

Научная статья
УДК 678.8

ОСОБЕННОСТИ ПРОПИТКИ СЕМИПРЕГОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Владимир Леонидович Федяев¹, Валентин Илдарович Халиулин² ✉, Игорь Николаевич Сидоров³,
Равиль Шамсутдинович Гимадиев⁴

¹ Институт механики и машиностроения Федерального исследовательского центра
«Казанский научный центр Российской академии наук» (ИММ ФИЦ КазНЦ РАН),
Казань, Республика Татарстан, Россия

^{2, 3} Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
Казань, Республика Татарстан, Россия

⁴ Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ),
Казань, Республика Татарстан, Россия

¹ vlfed2020@gmail.com

² pla.kai@mail.ru ✉

³ insidorov1955@mail.ru

⁴ gimadiev@mail.ru

Аннотация. Рассматривается процесс пропитки расплавом полимерного связующего тканого наполнителя пакета семипрегов при вакуумном формовании композитных изделий авиационной техники. Выделяются две стадии этого процесса: фильтрация и капиллярная пропитка. Осуществляется математическое моделирование фильтрационной пропитки в сверхкапиллярных порах слоев наполнителя под действием перепада давления и сил тяжести с учетом демпфирования каркаса наполнителя. Получены соотношения для оценки скорости фильтрации расплава, времени фильтрационной пропитки. Установлено влияние на это время давления внешней среды, паровоздушной смеси в крупных порах наполнителя, а также плотности, вязкости, проницаемости наполнителя, его пористости.

Ключевые слова: тканые композитные материалы, метод вакуумного формования, семипреги, расплав полимерного связующего, математическое моделирование фильтрационной пропитки

Для цитирования: Федяев В.Л., Халиулин В.И., Сидоров И.Н., Гимадиев Р.Ш. Особенности пропитки семипрегов в производстве авиационных конструкций // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 3. С. 69–77.

Original article

ASPECTS OF SEMIPREGS IMPREGNATION IN AIRCRAFT PARTS PRODUCTION

Vladimir L. Fedyayev¹, Valentin I. Khaliulin²✉, Igor' N. Sidorov³, Ravil' Sh. Gimadiev⁴

¹ Institute of Mechanics and Engineering - Subdivision of the Federal State Budgetary Institution of Science "Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences" (IME - Subdivision of FIC KazanSC of RAS), Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

^{2,3} Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

⁴ Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

¹ vlfed2020@gmail.com

² pla.kai@mail.ru ✉

³ insidorov1955@mail.ru

⁴ gimadiev@mail.ru

Abstract

The authors consider the issues of obtaining composite materials, widely applied in aircraft building, by the vacuum molding method. Special attention is paid to the stage of semi-preg stack impregnation by the polymer binding material melt. The processes of filtration impregnation and capillary impregnation are being distinguished while its realization process. On the assumption that the semi-preg stack is being horizontally set, mathematical modeling of the reinforcing fabric filler filtration impregnation under the impact of pressure difference in the vertical direction and gravity with account for the filler carcass damping is being performed. Provided that the reinforcement material does not swell or shrink, and discontinuity deficiency, the super capillary pores filling by the binding melt is quite rapid, and the upper, intermediate and lower semi-pregs are being distinguished. It is assumed in its turn that while the binding melt flowing in the vapor space of the filler it represents an uncompressing viscous uniform liquid, which viscosity and density do not change while the filtration process, and the melt flow is laminar and isothermal. As the result of the generalized Darcy filtration law integrating, an expression for the filtration speed of the melt in the filler layer and its full impregnation time were obtained. The article demonstrates that the time of the filtration impregnation can be reduced, and the productivity at this stage of production can be correspondingly increased. It can be achieved in the first place by the pressure drop increasing at the filler layer thickness, additional loading action on the semi-pregs stack surface and the melt viscosity reduction due to both temperature and density increase, as well as super-capillary porosity enhancing of the filler. The set regularities represent the possibility of rational technological modes selection for woven composite materials obtaining by the vacuum molding method.

Keywords: woven composite materials, vacuum forming method, semi-pregs, polymer binder melt, mathematical modeling of filtration impregnation

For citation: Fedyayev V.L., Khaliulin V.I., Sidorov I.N., Gimadiev R.Sh. Aspects of Semipregs Impregnation in Aircraft Parts Production. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 3, pp. 69–77.



Введение

Современные летательные аппараты содержат большое количество деталей и узлов из композитов. Они различаются формой, габаритами, функциональным назначением, требованиями к эксплуатации, уровнем нагружения и т. д. Это обстоятельство предопределяет применение широкого спектра технологических схем для их изготовления.

Все многообразие приемов переработки композитов в изделия можно условно разделить на две большие группы: препреговые технологии и методы с использованием пропитки сухого армирующего пакета.

