

М.И. Душин¹, А.В. Хрульков¹, Р.Р. Мухаметов¹, Л.В. Чурсова¹

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ МЕТОДОМ ПРОПИТКИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Рассмотрены особенности метода пропитки под давлением при изготовлении изделий из полимерных композиционных материалов. Представлены данные исследования свойств углеродных наполнителей – ткани УТ-900 и ленты УОЛ-300-2-3к – в зависимости от прикладываемого давления уплотнения и связанного с ним объемного наполнения волокном, а также характеристики проницаемости наполнителей и вязкости связующего, свойства полученных пластиков.

Ключевые слова: пропитка, давление, продолжительность, проницаемость, вязкость, свойства.

M.I. Dushin¹, A.V. Khrulkov¹, R.R. Mukhametov¹, L.V. Chursova¹

CHARACTERISTIC FEATURES OF MANUFACTURING PC PRODUCTS BY THE PRESSURE INFILTRATION METHOD

The features of the pressure infiltration method, used for the manufacture of PC products are considered in the present paper. The study results are given for the properties of carbon fillers (such as UT-900 fabric and UOL-300-2-3k tape) depending on the applied pressure and associated with it – the volumetric fibrous filling including the filler permeability characteristics and binder toughness.

Keywords: infiltration, pressure, duration, permeability, toughness, properties.

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Разработанный в 50-х годах XX века метод пропитки под давлением для изготовления стеклопластиковых изделий в настоящее время привлекает все большее внимание зарубежных исследователей для изготовления крупногабаритных углепластиковых деталей как методом RTM (пропитка под давлением), так и новым RFI (инжекция пленочного связующего в пакет армирующего наполнителя в направлении его толщины). Оба метода обеспечивают высокое качество и практически готовую форму изделий при минимальных затратах ручного труда и снижение стоимости производства.

Сущность метода пропитки под давлением состоит в том, что заключенный в форму армирующий наполнитель пропитывается жидким связующим, поступающим в форму за счет избыточного давления. Избыточное давление может быть создано с помощью одного вакуума (метод двух шаблонов [1] и др.), с помощью вакуума и давления, а также с помощью одного давления.

Методом пропитки под давлением на протяжении десятилетий изготавливалось и изготавливается до настоящего времени большое количество стеклопластиковых крупногабаритных изделий, таких как шлюпки, лопасти гребных винтов, лопасти турбин, обтекатели радиолокационных антенн самолетов, ракет и др. Этим методом были изготовлены носовой обтекатель и элементы передней кромки крыла космического корабля «Буран» на основе углеродного армирующего наполнителя и фенольного связующего с по-

следующей карбонизацией его в бескислородной среде. В основу процесса пропитки положена теория фильтрации вязких жидкостей в пористой среде, разработанная в 1856 году французским инженером Дарси на основании экспериментальных исследований прохождения жидкости через песчаные грунты (фильтры). На основании классических экспериментов инженер сделал весьма простой вывод (закон Дарси): дебит воды Q через слой фильтра прямо пропорционален площади поверхности песка S и разности между давлением жидкости ΔP при входе и выходе из слоя и обратно пропорционален толщине H слоя [2]. Выражая эту зависимость аналитически, имеем:

$$Q = \frac{K \cdot \Delta P \cdot S}{H}, \quad (1)$$

где K – константа, характеризующая песок.

Общая постоянная, которая определяет собой в динамической форме полностью пористую среду как носителя однородной жидкости при ламинарном течении, обозначается символом K и выражает собой проницаемость, известную под названием «коэффициента проницаемости», и входит в формулу скорости течения

$$V = - \frac{K}{\mu} \frac{dp}{dx}, \quad (2)$$

где μ – вязкость жидкости; dp/dx – градиент падения давления.

