

Факторный анализ подготовки волокнистой ленты при мокром способе намотки композитных конструкций

© М.А. Комков, Т.В. Васильева, А.И. Долгих

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Рассмотрен комплекс параметров формирования и пропитки волокнистой ленты из нитей, ровингов и жгутов жидкими связующими при изготовлении композитных конструкций с использованием мокрого способа намотки. Проведен анализ совокупности таких факторов, как вязкость связующего и скорость капиллярной пропитки, существенно влияющих на качество и время пропитки волокнистой намоточной ленты. Показано, что предварительная физико-химическая подготовка и аппретирование поверхности используемых волокон существенно увеличивает адгезионную связь на границе раздела волокна с полимерной матрицей, что, в свою очередь, резко снижает пористость и значительно повышает сдвиговую прочность однонаправленного композиционного материала. Представлены технологические приемы и способы, обеспечивающие возрастание объемного содержания основных видов волокон в наматываемой ленте до оптимальных значений, благодаря чему достигается максимальная прочность однонаправленных композиционных материалов при работе на растяжение.

Ключевые слова: мокрый способ намотки, волокнистая лента, капиллярная пропитка, объемное содержание волокон, композиционный материал

Введение. Отличительная особенность изготовления композитных конструкций мокрым способом намотки заключается в том, что процесс формообразования облика изделия и формирование самого композиционного материала совмещены во времени, т. е. осуществляются в едином технологическом процессе. При мокрой намотке, когда задан уровень натяжения ленты и заранее установлено значение скорости намотки, в пропиточно-натяжном тракте станка формируется намоточная лента, состоящая из стеклянных, органических или углеродных нитей, жгутов или ровингов, и одновременно проводится процесс пропитки волокнистой структуры ленты связующим [1–4].

Цель работы — проанализировать технологические факторы, обеспечивающие максимальную прочность на растяжение однонаправленных композитов, полученных способом намотки.

Определение размера капиллярного канала. В процессе пропитки газовая среда (воздух) межволоконного пространства постепенно замещается жидким связующим. Обычно полностью вытеснить весь воздух из наполнителя не удается, вследствие чего после отверждения связующего в композиционном материале образуются газовые пузыри-поры и сам материал становится пористым [5–10]. Большие протяженные поры (пустоты) значительно снижают величину сдвиговых $\tau_{сд}$ и сжимающих $\sigma_{сж}$ напряжений композиционных

материалов. Так, для однонаправленных эпоксидных стеклопластиков при испытании их по трехточечному изгибу была получена экспериментальная зависимость $\tau_{сд} = (67,3...6,0П)$ МПа, при которой сдвиговая прочность снижается пропорционально объемному содержанию пор П, %.

Движущими силами пропитки являются капиллярное всасывание, а также внешнее давление и температура, воздействующие на пропиточную жидкость. Следует отметить, что самой капиллярной пропитке предшествует процесс смачивания волокон жидкостью, обеспечивающий вытеснение воздушной среды из пор и капилляров наполнителя и замену ее связующим.

В результате происходит сцепление (адгезия) пропиточной жидкости с поверхностью волокон и на границе раздела фаз образуется новая гетерогенная система — переходная зона толщиной 10...1000 нм с особыми физическими, химическими и механическими свойствами [4, 9]. Степень адгезии определяется силами трения на границе раздела волокно–матрица, смачиваемостью наполнителя связующим и химическим соединением матрицы и наполнителя. Схематическое представление межфазной области между волокном и матрицей показано на рис. 1.

