

Научная статья

УДК 678.8

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177608>

КАПИЛЛЯРНАЯ ПРОПИТКА ПАКЕТА СЕМИПРЕГОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Владимир Леонидович Федяев¹, Валентин Илдарович Халиулин² ✉, Игорь Николаевич Сидоров³,
Юрий Павлович Катаев⁴

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

Казань, Республика Татарстан,

^{2, 3, 4} Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Республика Татарстан, Россия

¹ vlfed2020@gmail.com

² pla.kai@mail.ru ✉

³ insidorov1955@mail.ru

⁴ YuPKataev@kai.ru

Аннотация. Разработаны математические модели капиллярной пропитки связующим тканого наполнителя пакета семипрегов. Технологическая схема на основе семипрегов и вакуумного формования имеет большой потенциал применения при изготовлении перспективных конструкций ракетной и авиационной техники. Исследование процессов капиллярной пропитки в дополнение к фильтрации делает картину совмещения армирующего материала со связующим более полной. В перспективе это дает возможность вакуумным формованием получить характеристики пористости в композите, сопоставимые с получаемыми автоклавным методом. Открывается возможность с меньшими затратами и циклом производства изготавливать крупногабаритные элементы летательных аппаратов. При построении модели капиллярной пропитки предполагается, что волокна армирующего наполнителя состоят из пучка монолитных моноволокон, в качестве основного выделено продольное движение связующего в трубках капилляров и поперечное – в капиллярных щелях. После принятия ряда упрощений получены соотношения для расчета времени заполнения капилляров связующим, зависящего от их длины, радиуса, поверхностного натяжения, вязкости связующего и других факторов. Показано, что закономерности, наблюдаемые при перемещении связующего в трубчатых капиллярах, в общем случае имеют место и при его движении в щелевых капиллярах. В результате анализа полученных данных предложены способы интенсификации пропитки пористых материалов.

Ключевые слова: композиционные материалы, семипреги, вакуумное формование, капиллярная пропитка, пористость, проницаемость, моделирование пропитки семипрегов, расчет времени пропитки

Для цитирования: Федяев В.Л., Халиулин В.И., Сидоров И.Н., Катаев Ю.П. Капиллярная пропитка пакета семипрегов при изготовлении композитных элементов летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 4. С. 68–78. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177608>

Original article

CAPILLARY IMPREGNATION OF A SEMIPREG STACK IN COMPOSITE AIRCRAFT PARTS PRODUCTION

Vladimir L. Fedyayev¹, Valentin I. Khaliulin²✉, Igor' N. Sidorov³, Yurii P. Kataev⁴

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, 4} Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

¹ vlfed2020@gmail.com

² pla.kai@mail.ru ✉

³ insidorov1955@mail.ru

⁴ YuPKataev@kai.ru

Abstract

The reinforcing filler impregnation by the binder is one of the basic stages while aviation and rocket engineering composite structures production by the vacuum molding method. The porous space in the reinforcing filler, such as woven, consists of super-capillary (large) pores, formed by the fibers, and micro-capillary pores, formed by the micro fibers inside the fibers. The impregnation time is being determined by the speed of the inter-fiber capillary filling by the filler. Its study is being performed with the mathematical modeling methods. Accounting for the fact herewith that the woven filler consists of fibers, which in their turn, are formed by the continuous mono-fibers, the filler capillary movement occurs both along the fibers in capillary tubes and transversally in the capillary slits. As long as the shape of the real capillary walls is rather complex, it is being idealized, and the tubes are being replaced by the equivalent ones in the form of a circular cylinder with slits. Besides, it is assumed that physical and chemical properties of the internal surface of these tubes are identical to those of filament surfaces.

As the result of the Laplace's equation integrating, employing expressions for estimating the pressure in the quiescent filler in the entry of the tube and transversal motion of the filler in the capillary slits, the authors obtained expressions allowing estimating the resin flow rate in the tubes and the time of their filling. The article demonstrates that the filling rate of the capillary tubes decreases over time. It can be increased by reducing the resin flow from the tubes through the slits, increasing the equivalent radius of the tubes within certain limits, for example, by reducing the loads acting on the surface of the semipreg stack, as well as by viscosity reducing of the polymer resin, and performing impregnation at higher temperatures.

The resin flow in the capillary slits in the transverse direction is in many ways similar to the resin flow in capillary tubes. However, in this case, the resin flows both in the capillary tubes and in the gaps between the sections of the micro-fiber surfaces. Provided that this flow is similar to the liquid filtration in the fractured-porous media, an equation for determining the time-dependent dynamics of the resin flow in the gap, the surface tension coefficient, the contact angle, the average distance between the slit walls, their roughness, and the resin viscosity was obtained.

Recommendations on the semipreg stack capillary impregnation intensification and its time reduction are presented based on the mathematical modeling results.