На основании выражения (2) проницаемость пористой среды равна объему жидкости с вязкостью, равной 1, проходящей через поперечное сечение пористой среды, равное 1, в единицу времени под действием перепада давления, также равного 1. Эта постоянная определяется, несомненно, только структурой среды и совершенно не зависит от природы жидкости. Размерность проницаемости соответствует размерности площади поверхности, или

$$K = [S^2]. \quad (3)$$

В физическом смысле коэффициент проницаемости характеризует величину площади сечения каналов пористой среды, по которым в основном происходит фильтрация. Коэффициент проницаемости K определяет скорость фильтрации, поэтому для расчета продолжительности пропитки при изготовлении изделий необходимо прежде всего знать значение K для пакета армирующего наполнителя. При этом продолжительность пропитки должна быть меньше времени жизнеспособности связующего при температуре пропитки. Проницаемость (пропускная способность) пористой среды армирующих наполнителей обусловлена особенностью строения их порового пространства, состоящего в основном из двух видов пористости: поры в нитях (микропоры), образованные между отдельными моноволокнами, из которых состоит нить, а также поры между нитями (макропоры). Диаметр моноволокон колеблется от 7 до 8–10 мкм, поэтому между ними, вследствие неплотного прилегания друг к другу, образуются мельчайшие каналы – микропоры. Кроме того, в структурах, образующих пористость в пучках моноволокон (нити или жгуты), где соприкасаются соседние моноволокна, образуются так называемые области застойной жидкости, не участвующей в общем течении связующего. Это дополнительно уменьшает истинную эффективную пористость структуры нитей.

Известно [3], что проницаемость зависит от «гидравлического» радиуса в квадрате поперечного сечения порового просвета, поэтому проницаемость через жгуты и нити очень мала, следовательно, в расчетах продолжительности пропитки можно не учитывать пористость нитей и жгутов. Установлено [3], что при пористости, равной

0,13 и ниже, проницаемость практически равна нулю и называется «порогом проницаемости». Кроме того, вследствие чрезвычайно малого поперечного сечения пор и малых скоростей течения в них, вязкость связующего играет значительную роль, а она, как правило, значительно больше вязкости воды, с которой работали исследователи по определению проницаемости грунтов. Между отдельными нитями в тканях образуются макропоры, значительно (в 10–100 и более раз) превосходящие по размерам микропоры. Они-то и являются основным проводником при движении связующего в процессе пропитки, заполнение же межволоконных каналов происходит уже позже, когда фронт пропитки ушел вперед и когда перекрывается выходной трубопровод и производится так называемое выравнивание давления.

Принцип измерения проницаемости пористой среды в лабораторных условиях состоит в непосредственном определении расхода жидкости определенной вязкости через единицу площади образца среды и градиента давления, вызывающего это течение, а также в подсчете коэффициента проницаемости K из выражения [2]:

$$K = \frac{\mu \cdot Q \cdot H}{S \cdot (P_1 - P_2)}, \quad (4)$$

где μ – вязкость жидкости, мПа·с; Q – расход жидкости, см³/с; H – длина испытуемого образца, см; S – площадь поперечного сечения образца, см²; P_1 и P_2 – величина давления на входе и выходе жидкости, МПа.

Весьма существенное значение для правильной оценки коэффициента проницаемости имеет способ крепления образца, предусматривающий исключение образования обходного канала.

Проницаемость является основной физической характеристикой пористых материалов (в данном случае – армирующих наполнителей), которая, в свою очередь, зависит от открытой (эффективной) пористости и особенно от размера самих пор.

Следует отметить, что формула Дарси выводилась для структур, практически не изменяющих своей пористости от приложенного давления (песчаники, керамика, различные грунты и т. п.). Пористость же армирующих наполнителей – величина переменная и зависит от прикладываемого давления, т. е. является функцией этого давления, что необходимо учитывать как при определении коэффициента проницаемости, так и при расчете продолжительности пропитки. С этой целью проведены исследования по влиянию приложенного давления на изменение пористости армирующих наполнителей на основе углеродной жгутовой ткани УТ-900 и ленты УОЛ-300-2-3к. Установлено, что для уплотнения этих материалов объемного содержания волокна 0,65–0,7, соответствующего 35–40%-ной пористости ткани УТ-900 и 27–35%-ной – для ленты УОЛ-300, требуются незначительные усилия ~0,05–0,06 МПа (рис. 1). Видно, что при таком давлении наблюдается резкий переход направления кривой изменения толщины монослоя от приложенного давления – с этого момента начинается уплотнение ткани и ленты в зонах пересечения нитей основы и утка, а это, в свою очередь, резко меняет размер пор между нитями, что уменьшает величину проницаемости K .