В первом случае в качестве полуфабриката используется пропитанный связующим армирующий материал – препрег [1–4]. Для обеспечения заданных режимов формования применяется большая номенклатура методов, описанных в литературе [5–8].

Наиболее известными схемами формования с использованием пропитки являются: инфузия (Infusion) [9], пропитка под давлением (RTM) [10], совмещение слоев преформы с пленочным связующим (RFI) [11–12]. Комбинация и модификация этих схем послужили основанием для создания еще более двух десятков методов, основанных на трансфере связующего [13–14].

В производстве композитных конструкций, в зависимости от принятого метода формования, возможен существенный разброс механических характеристик изделия (при тех же исходных материалах). В то же время основное требование в авиастроении – это высокое весовое совершенство конструкции. Среди множества факторов ключевыми для качества композита являются высокий коэффициент наполнения арматурой и низкая пористость [15]. Немаловажны также экономические показатели. В связи с этим поиск и освоение новых методов совмещения композитов и формования безусловно актуальны.

Относительно недавно появился метод формования, основанный на использовании семипрегов [6–24].

Семипреги – полуфабрикаты в виде армирующей ткани, частично совмещенной по толщине со связующим пленочного типа. Таким образом, в технологическом пакете из семипрегов остаются газопроницаемые полости на поверхности непританной ткани. Это дает возможность удалить из технологического пакета газовые включения вакуумированием – создаются условия для снижения образования пор.

Можно прогнозировать, что применение схемы с семипрегами позволит достичь качественных па-

раметров, соизмеримых с теми, которые достигаются при автоклавном формовании. Экономические показатели при этом будут выше [25].

Пропитка пакета семипрегов, обеспечивающая низкую пористость и высокий коэффициент наполнения, является сложной технической задачей. Основные стадии этого метода: подготовительные операции, придание формы пакету семипрегов, вакуумирование сухого технологического пакета семипрегов, нагрев, пропитка наполнителя, отверждение связующего, охлаждение изделия.

Каждая из названных стадий, безусловно, оказывает влияние на качество получаемых изделий, их эксплуатационные показатели, причем, по нашему мнению, в большей степени – стадия вакуумирования сухого технологического пакета и пропитки слоев наполнителя расплавом связующего материала. В настоящей статье акцентируется внимание на последней из них. Проводится математическое моделирование пропитки слоев тканого материала наполнителя расплавом полимерного связующего с целью установления рациональных технологических режимов.

Пропитка тканого армирующего наполнителя расплавом полимерного связующего

После вакуумирования сухой технологический пакет семипрегов помещается в термошкаф, где нагревается, полимерный материал связующего плавится в течение некоторого времени $\tau = (\tau_{н0} \div \tau_{н})$, после чего начинается пропитка наполнителя.

Предположим, что общее количество слоев семипрегов N , на плоской поверхности оснастки они располагаются друг на друге горизонтально, ориентировочная толщина слоев наполнителя h_a , толщина слоев расплава полимера h_f .

Выделим в пакете контрольный объем с единичными продольными размерами. Схематично его можно представить так, как показано на рис. 1,а. Здесь y, z – продольная, поперечная координаты; h_{c0} – общая толщина пакета, заключенного между поверхностью оснастки S_0 и «жертвенной» ткани S_h ; \vec{g} – вектор ускорения свободного падения (направление действия гравитационной силы).

В свою очередь, в контрольном объеме пористого наполнителя, следуя общепринятой классификации, будем различать сверхкапиллярные поры с просветом 0.1 мм и более; капиллярные поры (характерный поперечный размер $0.0002 \div 0.1$ мм); субкапиллярные поры с просветом менее 0,0002 мм. Соответственно, движение расплава (жидкости) в сверхкапиллярных порах происходит согласно законам фильтрации под действием сил тяжести, перепада давления. В капиллярах, содержащих по своей длине жидкость и контактирующую с ней га-

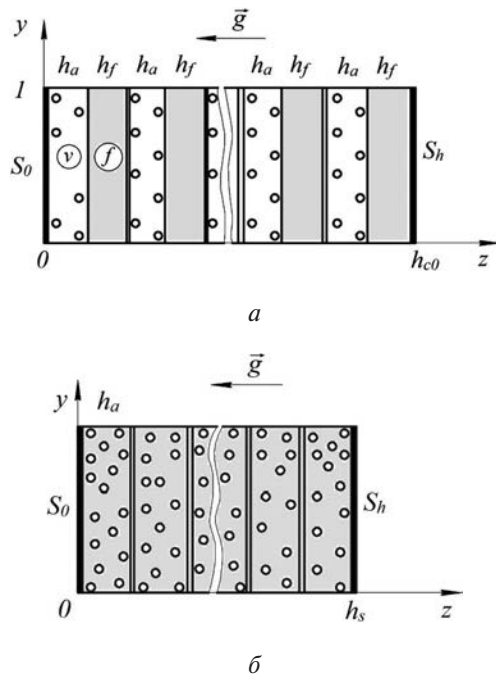


Рис. 1. Структура материала:
 а – технологического пакета в начале пропитки;
 б – пакета к концу пропитки;
 v – слой наполнителя толщиной h_a ; индекс f означает слой расплава полимерного связующего толщиной h_f ; h_{c0} , h_s – общая толщина пакета в начале ($\tau = \tau_n$) и конце пропитки ($\tau = \tau_s$)