Keywords: composites, semipregs, vacuum molding, capillary impregnation, composite porosity, preform permeability, semipregs impregnation modeling, impregnation time computing

For citation: Fedyayev V.L., Khaliulin V.I., Sidorov I.N., Kataev Yu.P. Capillary Impregnation of a Semipreg Stack in Composite Aircraft Parts Production. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 4, pp. 68–78. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177608>

Введение

В производстве композитных элементов летательных аппаратов используются практически все существующие технологии, основанные как на применении препрегов, так на пропитке сухих преформ [1–8]. У этих методов есть и положительные, и отрицательные стороны. Например, достоинство препреговой технологии состоит в возможности качественного совмещения арматуры и связующего. Пропитка осуществляется на специальном оборудовании с использованием армирующего материала простой формы (жгут, лента, ткань), легко поддается отладке и контролю. К основным недостаткам данной технологии можно отнести ограничения в применении некоторых автоматизированных методов придания формы полуфабрикату (преламину), а также сложности с удалением газовых включений из материала композита для конструкций сложной формы.

В настоящее время в производстве летательных аппаратов активно используются методы, базирующиеся на пропитке сухих армирующих заготовок. Их очевидным преимуществом является возможность получения преформ сложной конфигурации с помощью высокопроизводительных технологий, таких как радиальное плетение, техническая вышивка (TFP), тафтинг, вязание и т. д. Кроме того, при производстве композитных изделий с использованием сухих преформ возможно максимально полное удаление из них газовых включений путем создания вакуума. Вместе с тем пропитка осуществляется в более сложных условиях, чем при получении препрегов. Соответственно, для должного контроля показателей протекающих процессов, обеспечения требуемого качества получаемых изделий необходимо более полное понимание особенностей соответствующих процессов, чему способствует, в том числе, применение методов математического моделирования.

Относительно новой и малоизученной является технологическая схема получения композитных конструкций с применением семипрегов [9–12]. По существу этот метод можно рассматривать как промежуточное звено между препреговой технологией и технологией, основанной на трансфере связующего. Семипреги представляют собой волокна, жгуты, ленты или ткани, совмещенные с пленкой связующего, частично их пропитавшего. При этом предполагается, что частичное совмещение связующего с арматурой обеспечивает равномерное и дозированное распределение его по поверхности, а непропитанный объем армирующего материала позволяет практически полностью удалить газовые включения. Данная технология состоит из последовательности операций, основными из которых

являются вакуумирование сухого технологического пакета семипрегов (удаление паровоздушной смеси (ПВС)) [13–17], перевод связующего в вязкотекучее состояние нагревом [18–20], пропитка им армирующей ткани [21].

При изучении пропитки пакета семипрегов удобно условно разделить соответствующий процесс на два этапа: фильтрацию связующего и капиллярную пропитку. Первый этап – фильтрационная пропитка – подробно рассмотрен в работе [20]. Особенность её состоит в том, что помимо перепада давления, действующего на пакет семипрегов, учитываются силы тяжести и демпфирование каркаса наполнителя.

В отличие от фильтрационной пропитки, когда связующее заполняет пространство сверхкапиллярных (крупных, межволоконных) пор наполнителя, на этапе капиллярной пропитки содержащиеся в капиллярных порах связующее и контактирующая с ним газовая (паровоздушная) среда движутся вследствие действия молекулярных поверхностных сил (поверхностного натяжения). Поскольку при капиллярной пропитке скорость движения связующего зависит от ряда факторов, которые трудно оценить, изучение её представляет большие сложности. Вместе с тем результаты капиллярной пропитки могут существенно повлиять на качество получаемых композитных изделий. Поэтому исследование особенностей и установление закономерностей процесса капиллярной пропитки представляет большой научный и практический интерес.

В настоящей работе в качестве основного метода исследования названного процесса выбран метод математического моделирования. Этот метод универсален, позволяет прогнозировать динамику уменьшения пористости композитных материалов, влияние на неё свойств связующего, структуры армирующего наполнителя, технологических параметров, внешних факторов.

Применение такого подхода позволит прогнозировать наличие газовых включений в композите, формулировать ограничения на выбор структуры армирующего материала и связующего.

Математическое моделирование капиллярной пропитки

Приступая к математическому описанию процессов, протекающих при капиллярной пропитке наполнителя пакета семипрегов, примем во внимание следующие обстоятельства. По нашему мнению, по ходу фильтрационной пропитки поступление связующего в капиллярные каналы может быть незначительным. Полномасштабной капиллярная пропитка будет тогда, когда связую-

шее полностью заполнит сверхкапиллярные поры. Удаление из пакета семипрегов газов, находящихся в капиллярных полостях, достигается одновременным вакуумированием пакета и его капиллярной пропиткой.

В целом, структура наполнителя рассматриваемого пакета семипрегов может быть достаточно сложной [2, 22, 23], соответственно, будет сложной и структура капилляров как по конфигурации, форме (трубчатые, щелевые), так и по характерным продольным и поперечным размерам, свойствам стенок. Остановимся на наполнителях в виде ткани (простейший случай), а также ленты, элементами структуры которых являются волокна, состоящие из сплошных по объему моноволокон (филаментов). Поперечное сечение капилляров по форме близко к криволинейному треугольнику или четырехугольнику (рис. 1). В альтернативных им продольных щелевых капиллярах площадь сечения по высоте щели, соизмеримой с толщиной слоя наполнителя, заметно меняется. В обоих случаях характерный продольный размер капилляров определяется расстоянием между сверхкапиллярными порами (макроэлементами), по которым фильтруется связующее в контрольном объеме. Соответственно, введем в рассмотрение эквивалентную (условную) длину трубок, щелей l_u ; эквивалентный радиус трубок r_u ; поперечный размер, высоту щелей d_u и $h_u \approx h_a$. Надо иметь в виду, что эти микропоры в местах пересечения обладают общими микрообъемами, являющимися по существу капиллярными трубками, в которых связующее движется и в горизонтальном, и в вертикальном направлении (рис. 1).