Авторами сконструировано приспособление (форма) для определения коэффициента проницаемости, в котором исключается возникновение обходного канала. Рабочий зазор формы составляет 15 мм, но за счет наличия герметизирующих прокладок в верхней и нижней крышках и специальных ограничительных упоров размер зазора изменялся от 20 до 15 мм. Это позволило, не разбирая форму, изменять величину пористости пакета уложенных заготовок ткани (толщину монослоя) от 53 до 30%-ной пористости (от 0,3 до 0,195 мм толщины монослоя) – для ткани УТ-900 и от 55 до 44,6%-ной пористости (от 0,27 до 0,22 мм толщины монослоя) – для углеродной ленты УОЛ-300-2-3к.

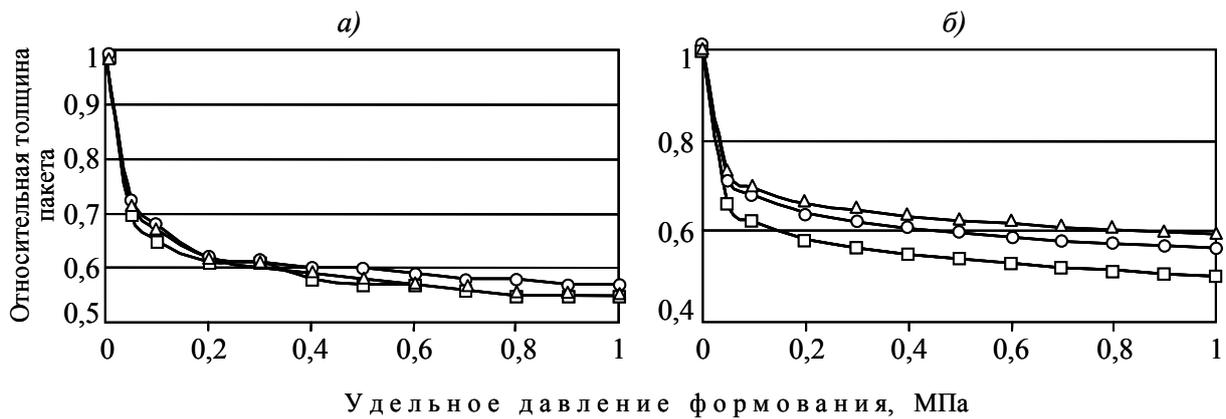


Рис. 1. Относительная толщина пакета углеродных ткани УТ-900 (а) и ленты УОЛ-300 (б) при количестве слоев 20 (□), 30 (○) и 40 (Δ)