зовую (паровоздушную) среду, жидкость движется вследствие действия молекулярных поверхностных сил (поверхностного натяжения) безотносительно к ориентации капилляров в пространстве. Субкапиллярные поры практически не пропускают жидкость, поэтому в них ее либо нет, либо она прочно связана со стенками пор и не движется.

Полагая, что в данном контрольном объеме наполнителя в принципе возможны все названные типы пор, общую пористость m_0 представим в виде

$$m_0 = m_{0f} + m_{0c} + m_{0s},$$

где величины m_{0f} , m_{0c} , m_{0s} характеризуют долю сверхкапиллярных, капиллярных и субкапиллярных пор соответственно в контрольном объеме. Последние можно интерпретировать как закрытые поры, из рассмотрения их следует исключить. Далее будем считать, что первоначально (к моменту завершения расплавления связующего материала) в оставшихся порах находится сильно разреженная паровоздушная среда плотностью $\rho_B \approx 0$ с давлением $p_B \approx 0$.

Таким образом, в ходе пропитки расплав, будучи несжимаемой вязкой жидкостью с плотностью ρ_f , вязкостью μ_f , движется в слоях, отмеченных на рис. 1,а буквой f , фильтруется в занятых угле-

родным наполнителем пористых слоях v , протекая по сверхкапиллярным порам в вертикальном направлении (вдоль оси z). Кроме того, в слое армирующего наполнителя v вследствие капиллярности расплав распространяется по всем направлениям, заполняя капилляры, т. е. практически реализуется принцип суперпозиции разномасштабных течений. Одномерность «свободного» течения в слое f , фильтрации жидкости в слое v обусловлены тем, что в окружающих областях условия движения жидкости схожи с условиями в контрольном объеме. Очевидно, что к моменту окончания пропитки τ_s толщина пакета уменьшится до h_s (см. рис. 1,б). При относительно полном заполнении пустот в наполнителе толщина пакета

$$h_s = Nh_a (1 + h_f / h_a - m_{0f} - m_{0c}).$$

Если весь объем расплава проникнет в полости наполнителя, то $h_f = (m_{0f} + m_{0c})h_a$, $h_s = Nh_a$. При этом расплава между слоями наполнителя не должно быть, однако велика опасность появления так называемых сухих участков.

Итак, во время пропитки $\tau = (\tau_n \div \tau_s)$ толщина пакета $h_{c0} = h_{c0}(\tau)$, слоя расплава $h_f = h_f(\tau)$ меняется, т. е. зависит от времени. Для количественного анализа этих и других показателей пропитки примем дополнительные допущения. Предположим, что при пропитке материал наполнителя не набухает, не сжимается, $h_a = \text{const}$; в контрольном объеме пакета не происходит разрыва «сплошности», т. е. смещающиеся слои наполнителя вдоль нижней поверхности соприкасаются с находящимися ниже слоями расплава. В силу малой толщины слоев наполнителя, разрежения в незанятых расплавом сверхкапиллярных порах, заполнение их расплавом (фильтрационная стадия) происходит достаточно быстро, практически во всех слоях наполнителя в течение одного и того же времени τ_f . Соответственно, по окончании его начинается следующая капиллярная стадия пропитки наполнителя, когда расплав полимерного связующего в течение времени τ_c проникает в капилляры. Динамика этого процесса сложная, так как скорость движения расплава в капиллярах зависит от многих параметров, да и геометрия каналов весьма разнообразна. Ряд закономерностей капиллярной пропитки рассматривается далее.

Математическое моделирование фильтрации расплава (фильтрационная пропитка)

Обратимся вновь к контрольному объему (рис. 1,а), выделенному в материале рассматриваемого пакета. Примем во внимание то, что на расплав, находящийся в нем, действуют массо-

вые гравитационные силы (силы тяжести), а со стороны поверхности S_h – давление печных газов p_d , пребывающих в рабочем пространстве термощафа (возможно $p_d \approx p_a$, где p_a – атмосферное давление), а также дополнительное давление p_w . Суммарное давление

$$p_{s0} = p_d + p_w.$$

Далее, предполагая, что по высоте контрольного объема нагрузки процессы фильтрации расплава могут несколько различаться, выделим верхний приграничный семипрег, контактирующий с поверхностью S_h , состоящий из слоя расплава и наполнителя, внутренние семипрега, тоже содержащие слой расплава, наполнителя, и, наконец, нижний семипрег из таких же слоев, в котором наполнитель располагается на поверхности оснastки S_0 .