Предположим, что капиллярное движение связующего в горизонтальном направлении и его движение в вертикальном направлении не зависят одно от другого, при этом в качестве основного выберем продольное движение связующего в капиллярных трубках.

Движение связующего в трубках капилляров. Рассматривая его, необходимо в первую очередь об-

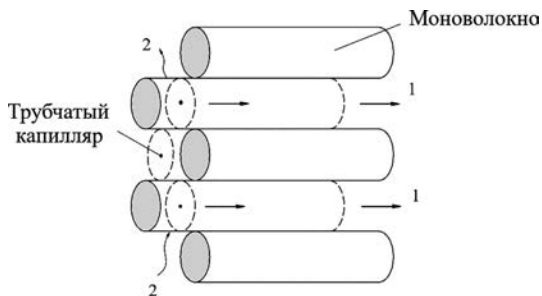


Рис. 1. Схема капиллярного движения связующего в трубках (1) и щелях (2) волокна, содержащего моноволокна

ратить внимание на стенки этих капилляров. Они образованы поверхностями расположенных по соседству волокон, поэтому форма поперечного сечения капилляров сложная, характерные размеры его зависят от их взаимного положения. Важно также то, что данные стенки в продольном направлении не сплошные, между частями их имеются щели, те самые, через которые связующее движется в поперечном направлении. В этой ситуации целесообразно заменить реальные продольные капилляры эквивалентными трубчатыми в форме круговых цилиндров таким образом, чтобы площади поперечных сечений реального и эквивалентного капилляров были равны. Отсюда эквивалентный радиус кругового цилиндра (трубки)

$$r_u = \sqrt{\frac{F_k}{\pi}},$$

где — F_k площадь поперечного сечения реального капилляра.

Объем связующего, находящегося в трубчатом капилляре, зависит от интенсивности q_k поступления его в щели. Кроме того, предположим, что физико-химические свойства внутренней поверхности этой трубки (температура, структура, смачиваемость связующим и т. п.) идентичны соответствующим свойствам поверхности волокон.

Следующей поверхностью в цилиндрическом капилляре, которая оказывает значительное влияние на проникновение в него связующего, является поверхность раздела газообразной (паровоздушной) среды и связующего. В пределе возможна ситуация, когда первая среда отсутствует (вакуум). Однако в действительности, пусть и сильно разреженная, газовая среда в полости капилляра остается.

Молекулы связующего, расположенные на поверхности раздела сред, образуют поверхностный слой. Толщина поверхностного слоя, в общем, меняется, особенно большой она может быть вблизи твердой поверхности (критической точки) и по мере удаления от нее становится весьма тонкой, порядка нескольких размеров молекул связующего. Поэтому при рассмотрении макроскопических свойств контактирующих сред поверхностный слой, имеющий бесконечно малую толщину, считается геометрической поверхностью. Молекулы поверхностного слоя испытывают воздействие молекулярных сил со стороны соседних молекул, направленное как внутрь объема связующего, так и вдоль поверхности раздела. Энергия продольного воздействия, отнесенная к единице площади этой поверхности, называется поверхностным натяжением и обозначается через σ .

Основными факторами, от которых зависит поверхностное натяжение связующего, являются:

- химическая природа связующего;
- наличие в связующем как химических, так и механических примесей;
- температура связующего.

Зависимость σ от температуры связующего обычно линейная:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 t,$$

где σ_0 – поверхностное натяжение при температуре $t = 0$; $\sigma_1 = -d\sigma/dt$ – температурный коэффициент, характеризующий степень влияния температуры связующего на σ (с ростом температуры поверхностное натяжение уменьшается).

Контакт твердой поверхности стенки рассматриваемого цилиндрического капилляра с поверхностью раздела фаз характеризуется углом смачивания, или краевым углом, который обозначим через θ . Этот угол в критической точке К контакта названных поверхностей образован касательной к поверхности раздела и, в нашем случае, линией пересечения внутренней поверхности капилляра с плоскостью, проходящей через ось симметрии. Таким образом, в критической точке контактируют друг с другом твердая, жидкая (связующее) и газообразная среда (стенка цилиндра, связующее, газ, ПВС). Считается, что если $0 \leq \theta \leq \pi/2$, то смачивание положительное, поверхность твердого тела лиофильная; при $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$ смачивание отрицательное, поверхность тела лиофобная (несмачиваемая). Например, при контакте графита с водой и воздухом $\theta = 0,97$ и $\cos \theta = 0,57$.

На степень смачивания поверхности капилляра могут повлиять и внешние факторы, такие как волновые (ультразвуковые) колебания, электростатические, магнитные поля и т. д.

