

УДК 629.7.017

СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПРОПИТКОЙ ПОД ВАКУУМОМ

© 2012 Д.И. Коган¹, М.И. Душин¹, А.В. Борщёв¹, Е.А. Вешкин², П.А. Абрамов², К.В. Макрушин²

¹ ФГУП ГНЦ «Всероссийский институт авиационных материалов» (ВИАМ), г. Москва

² Ульяновский научно-технологический центр ВИАМ

Поступила в редакцию 17.10.2012

В статье рассматриваются свойства конструкционных углепластиков изготовленных пропиткой под вакуумом

Ключевые слова: инфузия, проницаемость, углепластик

Одним из перспективных технологических процессов, улучшающих качество деталей и агрегатов самолетов и значительно снижающих затраты при их изготовлении, является применение технологий пропитки армирующего наполнителя под вакуумом – «инфузия». При этом возможно исключение из технологического цикла такого дорогостоящего оборудования как автоклав. При традиционном автоклавном формовании конструкция выкладывается из препрега, а затем помещается в автоклав, где создается необходимая температура и давление. В свою очередь, безавтоклавные технологии подразумевают сборку конструкции из сухого материала с пропиткой связующим под вакуумом. Применение этих технологий расширяет возможности конструктора по созданию более совершенной конструкции, дает повышение технологичности, качества, резкое снижение трудоемкости цикла и затрат, в том числе на приобретение дорогостоящего оборудования.

Как упоминалось выше, метод инфузии заключается в том, что находящийся в специальной обогреваемой емкости расплав связующего под действием вакуума подается в предварительно собранный на оснастке и герметично упакованный технологический пакет, в котором находятся слои сухого углеродного наполнителя, пропитывает их, вытесняя по мере заполнения формы оставшийся воздух. По окончании процесса пропитки оснастка нагревается и происходит процесс полимеризации связующего по заданному режиму.

Исходя из теории фильтрации, на скорость пропитки, существенно влияет проницаемость,

Коган Дмитрий Ильич, кандидат технических наук, ведущий-инженер. E-mail: admin@viam.ru

Душин Михаил Иванович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.

Борщёв Артём Валерьевич, инженер-технолог.

Вешкин Евгений Алексеевич, начальник сектора.

E-mail: untcviam@viam.ru

Абрамов Петр Александрович, ведущий инженер.

Макрушин Константин Владимирович, ведущий инженер.

зависящая от пористости пакета армирующего наполнителя и вязкость связующего, поэтому проведено исследование фильтрационной способности (проницаемости) тканых наполнителей, которая, как известно, обеспечивается макропорами, образующимися в зонах пересечения жгутов и микропорами, образованными между отдельными моноволокнами, из которых состоит жгут.

Лучшей проницаемостью обладают ткани имеющие переплетение в 2-х взаимно перпендикулярных направлениях (основа-уток). Выбранная нами условно однонаправленная углеродная ткань фирмы «Porchet Ind.» арт. 3673 имеет в своем составе тонкую уточную стеклонить, обеспечивающую, в основном, технологическую связь продольных жгутов. При формировании сухого пакета наполнителя из ткани в направлении ее армирования (0°) получается более плотная упаковка (с меньшей пористостью), которая может препятствовать быстрому проникновению связующего, а это, в свою очередь, скажется на скорости пропитки.

В связи с этим проведено исследование проницаемости углеродной ткани арт. 3673 на специальной установке. Схема сборки установки для определения коэффициента проницаемости в поперечном к укладке слоев направлении представлена на рис 1.

Сущность метода заключается в следующем: находящееся в емкости (2) дозированное количество водопроводной воды под действием вакуума пропускали через пакет сухого наполнителя, уложенный в форме (1) с фиксированным рабочим зазором и определяли время, за которое вода пройдет через пакет наполнителя из емкости (2) в емкость (6). В процессе эксперимента меняли плотность пакета путем закладки N-ного количества слоев в форму (1) в сторону увеличения и измеряли количество жидкости (Q), прошедшее через пакет.

Результаты измерения представлены на рис. 2 и 3.