Перед началом фильтрации расплава, рассматривая верхний приграничный семипрег, учитывая, что расплав несжимаем, оценим нагрузку, действующую на каркас наполнителя:

$$p_s^{(1)} = \frac{p_{s0} + g\rho_f h_f}{1 - m_{0f}},$$

где $g\rho_f h_f$ – гидростатическое давление, обусловленное весом слоя расплава толщиной .

В результате демпфирования (уменьшения нагрузки на величину Δp_s), давление на нижней поверхности слоя наполнителя этого семипрега

$$p_s^{(2)} = p_s^{(1)} - \Delta p_s.$$

Соответственно, давление на поверхности слоя расплава следующего семипрега

$$p_{s1} = (1 - m_{0f}) p_s^{(2)} = p_{s0} + g\rho_f h_f - (1 - m_{0f}) \Delta p_s,$$

n -го семипрега

$$p_{s(m-1)} = p_{s0} + (n - 1) \times [g\rho_f h_f - (1 - m_{0f}) \Delta p_s]. \quad (1)$$

Здесь $n = 1$ – приграничный, 2 – следующий семипрег; $n = N$ – семипрег на поверхности оснastки S_0 .

Из формулы (1) видно, что первоначальная нагрузка p_{s0} , действующая на поверхность пакета семипрегов, с одной стороны увеличивается на $(n - 1)g\rho_f h_f$ за счет веса слоев расплава, с другой уменьшается на $(n - 1)(1 - m_{0f})\Delta p_s$ вследствие демпфирования каркаса наполнителя. Кроме того, поскольку начальное давление расплава на поверхности соответствующих слоев разное, при одинаковых проницаемости, противодавлении p_b в крупных порах слоев наполнителя, скорость фильтрации в

них, возможно, будет разной.

Для оценки этой скорости рассмотрим элемент сухого пористого наполнителя, на верхней поверхности которого находится в начальный момент времени $\tau = \tau_n$ слой расплава толщиной h_f . Пропитка этим расплавом наполнителя на глубину $s_a(\tau)$ схематично показана на рис. 2. Здесь p_l – давление, действующее на опускающуюся верхнюю поверхность слоя расплава, удаленную от верхней поверхности наполнителя на расстояние $s_f(\tau)$, p_b – давление разрежения в порах сухой части наполнителя.

Далее обратимся непосредственно к фильтрации расплава связующего в наполнителе при пропитке. Предварительно примем, что наполнитель – недеформируемая пористая среда с достаточно равномерным распределением сверхкапиллярных пор по объему. Расплав – несжимаемая вязкая однородная жидкость, плотность, вязкость которой в процессе фильтрации не меняются ($\rho_f = \text{const}$, $\mu_f = \text{const}$); течение расплава в каналах наполнителя ламинарное (числа Рейнольдса малы), изотермичное.

Поскольку при пропитке скорость фильтрации v_z расплава в слое толщиной $h_a(\tau)$ направлена против оси z (вниз), она будет отрицательной. Согласно обобщенному закону Дарси, учитывающему действие на расплав силы тяжести, скорость фильтрации определяется соотношением

$$v_s = -\frac{k_f}{\mu_f} \left(\frac{dp}{dz} + \rho_f g \right), \quad (2)$$

где k_f – проницаемость пористого наполнителя в направлении оси z , первоначальную оценку ее можно получить с помощью формулы Козени [26].

Несмотря на то, что рассматриваемый процесс фильтрации носит динамический характер, в (2) инерционный член вида $\rho_f Dv_z/D\tau$ отсутствует, что означает пренебрежение силами инерции. Основ-

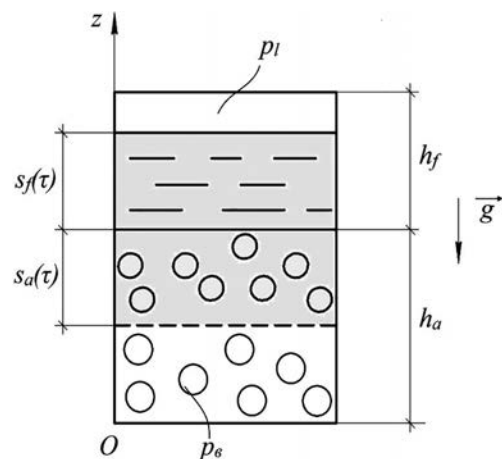


Рис. 2. Расчетная схема пропитки расплавом слоя наполнителя толщиной h_a

нием является то, что благодаря большой площади стенок каналов, их сложной форме, а также сравнительно малой скорости течения расплава силы сопротивления могут значительно превосходить силы инерции.