В целом, процессы капиллярной пропитки слоя пористого наполнителя, безусловно, сложные, поэтому для начала ограничимся математическим описанием перемещения связующего в отдельном капилляре, схематично показанном на рис. 2. Здесь ξ, φ, η – локальная цилиндрическая система координат (φ – полярный угол), центр которой O помещается в начале капиллярной трубки на поверхности связующего: ψ – угол наклона оси трубки; \vec{g} – вектор ускорения свободного падения; η_k – расстояние удаления мениска от начала координат (внутренняя поверхность трубки лиофильная, смачиваемая); $h_k = h_k(\tau)$ – высота поднятия связующего к моменту времени τ ; h_m – максимально возможная высота.

Пусть давление в газе (ПВС) $p_1 \approx p_b$ постоянно, давление p_f в покоящемся связующем n -го слоя семипрега рассматриваемого пакета находится с помощью соотношения [20]

$$p_f = p_{s0} + (n - 1) [g \rho_f h_f - (1 - m_{of}) \Delta p_s],$$

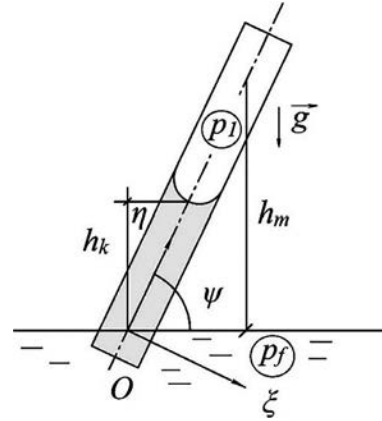


Рис. 2. Схема движения связующего в цилиндрическом капилляре

где n – номер слоя семипрега, начиная от приграничного ($n = 1$); p_{s0} – нагрузка со стороны внешней среды, действующая на пакет семипрегов; m_{of} – доля сверхкапиллярных пор в поровом пространстве контрольного объема наполнителя; Δp_s – уменьшение давления вследствие демпфирования слоя наполнителя.

Предположим, что кривизна осесимметричной формы мениска $k_m = 1/R_m$, радиус кривизны $R_m = r_u / \cos \theta$ (в случае полного смачивания $\theta = 0$; $R_m = r_u$) описываемой уравнением

$$\eta = f_m(\xi),$$

При этом величина

$$p_\sigma = p_\sigma(\sigma, \cos \theta) = \frac{2\sigma}{R_m} \quad (1)$$

называется капиллярным давлением.

Равновесие элемента капиллярной пленки, находящейся в поле сил тяжести, под действием нормальных к ней давлений p_1, p_2 и продольных растягивающих нагрузок, обусловленных силами поверхностного натяжения, определяется уравнением Лапласа:

$$p_2 - p_1 = p_\sigma.$$

Здесь давление связующего вблизи поверхности мениска

$$p_2 = p_f - g \rho_f h_k \quad (h_k = \eta_k \sin \psi).$$

Перепад давления Δp вдоль капилляра от поперечного сечения $\eta = 0$ до $\eta = \eta_k$, характеризующего положение мениска:

$$\Delta p = (p_f - p_2) + (p_\sigma - p_1) = p_\sigma - g \rho_f h_k - p_1.$$

При малом давлении p_1 газовой среды (ПВС) по сравнению с давлением p_f в связующем

$$\Delta p \approx p_\sigma - g \rho_f h_k \sin \psi$$

текущее значение перепада давления на длине η

$$\Delta p = \Delta p(\eta) = p_\sigma - g_k \eta \quad (g_k = g \rho_f \sin \psi). \quad (2)$$

Данный перепад давления вызывает направленное движение связующего в капилляре. В силу того что он прямолинейный, круговой, течение связующего медленное, для описания его на удалении от входа в трубку и мениска можно воспользоваться уравнением Пуазейля. При наличии по длине трубки стока связующего в щелевые капилляры с интенсивностью q_k (под интенсивностью q_k подразумевается средняя скорость вытекания (поступления) связующего через щели с суммарной площадью $s_0 \eta$), средняя скорость связующего в поперечном сечении трубки на расстоянии η от ее начала ее будет

$$v(\tau) = v_0(\tau) - V_0(\tau),$$

где

$$v_0 = v_0(\tau) = \frac{d\eta}{d\tau};$$

$$V_0 = V_0(\tau) = \frac{s_0 \eta(\tau) q_k}{\pi r_u^2}; \quad (q_k = \text{const}).$$

Согласно закону Пуазейля

$$v_0 = \frac{r_u^2 \Delta p}{8 \mu_f \eta}.$$

Подставляя в это выражение зависимость (2) для Δp , получим дифференциальное уравнение

$$\eta \frac{d\eta}{dt} + G_0 \eta - G_1 = 0. \quad (3)$$

Здесь τ – текущее время ($\tau = 0 \dots \tau_k$),

$$G_0 = \frac{g r_u^2}{8 \mu_f}, \quad G_1 = \frac{p_\sigma (\sigma, \cos \theta) r_u}{8 \mu_f} = \frac{\sigma r_u}{4 \mu_f}$$

($p_\sigma = 2\sigma/r_u$ – случай полного смачивания, когда $\theta = 0$). При неполном смачивании в выражении для G_1 параметр σ следует заменить параметром $\sigma \cos \theta$.

