

УДК 667.621

С.Е. Истягин¹, Е.А. Вешкин¹, В.И. Постнов¹, Д.И. Коган¹**РОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ФОРМИРОВАНИИ СТАБИЛЬНОСТИ СВОЙСТВ ПЛЕНОЧНОГО СВЯЗУЮЩЕГО**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-7-7

Применение композиционных материалов осуществляется во все более широких масштабах, что обуславливает рост объема их производства. В настоящее время из существующих технологий изготовления полимерных композиционных материалов (ПКМ) безавтоклавные технологии являются наиболее экономичными, так как позволяют исключить использование дорогостоящего оборудования при обеспечении требуемого уровня свойств. В связи с ростом объемов применения безавтоклавных технологий создание высококачественных полуфабрикатов для некоторых их разновидностей становится актуальной задачей. В данной статье рассмотрены способы изготовления пленок связующего, перерабатываемых методом RFI.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, пленочное связующее, пропиточные машины, RFI, поверхностная плотность.

Application of composite materials becomes more and more wide that causes growth of volume of their manufacture. From manufacturing methods of PCM existing for today, out-of-autoclave techniques are most efficient as they allow excluding use of expensive equipment and providing demanded level of properties. In connection with growth of volumes of application of out-of-autoclave techniques, creation of high-quality semi-products for some their varieties becomes a topical problem. This article describes methods of manufacture of film binder processed by RFI.

Work is executed within implementation of the complex scientific direction 13.2. «structurall PCM» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: polymeric composite materials, film binder, impregnating machines, RFI, surface density.

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

Проектирование образцов перспективной авиационной техники – сложная задача для конструкторов и технологов, решение которой требует от них поиска компромисса между совершенствованием тактико-технических характеристик и снижением стоимости производства летательных аппаратов (ЛА), – для повышения экономической эффективности [2]. В этой связи требуется выполнение целого комплекса мероприятий:

– использование новых технологических процессов изготовления авиационных компонентов, обеспечивающих снижение стоимости подготовки производства, уменьшение длительности производственных циклов, трудоемкости и энергозатрат при их изготовлении [3];

– применение новых материалов, обеспечивающих получение деталей высокого качества [4, 5] и соответствующих по своим характеристикам постоянно ужесточающимся авиационным стандартам.

В связи с этим в ВИАМ разработаны «Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», в которых представлены 18 комплексных проблем с учетом тенденций развития материалов в мире по данным направлениям [1].

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко применяются в конструкциях современных летательных аппаратов [6]. Среди большого количества методов изготовления ПКМ наиболее простыми являются методы с использованием эластичных мембран. Для изделий летательных аппаратов основные – это вакуум-автоклавное и безавтоклавные методы формования [7].

Большое количество статей посвящено рассмотрению преимуществ и недостатков вышеуказанных технологий [8–10]. Однако рациональность их применения при изготовлении конкретной детали зависит от предназначения последней и требуемого уровня сервисных свойств.

Тенденция последних десятилетий – повышение интереса производителей ПКМ к безавтоклавным технологиям [4, 8], обусловлена их дешевизной в сравнении с автоклавной технологией. Из безавтоклавных технологий особое место занимает технология изготовления ПКМ с применением пленочного связующего – RFI-технология [1, 6, 7], которая позволяет изготавливать крупногабаритные детали из ПКМ без применения дорогостоящего оборудования [10].

Выкладка заготовки детали для RFI-технологии производится в основном двумя способами. Первый способ сборки заготовки детали предполагает выкладку на оснастку эластичной пленки связующего, а затем сухого не пропитанного связующим тканого наполнителя (преформы) в рассчитанной пропорции. При этом преформа может быть армирована в трансверсальном направлении, т. е. иметь трехмерную ориентацию волокон, что повышает прочностные показатели ПКМ при сдвиге. Второй способ – выкладка заготовки из дублированного препрега (семипрега), получаемого совмещением пленочного связующего и армирующего наполнителя. Этот способ больше подходит для деталей из ПКМ большой толщины и переменного сечения по толщине. Данные технологии сокращают время выкладки отдельных слоев в заготовке детали и ее трудоемкость по сравнению с препреговой технологией. Отсутствие дорогостоящего процесса изготовления препрега уменьшает экономические затраты при изготовлении ПКМ.