Из рисунка видно, что с увеличением плотности пакета (с уменьшением пористости) рез-

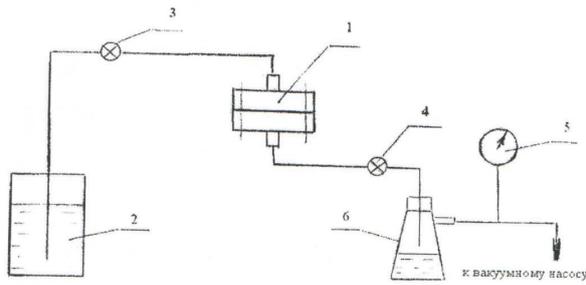


Рис 1. Схема сборки установки для определения коэффициента проницаемости армирующих тканых наполнителей:

1 – форма укладки пакета заготовок с фиксированным рабочим зазором; 2 – емкость для рабочей жидкости; 3 – выпускной кран; 5 – вакуумметр; 6 – колба Бунзена

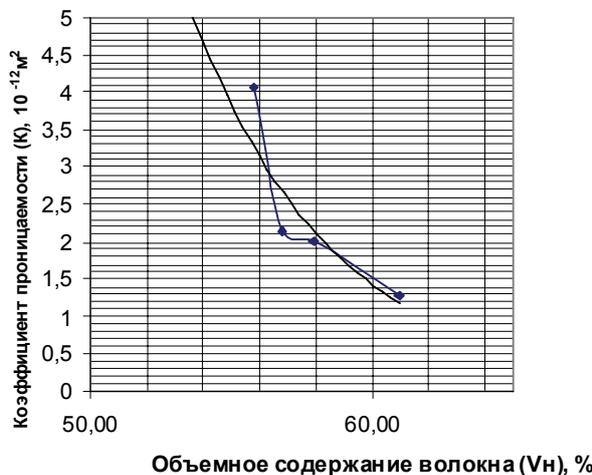


Рис. 3. Коэффициент проницаемости пакета наполнителя из углеродной ткани арт. 3673 в зависимости от объемного содержания волокна в поперечном направлении

ко падает проницаемость. При уплотнении (объемном содержании волокна) до 55-60% коэффициент проницаемости пакета из углеродной ткани арт. 3673 в продольном направлении более чем на порядок ниже, чем в поперечном направлении и составляет $(0,11 - 0,07 \times 10^{-12} \text{ м}^2)$ и $(3,8 - 1,4 \times 10^{-12} \text{ м}^2)$ соответственно.

Указанное объемное содержание волокна, способно обеспечить оптимальные свойства углепластика на основе условно однонаправленного углеродного наполнителя указанной выше структуры.

Требуемое соотношение наполнитель/связующее достигается с помощью давления, действующего на пакет армирующего наполнителя. В этом случае меняется исходная толщина монослоя ткани, а с ней и объем межволоконных и межгзутовых зазоров, заполняемых связующим. Поскольку в процессе инфузии величина прикладываемого давления $\leq 0,1 \text{ МПа}$, исследовали влияние величины вакуума на степень уп-

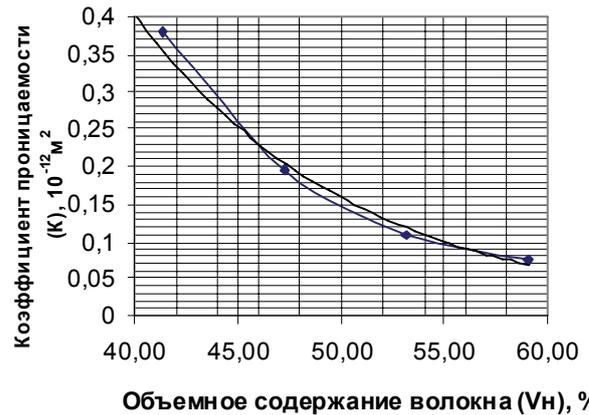


Рис. 2. Коэффициент проницаемости пакета наполнителя из углеродной ткани арт. 3673 в зависимости от объемного содержания волокна в продольном направлении

лотнения пакета наполнителя (на изменение толщины монослоя).

Исследование влияния приложенного давления уплотнения на изменение толщины монослоя ткани арт. 3673 проводили на испытательной машине «Тиратест 2300». В приспособление для сжатия закладывали пакет, состоящий из 40 слоев ткани и фиксировали изменение толщины пакета в процессе нагружения. Результаты исследований представлены на рис 4.

Из кривой уплотнения следует, что вакуумного давления вполне достаточно для уплотнения пакета сухого наполнителя до оптимального. При давлении 0,05-0,06 МПа углеродная ткань арт.3673 уплотняется до толщины монослоя 4 0,19 мм, что соответствует объемному наполнению волокна 4 59%.