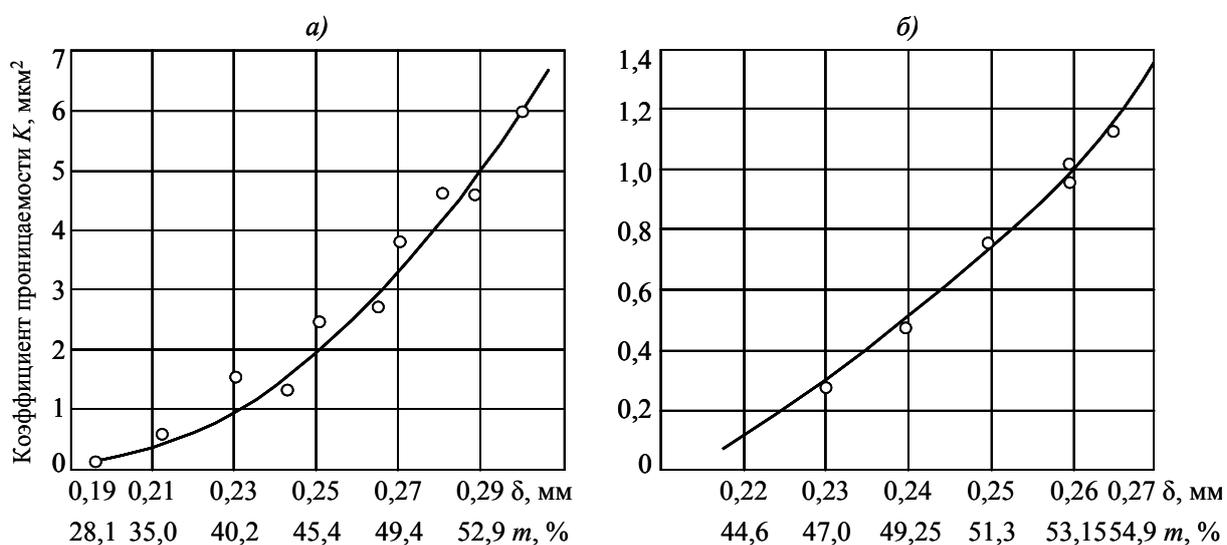


Рис. 2. Изменение коэффициента проницаемости углеродных ткани УТ-900 (а) и ленты УОЛ-300 (б) в зависимости от величины монослоя (δ – толщина монослоя; m – пористость)

Определение проницаемости углеродных наполнителей проводили начиная с максимальной толщины монослоя, уменьшая ее постепенно с помощью соответствующих ограничительных упоров – до минимальной. Ввиду того что течение жидкости (воды) на сконструированном приспособлении происходило не линейно от одного торца до другого, а от периферии к центру, подсчет коэффициента проницаемости проводился по формуле:

$$K = \frac{Q \cdot \mu \cdot \ln r_1 / r_2}{2\pi \cdot H \cdot \Delta P}, \quad (5)$$

где Q – объемный расход жидкости, $\text{см}^3/\text{с}$; r_1 и r_2 – радиусы запитывающего и выходного сечения, см ; H – высота пакета наполнителя, см ; ΔP – перепад давления.

На основании экспериментальных измерений коэффициента проницаемости построены кривые изменения K от δ (m) для ткани УТ-900 и ленты УОЛ-300 (рис. 2). Видно, что для ткани УТ-900 при пористости $< 43\%$ меняется направление кривой и резко умень-

шается значение коэффициента проницаемости. Причем при пористости ~30% коэффициент проницаемости составляет всего $0,2 \text{ мкм}^2$, а при пористости ~54% – $K=6 \text{ мкм}^2$, т. е. изменение пористости на 44,4% приводит к изменению коэффициента проницаемости на 96,7% (пористость изменилась в 1,8 раза, проницаемость – в 30 раз).

Для ленты УОЛ-300 коэффициент проницаемости значительно меньше при той же пористости, чем для ткани УТ-900, причем при пористости 44,6% для ленты УОЛ-300 он составляет $0,11 \text{ мкм}^2$, а для ткани УТ-900: $2,5 \text{ мкм}^2$, т. е. меньше в 22,7 раза. Причем на кривой изменения проницаемости в зависимости от пористости отсутствует резкий перегиб, что зависит, очевидно, от того, что даже при пористости ~55% отсутствуют межнитяные макропоры из-за однонаправленности структуры ленты (при укладке слоев межжгутовые зазоры заполняются жгутами следующего слоя).

Согласно формуле (2) скорость пропитки прямо пропорционально зависит от коэффициента проницаемости и перепада давления и обратно пропорциональна вязкости связующего. Поэтому для ускорения процесса пропитки коэффициент проницаемости должен быть максимальным, а этого можно достичь только путем повышения пористости пакета армирующего наполнителя до 50% и более, но при этом низкое наполнение волокном, определяющим прочностные свойства пластика, приведет к их низким значениям. Поэтому на практике для ускорения процесса пропитки при изготовлении антенных обтекателей из стеклопластиков пропитку производят на так называемых пропиточных упорах, позволяющих увеличить рабочий зазор формы, а после пропитки производят уплотнение пропитанного пакета до требуемой толщины с помощью формующих упоров. При этом удаляются излишки связующего и происходит более полная пропитка межволоконных зазоров в нитях. Таким образом, основной особенностью процесса пропитки под давлением является обеспечение условия пропитки пакета армирующего наполнителя при максимально возможной его пористости. При этом в пресс-форме необходимо уплотнить пакет армирующего наполнителя до требуемого значения после пропитки.