Интеграл уравнения (3), представленный зависимостью времени τ от длины η ($\tau = \tau(\eta)$), имеет вид

$$\tau = \tau(\eta) = \frac{\eta_0 \ln \left(\frac{\eta_0}{\eta_0 - \eta} - \eta \right)}{G_0}, \quad (\eta < \eta_0),$$

где $\eta_0 = 2\sigma/(g_k r_u)$.

Нетрудно убедиться, что приближенно

$$\eta = \eta(\tau) \approx \sqrt{2\eta_0 G_0 \tau} = \sqrt{\frac{\sigma r_u \tau}{2 \mu_f}} = \sqrt{2G_1 \tau},$$

скорость

$$v_0 = v_0(\tau) = \frac{d\eta}{d\tau} \approx 0,5 \sqrt{\frac{2G_1}{\tau}}. \quad (4)$$

Отсюда следует, что в трубчатых капиллярах с эквивалентным (условным) радиусом r_u , при наличии на боковых поверхностях щелей, скорость движения мениска, заполнения капилляра в течение времени $\tau = \tau_k$ будет

$$v_k = v_0(\tau_k) - V_0(\tau_k),$$

длина части капилляра, заполненной связующим,

$$\eta_k = \int_0^{\tau_k} [v_0(\tau) - V_0(\tau)] d\tau.$$

Из данного соотношения, задаваясь длиной η_k , можно найти время τ_k .

В общем, видно, что скорость заполнения капилляров обратно пропорциональна времени $\sqrt{\tau}$, т. е. с течением времени она уменьшается. Скорость можно увеличить за счет увеличения (в определенных пределах) радиуса трубок r_u , поверхностного натяжения σ на границе раздела фаз, уменьшения вязкости связующего μ_f . Степень заполнения капилляра связующим η_k пропорциональна $\sqrt{\tau}$, однако она будет тем больше, чем больше радиус трубки, поверхностное натяжение и меньше вязкость связующего.

Если считать текущее время τ ($\tau = 0 \dots \tau_k$), поверхностное натяжение σ , вязкость μ_f технологическими параметрами, то, меняя их, можно, в определенной степени, управлять процессом капиллярной пропитки. В частности, при известной средней длине трубчатых капилляров l_u , полученные формулы позволяют оценить время полной капиллярной пропитки с учетом всех основных факторов.

Следует подчеркнуть, что все приведенные зависимости полностью согласуются с имеющимися физическими представлениями, правда, предполагается, что смачивание близко к полному, краевой угол θ мал. Для учета угла θ во всех выделенных формулах параметр σ необходимо заменить параметром $\sigma \cos \theta$.

Данные результаты получены при условии, что капиллярные поры сквозные, давление p_v газа, ПВС в них мало, движение мениска практически не приводит к его изменению. Однако вполне возможна ситуация, когда эти поры являются тупиковыми либо заполняются связующим с обоих концов (квазитупиковые поры). По мере движения мениска давление газа, ПВС в порах капилляров, естественно, повышается. Степень повышения этого давления характеризует параметр

$$\delta = \delta(\bar{\eta}) = \frac{p_\sigma}{p_1 + p_\sigma} \approx 1 - \bar{p}_1.$$

Здесь безразмерное давление газа (ПВС) в полости капилляра $\bar{p}_1 = p_1 / p_\sigma$ при движении мениска, вообще говоря, зависит от $\bar{\eta}$, а значит, и от времени, $\bar{p}_1 = \bar{p}_1(\bar{\eta})$ ($\bar{\eta} = \eta/r_u$), $\bar{p}_1 \gg p_b/p_\sigma$. Ради простоты будем далее считать, что давление \bar{p}_1 равно среднему по времени противодействию \bar{p}_0 .

Отсюда текущее время τ ($\tau = \eta(\tau)$) определяется соотношением (угол смачивания $\theta \neq 0$)

$$\tau = \frac{4\delta r_u \mu_f}{\sigma \cos \theta} H(\bar{\eta}), \quad (5)$$

где

$$H(\bar{\eta}) = 0,5\eta^2(1 - \delta) \left[\delta \ln \left(\frac{\delta}{\delta - \eta} \right) - \bar{\eta} \right].$$

При малых $|\delta|$, когда давление p_1 превышает капиллярное давление p_σ , $\bar{\eta} > 1$ (мениск удален от первоначального положения более чем на расстояние r_u), параметр $\bar{\delta}^* = \delta^* / \bar{\eta}$ ($\delta^* = \bar{p}_1 - 1$) мал, получим

$$H(\bar{\eta}) = 0,5\bar{\eta}^2 - (1 + \delta^*) \left[\delta^* \ln \left(\frac{\bar{\delta}^*}{1 + \bar{\delta}^*} \right) + \bar{\eta} \right] \approx \approx c_0 \bar{\eta}^2 + c_1 \bar{\eta} + c_2, \quad (6)$$

где коэффициенты $c_0 = 1,5$, $c_1 = 1 + \delta^*$, $c_2 = 1,5\delta^*(1 + \delta^*)$.

Из соотношений (5), (6) видно, что при фиксированном расстоянии смещения мениска в капилляре $\bar{\eta}$ с увеличением противодействия газа, ПВС (параметра δ^*) время τ достижения этого положения увеличивается, т. е. движение мениска замедляется.

