

УДК 678.072, 678.078

*А.Н. Кудрявцева¹, А.И. Ткачук¹, К.Н. Григорьева¹, Я.М. Гуревич¹***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЯЗУЮЩЕГО МАРКИ ВСЭ-30,
ПЕРЕРАБАТЫВАЕМОГО ПО ИНФУЗИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ,
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НИЗКО- И СРЕДНЕНАГРУЖЕННЫХ
ДЕТАЛЕЙ КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-31-39

Рассмотрены основные физико-химические, термомеханические и упруго-прочностные характеристики разработанного во ФГУП «ВИАМ» двухкомпонентного связующего марки ВСЭ-30, перерабатываемого по инфузионной технологии. Приведены результаты сравнения с отечественными и импортными аналогами. Методом ДСК исследованы кинетические параметры процесса отверждения для изучения влияния конечной температуры и режима отверждения на уровень механических и термомеханических свойств отвержденного связующего ВСЭ-30. Установлено, что снижение температуры отверждения незначительно влияет на суммарный тепловой эффект реакции. Выбран оптимальный режим отверждения связующего ВСЭ-30 при пониженной температуре, позволяющий получать материалы с небольшим снижением их температуры стеклования и прочностных свойств.

Ключевые слова: *эпоксидное связующее, «зеленая химия», энергоэффективный режим отверждения, температура стеклования, вакуумная инфузионная технология, угле- и стеклопластики.*

*A.N. Kudryavtseva¹, A.I. Tkachuk¹, K.N. Grigoreva¹, Ya.M. Gurevich¹***THE USE OF EPOXY RESIN SYSTEM VSE-30,
PROCESSED BY THE INFUSION TECHNOLOGY,
FOR THE MANUFACTURE OF LOW AND MEDIUM LOADED
STRUCTURAL POLYMER COMPOSITE MATERIALS**

In the present work, the main physicochemical and thermomechanical characteristics of a two-component epoxy resin system VSE-30, processed by infusion technology and developed at the FSUE «VIAM», are considered. The DSC method is used to study the kinetic parameters of the curing process and to study the effect of the final curing temperature on the level of mechanical and thermomechanical properties of the cured binder VSE-30. The comparison of obtained data with domestic and foreign analogues are given. It has been established that lowering the curing temperature has little effect on the total thermal effect of the reaction. The optimum curing mode of the epoxy resin system VSE-30 at a low temperature is chosen, which allows to obtain materials with a slight decrease in their glass transition temperature and strength properties.

Keywords: *epoxy resin, «green chemistry», energy-efficient curing mode, glass transition temperature, vacuum infusion technology, carbon and fiberglass.*

¹Федеральное 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

Введение

Изготовление изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей мировой промышленности. В настоящее время в мировой промышленности широко используются разнообразные технологии для переработки реактопластичных связующих в ПКМ, среди которых следует отметить такие основные методы переработки, как [1–3]:

- автоклавное формование;
- контактное формование;
- намотка;
- безавтоклавные методы (RTM, VaRTM, RFI и др.);
- прессование в формах (применяется большое количество технологий изготовления полимерной оснастки из ПКМ на основе теплостойких термореактивных связующих).

Применимость перечисленных или иных методов и выбор конкретного метода в каждом случае определяется множеством факторов, в том числе формой и габаритами изделий, их количеством, физическими параметрами процесса, требованиями, предъявляемыми к изделию (прочность, точность размеров и т. д.), а также в большой степени на выбор влияет стоимость процесса [4–6]. Для того чтобы при производстве обеспечить заданные характеристики ПКМ, необходимо создать определенные условия для отверждения связующего, в том числе длительную выдержку при повышенной температуре. В каждом случае режим отверждения должен обеспечивать условия для полного протекания реакции полимеризации.

Технологии автоклавного изготовления изделий из ПКМ – несмотря на совершенствование автоматизированных систем проектирования программ, лазерных технологий автоматизированной выкладки образцов, позволяющих сократить технологический цикл при производстве и минимизировать трудозатраты, – вследствие необходимости использовать дорогостоящий автоклав, расходные материалы и характеризующиеся высоким энергопотреблением, стали уступать свое место на рынке конструкционных пластиков более экономичным безавтоклавным процессам переработки полимерных связующих [7–9].