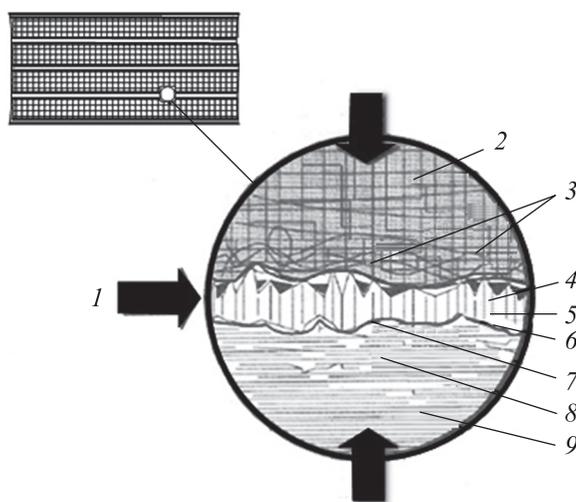


Рис. 1. Межфазная граница раздела волокно–матрица:

1 — термическое, химическое и механическое воздействие; 2 — матрица; 3 — молекулярная масса полимера; 4 — замасливатель; 5 — адсорбированные компоненты; 6 — химический состав волокна; 7 — поверхность волокна; 8 — морфология волокна; 9 — волокно

Экспериментально смачиваемость твердой поверхности жидкостью определяется по методу «сидячей» капли (рис. 2). Смачивание имеет место, когда краевой угол θ между жидкой матрицей и твердым волокном существенно меньше 90° (рис. 2, а).

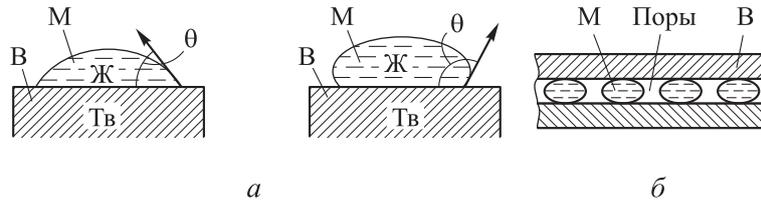


Рис. 2. Схема смачивания твердых поверхностей Тв волокон В жидкой Ж матрицей М (а) и образования газообразных пор и пустот при пропитке (б)

Для снижения образования пор и пустот (рис. 2, б) улучшают смачиваемость и повышают адгезию, с этой целью поверхность волокон обрабатывают: удаляют влагу, очищают волокна от замасливателя прокаливанием или химическим травлением, создающим микрошероховатость, а затем на подготовленную поверхность наносят специальные покрытия либо аппреты, например, аминсиланы типа АГМ-5.

Можно заранее предположить, что диаметр канала в структуре волокнистой ленты будет примерно равен толщине прослойки связующего между волокнами $\delta = \delta_{св}$ (рис. 3), которая будет зависеть от коэффициента объемного содержания волокна ν_B в намоточной ленте (нити) и геометрического расположения в ней волокон.

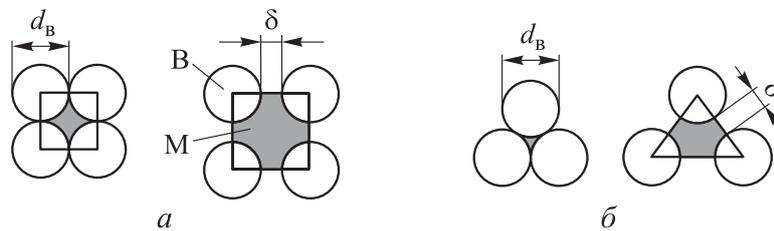


Рис. 3. Идеальные схемы укладки элементарных волокон в однонаправленном полимерно-волокнистом композиционном материале (ПКМ):

а — тетрагональная; б — гексагональная

Согласно обозначениям, приведенным на рис. 3, при тетрагональной схеме укладки цилиндрических волокон, которые соприкасаются друг с другом, коэффициент максимальной плотности упаковки $\nu_{B.T} = \pi/4 = 0,785$, а при гексагональной — $\nu_{B.Г} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} = 0,907$. Если считать распределение волокон по обеим схемам укладки равновероятным, получается максимально реализуемое значение коэффициента упаковки волокон:

$$\nu_{\max} = \frac{\nu_{B.T} + \nu_{B.Г}}{2} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) = 0,846. \quad (1)$$

В общем случае, учитывая значение ν_{\max} (1) и толщину прослойки связующего $\delta_{\text{св}} = \delta$, коэффициент армирования однонаправленных волокнистых композитов будет определяться зависимостью

$$\nu_{\text{в}}(\delta) = \frac{0,846}{\left(1 + \frac{\delta}{d_{\text{в}}}\right)^2}, \quad (2)$$

где $d_{\text{в}}$ — диаметр элементарного волокна.