Принципиальная схема сборки технологического пакета с заготовкой детали из ПКМ для метода RFI представлена на рис. 1.

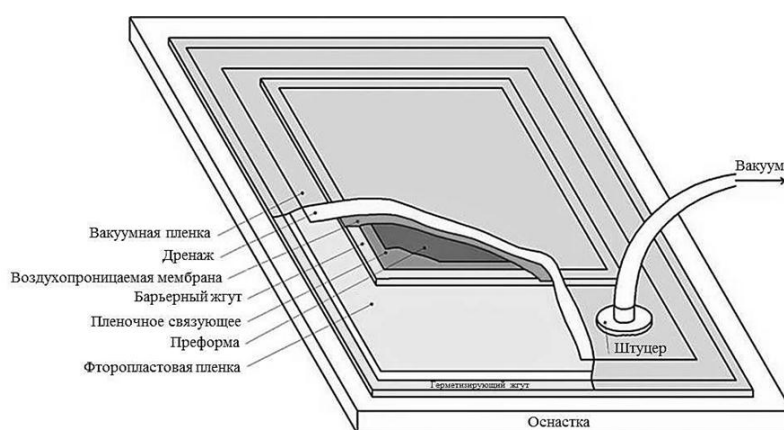


Рис 1. Схема изготовления детали RFI-методом

Несмотря на отсутствие большого избыточного давления в процессе формования, RFI-технология позволяет получать изделия с минимальными значениями пористости и нормированным объемным содержанием связующего в ПКМ [7–10].

Смолы с большим содержанием низкомолекулярных веществ обладают более низкой вязкостью, чем смолы с малым содержанием таких веществ, что позволяет снизить количество выделившихся летучих веществ на стадии отверждения ПКМ. Применение пленочных связующих при формовании деталей из ПКМ способствует сокращению выбросов вредных веществ в воздух. Данная технология является более экологичной и в меньшей мере воздействует на органы дыхания и организм человека в целом. Недостатками является работа с сухим армирующим наполнителем, применение специального вида связующего, а, следовательно, и жесткие требования к его реологии, получение средне- и слабонагруженных деталей.

Материалы и методы

Разброс упруго-прочностных характеристик в ПКМ, изготовленных по указанной технологии, напрямую зависит от стабильности параметров технологического процесса пропитки (скорости пропитки, содержания связующего в пластике, продолжительности выдержки при температурах). На перечисленные параметры процесса оказывает влияние много факторов, результатом которых является стабильность поверхностной плотности пленочного связующего.

В этой связи технологический процесс изготовления пленочного связующего должен обеспечивать наименьшие колебания его поверхностной плотности. На свойства пленочного связующего влияют многие технологические параметры пропиточных машин: температура фильеры или валов, температура ванны, жесткость и точность изготовления фильеры или валов, скорость протяжки, конструкция фильер и валов, а также технологические и реологические свойства применяемых материалов, адгезионные характеристики применяемых подложек (пленка, бумага) для нанесения на них пленочного связующего.

При изготовлении пленочных связующих на пропиточных машинах необходимо подобрать оптимальные параметры процесса для обеспечения стабильности их характеристик. Кроме того, оборудование должно обеспечивать минимальные отклонения технических и технологических характеристик от выбранных параметров технологического процесса. Рассмотрим стадии изготовления пленок связующего на установках для их изготовления, начиная с разогрева связующего. Связующее должно быть нагрето до определенной температуры и находиться при этой температуре определенное время с необходимой вязкостью, при этом нельзя допускать превышения продолжительности выдержки, так как это приведет к увеличению вязкости связующего. Зачастую реологические свойства связующего могут довольно резко меняться даже в пределах небольшого перепада температур (5–10°C), поэтому значительное влияние на характеристики пленок связующего оказывает температура в зоне формирования наноса, которая контролируется с помощью температурных датчиков (термопар). Их расположение непосредственно влияет на измерение температуры. Чем ближе к поверхности наноса на пропиточной машине расположена контрольная термопара, тем реальнее будет измеренная температура и тем меньше расхождение между требуемой температурой для получения пленки и реальной ее температурой на ролике и фильере. Кроме того, вследствие перегрева связующего и недостаточной его адгезионной прочности с технологической подложкой возможно скатывание пленки связующего в капли, обусловленное поверхностным натяжением связующего, что также недопустимо. Завершение процесса изготовления пленок на пропиточных машинах, как правило, заканчивается смоткой их в рулон. На этом этапе важно не допустить перетекания связующего и его смятия в рулоне, поэтому важным параметром является температура пленки после прохождения через фильеру при прикатывании к ней технологических подложек. Таким образом, при недостаточном охлаждении перед сматыванием пленки в рулон также могут наблюдаться перетекания связующего, что ведет к увеличению или уменьшению ее толщины. При излишнем охлаждении в процессе смотки (наличие охлаждающих валов, конвек-

