$.

С точностью до второго порядка малости функция

$$F = F(\xi) \approx \left(\tilde{m}_0 + (\tilde{m}_1 - \tilde{m}_0\tilde{\mu}_1/\tilde{\mu}_0)\xi - (\tilde{m}_1\tilde{\mu}_1/\tilde{\mu}_0)\xi^2 \right) / \tilde{\mu}_0 .$$

Отсюда время вакуумирования τ_k^* при фильтрации паровоздушной смеси в поровом пространстве наполнителя будет оптимальным, если $F'(\xi) = 0$. Варьируемый параметр ξ принимает значение

$$\xi_m \approx 0{,}5(\tilde{\mu}_0\tilde{m}_1 - \tilde{m}_0\tilde{\mu}_1) / (\tilde{m}_1\tilde{\mu}_1).$$

После ряда преобразований этого соотношения получим ($k_\mu \approx 0$):

$$\xi_m \approx 0{,}25 \left(2h_0^* k_m - m_0 k_h \right) / (k_m k_h). \tag{10}$$

Так как в формуле (10) параметр $\xi_m = \lambda\, p_{bm} / p_a$, p_{bm} – оптимальное давление вакуумирования в дренажной скважине, p_a – давление воздуха вне вакуумного мешка, λ – величина, обратная интенсивности удаления паровоздушной смеси из пор наполнителя; $h_0^* = \gamma_0 + \omega\gamma_1$, $\gamma_0 = h_s^* \left(1 - \tilde{a}_k \left(1 + \left(\kappa^* - 1 \right) \sigma_k \right) \right)$,

$\gamma_1 = h_s^* \kappa^* \tilde{a}_k \sigma_k$, $h_s^* = h_s / r_b$, h_s – первоначальная (до вакуумирования) толщина слоя контрольного объема, r_b – радиус «дренажной скважины», $\kappa^* = c_p / c_v$, $\tilde{a}_k = a_k / (1 + m_a)$, a_k – экспериментальный коэффициент компрессии, m_a – пористость материала контрольного объема до вакуумирования, $\sigma_k = (\rho_0 / \rho_1)^{\kappa^*} / p_a^*$, ρ_1 – экспериментальный множитель в уравнении состояния паровоздушной смеси, ρ_0 – характерная плотность паровоздушной смеси, $\omega = \rho_1 (p_a^*)^{\kappa} / \rho_0$, $p_a^* = p_a / p_0$ – внешнее давление, $\kappa = 1/\kappa^*$; $m_0 = \delta_0 + \omega\delta_1$, $\delta_0 = m_a - a_k (1 + (\kappa^* - 1))\sigma_k$, $\delta_1 = \kappa^* a_k \sigma_k$, коэффициенты $k_m = \omega\delta_1$, $k_h = \omega\gamma_1$ характеризуют величину внешних нагрузок и деформируемость пористого материала.

Видно, что при принятых допущениях величина ξ_m, характеризующая оптимальные режимы фильтрационного вакуумирования порового пространства сухого пакета семипрегов, зависит, во-первых, от конструкторских параметров семипрегов (начальные значения толщины слоя наполнителя h_0, пористости m_a), во-вторых, от деформируемости паровоздушной среды, материала тканого наполнителя при сжатии, соответственно, значений коэффициентов k_m, k_h.

Подчеркнем, что решение (10) позволяет определить оптимальные режимные параметры p_b либо λ при условии, что все остальные, в первую очередь конструкторские, параметры заданы.

Поиск конкретных оптимальных конструкторских, технологических параметров (внешнего давления p_a) с помощью полученных соотношений (8) – (10) можно осуществить следующим образом. Задается необходимое минимальное время фильтрационного вакуумирования τ_k^*, оцениваются (см. соотношения (8), (9)) величины множителя Θ_k, функции $F = F(\xi_m) = \varphi_m$, после чего устанавливается зависимость

$$\zeta_m = (\varphi_m \tilde{\mu}_0 - \tilde{m}_0) / (\tilde{m}_1 - \varphi_m \tilde{\mu}_1), \tag{11}$$

где $\tilde{m}_0 = \tilde{m}_0(m_0, k_m)$; $\tilde{m}_1 = m_1(m_0, k_m, k_h, k_\mu)$; $\tilde{\mu}_0 = \tilde{\mu}_0(h_0^*, \mu_0^*, k_h, k_\mu)$, $k_\mu = \omega\beta_1 \approx 0$; $\tilde{\mu}_1 = \tilde{\mu}_1(h_0^*, \mu_0^*)$; $\mu_0^* = \beta_0 - \omega\beta_1$. Коэффициенты β_0, β_1 зависят от κ^*, температуры смеси T_0 (см. формулу (2)).