С точки зрения достижения максимальной прочности на растяжение однонаправленных угле-, стекло- и органопластиков коэффициент армирования при оптимальном содержании волокна в композиционном материале находится в диапазоне $\nu_{\text{в.опт}} = 0,64 \dots 0,70$. При определении минимального диаметра капилляра $\delta_{\text{мин}}$ в волокнистой ленте с помощью зависимости (2) можно принять с небольшой долей погрешности для указанных выше материалов (без учета пор) среднее значение коэффициента армирования волокон $\nu_{\text{в}}(\delta_{\text{мин}}) = \nu_{\text{в.ср}} = 0,67 \approx 2/3$. После этого с учетом среднего содержания волокон в композиции выражение (2) можно представить в виде

$$\left(1 + \frac{\delta_{\text{мин}}}{d_{\text{в}}}\right)^2 = 0,846 / \nu_{\text{в.ср}}. \quad (3)$$

Подстановка коэффициента армирования $\nu_{\text{в.ср}} = 0,67$ в равенство (3) позволяет определить оптимальное значение толщины межволоконной прослойки связующего, примерно равное диаметру капилляра:

$$\delta_{\text{мин}} = (1/8)d_{\text{в}} \cong d_{\text{кап}}. \quad (4)$$

Поскольку для рассматриваемых выше видов наматываемых нитей диаметры элементарных волокон составляют 7...10 мкм, на основании равенства (4) значение толщины прослойки связующего и, следовательно, диаметр капилляра будут равны: $\delta_{\text{мин}} \approx d_{\text{кап}} \approx 1,0$ мкм.

Определение времени капиллярной пропитки. В случае погружения наполнителя в связующее (рис. 4, линия II) пропитка волокон по толщине намоточной ленты происходит в основном за счет капиллярного проникновения жидкости в волокнистую структуру ленты, и время пребывания наполнителя в ванночке должно быть значительным. При хорошем смачивании волокон матрицы жидкое связующее под действием капиллярных сил (давления), обусловленных поверхностным натяжением жидкости (рис. 5, а), будет перемещаться по каналам пористой структуры наполнителя.

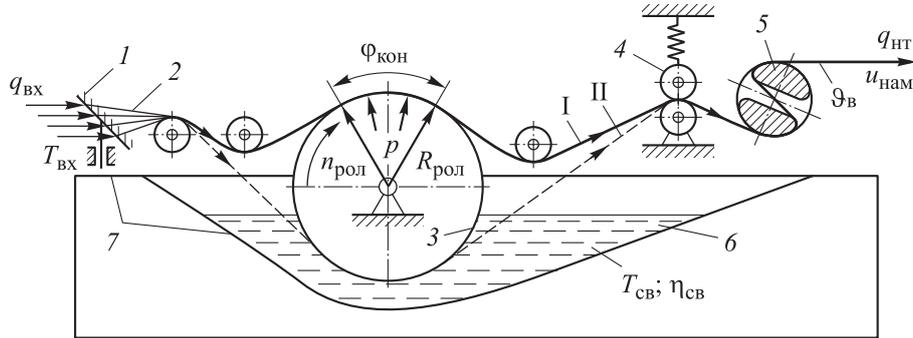


Рис. 4. Схема формирования и пропитки волокнистой ленты жидкими связующими или растворами:

1 — гребенка; 2 — нить, жгут, ровинг; 3 — пропитывающий ролик; 4 — отжимные ролики; 5 — натяжитель ленты; б — связующее, раствор; 7 — пропиточная ванна; I, II — способы пропитки нитей; p — давление ролика; $n_{ролл}$ — частота вращения ролика; $R_{ролл}$ — радиус ролика; $q_{вх}$ — натяжение ленты на входе; $q_{нт}$ — натяжение ленты; $u_{нам}$ — скорость мокрой намотки композитных оболочек сосудов давления; $v_в$ — объемное содержание волокна; $T_{вх}$ — температура волокна на входе; $T_{св}$ — температура жидкого связующего; $\eta_{св}$ — вязкость жидкого связующего; $\Phi_{кон}$ — угол контакта нити с роликом