Перспективными безавтоклавными технологиями в настоящее время являются пропитка под давлением (Resin Transfer Moulding – RTM) и ее разновидность – вакуумная инфузия (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding – VaRTM). Инжекционные способы переработки имеют несколько преимуществ [10–12]:

- отсутствие необходимости на производстве в дорогостоящем оборудовании;
- повышение стабильности и культуры производственного процесса;
- широкие возможности при конструировании деталей сложной формы с жестко фиксированными геометрическими параметрами угле- и стеклопластика;
- снижение затрат на оснастку и расходные материалы;
- снижение отходов производства;
- снижение трудоемкости при изготовлении ПКМ;
- улучшение экологической составляющей на производстве.

Использование пластиков, изготовленных по инъекционным технологиям, интенсивно увеличивается в авиационных конструкциях. Например, в настоящее время в России завод АО «Аэрокомпозит» одним из первых в мире применил метод вакуумной инфузии для изготовления из углепластика крыла самолета МС-21 [13]. Кроме того, данные технологии стали активно использоваться не только в авиационной технике для изготовления ответственных и сложных изделий, но и в других отраслях – в первую очередь в энергетике (лопасти ветрогенератора, опоры ЛЭП [14]), строительстве (трубы, шпунтовые ограждения, сосуды под давлением [15–18]) и др.

Для изготовления низко- и средненагруженных деталей конструкционного назначения, в том числе и авиационного назначения, из ПКМ методом вакуумной инфузии во ФГУП «ВИАМ» разработано связующее марки ВСЭ-30 (ТУ1-595-12-1451–2015), которое характеризуется сочетанием высоких показателей прочностных, термомеханических и технологических свойств. Одним из основных преимуществ связующего является энергоэффективный режим отверждения – до 120°C, в то время как формообразование происходит уже при температурах 15–30°C.

Разработанное связующее ВСЭ-30 представляет собой двухкомпонентную систему: эпоксидная составляющая – компонент А, отверждающая система – компонент Б. Использование двухкомпонентной системы позволяет значительно повысить срок хранения связующего и снизить затраты на его транспортирование и хранение до момента использования за счет исключения затрат на использование холодильной техники.

В составе отверждающей системы связующего ВСЭ-30 подобрано оптимальное соотношение аминных отвердителей, которое способствует активному процессу нарастания вязкости композиции после совмещения исходных компонентов связующего и контролируемому процессу гелеобразования при комнатной температуре, что обеспечивает возможность полноценной пропитки пакета из углеродного или стеклянного наполнителя при изготовлении даже крупногабаритных толстостенных изделий, а также кратковременный процесс формования полимерной матрицы при создании ПКМ (формообразование длится в течение 24 ч). Процесс отверждения связующего ВСЭ-30 протекает по поликонденсационному механизму и приводит к образованию равномерно сшитой полимерной сетчатой структуры, что обеспечивает создание однородно сшитой полимерной структуры с повышенными упруго-прочностными и термомеханическими характеристиками.

Отсутствие в разработанном эпоксидном связующем марки ВСЭ-30 токсичных легколетучих растворителей и компонентов не только улучшает пожаробезопасность производства и способствует уменьшению выбросов в атмосферу вредных веществ (т. е. процесс изготовления согласуется с принципами «зеленой химии»), но и позволяет получать бездефектную монолитную структуру изделия из ПКМ [19].

В данной работе приводятся технологические и эксплуатационные характеристики двухкомпонентного эпоксидного связующего марки ВСЭ-30, свойства стекло- и углепластиков на его основе, а также исследовано влияние температуры и режима отверждения на уровень его механических и термомеханических свойств.

Материалы и методы

Предмет исследования – связующее марки ВСЭ-30 производства ФГУП «ВИАМ». Температуру и продолжительность отверждения связующего подбирали по разным режимам. Рекомендуемым режимом считается выдержка до формообразования при комнатной температуре, а затем отверждение при 120°C до достижения нужных качественных характеристик.

Температуру стеклования отвержденных образцов измеряли в соответствии с ASTM E1640 при скорости нагрева 10°C/мин. Проводили испытания образцов размером 50×10×4 мм на термоанализаторе динамическо-механической модификации DMA 242C фирмы Netzsch.

Тепловой эффект реакции определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на дифференциальном сканирующем калориметре марки Netzsch (Германия) с интервалом рабочих температур от -100 до +400°C и диапазоном скоростей нагрева от 1 до 20°C/мин. Испытания проводили в соответствии с ISO 11357-5.