ционного охлаждения) пленка связующего может коробиться. В этом случае возникает волнистость поверхности как самого связующего, так и технологических подложек (антиадгезионной бумаги, полиэтиленовой пленки).

Во ФГУП «ВИАМ» разработано связующее марки ВСЭ-20 для технологии изготовления ПКМ методом инфузии (RFI-технология) [11, 12]. Для разработки режима переработки связующего ВСЭ-20 в пленку проведен комплекс работ по исследованию его свойств и опробованию двух технологических схем пленкообразования на установке УПР-4.

В качестве критерия оценки качества пленочного связующего принималась стабильность поверхностной плотности по длине и ширине, так как именно от этого зависит содержание связующего в изготавливаемом ПКМ [13].

Результаты

Для выбора технологических параметров изготовления пленки на установке УПР-4 проведены исследования изменения реологических свойств связующего на вискозиметре марки «Brookfield» при динамическом нагреве с 70 до 145°C со скоростью 2°C/мин и изотермических выдержках при температурах 70, 80, 90 и 100°C (рис. 2).

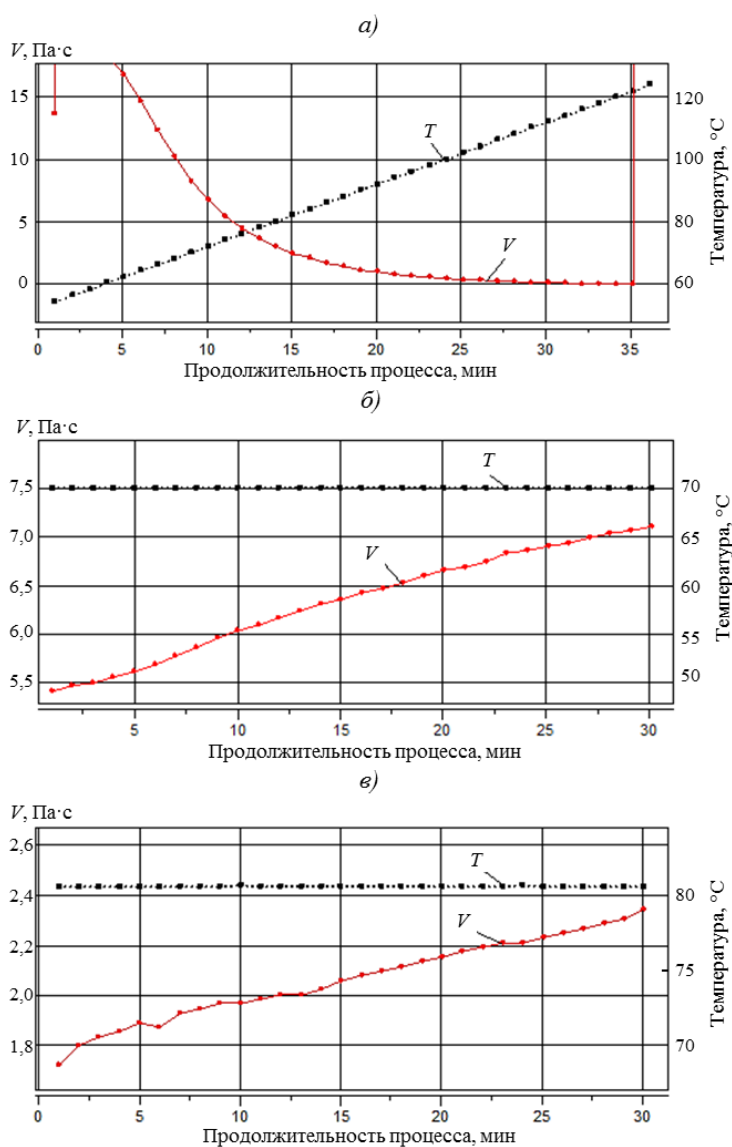


Рис. 2. Зависимость вязкости связующего ВСЭ-20 (V) при различных температурных режимах (T): нагрев от 70 до 145°C со скоростью 2°C/мин (a); выдержка при 70°C ($б$); выдержка при 80°C (e)