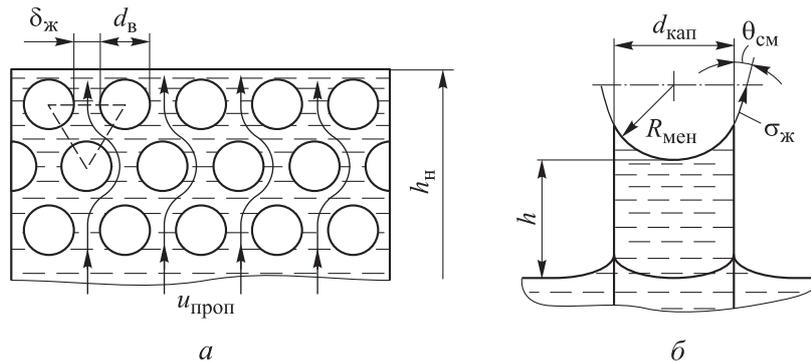


Рис. 5. Схема течения жидкости между волокнами по каналам пористой структуры наполнителя (а) и капиллярного всасывания жидкого связующего в межволоконное пространство (б):

$\delta_ж$ — толщина межволоконной прослойки жидкого связующего; $h_н$ — толщина нити; $u_{проп}$ — скорость пропитки; $R_{мен}$ — радиус кривизны мениска (сферы); $\theta_{см}$ — угол смачивания волокна связующим; h — высота канала капилляра; $d_{кап}$ — условный диаметр канала капилляра

Если канал капилляра (рис. 5, б) имеет условный диаметр $d_{кап}$, то давление $p_{кап}$ можно определить по формуле

$$p_{кап} = \frac{2\sigma_ж}{R_{мен}} = \frac{2\sigma_ж \cos \theta_{см}}{r_{кап}} = \frac{4\sigma_ж \cos \theta_{см}}{d_{кап}}, \quad (5)$$

где $\sigma_ж$ — поверхностное натяжение жидкости, Н/м.

Для жидкостей различных видов величина поверхностного натяжения $\sigma_ж$, или погонная сила, различна: для растворителей (спирта,

ацетона) поверхностное натяжение $\sigma_{\text{ж}} = (25...30) \cdot 10^{-3}$ Н/м; для связующих (полиэфирных, эпоксидных) $\sigma_{\text{ж}} = (75...100) \cdot 10^{-3}$ Н/м, а для воды $\sigma_{\text{ж}} = 72,8 \cdot 10^{-3}$ Н/м.

Продолжительность пребывания наполнителя при намотке в жидком связующем определяется скоростью движения ленты и размерами пропиточной ванны. В любом случае процесс пропитки весьма скоротечен, поэтому необходимо знать время проникновения связующего через толщину наматываемой ленты из нитей.

Скорость пропитки волокнистой структуры по толщине нити $h_{\text{н}}$ (см. рис. 5, а) или ленты $h_{\text{л}}$ может быть найдена из уравнения Дарси [11, 12]:

$$u_{\text{Д}} = \frac{dh}{d\tau} = \frac{K_{\text{Д}} p_{\text{кап}}}{\eta_{\text{ж}} h_{\text{л}}}, \quad (6)$$

где $K_{\text{Д}}$ — коэффициент Дарси, или коэффициент проницаемости пористой среды жидкостью, мм²; $p_{\text{кап}}$ — капиллярное давление пропитки, Па; $\eta_{\text{ж}}$ — вязкость жидкого связующего или раствора, Па·с.

Под проницаемостью понимается способность пористого материала пропускать через себя жидкость под действием приложенного градиента давления, т. е. проницаемость представляет собой проводимость пористой среды по отношению к жидкости. В общем случае проницаемость волокнистого наполнителя зависит от объемного содержания и удельной поверхности волокон, обтекаемых жидкостью.