Вязкость образцов связующего ВСЭ-30 измеряли в соответствии с ГОСТ 25271–93 на вискозиметре Брукфильда марки DV2TLV при комнатной температуре в термоячейке (использовали шпиндель №31).

Прочность при изгибе определяли на испытательной машине ИР5282-50 по ГОСТ 4648–2014 при комнатной температуре. Испытание проводили при скорости 5 мм/мин на образцах размером 80×10×4 мм, расстояние между опорами составляло 60 мм.

Результаты и обсуждение

В России на рынке эпоксидных материалов представлено несколько аналогов связующего ВСЭ-30 производства компаний ЗАО «Инумит», ООО «Суперпласт» и международного концерна Hexion. В табл. 1 приведены характеристики двухкомпонентных эпоксидных связующих. Данные связующие предназначены для получения композиционных материалов на основе различных волокнистых наполнителей методом инфузии, а также намотки, ручного формования и другими способами, которые применяются в авиационной промышленности, малом судостроении, строительной сфере и др. После смешения компонентов смоляной составляющей и отвердителя формообразование при комнатной температуре для этих связующих достигается в течение 24 ч, однако для повышения их термомеханических и прочностных свойств необходима дополнительная термообработка, которая является индивидуальной для каждой марки связующего.

Таблица 1

Характеристики связующего ВСЭ-30 и его аналогов

Свойства	Значения свойств для связующих				
	ВСЭ-30 (ФГУП «ВИАМ»)	Т-32 (ЗАО «Инумит»)	ООО «Суперпласт»		Epikote LR285 MGS Aero/ LN286 (Hexion)
			ЭПС-И-102	ЭПС-И-108	
Температура стеклования, °С	115	116	70	110	85–90
Вязкость при 25°С, Па·с	0,45	0,85	0,5	1,5	0,06–0,10
Температура формообразования, °С	15–30	15–30	15–30	15–30	15–30
Жизнеспособность при 25±5°С, мин	100	240*	480	300	40
Температура доотверждения (продолжительность)	120°С (4 ч)	140°С (3 ч)	90–100°С (до 6 ч)	150°С (4 ч)	80°С (15 ч)

* При температуре 50°С.

Как видно из данных табл. 1, связующее ВСЭ-30 по сравнению с отечественными аналогами имеет более низкую вязкость при комнатной температуре, что способствует легкому инжектированию в технологический пакет и проникновению через волокнистый наполнитель, а жизнеспособность позволяет вакуумировать связующее и проводить процесс пропитки даже крупногабаритных изделий без существенного увеличения вязкости, в то же время продолжительность формообразования связующего не превышает 6,5 ч, т. е. за одну рабочую смену можно провести пропитку, отверждение детали и доотверждение ее в термошкафу. Следует отметить, что в отличие от российских связующих импортный аналог имеет более узкое технологическое окно по переработке в ПКМ, что может создавать определенные трудности при изготовлении больших изделий. Как отмечалось ранее, для придания заявленных эксплуатационных характеристик данные связующие необходимо подвергать дополнительной термообработке, и хотя температура отверждения (120°С) связующего ВСЭ-30 находится в интервале температур отверждения аналогов (80–150°С), температура стеклования при этом равна 115°С, т. е. на уровне аналогичной температуры для связующего Т-32, отвержденного при температуре 140°С в течение 3 ч.

Снижение температуры отверждения позволяет в некоторых случаях получить композиционный материал с незначительным снижением теплостойкости и прочностных

характеристик, снизить затраты на производство сложных конструкционных деталей, а также сократить цикл изготовления, исключив необходимость длительной выдержки технологической оснастки и оборудования при комнатной температуре. С этой целью в данной работе проведено исследование влияния режима и температуры отверждения связующего марки ВСЭ-30 на эксплуатационные характеристики полученного материала.

В табл. 2 приведены данные реакции полимеризации связующего ВСЭ-30, полученные методом ДСК, сразу после смешения компонентов и при выдержке связующего до его формообразования при комнатной температуре [20].