В дополнение к соотношению (2) запишем закон сохранения массы (аналог уравнения неразрывности):

$$s_f(\tau)\rho_f + m_0s_a(\tau)\rho_f = h_f\rho_f$$

или

$$s_f(\tau) + m_{0f}s_a(\tau) = h_f \quad (h_f = \text{const}).$$

Следовательно, скорости смещения границы слоя расплава $v_{zf} = ds_f(\tau)/d\tau$ и фронта фильтрующегося расплава $v_{za} = ds_a(\tau)/d\tau$ связаны соотношением

$$v_{zf} = -m_{0f}v_{sa}.$$

Граничные условия (начало оси координат располагается на верхней поверхности слоя наполнителя):

- при $z = 0$ давление $p = p_l$ (давление на верхней поверхности расплава, в жидкости оно не меняется);
- при $z = -s_a(\tau)$ давление $p = p_b$.

Общее решение уравнения (2) относительно текущего давления p в области пропитки:

$$p = p(z) = C - g\rho_f z - \frac{\mu_f}{k_f} \int v(z) dz,$$

где C – константа интегрирования, $-s_a \leq z \leq 0$.

Обозначая первообразную функции $v_z(z)$ через

$$V_z(z) = \int v_z(z) dz,$$

из приведенных граничных условий найдем:

$$C = p_l + \frac{\mu_f}{k_f} V_z(0);$$

$$V_z = V_z(z) = V_{z0} + \frac{k_f}{\mu_f} (\Delta p - g\rho_f z).$$

Здесь $V_{z0} = V_z(z = 0)$; $\Delta p = p_l - p_b$ – перепад давления.

Предполагая далее, что градиент давления в (2) $dp/dz \approx \Delta p/h_a$, получим оценку скорости фильтрации расплава в слое наполнителя:

$$v_z = -(q_f + M_f), \quad (3)$$

где $q_f = k_f \Delta p / (\mu_f h_a)$; $M_f = gk_f \rho_f / \mu_f$, первый параметр характеризует влияние на скорость фильтрации перепада давления, второй – сил тяжести; знак минус означает, что скорость фильтрации направлена против направления оси z .

Примечательно, что в рамках принятых допущений скорость фильтрации – постоянная величина.

Отсюда, если скорость фронта фильтрующегося расплава $v_{za} \approx v_z$ (под v_z здесь понимается положительное значение скорости фильтрации (3)), то расстояние

$$s_f = s_f(\tau) = h_f - m_{0f}v_z(\tau - \tau_n);$$

$$s_a = s_a(\tau) = v_z(\tau - \tau_n);$$

время полной фильтрационной пропитки наполнителя

$$\tau_f = \tau_n + \frac{h_a}{v_z}; \quad (4)$$

толщина оставшегося на поверхности наполнителя слоя расплава

$$s_f = s_f(\tau = \tau_f) = h_f - m_{0f}h_a.$$

Подчеркнем, что именно за счет этого расплава должно быть обеспечено полное заполнение капиллярных пор в армирующем материале.

Вместе с тем, согласно (4), время фильтрационной пропитки τ_f можно уменьшить (повысить производительность этого процесса) следующим образом:

- увеличив перепад давления Δp ;
- уменьшив вязкость расплава μ_f , например подняв его температуру;
- увеличив плотность расплава, выбрав, в частности, более тяжелый материал связующего полимера;
- увеличив проницаемость наполнителя k_f , т. е. видоизменив его структуру за счет повышения пористости m_{0f} .

Качественно названные способы вполне очевидны, однако полученные соотношения позволяют оценить количественно их эффективность. Так, в зависимости от вязкости расплава, время τ_f уменьшается пропорционально μ_f ; изменение плотности ρ_f практически не влияет на τ_f , поскольку величина ρ_f входит еще и в выражение для k_f . Наиболее эффективным из перечисленных является, пожалуй, последний способ, когда увеличивается пористость наполнителя m_{0f} , так как в этом случае время фильтрационной пропитки уменьшается приблизительно в $m_{0f}^3 (1 + m_a^2)$.