Если подставить давление $p_{\text{кап}}$ из формулы (5) в уравнение (6), то получится выражение для скорости капиллярной пропитки волокнистой ленты:

$$u_{\text{кап}} = \frac{dh}{d\tau} = \frac{4K_{\text{Д}} \sigma_{\text{ж}} \cos \theta_{\text{см}}}{\eta_{\text{ж}} h_{\text{л}} d_{\text{в}}}.$$

Определение вязкости связующего. Важнейшим технологическим свойством термореактивных связующих, влияющих на скорость и качество пропитки при мокром способе намотки, является вязкость. Вязкостью, или внутренним трением, называют свойство жидкости сопротивляться взаимному перемещению ее частиц (слоев), вызванному действием приложенной к жидкости силы. Вязкость связующего можно регулировать его подогревом в пропиточной ванночке. Изменение условной вязкости эпоксидных связующих от температуры по вискозиметру ВЗ-1 и от времени выдержки при данной температуре [2, 9, 10, 13] показаны на рис. 6.

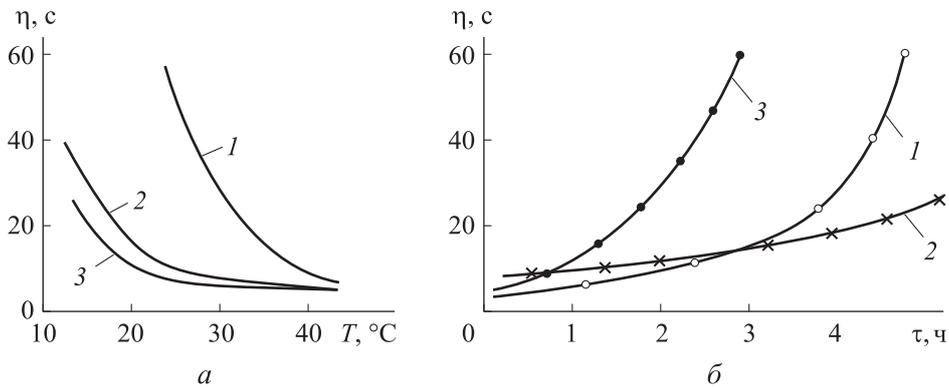


Рис. 6. Зависимость условной вязкости η связующих ЭДТ-10 (1), УП-612М (2) и ЭХД-М (3) от температуры T (а) и времени выдержки при данной температуре τ (б)

Динамическая вязкость определяется по формуле

$$\eta_{\text{ж}} = t\rho_{\text{ж}}K_{\text{ВЗ-1}}, \text{ Па}\cdot\text{с}, \quad (7)$$

где t — условная вязкость в секундах, определяемая по ВЗ-1; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкого связующего; $K_{\text{ВЗ-1}}$ — константа вискозиметра, $K_{\text{ВЗ-1}} = 12,37 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2/\text{с}^2$ [1].

Например, условная вязкость связующего ЭДТ-10 при температуре 60 °С по ВЗ-1 составляет $t = 17$ с, а его плотность $\rho_{\text{ж}} = 1,2 \text{ г}/\text{см}^3$. Если подставить значения этих величин в (7), то можно определить оптимальное значение динамической вязкости, принятое в производстве композитных конструкций, изготовляемых с использованием мокрого способа намотки: $\eta_{\text{ж}} = 17 \cdot 1,2 \cdot 12,37 \cdot 10^{-6} = 0,252 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Для медленного установившегося течения жидкости через однородную пористую волокнистую структуру коэффициент проницаемости Дарси в (6) может быть определен из уравнения Козени — Кармана [11]

$$K_{\text{Д}} = \frac{d_{\text{в}}^2 (1 - v_{\text{в}})^3}{32k_{\text{изв}} v_{\text{в}}^2}, \quad (8)$$

где $d_{\text{в}}$ — диаметр волокна в нити, $d_{\text{в}} = 8 \text{ мкм}$; $k_{\text{изв}}$ — коэффициент извилистости пути l течения жидкости через слой пористой ленты поперек волокон (см. рис. 5, а); $k_{\text{изв}} = \frac{1}{h_{\text{д}}} = 1,2 \dots 1,25$ для коэффициента оптимального объемного содержания волокон $v_{\text{в.ср}} = 0,68$.