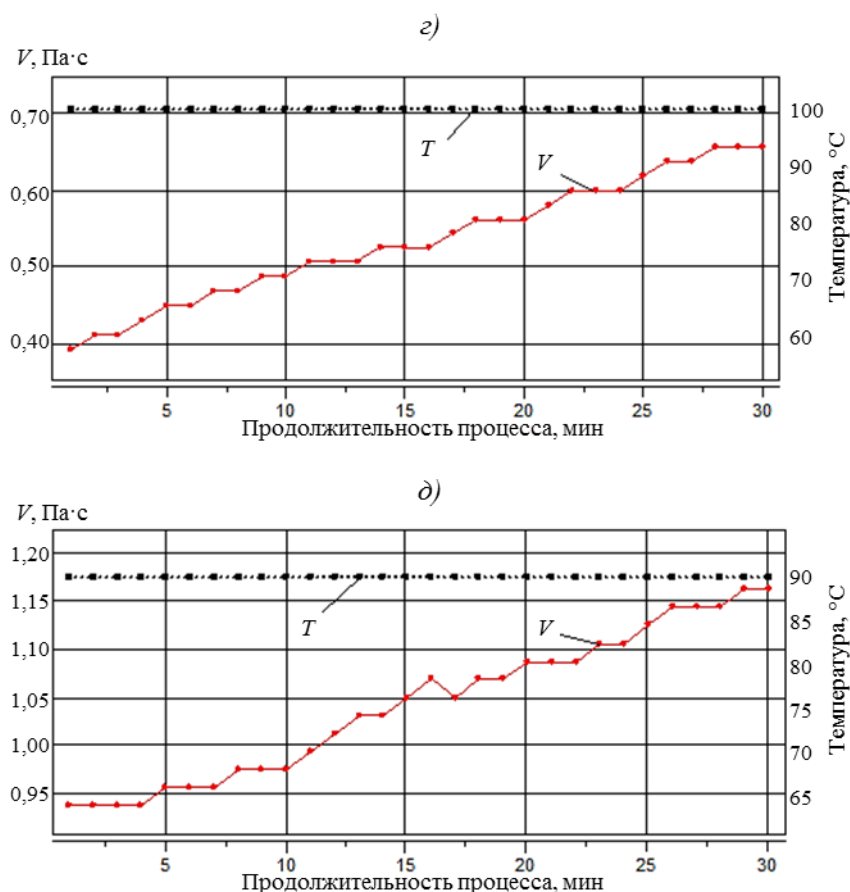


Рис. 2 (продолжение). Зависимость вязкости связующего ВСЭ-20 (V) при различных температурных режимах (T): выдержка при 100°C (z); выдержка при 90°C (d)

Из анализа полученных результатов исследований реологических свойств определена температура нагрева связующего ВСЭ-20 для изготовления пленки на установке УПР-4, которая составляет $80 \pm 5^\circ\text{C}$.

Для защиты от внешних воздействий и предотвращения слипания слоев пленки связующего выбрана технологическая подложка в виде бумаги с антиадгезионным покрытием и полиэтиленовой пленки низкого давления.

При проведении исследования температуры скатывания связующего на подложке в капли вследствие поверхностного натяжения связующее наносили на бумагу с антиадгезионным покрытием и полиэтиленовую пленку, затем выдерживали при температурах от 70 до 95°C . Далее провели визуальные исследования растекания связующего с использованием данных видов подложек. Для полиэтиленовой пленки температура стекания составила $95 \pm 5^\circ\text{C}$, а для антиадгезионной бумаги: $90 \pm 5^\circ\text{C}$.

Для оценки изменения вязкости связующего при хранении по рекомендуемым условиям в холодильнике при 13°C , проведены замеры при поставке и через 2 и 6 мес хранения. Замеры проводили на вискозиметре марки «Brookfield». Значительного изменения вязкости обнаружено не было – увеличение $< 0,3\%$ от начала хранения. Полученные результаты показали, что время хранения связующего не скажется на его свойствах и не повлияет на процесс изготовления из него пленки.