Необходимо иметь в виду, что к окончанию фильтрационной пропитки первоначальная толщина пакета семипрегов $h_{c0} = N(h_a + h_f)$ уменьшится при неизменной толщине h_a слоев наполнителя до величины

$$h_{cf} = N(h_a + s_f) = h_{c0} - m_{0f}h_{a0}$$

($h_{a0} = Nh_a$ – суммарная толщина слоев наполнителя). При этом, по нашему мнению, в принципе уменьшение толщины h_a возможно, в первую оче-

редь, за счет взаимного смещения нитей (микроволокон), деформирования их под действием сжимающих нагрузок, рассмотренных выше. Свойства текстильных композиций, нитей представлены в [27].

Отметим также, что влияние поперечной нагрузки p_w , действующей на расположенный на цилиндрической жесткой оправке слой заготовки в случае стеклопластика, с учетом упругих деформаций его, на скорость движения связующего материала в пористой среде, уменьшение толщины прослойки связующего в ходе пропитки, время пропитки на оправке при применении метода намотки формирования изделий оцениваются в работе [28].

Кроме того, следует иметь в виду, что альтернативным данному подходу к изучению фильтрационной пропитки является метод, когда продвижение расплава в порах среды представляется как его диффузия [29–30]. При этом используются соответствующие математические модели, записываются краевые задачи.

Выводы

Разработана математическая модель фильтрационной стадии пропитки полимерным связующим армирующего тканого наполнителя пакета препрегов с использованием определенных допущений. Она включает связующие параметры фильтрации, описывает механизмы процесса пропитки, раскрывает его закономерности, позволяет сформулировать рекомендации по выбору параметров для достижения заданной производительности. Следует отметить, что в авиастроении имеет место тренд замены многодетальных конструкций интегральными, т. е. объединения множества структурных элементов в единое целое без соединительных швов. Такой подход усложняет архитектуру узлов и агрегатов и, соответственно, технологию их производства. В данном случае получаемая математическая модель может быть использована для выбора оптимальной схемы и режимов изготовления и достижения высокого качества композитного изделия сложной конфигурации.

Список источников

1. *Arafath A.R.A., Fernlund G., Poursartip A.* Gas transport in prepregs: Model and permeability experiments // 17th International Conference on Composite Materials (27–31 July 2009; Edinburgh, UK).
2. *Centea T., Hubert P.* Measuring the impregnation of an out-of-autoclave prepreg by micro-CT // *Composites Science and Technology*. 2011. Vol. 71. No. 5, pp. 593–599. DOI: 10.1016/j.compscitech.2010.12.009

3. *Furukawa Y., Furuta T., Chiba T.* et al. Semipreg, prepreg, resin composite materials, and production methods thereof. Patent US 2020/0148846 A1, 14.03.2020.
4. *Cender T., Simacek P., Advani S.G.* Resin film impregnation in fabric prepregs with dual length scale permeability // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2013. Vol. 53, pp. 118–128. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.05.013
5. *Джоган О.М., Костенко О.П.* Методы изготовления деталей из композиционных материалов пропиткой в оснастке. Часть 2. Методы вакуумной пропитки // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. 2012. № 1. С. 80–92.
6. *Джоган О.М., Костенко О.П.* Методы изготовления деталей из композиционных материалов пропиткой в оснастке. Часть 1. Методы пропитки под давлением // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. 2011. № 4. С. 111–125.
7. *Белов О.А., Бердникова Н.А., Бабкин А.В.* и др. Композитная формообразующая оснастка // *Вестник Московского авиационного института*. 2017. Т. 24. № 2. С. 115–122.
8. *Воробей В.В., Логинов В.Е.* Современный подход к разработке конструкций из композиционных материалов // *Вестник Московского авиационного института*. 2002. Т. 9. № 1. С. 66–72.
9. *Душин М.И., Чурсова Л.В., Хрульков А.В., Коган Д.И.* Особенности изготовления полимерных композиционных материалов методом вакуумной инфузии // *Вопросы материаловедения*. 2013. № 3(75). С. 33–40.
10. *Бодунов Н.М., Халиулин В.И., Сидоров И.Н., Костин В.А.* К вопросу о моделировании процесса пропитки преформы при трансферном формовании композитных изделий // *Вестник Московского авиационного института*. 2020. Т. 27. № 1. С. 233–245. DOI: 10.34759/vst-2020-1-233-245
11. *Bernardon E., Foley M.F.* Disposable self contained cartridge or resin transfer molding and resin transfer molding method. Patent US 5322665 A, 21.02.1994.
12. *Palmer R.J., Moore W.E.* Resin impregnation process for producing a resin-fiber composite. Patent US 5281388 A, 25.01.1994.
13. *Hindersmann A.* Confusion about infusion: An overview of infusion processes // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019. Vol. 126. No. 6 :105583. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105583
14. *Caldwell J.D.* Mandrel-assisted resin transfer molding process employing resin outflow perimeter channel between male and female mold elements. Patent US 6929770 B2, 16.08.2005.
15. *Алифанов О.М., Черепанов В.В.* Идентификация физических свойств высокопористых волокнистых материалов методом статистического моделирования // *Вестник Московского авиационного института*. 2008. Т. 15. № 5. С. 109–117.
16. *Tanaka T., Nakamura T., Hiraishi Y.* et al. Resin integrated fiber sheet for vacuum forming, and formed body production method using same. Patent WO/2021/095626, 16.07.2021.