Рассматривая далее зависимость (5) как уравнение для отыскания расстояния $\bar{\eta} = \bar{\eta}(\bar{\tau})$ (безразмерное время $\bar{\tau} = \tau \sigma \cos \theta / (4\delta r_u \mu_f)$) при условии, что \bar{p}_1 меняется мало, $\bar{p}_1 \approx \bar{p}_0$, найдем:

$$\begin{aligned} \bar{\eta} = \bar{\eta}(\bar{\tau}) &= \frac{-(1 + \delta^*) + \sqrt{(1 + \delta^*)^2 - 6 \cdot 1,5\delta^*(1 + \delta^*) - \bar{\tau}}}{6} = \\ &= \frac{-\bar{p}_0 + \sqrt{\bar{p}_0^2 + 6[1,5\bar{p}_0(1 - \bar{p}_0)] + \bar{\tau}}}{6} \approx \\ &\approx 0,5 \left[1,5 \left(1 - \bar{p}_0 + \frac{\bar{\tau}}{\bar{p}_0} \right) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Следовательно, приближенно, размерная скорость движения мениска в капилляре

$$\begin{aligned} v_0 = v_0(\tau) &= \frac{d\eta}{d\tau} = \frac{\sigma \cos \theta}{4\delta \mu_f} \frac{d\bar{\eta}}{d\bar{\tau}} \approx \\ &\approx \frac{\sigma \cos \theta}{8\mu_f} \left(1 + \frac{1}{p_0} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, эта скорость в рассматриваемом приближении слабо зависит от радиуса r_u , времени τ (почти постоянна), с увеличением противодействия в газовой полости капилляра (\bar{p}_0) скорость уменьшается. Кроме того, движение мениска замедляется при уменьшении поверхностного натяжения σ , увеличении краевого угла θ (если $\theta \approx \pi/2$, то $v_0 \approx 0$), повышении вязкости связующего μ_f . Все эти закономерности согласуются с действительностью.

Для сравнения, практически в отсутствие противодействия ($p_1 \approx p_b$, $\bar{p}_0 \approx 0$), согласно полученному выше решению (4) при $\cos \theta \neq 1$ средняя скорость связующего в поперечном сечении капиллярной трубки будет

$$v_0 = v_0(\tau) \approx \sqrt{\frac{\sigma \cos \theta r_u}{8\mu_f \tau}}.$$

Подчеркнем: если поры тупиковые, труднее заполняемые связующим, то из зависимости $\tau = \tau(\bar{\eta})$ следует, что время заполнения их пропорционально квадрату длины этих пор, соответственно время пропитки пористого тела будет пропорционально квадрату его размеров.

Движение связующего в капиллярных щелях. В волокнах, состоящих их моноволокон диаметром 7–10 мкм (см. рис. 1), щели в поперечном направлении к волокнам имеют вид, схематично показанный на рис. 3. Считается, что поверхности их имеют нерегулярную форму, состоят из участков поверхностей моноволокон и эквивалентных трубчатых капилляров со средним радиусом r_u . Как отмечалось выше, длина щелей равна длине трубок l_u , средний поперечный эквивалентный размер щелевого канала d_u , высота щели h_u соизмерима с толщиной слоя наполнителя h_a . Предполагается, что в поровом пространстве щелей по ходу пропитки связующее движется в эквивалентных капиллярных трубках в горизонтальном направлении и в зазорах между

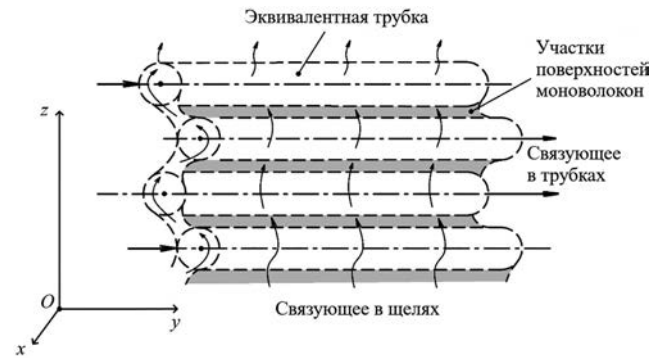


Рис. 3. Схема капиллярной щели, состоящей из участков поверхности углеродных моноволокон и эквивалентных трубок

участками поверхностей моноволокон, сквозь те же эквивалентные капиллярные трубки, но в вертикальном направлении. То есть связующее распространяется в щелях одновременно в обоих направлениях, при этом потоки как бы взаимно проникают друг в друга (аналогично взаимопроникающим континуумам).

Данная схема движения связующего в пористом теле, по нашему мнению, в определенном смысле схожа со схемами фильтрации жидкости в трещиновато-пористых средах, когда данный коллектор представляется как сложная среда, состоящая из вложенных одна в другую трещиноватой и пористой сред, между которыми перетекает жидкость.

Поскольку анализ продольного течения связующего в эквивалентных трубках произведен, далее акцентируем внимание на его поперечном движении, называемом шелевым.

В общем случае различают щели с поперечным сечением: постоянным, клиновидным, резко меняющимся, волнистым. Рассматриваемые нами щели – щели с волнистыми, параллельными друг другу стенками (см. рис. 3). Простейшие из них – щели с плоскими стенками, расстояние между которыми b .