Затем после определенных преобразований приравниваются правые части соотношений (10), (11):

$$f = f(h_0^*, m_0, k_m, k_h); \; g = g(h_0^*, m_0, k_m, k_h).$$

В результате получается уравнение вида

$$G(h_0^*, m_0, k_m, k_h) = 0. \tag{12}$$

Следует иметь в виду, что аргументы функции G зависят от первоначальных значений толщины h_s (значит, и от толщины сухого пакета семипрегов h_0), пористости m_a, внешней нагрузки p_a. Выделяя из этих параметров один (оптимизируемый), задавая остальные, из уравнения (12) определим его величину. Рассчитаем с помощью формулы (10) оптимальные значения параметров ξ_m, режимов вакуумирования p_b либо λ.

При необходимости уточнения полученных решений можно организовать своего рода итерационный процесс, скорректировав оценки множителя Θ_k и функции F с использованием найденных оптимальных параметров.

Таким образом, в результате решения оптимизационной задачи определен в зависимости от устройства пакета, деформационных показателей паровоздушной смеси и материала наполнителя режимный параметр – давление вакуумирования, при котором время фильтрационного вакуумирования оптимально. Кроме того, предложена методика оценки ряда конструкторских параметров сухого пакета семипрегов, величины давления, действующего извне на вакуумный мешок, обеспечивающих заданное время вакуумирования.

Статья подготовлена в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020–2025 гг. при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение от 17.05.2022 № 075-15-2022-1023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тарнопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А.* Пространственно-армированные композиционные материалы: Справочник. М.: Машиностроение, 1987. 224 с.
2. *Каблов Е.Н.* Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. № 1. С. 36–39.
3. *Каблов Е.Н.* Стратегические направления развития материалов и технологий переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7–17.
4. *Константинов Д.Ю. и др.* Влияние способа изготовления преформ на механические характеристики углепластика // Изв. вузов. Авиационная техника. 2021. № 1. С. 104–108.
5. *Салина М.С., Захаров О.Г., Катаев Ю.П.* Нанесение полимерной смолы на поверхность тканей при изготовлении деталей летательных аппаратов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2022. № 1. С. 189–192.
6. *Людоговский П.Л., Наумов А.В., Лунев И.В.* Разработка, изготовление и испытания высокотермостойкого радиопрозрачного композиционного материала // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 4. С. 167–177.
7. *Коваль А.П., Бобарика И.О.* Элементы алгоритма оптимизации технологического процесса вакуумной инфузии при изготовлении крупногабаритных изделий из полимерных композиционных материалов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 1. С. 192–196.
8. *Коваль А.П., Бобарика И.О.* Моделирование системы подачи связующего вещества в процессе вакуумной инфузии композитной панели // Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 3. С. 197–202.
9. *Душин М.И. и др.* Исследование процесса безавтоклавного формования семипрегов на основе углеродных наполнителей (обзор) // Тр. ВИАМ. 2018. № 9 (69). С. 21–31.
10. *Донецкий К.И. и др.* Некоторые особенности применения семипрегов для вакуумного формования ПКМ (обзор) // Тр. ВИАМ. 2017. № 12 (60). С. 81–93.
11. *Хамидуллин О.Л. и др.* Токопроводящие порошковые связующие для получения углекомпозитов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 3. С. 217–224.
12. *Федяев В.Л. и др.* Математическое моделирование вакуумирования сухого технологического пакета семипрегов. I // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 3. С. 150–158.
13. *Федяев В.Л. и др.* Математическое моделирование вакуумирования сухого пакета семипрегов. II // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 4. С. 178–183.
14. *Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г.* Справочник по элементарной физике. М.: Наука, 1974. 256 с.
15. *Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т.* Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие. Л.: Химия, 1982. 592 с.
16. *Маскет М.* Течение однородных жидкостей в пористой среде. М.–Л.: Гостоптехиздат, 1949. 628 с.
17. *Галимов Э.Р. и др.* Синтактические углеродные пены: получение, структура, свойства, применение. Казань: Изд-во АН РТ, 2022. 324 с.

Поступила в редакцию 29.04.25
После доработки 5.05.25
Принята к публикации 5.05.25

Optimization of Vacuumization of a Dry Semipreg Package during Molding the Composite Products

V.L. FEDYAEV[1,2], V.I. KHALIULIN[2], R.SH. GIMADIEV[3], AND N.V. LEVSHONKOV[2]

[1] IME – Subdivision of FRC KazSC RAS, Kazan
[2] Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan
[3] Kazan State Power Engineering University, Kazan

The stage of vacuumization of a dry semipreg package during the formation of composite products is considered. It is assumed that the viscosity of the air-vapor mixture in the pore space of the package, its porosity, permeability, and thickness depend on the density of this mixture. The corresponding relationships are given, the optimization problem is formulated, where the time of filtration vacuumization of a semipreg package acts as an optimality criterion. As a result of its solution, the value of the parameter characterizing the intensity of bleeding the air-vapor mixture, at which the vacuumization time would be minimal, is found.

Polymer composite materials, vacuum molding technology, optimization of vacuumization of the dry semipreg package