Таблица 2

Параметры отверждения связующего ВСЭ-30, полученные методом ДСК

Параметры		Значения параметров	
		сразу после смешения	после формообразования
Температурный интервал пика экзотермической реакции, °С	Температура начала экзотермической реакции, °С	22,7	60,0
	Температура начала активной экзотермической реакции, °С	51,0	80,0
	Температура максимальной скорости экзотермической реакции, °С	77,7	119,5
	Температура конца экзотермической реакции, °С	160,0	200,0
Тепловой эффект реакции отверждения связующего ΔH , Дж/г		469,3	100,9

Из данных табл. 2 видно, что начало процесса полимеризации свежеприготовленного связующего происходит уже при комнатной температуре и заканчивается при 160°С при этом максимальная скорость отверждения наблюдается при 77,7°С. Параметры отверждения образца связующего после его предварительного формообразования показали, что температурный интервал экзотермической реакции (начало, пик и окончание) сместился на ~40°С, а степень доотверждения составила 78%.

На рис. 1 показан характер изменения кажущейся вязкости связующего ВСЭ-30 при изотермической выдержке при температуре 25°С. Как видно из реологической кривой связующего, она имеет достаточно пологий характер – вязкость нарастает постепенно, достигая значения >1 Па·с через ~1,5 ч после совмещения компонентов. Экстремального увеличения скорости отверждения за счет теплового эффекта экзотермической реакции «эпоксидная смола–аминный отвердитель» не наблюдается.

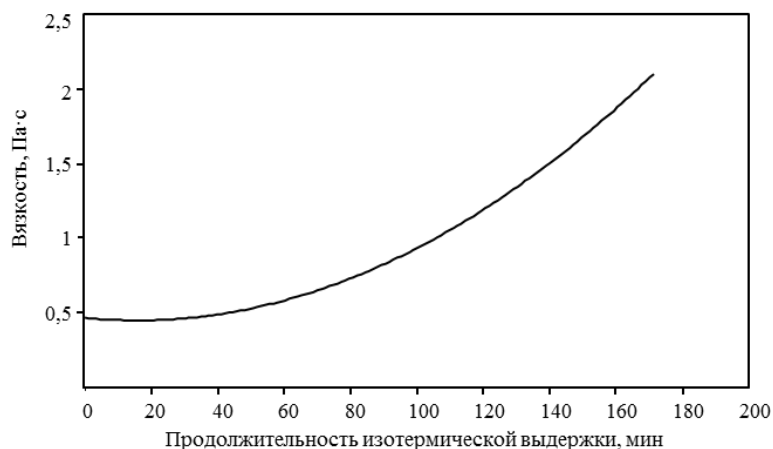


Рис. 1. Зависимость вязкости эпоксидного связующего марки ВСЭ-30 от продолжительности изотермической выдержки при температуре 25°С

Проведены испытания по комплексу механических характеристик связующего ВСЭ-30. Как видно из данных табл. 3, механические характеристики инфузионного связующего находятся на высоком уровне.

Таблица 3

Механические характеристики связующего ВСЭ-30

Свойства	Значения свойств
Относительное удлинение при растяжении, %, при температуре, °С:	
20	2,9
80	2,2
Сохранение значений свойств, %	76
Прочность при статическом изгибе, МПа, при температуре, °С:	
20	145
80	92
Сохранение значений свойств, %	64

Однако у производителя не всегда есть возможность проведения отверждения изделий из ПКМ при высоких температурах – в первую очередь из-за отсутствия необходимого нагревательного оборудования, или когда требуется изготовление деталей в так называемых «полевых» условиях. В таких случаях технологи могут создать лишь тепловую завесу, не превышающую температуру 80–100°С. В состав некоторых сложных деталей в качестве наполнителей также могут входить и другие материалы – например, пенопласты или сферопластики, которые теряют свои свойства при нагревании до высоких температур.

В связи с этим в данной работе проведено дополнительное исследование влияния температуры и режима доотверждения на качественные характеристики отвержденного связующего. Проведенное исследование направлено на сокращение продолжительности цикла производства ПКМ, а также на проверку возможности использования данного связующего в условиях, где невозможно применить рекомендуемый режим отверждения.

Для исследования разработаны два режима, при которых образцы связующего отверждались после формообразования (табл. 4) и сразу после смешения (табл. 5). В качестве конечных температур доотверждения выбраны: 80, 100 и 120°С.