Фактор времени, в течение которого связующее остается жидким, является критичным при проведении пропитки наполнителя под действием вакуума (инфузия). Поэтому для обеспечения качества пропитки важно знать жизнеспособность связующего, т.е. время, в течение которого оно не теряет своей текучести и может быть

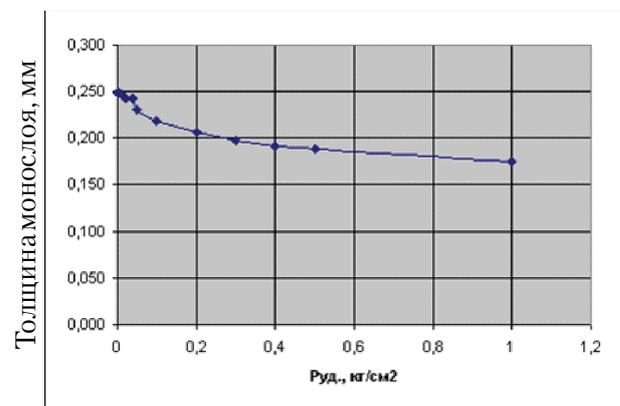


Рис. 4. Зависимость объемного наполнения (толщины монослоя) от величины приложенного давления

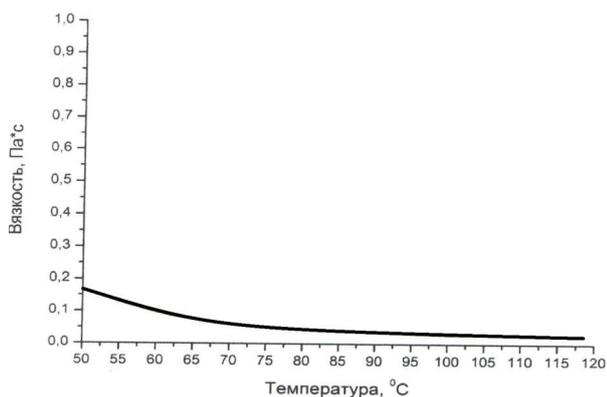


Рис. 5. Зависимость изменения вязкости связующего ВСЭ-21 от температуры

пригодно для пропитки.

Для отработки технологии изготовления углепластика методом инфузии наработана опытная партия связующего ВСЭ-21 и исследована его вязкость, приведенная на рис. 5.

Анализ результатов определений показал, что вязкость связующего при температуре от 50°С и выше имеет минимальное значение (менее 0,2 Па·с), а также что по показателям вязкости, связующее соответствует ТУ 1-595-12-1195-2011 как в исходном состоянии, так и после выдержки в течение 2-х часов при температуре 60 °С и может быть использовано для отработки технологии изготовления углепластика.

Отработку технологии изготовления углепластика методом пропитки пакета сухого наполнителя из углеродной ткани арт. 3673 ф. «Porcher» связующим ВСЭ-21 под действием вакуума проводили на имеющемся в лаборатории специализированном экспериментальном стенде «Нуражест МК-3», используя обогреваемый стол (матрицу) в качестве оснастки. На оснастку укладывался предварительно собранный пакет сухого наполнителя и герметизировался. Принципиальная схема сборки приведена на рис. 6.

В процессе работы контролировали:

- равномерность распределения и ориенти-

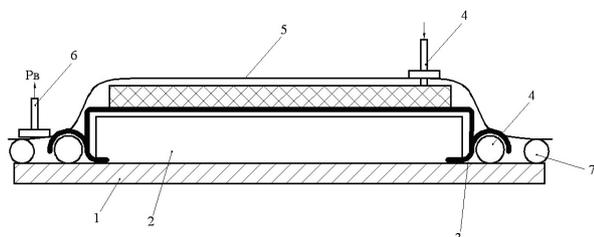


Рис. 6. Схема сборки технологического пакета для пропитки под вакуумом (инфузии)

1 — формообразующая оснастка; 2 — слой углеродной ткани арт. 3673 ф. «Porcher»; 3 — слой дренажной и жертвенной ткани; 4 — запитывающий штуцер; 5 — распределительная сетка; 6 — штуцер вакуумной линии; 7 — жгут замазка; 8 — вакуумный мешок

рованность нитей основы и утка наполнителя, а так же количество слоев сухого наполнителя в процессе сборки пакета;

- вес собранного пакета сухого наполнителя;
- порядок укладки вспомогательных материалов (жертвенный слой, разделительный слой, распределительная сетка, дренажный слой и др.);
- место установки порта подачи связующего и вакуумного штуцера;
- герметичность собранного технологического пакета (по величине вакуума);
- температуру оснастки по термометре, установленной под пакетом;
- расход связующего (по шкале, нанесенной на емкость подачи связующего).