Подставив числовые значения указанных величин в уравнение (8), можно рассчитать значение коэффициента проницаемости Дарси: $K_D = 0,133 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2$.

Скорость капиллярной пропитки $u_{\text{кап}} = u_D$ нити или ленты зависит от поверхностного натяжения эпоксидного связующего $\sigma_{\text{ж}} = 90 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$, краевого угла смачивания $\theta_{\text{см}} = 20^\circ$, вязкости связующего $\eta_{\text{ж}} = 0,25 \text{ Па} \cdot \text{с}$, диаметра волокна $d_{\text{в}} = 8,0 \text{ мкм}$ и коэффициента K_D . Подстановка в уравнение (6) полученных числовых значений даст

$$u_{\text{кап}} = 0,72 \text{ мм/с} = 43,2 \text{ мм/мин.}$$

Разделив толщину наматываемой ленты (нити) $h_L = 0,25 \text{ мм}$ на скорость капиллярной пропитки $u_{\text{кап}} = 43,2 \text{ мм/мин}$, можно найти время капиллярной пропитки ленты (нити) $\tau_{\text{кап}} = 0,0058 \text{ мин} = 0,347 \text{ с}$. В среднем скорость мокрой намотки композитных оболочек сосудов давления $u_{\text{нам}} = 20 \text{ м/мин}$, поэтому несложно определить протяженность (или длину) контактирования ленты со связующим $L_{\text{ван}}$ в пропиточной ванне намоточного станка: $L_{\text{ван}} = u_{\text{нам}} \tau_{\text{кап}} = 116 \text{ мм}$.

Заключение. Получены аналитические зависимости, определяющие размер капиллярного канала, объемное содержание волокна в композиции, скорость и время капиллярной пропитки волокнистой ленты, которые целесообразно использовать при проектировании пропиточно-натяжного тракта намоточного станка. Приведены технологические приемы, позволяющие:

– повысить качество пропитки (снижение количества пор до 1...2 %). Нагрев волокнистого наполнителя до температуры $T_{\text{вх}} = 120...130 \text{ }^\circ\text{C}$ перед пропиткой в ванночке обеспечивает лучшее удаление влаги из волокнистой структуры и повышает смачивание волокон. Вакуумирование волокнистого наполнителя до значений $p_{\text{вак}} = 20...30 \text{ кПа}$ обеспечивает лучшее удаление воздуха и паров влаги из волокнистой структуры перед поступлением в ванну со связующим. Последовательные обжатие и отжим пропитанного волокнистого наполнителя подвижными роликами, ножами, упругой фильерой или клиновой камерой повышают качество пропитки и регулируют содержание связующего волокнистого ПКМ на требуемом уровне;

– определить значения оптимального содержания волокна в композиции. Коэффициент объемного содержания волокон, при котором достигается максимальная прочность на растяжение однонаправленных

ПКМ, для углепластиков составляет $v_{в.опт}^{уп} = 0,62...0,64$, стеклопластиков — $v_{в.опт}^{сп} = 0,65...0,67$, органопластиков — $v_{в.опт}^{оп} = 0,69...0,71$;