При хранении рулона в неподвешенном состоянии и при температурах $> 26^\circ\text{C}$ наблюдалось скатывание связующего под собственной массой, что приводит к нарушению поверхностной плотности пленочного связующего.

Исследование влияния величины пленкообразующего зазора, температуры связующего и скорости протяжки подложки на величину поверхностной плотности пленочного связующего проводили на серийной установке УПР-4 по двум технологическим схемам изготовления пленок связующего (рис. 3 и 4).

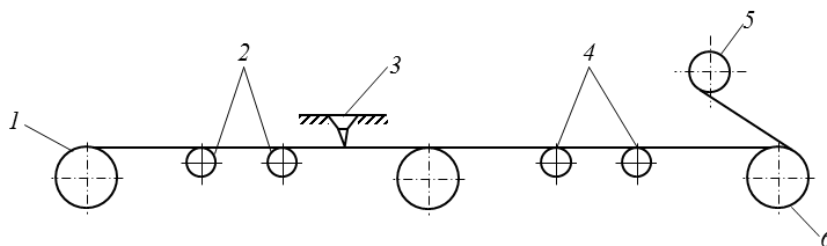


Рис. 3. Схема изготовления пленочного связующего при помощи фильеры:

1 – размоточное устройство с антиадгезионной бумагой; 2 – направляющие валы; 3 – фильера со связующим; 4 – направляющие валы (камера охлаждения); 5 – размоточный вал с полиэтиленовой пленкой; 6 – намоточный вал

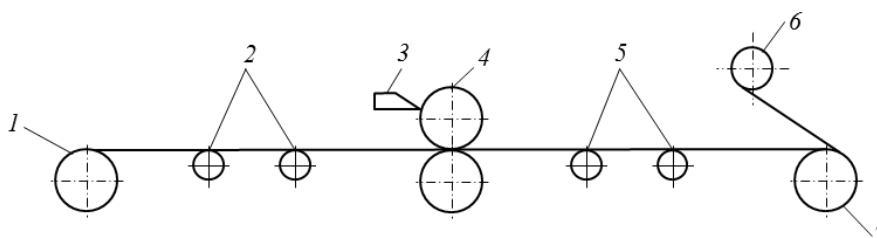


Рис. 4. Схема изготовления пленочного связующего при помощи ракеля:

1 – размоточное устройство с антиадгезионной бумагой; 2 – направляющие валы; 3 – рапель со связующим; 4 – наносящий вал; 5 – направляющие валы (камера охлаждения); 6 – размоточный вал с полиэтиленовой пленкой; 7 – намоточный вал

В соответствии с приведенными технологическими схемами для связующего ВСЭ-20 на установке УПР-4 установлены температуры реактора со связующим – $T_p=75^\circ\text{C}$, фильеры и ракеля – $T_\phi=T_{рк}=80^\circ\text{C}$, чтобы обеспечить необходимые параметры адгезии связующего с технологической подложкой из бумаги. Скорость протяжки через фильеру регулировалась от 1 до 3 м/мин. Зазор у фильеры и между ракелем и бумагой (без учета толщин бумаги и пленок) устанавливали размером 0,1; 0,2; 0,4 и 0,6 мм. Замеры поверхностной плотности связующего, полученные по двум технологическим схемам с помощью фильеры и ракеля, приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Поверхностная плотность пленочного связующего ВСЭ-20, изготовленного с помощью рапельной технологии, при различных зазорах и скоростях протяжки

Зазор правый и левый, мм	Скорость протяжки, м/с	Поверхностная плотность, г/м ² , в точках				Отклонение, %
		правой	средней	левой	среднее значение	
0,6	1	708	710	705	708	0,7
	2	683	686	682	684	0,6
	3	624	620	627	624	1,1
0,4	1	525	526	530	527	0,9
	2	510	507	512	510	1,0
	3	481	477	479	479	0,8
0,2	1	428	425	422	425	1,4
	2	402	408	403	404	1,5
	3	378	387	375	380	3,2
0,1	1	263	265	264	264	0,8
	2	240	243	246	243	2,5
	3	220	221	223	221	1,4

Таблица 2

**Поверхностная плотность пленочного связующего ВСЭ-20,
изготовленного с помощью фильеры, при различных зазорах и скоростях протяжки**