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что время пропитки пакета наполнителя складывается из 3-х составляющих: времени растекания связующего по распределительной сетке и жертвенной ткани — поперечная пропитка и времени пропитки кромок заготовки от торца жертвенной ткани до кромки пакета наполнителя — пропитка вдоль слоев. Суммарное время пропитки пакета наполнителя из углеродной ткани арт. 3673 размером 4 300 x 300 мм, составляло порядка 40-60 минут, причем на 3-й участок (кромки пакета вдоль волокна) уходит более 70% времени пропитки. Таким образом, разработанное связующее позволяет осуществить процесс пропитки пакета наполнителя при температуре не выше 70 °С в течение ~ 1 часа .

В процессе отработки технологии установлено, что не смотря на кажущуюся простоту, этот метод имеет ряд особенностей, требующих тщательной подготовки к его осуществлению:

1. Перед пропиткой связующее должно быть отвакууммировано.
2. Необходимо наличие вспомогательных материалов (вакуумные пленки, вакуумные шланги, разделительные пленки, жертвенные ткани, дренажные ткани, герметизирующие жгуты, порты подачи связующего, распределительные среды и др.)

3. Необходимо обеспечение вакуума на протяжении всего процесса инфузии и отверждения. Разгерметизация может привести к браку и полной потере заготовки пакета наполнителя.

4. Для исключения непропитанных зон пакета наполнителя в процессе инфузии, необходимо обеспечение градиента давления на всем протяжении пути пропитки.

Проведены исследования физико-механических (прочность, модуль упругости и относительное удлинение при растяжении по ГОСТ 25.601-80; прочность при сжатии по ГОСТ 25.602-80; прочность при изгибе по ГОСТ

Таблица 1. Физико-механические свойства углепластиков

Наименование свойств	Температура испытания, °С	углепластик на основе ткани фирмы «Porcher» арт. 3673 и связующего ВСЭ-21, полученный методом инфузии
Физические свойства		
Объемная доля наполнителя, %	20	55-58
Плотность, кг/м ³	20	1534-1554
Пористость, %	20	0,33-1,2
Механические свойства (схема укладки 0°/90°/±45°)		
Прочность при сжатии, МПа	20	435-490
	100	375-425
Прочность при межслойном сдвиге, МПа	20	42-51
	100	35-47
Механические свойства (схема укладки 0°)		
Прочность при растяжении, МПа	20	1960 1730-2140
	100	1785-2050
Модуль упругости при растяжении, ГПа	20	140-190
Относительное удлинение при растяжении, %	20	1,0-1,6%
Прочность при сжатии, МПа	20	1170-1290
	100	765-940
Прочность при изгибе, МПа	20	1825-2150
	100	1550-1670
Прочность при межслойном сдвиге, МПа	20	52-84
	100	45-52

25.604-82; прочность при межслойном сдвиге по EN 2563-89; плотность по ГОСТ 15139-69; объемная доля наполнителя по ММ 1.2.086-2009; область температуры стеклования полимерной матрицы, отвержденной в составе угленополнителей методом динамического механического анализа по ASTM E 1640- 94 DIN 53545; пористость углепластиков по ММ 1.2.086-2009) и эксплуатационных (тепловлажностное воздействие температуры 60°С и влаги 85% в течение 1 и 2-х месяцев по ГОСТ 9.707-81; тепловое старение при температуре 100°С в течение 500 и 1000 ч по СТП 1-595-11-101-83) свойств опытных образцов углепластиков, полученных на основе расплавленного связующего ВСЭ-21 и наполнителя – углеродной ткани фирмы «Porcher» арт. 3673 методом инфузии с последующим вакуумным формованием.

Физико-механические свойства опытных образцов углепластиков приведены в табл. 1.

Анализ результатов показал, что углепластик обеспечивает высокие упруго-прочностные показатели и низкую пористость. Сохранение свойств при температуре 100°С в среднем составляет ~ 70-98% от исходной в зависимости от вида испытаний.

Для отработки технологии пропитки углеродного наполнителя под вакуумом крупногаба-

ритных деталей исследовано изменение вязкости связующего ВСЭ-21 в интервале температур 50-70°С для установления допустимых границ нагрева связующего в процессе проведения пропитки (рис. 7).