Таблица 4

Свойства отвержденных образцов связующего ВСЭ-30 после формообразования

Конечная температура, °С	Степень доотверждения по ДСК, %	Температура стеклования, °С	Прочность при статическом изгибе, МПа	Модуль упругости, ГПа
120	99,9	115	145	2,9
100	99,9	115	120	3,0
80	99,9	107	105	3,2

Таблица 5

Свойства отвержденных образцов связующего ВСЭ-30 сразу после смешения

Конечная температура, °С	Степень доотверждения по ДСК, %	Температура стеклования, °С	Прочность при статическом изгибе, МПа	Модуль упругости, ГПа
120	99,9	116	140	2,9
100	99,9	117	135	3,1
80	98,5	108	130	3,3

Как видно из данных табл. 4, ДСК-исследования показали – при снижении конечной температуры доотверждения не изменяется полнота протекания химической реакции, что, по-видимому, может объясняться тем, что незначительные оставшиеся реакционноспособные группы находятся в очень низкой концентрации и на значительном расстоянии друг от друга, в связи с чем чувствительность метода ДСК не позволяет уловить оставшийся тепловой эффект. Установлено также, что понижение температуры отверждения оказывает незначительное влияние на температуру стеклования – происходит снижение на $\sim 8^\circ\text{C}$, однако для образцов доотвержденных при 80°C наблюдается снижение прочности при статическом изгибе до 28%.

В табл. 5 приведены полученные данные отвержденных образцов ВСЭ-30 без предварительного формообразования. Видно, что при изменении режима отверждения удается избежать значительного снижения прочностных характеристик связующего при его доотверждении при 80°C (табл. 4) и добиться значения 130 МПа (уменьшение прочности – всего на 8,5%). Это вызвано особенностями состава аминного отвердителя в связующем ВСЭ-30. При предварительном формообразовании при комнатной температуре происходит постепенное расходование до 80% активных функциональных групп и, как следствие, экзотермического эффекта не наблюдается, последующее доотверждение при 80°C не позволяет получить равномерно отвержденную структуру. Однако при проведении полимеризации сразу после смешения в системе (вследствие экзотермической реакции) происходит саморазогрев связующего, который позволяет достичь данных характеристик. В отвержденных по такому режиму образцах отсутствует коробление, растрескивание или почернение, которое могло быть вызвано процессами деструкции полимера при горении при экзотермической реакции.

Следует отметить, что данный режим позволяет получать при доотверждении при 80°C температуру стеклования выше, чем у импортного аналога связующего Epikote LR285 MGS Aero/LH286 (табл. 1).

Во ФГУП «ВИАМ» по инфузионной технологии изготовлены образцы ПКМ на основе связующего ВСЭ-30 и исследованы их физико-механические и термомеханические свойства (табл. 6). Пример изготовления плиты углепластика на основе связующего ВСЭ-30 методом вакуумной инфузии приведен на рис. 2. После формообразования при комнатной температуре плиту углепластика доотверждали в термощкафу при температуре 120°C в течение 3 ч.

Таблица 6

Свойства образцов ПКМ на основе связующего ВСЭ-30

Свойства	Значения свойств	
	стеклопластика ВСЭ-30/Т-10-80 ВМП	углепластика ВСЭ-30/Porcher 4510
Прочность при статическом изгибе, МПа, при температуре, $^\circ\text{C}$:		
20	585	738
80	450	468
Сохранение значений свойств, %	77	64
Температура стеклования, $^\circ\text{C}$	118	124

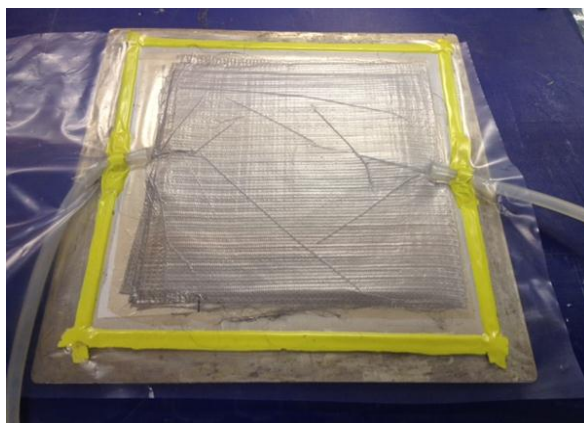


Рис. 2. Пример изготовления плиты пластика на основе связующего ВСЭ-30 методом вакуумной инфузии

Температура стеклования образцов стеклопластика на основе связующего ВСЭ-30 составила 118°C, углепластика: 124°C. Данные значения температуры стеклования выше, чем у исходного материала. Сохранение прочностных характеристик ПКМ при температуре 80°C также составляет не менее 64–77% от исходных значений (при 20°C). Полученные данные показывают, что связующее ВСЭ-30 для изготовления ПКМ конструкционного назначения может использоваться при температурах до 80°C.