При ламинарном стационарном течении связующего в полностью заполненной щели, если поверхность стенок гладкая, средняя скорость движения связующего в щели

$$v_0 = \frac{b^2}{12\mu_f} \cdot \frac{\Delta p}{l}, \quad (9)$$

где Δp – перепад давления на длине l .

На практике, однако, поверхности стенок шероховатые. В результате многочисленных экспериментов установлено, что при этом средняя скорость

$$v_0 = \frac{b^2}{12\mu_f \left[1 + 6,0 \left(\frac{e}{b} \right)^{1,5} \right]} \cdot \frac{\Delta p}{l}, \quad (10)$$

где e – абсолютная шероховатость.

Особенность движения жидкости в тонких, сверхтонких щелях состоит в том, что на их стенках образуется очень тонкий слой (молекулярная пленка) жидкости, обладающий аномальными свойствами, в частности повышенной плотностью и вязкостью. Кроме того, экспериментально обнаружено, что жидкость в этом слое имеет предел текучести. Характерная толщина его порядка 0.1 ... 0.2 мкм. В процессе движения жидкости слой уменьшает эффективное сечение щели, что при неизменном перепаде давления скажется на средней скорости движения.

При полном заполнении щели связующим, помимо рассмотренного движения его, обусловленного перепадом давления, возможен диффузионный перенос среды вследствие разной концентрации ее по длине. В отсутствие перепада давления перенос среды происходит только за счет диффузии, соответственно, скорость его определяется законами диффузии. На коэффициент диффузии оказывают влияние гидродинамическое сопротивление стенок щели, толщина щели, степень стесненности потока. В основном, коэффициент диффузии определяется экспериментально.

В капиллярных щелях, частично заполненных связующим и газовой средой (ПВС), его перемещение, как и в капиллярных трубках, обусловлено действием сил поверхностного натяжения и тяжести. Силы тяжести далее не учитываются, поскольку трудно определить положение в пространстве капиллярных щелей, ориентацию их относительно вектора сил тяжести.

По аналогии с постановкой, решением предыдущей задачи для капиллярной трубки, введем локальную декартовую прямоугольную систему координат (ξ, η) с центром, находящимся на пересечении плоскости симметрии щели с поверхностью связующего. Не вдаваясь в подробности, запишем выражения для капиллярного давления

$$p_\sigma = \frac{\sigma \cos \theta}{b},$$

перепада давления по длине щели

$$\Delta p = p_\sigma.$$

В соответствии с законом Куэтта (9) для случая гладких стенок щели средняя скорость движения жидкости

$$v_0 = v_0(\eta) = \frac{b^2}{12\mu_f} \frac{\Delta p}{\eta}. \quad (11)$$

Отсюда дифференциальное уравнение для отыскания зависимости $\eta = \eta(\tau)$ имеет вид

$$\eta \frac{d\eta}{d\tau} = G_1, \quad \left(G_1 = \frac{\sigma b \cos \theta}{12\mu_f} \right),$$

решение его

$$\eta = \eta(\tau) = \sqrt{2G_1\tau}, \quad (12)$$

где τ – текущее время.

Из (12) следует, что закономерности динамики пропитки, установленные для капиллярных трубок, имеют место и для щелей.

Касательно формулы (12) отметим, что ее можно уточнить: на случай шероховатых стенок, если скорость v_0 (11) заменить скоростью (10)

$$v_0 = \frac{b^2}{12\mu_f \left[1 + 6,0 \left(\frac{e}{b} \right)^{1,5} \right]} \frac{\Delta p}{\eta},$$

если подставить вместо b ширину d_u , а также скорректировать угол смачивания θ , коэффициент поверхностного натяжения связующего σ , приняв во внимание особенности устройства стенок щелевых капилляров наполнителя семипрегов.

Нетрудно убедиться, что установленные выше особенности пропитки тупиковых капиллярных трубок (соотношения (5)–(8)) будут иметь место и при пропитке (заполнении) связующим тупиковых капиллярных щелей в силу идентичности данных процессов.

Выводы

В результате проведения исследований разработаны математические модели капиллярной пропитки связующим тканевого армирующего наполнителя пакета семипрегов. Технология, основанная на применении семипрегов и вакуумном формовании, имеет перспективы широкого внедрения в производстве летательных аппаратов, так как она способна при существенно меньших затратах обеспечить низкую пористость композита. Подход основан на выделении движения связующего в трубчатых и щелевых капиллярах. Установлено, что скорость заполнения связующим трубчатых капилляров с течением времени уменьшается. Увеличить ее, а значит, уменьшить время пропитки можно за счет увеличения характерных размеров капиллярных пор, поверхностного натяжения на границе раздела связующего и газообразной среды и уменьшения вязкости связующего. Представлены также оценки скорости движения мениска в тупиковых капиллярных порах, заполняемых связующим с обоих концов.

Показано, что закономерности, наблюдаемые при перемещении связующего в трубчатых капиллярах, в общем, имеют место и при его движении в щелевых капиллярах.