17. Dang C., Bernetich K., Carter E., Butler G. Mechanical comparison of out-of-autoclave prepreg part to conventional autoclave prepreg part // 67th Annual Forum of the American Helicopter Society (3-5 May 2011; Virginia Beach, VA). Vol. 3, pp. 1900-1910.
18. Préau M. Defect management in vacuum bag only semipreg processing of co-bonded composite repairs. A thesis submitted to McGill University in partial fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy. – Montréal, Québec, Canada, 2016. – 226 p.
19. Louis B.M. Gas transport in out-of-autoclave prepreg laminates. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree of Master of Applied Science. 2010. – 143 p. DOI: 10.14288/1.0071143
20. Centea T., Hubert P. Modelling the effect of material properties and process parameters on tow impregnation in out-of-autoclave prepreps // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2012. Vol. 43. No. 9, pp. 1505-1513. DOI: 10.1016/j.compositesa.2012.03.028
21. Thorfinnson B., Biermann T.F. Production of void free composite parts without debulking // International SAMPE Symposium and Exhibition. 1986. Vol. 31, pp. 480-490.
22. Zeinstra M., ten Thije R.H.W., Warnet L. Low velocity impact on a single-ply aramid semipreg // International Journal of Material Forming. 2009. Vol. 2. Suppl 1, pp. 193-196. DOI: 10.1007/s12289-009-0653-z
23. Душин М.И., Донецкий К.И., Тимошков П.Н., Караваев Р.Ю. Исследование процесса безавтоклавного формования семипрегов на основе углеродных наполнителей (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 9(69). С. 21–31.
24. Донецкий К.И., Душин М.И., Мищун М.И., Севастьянов Д.В. Некоторые особенности применения семипрегов для вакуумного формования ПКМ (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. №12(60). С. 81–93.
25. Ekause O.A., Anjum N., Eze V.O., Okoli O.I. A Review on the Out-of-Autoclave Process for Composite Manufacturing // Composite Science. 2022. Vol. 6. No. 6: 172. DOI: 10.3390/jcs6060172
26. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде / пер. М.А. Геймана. – М.–Л.: Гостоптехиздат, 1949. – 628 с.
27. Скардино Ф., Хирл Дж., Кавабата С. и др. Тканые конструкционные композиты / Под ред. Т.-В. Чу, Ф. Ко; Пер. с англ. Н.П. Жмудя, В.Л. Кулакова под ред. Ю.М. Тарнопольского. – М.: Мир, 1991. – 430 с.
28. Калинин В.А., Макаров М.С. Намотанные стеклопластики. – М.: Химия, 1986. – 268 с.
29. Аксельруд Г.А., Лысянский В.М. Экстрагирование: система твердое тело – жидкость. – Л.: Химия, 1974. – 256 с.
30. Таганов И.П. Моделирование процессов массо- и энергопереноса. Нелинейные системы. – Л.: Химия, 1979. – 208 с.

References

1. Arafath A.R.A., Fernlund G., Poursartip A. Gas transport in prepreps: Model and permeability experiments. *17th International Conference on Composite Materials (27-31 July 2009; Edinburgh, UK)*.
2. Centea T., Hubert P. Measuring the impregnation of an out-of-autoclave prepreg by micro-CT. *Composites Science and Technology*, 2011, vol. 71, no. 5, pp. 593-599. DOI: 10.1016/j.compscitech.2010.12.009
3. Furukawa Y., Furuta T., Chiba T. et al. Semipreg, prepreg, resin composite materials, and production methods thereof. *Patent US 2020/0148846 A1*, 14.03.2020
4. Cender T., Simacek P., Advani S.G. Resin film impregnation in fabric prepreps with dual length scale permeability. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, vol. 53, pp. 118-128. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.05.013
5. Dzhogan O.M., Kostenko O.P. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruktivnykh letatel'nykh apparatov*, 2012, no. 1, pp. 80-92.
6. Dzhogan O.M., Kostenko O.P. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruktivnykh letatel'nykh apparatov*, 2011, no. 4, pp. 111-125.
7. Belov O.A., Berdnikova N.A., Babkin A.V. et al. Composite shape-generating tool set for spacecraft antennae reflector manufacturing. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 115-122.
8. Vorobey V.V., Loginov V.E. A modern approach to composite material structures design. *Aerospace MAI Journal*, 2002, vol. 9, no. 1, pp. 66-72.
9. Dushin M.I., Chursova L.V., Khrul'kov A.V., Kogan D.I. *Voprosy materialovedeniya*, 2013, no. 3(75), pp. 33-40.
10. Bodunov N.M., Khaliulin V.I., Sidorov I.N., Kostin V.A. On preform impregnation process simulation while transfer molding of composite products. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 1, pp. 233-245. DOI: 10.34759/vst-2020-1-233-245
11. Bernardon E., Foley M.F. Disposable self contained cartridge or resin transfer molding and resin transfer molding method. *Patent US 5322665 A*, 21.02.1994.
12. Palmer R.J., Moore W.E. Resin impregnation process for producing a resin-fiber composite. *Patent US 5281388 A*, 25.01.1994.
13. Hindersmann A. Confusion about infusion: An overview of infusion processes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 126, no. 6 :105583. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105583
14. Caldwell J.D. Mandrel-assisted resin transfer molding process employing resin outflow perimeter channel between male and female mold elements. *Patent US 6929770 B2*, 16.08.2005.
15. Alifanov O.M., Cherepanov V.V. Identification of physical properties for highly porous fibrous material by means of statistical modeling techniques. *Aerospace MAI Journal*, 2008, vol. 15, no. 5, pp. 109-117.