Заключения

В работе представлены технологические и термомеханические свойства связующего ВСЭ-30 в сравнении с отечественными и импортными аналогами. Показано, что разработанное связующее по температуре стеклования превосходит аналоги и может быть рекомендовано для изготовления методом вакуумной инфузии низко- и средненагруженных деталей из ПКМ конструкционного назначения, в том числе и авиационного назначения. Исследование влияния температуры и режима отверждения на уровень механических и термомеханических свойств отвержденного связующего ВСЭ-30 показало, что оптимальным режимом отверждения являются формообразование при комнатной температуре и доотверждение при 120°C; в случае необходимости возможно уменьшение температуры отверждения связующего до 80°C, но уже без стадии формообразования при комнатной температуре. Полученные результаты позволяют значительно сократить время переработки, что в свою очередь способствует экономии энергоресурсов, а также соответствует принципам «зеленой химии». При понижении конечной температуры отверждения, связующее применимо в ненагруженных деталях, а также когда не требуется высокая рабочая температура материалов. Связующее ВСЭ-30 удобно в применении при выполнении различных технологических задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2. С. 16–22.
3. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. №2. С. 37–42.

4. Вешкин Е.А. Технологии безавтоклавного формования низкопористых полимерных композиционных материалов и крупногабаритных конструкций из них: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 146 с.
5. Григорьев М.М., Хрульков А.В., Гуревич Я.М., Панина Н.Н. Изготовление стеклопластиковых обшивок методом вакуумной инфузии с использованием эпоксиангидридного связующего и полупроницаемой мембраны // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №2. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-2-4-4.
6. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
7. Dry fibrous material for subsequent resin infusion: pat. WO 2013096377; filed 20.12.11; publ. 27.06.13.
8. Michelsa J., Widmann R., Czaderski C., Allahvirdizadeh R., Motavalli M. Glass transition evaluation of commercially available epoxy resins used for civil engineering applications // Composites Part B: Engineering 2015. Vol. 77. P. 484–493. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.03.053.
9. Ricciardi M.R., Antonucci V., Durante M. et al. A new cost-saving vacuum infusion process for fiber-reinforced composites: Pulsed infusion // Journal of Composite Materials. 2014. Vol. 48 (11). P. 1365–1373.
10. Компания «КОРСИЛ ТРЕЙД» Lamborghini выбирает Araldite® // Композитный мир. 2013. №4. С. 34–36.
11. Щепотова А., Райхлин Л., Яценко С. Некоторые аспекты инфузии крупногабаритных конструкций // Композитный мир. 2013. №4. С. 44–51.
12. Arulappan C., Duraisamy A., Adhikari D., Gururaja S. Investigations on pressure and thickness profiles in carbon fiber-reinforced polymers during vacuum assisted resin transfer molding // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2015. Vol. 34. Is. 1. P. 3–18.
13. Савин С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. №4 (2). С. 686–693.
14. Чурсова Л.В., Ким М.А., Панина Н.Н., Швецов Е.П. Наномодифицированное эпоксидное связующее для строительной индустрии // Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 40–47.
15. Чурсова Л.В., Гребенева Т.А., Панина Н.Н., Цыбин А.И. Связующие для полимерных композиционных материалов строительного назначения // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2015. №8. С. 13–17.
16. Мишкин С.И., Раскутин А.Е., Евдокимов А.А., Гуляев И.Н. Технологии и основные этапы строительства первого в России арочного моста из композиционных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №6 (54). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-5-5.
17. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Раскутин А.Е., Панина Н.Н. Свойства угле- и стеклопластиков на основе плетеных преформ // Авиационные материалы и технологии. 2016. №4 (45). С. 54–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-54-59.
18. Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Панина Н.Н., Ткачук А.И., Терехов И.В. Использование ароматических аминных отвердителей для создания эпоксидных связующих для ПКМ конструкционного назначения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №6 (42). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-4-4.
19. Донецкий К.И., Хрульков А.В. Принципы «зеленой химии» в перспективных технологиях изготовления изделий из ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S2. С. 24–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-24-28.
20. Антюфеева Н.В., Алексахин В.М., Столянков Ю.В. Определение степени отверждения ПКМ методами термического анализа // Авиационные материалы и технологии. 2015. №3 (36). С. 79–83.