Поскольку время заполнения пор жестко регламентируется жизнеспособностью связующего и является критическим параметром, фактор времени особенно важен при изготовлении крупногабаритных элементов летательных аппаратов, таких как панели крыла, шпангоуты, обтекатели носовой части ракет, корпусов авиационных двигателей и т. д.

В соответствии с полученными результатами математического моделирования, выделим следующие основные способы интенсификации пропитки пакета семипрегов:

- вакуумирование порового пространства по ходу пропитки;
- увеличение внешних механических нагрузок, действующих на связующее, в пакете семипрегов;
- волновое воздействие во время пропитки на пакет семипрегов механических, низкочастотных колебаний, вибраций;
- акустические колебания (звуковые, ультразвуковые);
- уменьшение вязкости связующего, увеличение коэффициента поверхностного натяжения, угла смачивания.

Список источников

1. Тарнопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А. Пространственно-армированные композиционные материалы: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
2. 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.
3. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. № 1. С. 36–39.
4. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7–17.
5. 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.
6. Белов О.А., Бердникова Н.А., Бабкин А.В., Козлов М.В., Белов Д.А. Композитная формообразующая оснастка // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 2. С. 115–122.
7. Бухаров С.В., Лебедев А.К., Зинин А.В. Пространственное армирование прошивкой высокоплотных толстостенных заготовок слоистых композиционных материалов // Авиационное машиностроение и транспорт Сибири: сборник статей XII Международной научно-технической конференции (27 мая–01 июня 2019; Иркутск). Иркутск: Изд-во ИНИТУ, 2019. С. 107–115.
8. Насонов Ф.А., Алексахин В.М., Мельников Д.А., Бухаров С.В. Исследование влияния модифицирования эпоксидной матрицы и углепластика на ее основе стеаратом цинка на основные технологические свойства композиции // Вопросы материаловедения. 2018. № 3(95). С. 146–156. DOI: 10.22349/1994-6716-2018-95-3-146-156

9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Кузнецова П.А., Ткачук А.И., Караваев Р.Ю., Донецкий К.И. Применение семипрегов для изготовления методом вакуумного формования панелей корпусных конструкций из ПКМ // Труды ВИАМ. 2023. № 8(126). С. 74–84. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-74-84
13. 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).
14. Душин М.И., Чурсова Л.В., Хрульков А.В., Коган Д.И. Особенности изготовления ПКМ методом вакуумной инфузии // Вопросы материаловедения. 2013. № 3(75). С. 33–40.
15. 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
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. 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.

18. 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
19. 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.
20. 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.
21. 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
22. 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.
23. 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

References

1. Tarnopol'skii Yu.M., Zhigun I.G., Polyakov V.A. *Prostranstvenno-armirovannye kompozitsionnye materialy. Spravochnik* (Spatially reinforced composite materials. Handbook), Moscow, Mashinostroenie, 1987, 224 p.
2. Skardino F., Khirl Dzh., Kavabata S. et al. *Tkanye konstruktsionnye kompozity* (Woven structural kompozity), Moscow, Mir, 1991, 430 p.
3. Kablov E.N. *Metally Evrazii*, 2015, no. 1, pp. 36–39.
4. Kablov E.N. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. 5, pp. 7–17.
5. 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.
6. Belov O.A., Berdnikova N.A., Babkin A.V., Kozlov M.V., Belov D.A. Composite shape-generating tool set for spacecraft antennae reflector manufacturing. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 115–122.
7. Bukharov S.V., Lebedev A.K., Zinin A.V. *Materialy XII*

Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoj konferentsii "Aviamashinostroenie i transport Sibiri" (27 May – 01 June 2019; Irkutsk). Irkutsk, INITU, 2019, pp. 107–115.

8. Nasonov F.A., Aleksashin V.M., Mel'nikov D.A., Bukharov S.V. *Voprosy materialovedeniya*, 2018, no. 3(95), pp. 146–156. DOI: 10.22349/1994-6716-2018-95-3-146-156
9. Donetskii K.I., Dushin M.I., Mishchun M.I., Sevast'yanov D.V. *Trudy VIAM*, 2017, no. 12(60), pp. 81–93.
10. Dushin M.I., Donetskii K.I., Timoshkov P.N., Karavaev R.Yu. *Trudy VIAM*, 2018, no. 9(69), pp. 21–31.
11. 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.
12. Kuznetsova P.A., Tkachuk A.I., Karavaev R.Yu., Donetskii K.I. *Trudy VIAM*, 2023, no. 8(126), pp. 74–84. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-74-84
13. 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)*.

14. Dushin M.I., Chursova L.V., Khrul'kov A.V., Kogan D.I. *Voprosy materialovedeniya*, 2013, no. 3(75), pp. 33-40.
15. 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
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. 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.
18. Dzhogan O.M., Kostenko O.P. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruktii letatel'nykh apparatov*, 2011, no. 4, pp. 111-125.
19. Dzhogan O.M., Kostenko O.P. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruktii letatel'nykh apparatov*, 2012, no. 1, pp. 80-92.
20. Fedyaev 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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

Статья поступила в редакцию 24.08.2023; одобрена после рецензирования 31.10.2023; принята к публикации 02.11.2023.

The article was submitted on 24.08.2023; approved after reviewing on 31.10.2023; accepted for publication on 02.11.2023.