С этой особенностью связана другая, не менее важная особенность – обеспечение заданного рабочего зазора пресс-формы, определяющего содержание связующего в пластике. При проектировании и изготовлении пресс-формы конструктором назначается допуск на отклонение от заданных размеров. Причем величина отклонения от номинала не должна превышать отклонение от заданного содержания связующего в пластике. Если весовое содержание связующего в пластике задано конструктором в пределах $40 \pm 2\%$, то и допуск на величину рабочего зазора не должен превышать $\pm 5\%$ от номинала. Поэтому чем меньше величина рабочего зазора, тем жестче должен быть допуск на размер. Таким образом, на изменение содержания связующего в пластике влияет не сам допуск на точность получения рабочего зазора пресс-формы, а величина его отношения к номинальному значению зазора. Отклонение от допуска в сторону уменьшения рабочего зазора приведет к уплотнению армирующего материала, а оно, в свою очередь, может привести к непропитке переуплотненного участка или снижению содержания связующего. Увеличение рабочего зазора приведет к увеличению как толщины изделия, так и содержания связующего.

Поскольку рабочий зазор пресс-формы определяется конструкцией формы и есть величина заданная, то на содержание связующего в пластике влияет как количество уложенных заготовок наполнителя, так и величина допуска на рабочий зазор, а также исходная толщина используемой ткани (чем больше толщина используемой ткани, тем больше будет колебание содержания связующего в пластике при заданном рабочем зазоре пресс-формы). Поэтому при проектировании оснастки необходимо учитывать толщину монослоя используемой ткани в пластике. Рабочий зазор должен быть

спроектирован с учетом этой толщины, т. е. должен включать количество заготовок ткани, кратное толщине монослоя.

Следующая особенность метода пропитки под давлением связана со свойствами самих армирующих наполнителей. Толщина как стекло-, так и углеткани в исходном состоянии на 50–70% больше толщины монослоя в композите. Поэтому, если пресс-форма не позволяет произвести уплотнение пакета армирующего наполнителя, то его необходимо уплотнить предварительно перед укладкой в пресс-форму или непосредственно в самой форме. За рубежом для этих целей используют специальные прошивные машины, чтобы уплотнить пакет непосредственно в пресс-форме или на соответствующем столе. Эти установки способны изготавливать заготовки (так называемые «преформы») длиной >15 м, ~3 м шириной и до 40 мм толщиной [4]. При этом показано, что прошивка увеличивает сопротивление расслаиванию материала при ударах, что, в свою очередь, повышает несущую способность конструкции. Метод сшивания является весьма рентабельным для изготовления стойких к повреждениям конструкций из углепластиков. НАСА в США занимается исследованием прошивных структур, их пропиткой и исследованием свойств полученных материалов с 1988 г. [5]. При прошивке отпадает необходимость в средствах противоскольжения заготовок ткани, обладающих низким коэффициентом трения. Чем выше уплотнение пакета армирующего наполнителя, тем меньше коэффициент проницаемости, но из-за наличия прошивки образуются дополнительные каналы пропитки, по которым происходит быстрая пропитка, поскольку их много и они расположены близко друг от друга. Таким образом прошивные каналы становятся микро-запитывающими участками по вертикали, т. е. не вдоль, а поперек пакета армирующего наполнителя, и от них пропитка происходит в плоскости укладки. Однако прошивка пакета армирующего наполнителя нарушает, вернее, разрушает структуру ткани, что может сказаться на свойствах получаемых композиционных материалов. Поэтому при выборе метода уплотнения пакета армирующего наполнителя следует учитывать влияние прошивки на потерю свойств композита. Использование заранее сшитых заготовок позволяет отказаться от верхней части пресс-формы (матрицы), заменяемой вакуумным мешком, а пропитку заготовки производить не вдоль укладываемых слоев, а в поперечном направлении, используя для этих целей пленочное связующее, превращающееся в жидкость при нагревании. При этом продолжительность пропитки резко уменьшается, и процесс пропитки можно объединить с автоклавным формованием, т. е. пропитку произвести в автоклаве с помощью вакуума, а затем, дав давление на пакет, уплотнить его до требуемой толщины. За рубежом метод носит название RFI.