16. Tanaka T., Nakamura T., Hiraishi Y. et al. Resin integrated fiber sheet for vacuum forming, and formed body production method using same. *Patent WO/2021/095626*, 16.07.2021.
17. Dang C., Bernetich K., Carter E., Butler G. Mechanical comparison of out-of-autoclave prepreg part to conventional autoclave prepreg part. *67th Annual Forum of the American Helicopter Society (3-5 May 2011; Virginia Beach, VA)*. Vol. 3, pp. 1900-1910.
18. Préau M. *Defect management in vacuum bag only semipreg processing of co-bonded composite repairs*. A thesis submitted to McGill University in partial fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Montréal, Québec, Canada, 2016, 226 p.
19. Louis B.M. *Gas transport in out-of-autoclave prepreg laminates*. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree of Master of Applied Science. 2010, 143 p. DOI: 10.14288/1.0071143
20. Centea T., Hubert P. Modelling the effect of material properties and process parameters on tow impregnation in out-of-autoclave prepregs. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, vol. 43, no. 9, pp. 1505-1513. DOI: 10.1016/j.compositesa.2012.03.028
21. Thorfinnson B., Biermann T.F. Production of void free composite parts without debulking. *International SAMPE Symposium and Exhibition*, 1986, vol. 31, pp. 480-490
22. Zeinstra M., ten Thije R.H.W., Warnet L. Low velocity impact on a single-ply aramid semipreg. *International Journal of Material Forming*, 2009, vol. 2, suppl 1, pp. 193-196. DOI: 10.1007/s12289-009-0653-z
23. Dushin M.I., Donetskii K.I., Timoshkov P.N., Karavaev R.Yu. *Trudy VIAM*, 2018, no. 9(69), pp. 21-31.
24. Dushin M.I., Donetskii K.I., Timoshkov P.N., Karavaev R.Yu. *Trudy VIAM. Polimernye materialy*, 2018, no. 9(69), pp. 21-31. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-21-31
25. Ekaue O.A., Anjum N., Eze V.O., Okoli O.I. A Review on the Out-of-Autoclave Process for Composite Manufacturing. *Composite Science*, 2022, vol. 6, no. 6: 172. DOI: 10.3390/jcs6060172
26. Muskat M. *The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media*. Michigan, I.W.Edwards & Arbor, 1946, 792 p.
27. Skardino F., Khirl Dz., Kavabata S. et al. *Tkanye konstruktsionnye kompozity (Woven structural kompozity)*, Moscow, Mir, 1991, 430 p.
28. Kalinchev V.A., Makarov M.S. *Namotannye stekloplastiki (Wound fiberglass)*, Moscow, Khimiya, 1986, 268 p.
29. Aksel'rud G.A., Lysyanskii V.M. *Ekstragirovanie: sistema tverdoe telo – zhidkost' (Extraction: solid–liquid system)*, Leningrad, Khimiya, 1974, 256 p.
30. Taganov I.P. *Modelirovanie protsessov masso- i energoperenosa. Nelineinye sistemy (Modeling of mass and energy transfer processes. Nonlinear systems)*, Leningrad, Khimiya, 1979, 208 p.

Статья поступила в редакцию 24.08.2023; одобрена после рецензирования 12.09.2023; принята к публикации 14.09.2023.

The article was submitted on 24.08.2023; approved after reviewing on 12.09.2023; accepted for publication on 14.09.2023.