– рассчитать величины натяжения нитей при намотке композитных конструкций. Из экспериментальных исследований [13] известно, что оптимальная величина натяжения ленты при намотке для углепластиков должна составлять $q_{в.нт}^{уп} = (0,05...0,07)\sigma_{нить}^{уп}$, стеклопластиков — $q_{в.нт}^{сп} = (0,1...0,12)\sigma_{нить}^{сп}$, органопластиков — $q_{в.нт}^{оп} = (0,15...0,17)\sigma_{нить}^{оп}$, где $\sigma_{нить}$ — прочность на растяжение нити в состоянии намотки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Комков М.А. Проектирование конструкции и технологии изготовления намоткой из композиционных материалов оболочек торовых сосудов давления. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2004, № 3, с. 51–65.
- [2] Власенко А.В., Скрябин В.В. Применения перспективных композиционных материалов для проектов ракетно-космической техники. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2016, т. 1, № 1, с. 71–73.
- [3] Лебедева О.В., Сипкина Е.И. Полимерные композиты и их свойства. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*, 2022, т. 12, № 2, с. 192–207.
- [4] Котомина С.В., Обидин И.М., Павлючкова Е. А. Расчет прочности адгезионной связи армирующих волокон с полимерами по методу «петли». *Механика композитных материалов*, 2022, т. 58, № 1, с. 197–212.
- [5] Комков М.А. Реологические свойства полимерных связующих, используемых при намотке изделий из композиционных материалов. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2012, № 3, с. 30–35.
- [6] Комков М.А., Тарасов В.А. Влияние вязкости связующего в пропиточной ванне на пористость композита при мокром способе намотке. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 12, с. 192–199. DOI: 10.7463/1214.0745284
- [7] Белов П.А., Бородулин А.С., Кобец Л.П., Малышева Г.В. Кинетика пропитывания волокон связующим. Градиентное обобщение уравнений Навье — Стокса — Дарси. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2015, № 12, с. 2–6.
- [8] Нелюб В.А., Бородулин А.С., Кобец Л.П., Малышева Г.В. Капиллярная гидродинамика олигомерных связующих. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2016, № 3, с. 43–48.
- [9] Комков М.А., Тарасов В.А., Кузнецов В.М. Исследование влияния вязкости эпоксидных связующих на степень пропитки волокнистых наполнителей. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2015, № 4, с. 24–27.
- [10] Komkov M.A., Tarasov V.A., Kuznetsov V.M. The influence of epoxide resin viscosity on impregnation of fiber reinforcement. *Polymer Science. Series D*, 2015, vol. 8, iss. 4, pp. 292–295. DOI: 10.1134/S1995421215040073
- [11] Маскет М. *Течение однородных жидкостей в пористой среде*. Москва–Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2006, 640 с.
- [12] Леонтьев Н.Е. *Основы теории фильтрации*. Москва, Изд-во ЦПИ при механико-математическом факультете МГУ, 2009, 88 с.

- [13] Комков М.А., Тарасов В.А. *Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 431с.

Статья поступила 05.11.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Комков М.А., Васильева Т.В., Долгих А.И. Факторный анализ подготовки волокнистой ленты при мокром способе намотки композитных конструкций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 3. EDN ТКУВМВ

Комков Михаил Андреевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: komkov.m.a@bmstu.ru, m_komkov@list.ru

Васильева Татьяна Владимировна — ст. преподаватель кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: vasilievatv@bmstu.ru

Долгих Анна Игоревна — канд. филос. наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: a.dolgikh@bmstu.ru

Factor analysis of the fibrous tape preparation for the composite structure wet winding

© M.A. Komkov, T.V. Vasilieva, A.I. Dolgikh

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

The paper considers a set of parameters in formation and impregnation of the fibrous tape from threads, rovings and bundles with liquid binders in the composite structures manufacture using the wet winding technique. It analyzes a body of factors, including binder viscosity and capillary impregnation rate, which significantly affect the quality and time of the fibrous winding tape impregnation. The paper shows that preliminary physicochemical preparation and finishing of the surface of the fibers used significantly increases the adhesive bond at the fiber boundary with the polymer matrix, which, in turn, sharply reduces porosity and significantly increases shear strength of the unidirectional composite material. The paper presents technological techniques and methods that ensure an increase in the volume content of the main types of fibers in the wound tape to their optimal values, where maximum strength of the unidirectional composite materials is achieved at tension.

Keywords: *wet winding technique, fibrous tape, capillary impregnation, fiber volumetric content, composite material*