Наряду с коэффициентом проницаемости K на скорость фильтрации, согласно формулы (2), влияет вязкость связующего (в обратной пропорциональности). Поэтому для повышения скорости пропитки необходимо использовать связующее с минимальной вязкостью. Однако вязкость связующего не является величиной постоянной, поэтому необходимо знать, как она меняется от температуры и во времени. Причем желательно, чтобы в процессе пропитки вязкость связующего, во-первых, была минимальной и, во-вторых, сохранялась бы постоянной.

Эпоксидные смолы, обладающие высокой вязкостью при комнатной температуре, для использования при изготовлении изделий методом пропитки под давлением, как правило, подогревают. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению жизнеспособности связующего. Поэтому необходимо найти оптимальную температуру подогрева связующего, обеспечивающую как снижение вязкости, так и сохранение ее длительно.

В работе для изготовления углепластиков методом пропитки под давлением использовалось вновь разработанное связующее ВСТ-1210 (ТУ 1-595-12-1042–2008), об-

ладающее весьма высокой вязкостью при комнатной температуре, поэтому для выбора режима пропитки были проведены исследования по изменению вязкости и жизнеспособности его от температуры. Свойства связующего приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства полициануратного связующего ВСТ-1210

Показатели	Значения показателей
Внешний вид и цвет	Высоковязкая смола коричневого цвета
Вязкость динамическая при 70°C, Па·с	0,30
Время желатинизации, мин, при температуре:	180±2°C
	200±2°C
Температура стеклования T_c , °C	240
Динамическая вязкость при температуре 70±2°C после выдержки в течение 1,5 ч при температуре 70±2°C, Па·с (не более)	0,30
Срок хранения связующего, мес (не менее)	3

Динамическую вязкость связующего ВСТ-1210 в зависимости от температуры определяли вискозиметром марки «Брукфильд» системы конус-плита. Определение жизнеспособности проводили на том же приборе после выдержки в термошкафу с заданной температурой.

На рис. 3 представлены данные по изменению вязкости связующего в зависимости от температуры, а также жизнеспособности при температурах 40; 60 и 80°C от продолжительности выдержки. Видно, что при температуре 80°C вязкость не изменяется в течение 90 мин. Эта температура и выбрана для пропитки. После определения коэффициента проницаемости K и характеристик вязкости связующего можно предварительно произвести расчет продолжительности пропитки пакетов наполнителей, а затем провести саму пропитку.

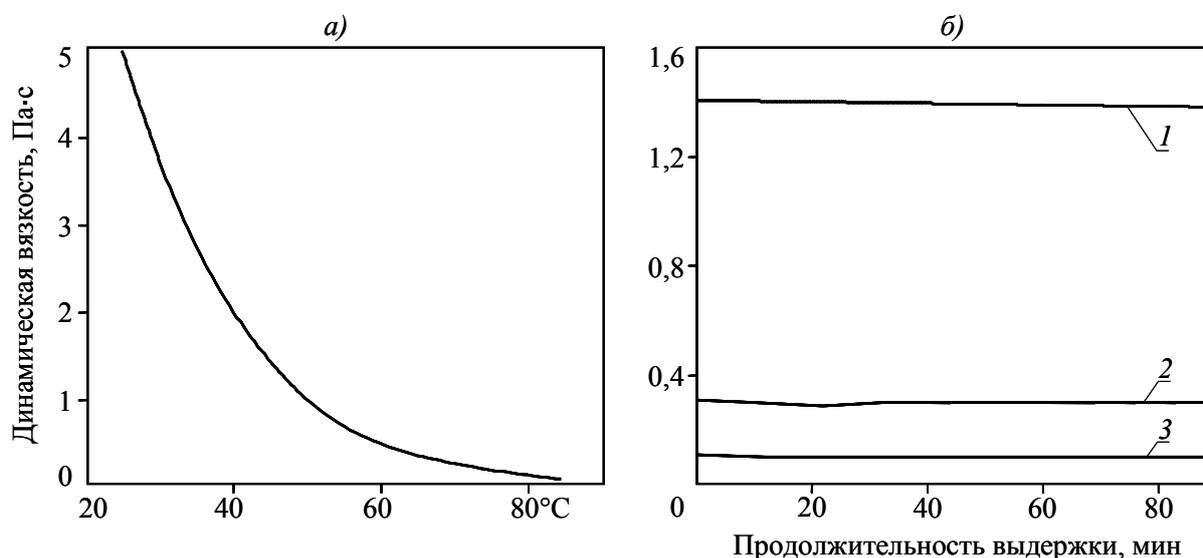


Рис. 3. Зависимость динамической вязкости связующего ВСТ-1210 от температуры (а) и продолжительности выдержки при температуре 40 (1), 60 (2) и 80°C (3) (б)