Зазор правый и левый, мм	Скорость протяжки, м/с	Поверхностная плотность, г/м ² , в точках				Отклонение, %
		правой	средней	левой	среднее значение	
0,6	1	740	780	770	763	5,2
	2	732	763	721	739	5,7
	3	660	676	698	678	5,6
0,4	1	566	550	584	567	6,0
	2	550	576	580	569	5,3
	3	510	500	530	513	5,8
0,2	1	458	436	429	441	6,6
	2	433	410	422	422	5,5
	3	425	448	435	436	5,3
0,1	1	269	287	276	277	6,5
	2	253	265	251	256	5,5
	3	240	243	254	246	5,7

Обсуждение и заключения

Результаты проведенных исследований показали, что при использовании ракельной технологии разброс значений поверхностной плотности связующего ВСЭ-20 меньше. Кроме того, при равных зазорах фильер и скоростей пропитки по ракельной технологии получают меньшие значения поверхностной плотности. Такой разброс значений плотности пленки можно объяснить недостаточной жесткостью системы при использовании фильеры.

На основании исследований установлено, что технологические параметры пропиточных машин вносят достаточно большую погрешность в поверхностную плотность пленочного связующего, что требует регулировки параметров для каждого вида пропиточных машин для получения требуемых параметров пленочного связующего. Изменение содержания связующего в пластике ведет к разбросу толщины монослоя, что нарушает геометрическую форму детали. Такое изменение приводит к изменению распределения напряжений при нагрузке детали. Увеличивается также общая масса детали. Завышенное содержание связующего негативно сказывается на механических характеристиках детали в целом [14]. Для исключения разброса содержания связующего необходимо учитывать жесткость системы. В качестве контроля поверхностной плотности подойдут методы просвечивания, основанные на измерении прошедшего излучения сквозь вещество [15].

Хранение изготовленной пленки связующего должно осуществляться по нормативной документации для обеспечения ее качественных показателей на начальном уровне. Не соответствующее хранение пленки связующего приводит к изменению ее физических свойств. Так, хранение при повышенных температурах (>26°С) приводит к скатыванию пленки. Хранение рулона в неподвешенном состоянии вызывает перетекание связующего в нем. Правильное хранение рулона исключит появление неоднородностей.

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.
2. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002: юбилейный науч.-технич. сб. М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 23–47.

3. Андреев А. В., Демиденко З. Н., Андреева В. А. Технологические аспекты применения пленочных связующих при создании конструкций из композиционных материалов пассажирских и транспортных самолетов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. 2013. Вып. 4. С. 21–26.
4. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии. 2008. 822 с.
5. Нелюб В.А., Гращенков Д.В., Коган Д.И., Соколов И.А. Применение прямых методов формования при производстве крупногабаритных деталей из стеклопластиков // Химическая технология. 2012. №13. С. 735–739.
6. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
7. Хрульков А.В., Душин М.И., Попов Ю.О., Коган Д.И. Исследования и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 292–301.
8. Григорьев М.М., Коган Д.И., Твердая О.Н., Панина Н.Н. Особенности изготовления ПКМ методом RFI // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2015).
9. Постнова М.В., Постнов В.И. Опыт развития безавтоклавных методов формования ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №4. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-6-6.
10. Тимошков П.Н., Платонов А.А., Хрульков А.В. Пропитка пленочным связующим (RFI) как перспективная безавтоклавная технология получения изделий из ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №5. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-5-9-6.
11. Коган Д.И. Технология изготовления полимерных композиционных материалов методом пропитки пленочным связующим: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 215 с.
12. Чурсова Л.В., Душин М.И., Коган Д.И., Панина Н.Н., Ким М.А., Гуревич Я.М., Платонов А.А. Пленочные связующие для RFI-технологии // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 63–66.
13. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. М.: ВИАМ, 2001. №1. С. 3–8.
14. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / под ред. А.А. Берлина. СПб.: Профессия, 2009. 556 с.
15. Постнов В.И., Бурхан О.Л., Качура С.М., Рахматуллин А.Э., Самсонов А.В., Ямаев Р.Р., Шершак П.В. Непрерывный автоматизированный контроль массового содержания пленочного клеевого связующего в препрегах в процессе их изготовления // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. №4–3. С. 830–833.