REFERENCES

- [1] Komkov M.A. Proektirovanie konstruksiy i tekhnologii izgotovleniya namotkoy iz kompozitsionnykh materialov obolochek torovykh sosyдов davleniya [Design of the structure and manufacturing technology of shells of the torus pressure vessels by winding from the composite materials]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2004, no. 3, pp. 51–65.
- [2] Vlasenko A.V., Scriabin V.V. Primenenie perspektivnykh kompozitsionnykh materialov dlya proektov raketno-kosmicheskoy tekhniki [Applications of advanced composite materials for project rocket-space technics]. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavtiki — Current Problems of Aviation and Cosmonautics*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 71–73.
- [3] Lebedeva O.V., Sipkina E.I. Polimernye kompozity i ikh svoystva [Polymer composites and their properties]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya — Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 2022, vol. 12, no. 2, pp. 192–207.
- [4] Kotomina S.V., Obidin I.M., Pavlyuchkova E.A. Raschet prochnosti adgezivnoy svyazi armiruyushchikh volokon s polimerami po metodu “petli” [Adhesive bond strength calculation of reinforcing fibers with polymers by the “loop” method]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov — Mechanics of Composite Materials*, 2022, vol. 58, no. 1, pp. 197–212.
- [5] Komkov M.A. Reologicheskie svoystva polimernykh svyazuyushchikh, ispolzuemykh pri namotke izdeliy iz kompozitsionnykh materialov [Rheological properties of polymer binders used in the winding of products of composite materials]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii — Polymer Science. Series D*, 2012, no. 3, pp. 30–35.

- [6] Komkov M.A., Tarasov V.A. Vliyanie vyazkosti svyazuyushchego v propitochnoy vanne na poristost kompozita pri mokrom sposobe namotki [A binder viscosity effect on the wet-wound composite porosity in the impregnating bath]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 12, pp. 192–199. <https://doi.org/10.7463/1214.0745284>
- [7] Belov P.A., Borodulin A.S., Kobets L.P., Malysheva G.V. Kinetika propityvaniya volokon svyazuyushchim. Gradientnoe obobshchenie uravneniy Navye—Stoksa—Darsi [Kinetics of the fiber impregnation with a binder. Gradient generalization of the Navier—Stokes—Darcy equations]. *Vse materialy. Entsiklopedichesiy spravochnik — All Materials. Encyclopedic Reference Book*, 2015, no. 12, pp. 2–6.
- [8] Nelyub V.A., Borodulin A.S., Kobets L.P., Malysheva G.V. Kapillyarnaya gidrodinamika oligomernykh svyazuyushchikh [Capillary hydrodynamics of the oligomeric binders]. *Vse materialy. Entsiklopedichesiy spravochnik — All Materials. Encyclopedic Reference Book*, 2016, no. 3, pp. 43–48.
- [9] Komkov M.A., Tarasov V.A., Kuznetsov V.M. Issledovanie vliyaniya vyazkosti epoksidnykh svyazuyushchikh na stepen propitki voloknistykh napolniteley [The influence of epoxide resin viscosity on impregnation of fiber reinforcement]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii — Polymer Science. Series D*, 2015, no. 4, pp. 24–27.
- [10] Komkov M.A., Tarasov V.A., Kuznetsov V.M. The influence of epoxide resin viscosity on impregnation of fiber reinforcement. *Polymer Science. Series D*, 2015, vol. 8, iss. 4, pp. 292–295. <https://doi.org/10.1134/S1995421215040073>
- [11] Muskat M. *The flow of homogeneous liquids through porous medium*. J.W. Edwards Inc., Ann Arbor, Michigan, 1946 [In Russ.: Masket M. Techenie odnorodnykh zhidkostey v poristoy srede. Moscow – Izhevsk, Institut Kompyuternykh Issledovaniy Publ., 2006, 640 p.].
- [12] Leontyev N.E. *Osnovy teorii filtratsii* [Fundamentals of the filtration theory]. Moscow, TsPI pri Mekhaniko-Matematicheskome Fakultete MGU Publ., 2009, 88 p.
- [13] Komkov M.A., Tarasov V.A. *Tekhnologiya namotki kompozitnykh konstruksiy raket i sredstv porazheniya* [Winding technology for composite structures of missiles and weapons]. Moscow, BMSTU Publ., 2011, 431 p.

Komkov M.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: komkov.m.a@bmstu.ru, m_komkov@list.ru

Vasilieva T.V., Senior Lecturer, Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: vasilievatv@bmstu.ru

Dolgikh A.I., Cand. Sc. (Philosophy), Associate Professor, Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: a.dolgikh@bmstu.ru