Расчет продолжительности пропитки проводили по формуле:

$$\tau = \frac{m \cdot \mu \cdot H^2}{2K \cdot \Delta P}, \quad (6)$$

где m – пористость армирующего наполнителя в долях единицы; μ – вязкость связующего, мПа·с; K – коэффициент проницаемости, мкм²; H – длина пути пропитки, см; ΔP – перепад давления, МПа.

Из формулы (6) видно, что продолжительность пропитки можно регулировать путем изменения перепада давления, однако следует помнить, что с увеличением давления необходимо повысить, во-первых, жесткость пресс-формы, а во-вторых, обеспечить крепление кромки пакета армирующего наполнителя, для того чтобы предотвратить сдвиг в начальный момент при подаче связующего, а также вследствие увеличения давления пропитки. Поэтому перед началом пропитки необходимо рассчитать давление пропитки, которое должно быть меньше силы трения между пакетом армирующего наполнителя и формообразующей оснасткой, по формуле [6]:

$$P_{\text{пр}} \leq P_{\text{пр.макс}} = \frac{2P_{\text{упл}} \cdot H \cdot f_{\text{тр}}}{h}, \quad (7)$$

где $P_{\text{упл}}$ – давление уплотнения пакета армирующего наполнителя, МПа; H и h – длина пропитки и толщина изделия, см; $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения пары «пакет наполнителя–поверхность формы».

Таким образом, все параметры, характеризующие особенности режима пропитки под давлением, присутствуют в формуле (6). Только два параметра, входящие в формулу, требуют непосредственного измерения – вязкость связующего и его жизнеспособность при температуре пропитки и коэффициент проницаемости K . Причем проницаемость армирующих наполнителей различна по основе, утку и в поперечном направлении. Поэтому для расчета продолжительности пропитки изделия необходимо определить коэффициент проницаемости в зависимости от схемы пропитки.

В работе оценивается возможность реализации свойств углеродного волокна (табл. 2), содержащегося в пластике в объеме ~60% (для УТ-900) и ~70% (для УОЛ-300), полученного методом пропитки под давлением расплавом полициануратного связующего из расчета толщины монослоя, близкой к максимальной (0,22 и 0,18 соответственно).

Таблица 2

Физико-механические свойства образцов углепластика на основе углеродных ткани УТ-900 и ленты УОЛ-300-2-3к

Свойства	Значения свойств* в зависимости от вида наполнителя	
	ткани УТ-900	ленты УОЛ-300-2-3к
Плотность, г/см ³	$\frac{1,50}{1,48-1,54}$	$\frac{1,55}{1,47-1,61}$
Содержание связующего, % (по массе)	$\frac{29,4}{27,8-30,7}$	$\frac{21,4}{20,5-22,6}$
Толщина монослоя углепластика, мм	$\frac{0,225}{0,22-0,23}$	$\frac{0,175}{0,17-0,18}$
Прочность при изгибе, МПа	$\frac{780}{706-914,5}$	$\frac{1930}{1704-2089}$
Модуль упругости при изгибе, ГПа	$\frac{61,2}{58,4-63,9}$	$\frac{142}{136-145}$
Прочность при сжатии, МПа	$\frac{445}{390-350}$	$\frac{980}{805-1085}$

* В числителе – средние значения, в знаменателе – минимальные и максимальные.

При отработке технологии изготовления углепластика установлено, что пропитка пакета, состоящего из углеродного наполнителя УОЛ-300, выложенного в направлении армирования, проходит значительно труднее, чем пропитка ткани УТ-900, из-за более плотной упаковки и низкого коэффициента проницаемости. При перекрестном армировании $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$ процесс пропитки облегчается, но при этом прочностные характеристики углепластика снижаются (прочность при сжатии 660 МПа вместо 900 МПа у углепластика с однонаправленной структурой армирования).