Установлено, что время пропитки углеродной ткани арт.3673 методом инфузии должно быть осуществлено при температуре не выше 60 °С в течение не более 2-х ч.

Методом инфузии – на основе углеродной ткани арт. 3673 ф. «Porcher» и связующего ВСЭ-

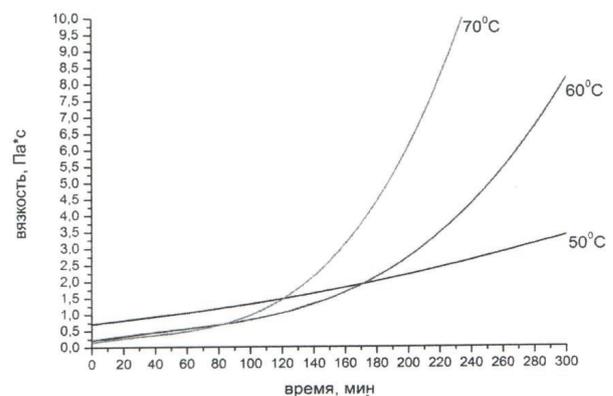


Рис. 7. Изменение вязкости связующего ВСЭ-21 от времени выдержки при различных температурах

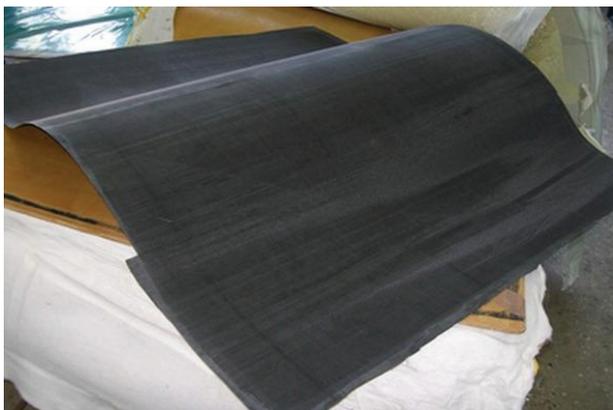


Рис. 8. Общий вид изготовленной методом инфузии панели (до обрезки технологического припуска) обтекателя реактивного учебно-тренировочного самолёта СР-10

21 с использованием стеклопластиковой оснастки изготовлена нижняя панель обтекателя реактивного учебно-тренировочного самолёта СР-10 общей площадью 1 м², показанная на рис 8.

Также были изготовлен образец свидетель из углепластика пропитанный и отвержденный под одним вакуумным мешком по одному режиму вместе с панелью обтекателя. Исследованы основные свойства образца-свидетеля. Результаты исследований представлены в табл. 2.

Таблица 2. Основные физико-механические характеристики образца-свидетеля углепластика, полученного методом инфузии

Наименование свойств	Значение свойств при температуре испытания, °С	
	20	100
Прочность при растяжении, МПа (ГОСТ 25.601-80)	1660	-
Прочность при сжатии, МПа (ГОСТ 25.602-80)	1220	875 (сохр.72%)
Пористость, % ММ 1.2.086-2009	0,40	-

Установлено, что сохранение прочности при сжатии углепластика при температуре испытания 100°С составляет 4 72 %, это подтверждает, что рабочая температура углепластика до 100°С.

Результаты опробования показали, что разработанная технология позволяют получать методом инфузии детали для слабо- и средне-нагруженных элементов конструкций из ПКМ на основе связующего ВСЭ-21 отвечающие требуемому набору упруго-прочностных и эксплуатационных свойств.

STRUCTURAL PROPERTIES OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS MANUFACTURED UNDER VACUUM IMPREGNATION

© 2012 D.I. Kogan¹, M.I. Dushin¹, A.N. Borshchev¹, E.A. Veshkin², P.A. Abramov², K.V. Makrushin²

¹ State Research Center "All-Russian Institute of Aviation Materials" (VIAM), Moscow

² The Ulyanovsk Scientific-Technological Center VIAM

The article consider the properties of structural carbon fiber manufactured under vacuum impregnation

Keywords: infusion, permeability, CFRP

Dmitri Kogan, Candidate of Technical Sciences, Leading Engineer. E-mail: admin@viam.ru

Michail Dushin, Candidate of Technical Sciences, Leading Research Staff Member.

Artem Borshev, engineer.

Evgeny Veshkin, Chief of Sector. E-mail: untcviam@viam.ru

Petr Abramov, Leading Engineer.

Konstantin Makrushin, Leading Engineer.