Известно, что водопоглощение зависит от типа и объемной доли связующего, пористости пластика и типа наполнителя и его поверхностной обработки.

Испытанию подвергались образцы углепластиков, которые выдерживали в холодной дистиллированной воде до 30 сут с промежуточной фиксацией количества поглощенной воды и в кипящей дистиллированной воде в течение 2 ч (по ГОСТ 4650–80). По окончании экспозиции образцы испытывали на прочность при изгибе (по ГОСТ 25.604–82) и межслоевом сдвиге (по ОСТ 1 90199–75). Результаты приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Водопоглощение углепластиков

Условия и продолжительность экспозиции	Привес, %, на наполнителе	
	УТ-900	УОЛ-300
В холодной дистиллированной воде в течение, сут:		
1	0,04	0,05
2	0,06	–
5	0,08	0,12
10	0,13	0,19
20	0,23	0,27
30	0,28	0,32
В кипящей дистиллированной воде в течение 2 ч	0,22	0,53

Видно, что водопоглощение минимально и за 30 сут составляет ~0,3% с тенденцией к некоторому увеличению на ~18% на наполнителе УОЛ-300. Испытания в дистиллированной кипящей воде в течение 2 ч показали превосходство углепластика на наполнителе УТ-900. Количество поглощенной воды в течение 2 ч кипячения практически соответствует 30-суточной выдержке в холодной воде. Поэтому в последующем образцы подвергали кипячению и исследовали прочность при изгибе и межслоевом сдвиге методом испытания на изгиб короткой балки.

Таблица 4

Водостойкость углепластиков

Свойства	Значения свойств углепластиков			
	исходные		после 2 ч кипячения	
	на наполнителе			
	УТ-900	УОЛ-300	УТ-900	УОЛ-300
Прочность при изгибе, МПа	810	1820	769	1590
Модуль упругости при изгибе, ГПа	63	146	61	141
Прочность при межслоевом сдвиге, МПа	55	78	50,6	77,5
Сохранение свойств, %	–	–	95	87

Анализ результатов таблицы показывает, что воздействие кипящей дистиллированной воды на углепластик с наполнителем из однонаправленной углеродной ленты УОЛ-300 выше, чем на углепластик на основе ткани УТ-900. Это еще раз свидетель-

ствует о более качественной пропитке углеродного наполнителя на основе тканой структуры УТ-900 ввиду меньшей плотности пакета и большего коэффициента проницаемости при прочих равных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2495640 США. 1950.
2. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. М.: Гостоптехиздат. 1949. С. 58.
3. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М.: Гостехиздат. 1947. С. 40.
4. Proctor P. Stitched composite wings eyed for future transports //Aviation Week Space Mechnol. 1988. August. P. 49–50.
5. Davis Jr. JG, Bohon H.L. First NASA Advanced Composites Technology Conference. NASA Conference Publication 3104. Seattle. October 1990. P. 6.
6. Виноградов В.М., Гончаренко В.А., Комаров Г.В. Моделирование в технологии полимерных деталей и изделий //Пластические массы. 2005. №1. С. 36–39.

REFERENCES LIST

1. Pat. 2495640 SShA. 1950.
2. Masket M. Techenie odnorodnyh zhidkostej v poristoj srede [For homogeneous fluids in porous media]. M.: Gostoptehizdat. 1949. S. 58.
3. Lejbenzon L.S. Dvizhenie prirodnyh zhidkostej i gazov v poristoj srede [Natural movement of liquids and gases in a porous medium]. M.: Gostehizdat. 1947. S. 40.
4. Proctor P. Stitched composite wings eyed for future transports //Aviation Week Space Mechnol. 1988. August. P. 49–50.
5. Davis Jr. JG, Bohon H.L. First NASA Advanced Composites Technology Conference. NASA Conference Publication 3104. Seattle. October 1990. P. 6.
6. Vinogradov V.M., Goncharenko V.A., Komarov G.V. Modelirovanie v tehnologii polimernyh detalej i izdelij [Modeling technology of polymeric parts and products] //Plasticheskie massy. 2005. №1. S. 36–39.