



УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-7-7

ВЛИЯНИЕ АППРЕТОВ НА СВОЙСТВА ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

Э.Я. Бейдер

кандидат технических наук

Г.Н. Петрова

кандидат технических наук

Т.Ф. Изотова

Сентябрь 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-7-7

Э.Я. Бейдер¹, Г.Н. Петрова¹, Т.Ф. Изотова¹

ВЛИЯНИЕ АППРЕТОВ НА СВОЙСТВА ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

Приведены результаты исследований по выбору аппретирующих составов для стеклопластиков на основе теплостойкого термопластичного связующего – полисульфона ПСФ-150 – с целью повышения уровня свойств ПКМ. Изучено влияние таких аппретирующих составов, как растворы эпоксидных смол с различным эпоксидным эквивалентом, роливсан, фуриловый спирт, полисульфон и др.

Показана зависимость механических свойств термопластичных стеклопластиков от природы аппрета и его количества.

Рассмотрены пожаробезопасные характеристики (горючесть, дымообразование и тепловыделение) разработанных термопластичных стеклопластиков и их соответствие отечественным (АП-25) и зарубежным (FAR-25) требованиям.

Показано, что природа аппрета не сказывается на горючести и дымообразовании термопластичных стеклопластиков, но влияет на его тепловыделение. Даны рекомендации по применению термопластичных стеклопластиков на основе полисульфона ПСФ-150.

Ключевые слова: *полимерный композиционный материал, термопластичные связующие, аппретирующие составы, физико-механические характеристики, пожаро-безопасные свойства.*

E.Y. Beyder, G.N. Petrova, T.F. Izotova

AN INFLUENCE OF COUPLING AGENT ON PROPERTIES OF THERMOPLASTIC GLASS REINFORCED PLASTICS

Results of investigation of coupling agents chosen for glass fiber reinforced plastics (GFRP) on the basis of thermoplastic heat-resistant binder - polysulfone PSU-150 aimed to get polymer composite materials with advanced properties is given. The influence of such coupling agents as epoxy resins solutions with different epoxy equivalent, rolivsan, furfuryl alcohol, polysulfone etc. was investigated.

Mechanical properties of GFRP are shown as a dependence on coupling agent's nature and its quantity.

Fireproof characteristics (combustibility, smoke density, heat release) of the developed thermoplastics GFRP and their accordance to domestic (AP-25) and foreign (FAR-25) requirements are considered.

It is shown that coupling agent's nature does not effect on combustibility and smoke density of GFRP but has an influence on their heat release. Recommendations on the use of thermoplastic GFRP based on polysulfone PSU-150 binder are given.

Keywords: *composite polymeric material, thermoplastic binders, coupling agents, physical and mechanical properties, fireproof properties.*

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

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) нашли широкое применение в авиакосмической технике. Используются ПКМ на основе как терморезистивных, так и термопластичных связующих [1–9].

Основной задачей при создании ПКМ является организация эффективного межфазного адгезионного взаимодействия компонентов на границе их раздела. В частности установлено, что при производстве стеклопластиков наиболее эффективным технологическим приемом усиления физической и химической взаимосвязи компонентов является операция аппретирования. Аппретами называют вещества, определяющие (задающие) структуру, свойства и протяженность слоя между поверхностью наполнителя и матрицей. Особую роль аппреты играют в ПКМ, получаемых на основе термопластичных термостойких матриц (поликарбонат, полиарилсульфоны, полиэфиримиды, полифениленсульфид, полиэфиркетоны, фторопласты), обладающих низкими адгезионными свойствами со стеклянными, базальтовыми и углеродными волокнами [10–12].

Исследование широкого круга промышленных замасливателей, а также опытных и специально синтезированных аппретов и замасливателей на основе эпокси-, амино-, винил-, хлорсиланов и их смесей показало, что прочность соединений «матрица–стеклянное волокно» существенно зависит от используемого кремнийорганического соединения. Известно, что наличие на поверхности волокон наполнителя аппретов в значительной степени определяет механические свойства ПКМ. Самые высокие значения адгезионной прочности в стеклопластиках достигаются при применении эпоксисилана ЭС-1 (глицидоксипропилтриэтоксисилан) и аминосилана АГМ-9 (γ -аминопропилтриэтоксисилан), наносимых на волокна в виде аппретов [11].

В данной статье приведены результаты исследований по выбору аппретирующих составов с целью повышения физико-механических и пожаробезопасных свойств стеклопластиков на основе теплостойкого термопластичного связующего полисульфона ПСФ-150.

Материалы и методы

В качестве аппретирующих составов опробованы растворы эпоксидных смол с различным эпоксидным эквивалентом в спиртоацетоновой смеси, роливсана, фурилового спирта, полисульфона и др.:

– замасливатель «76» – эмульсия в воде политерпенового масла и дибутилсебацата с добавлением γ -аминопропилтриэтоксисилана;

– композиции «А» и «Э», основу которых составляет дисперсия ЭДСВ-95 – водная эмульсия эпоксидной смолы ЭД-20, стабилизированная неогеновыми эмульгаторами. В композиции «А» – аппрет γ -аминопропилтриэтоксисилан, в композиции «Э» – аппрет γ -глицидоксипропилтриметоксисилан;

– универсальный аппрет «У»;

– фуриловый спирт (ФС);

– 5%-ный раствор смолы роливсан в ацетоне;

– 5%-ный раствор полисульфона ПСК-1 в метиленхлориде;

– 5%-ный и 10%-ный растворы эпоксидных смол ЭД-20, КДА и диапласта.

Выбор эпоксидных аппретов объясняется тем, что они образуют с полисульфоновым связующим хорошо совместимые растворы и расплавы. Одновременно при повышенных температурах эпоксидные смолы образуют химическую связь с силановым замасливателем «76», используемым при изготовлении стеклотканей [12].

В качестве наполнителя применяли стеклоткань марки Т-15(П)-76 на основе полых волокон и стеклоткань марки ЭЗ-200 электроизоляционного назначения. Перед нанесением аппретов «А», «Э» и «У» стеклоткань отжигали для удаления замасливателя (парафиновая эмульсия).

Аппретирующие составы наносили на лабораторной пропиточной машине с температурой по зонам шахты от $50\pm 5^\circ\text{C}$ до $120\pm 5^\circ\text{C}$ с последующей сушкой стеклоткани, обработанной эпоксидными аппретами при температуре 150°C в течение 30 мин. Образцы стеклоткани, аппретированные фуриловым спиртом, подвергали термической обработке (т.о.) при температуре 160°C в течение 30 мин.

Влияние аппретов оценивали по прочности образцов термопластичного стеклопластика при сжатии ($\sigma_{сж}$) и статическом изгибе ($\sigma_{в.и}$) при температуре 20 и 100°C. Одновременно изучали содержание аппрета на стеклоткани, режимы термообработки.

Результаты

Образцы листового стеклопластика для испытаний получали по пленочной технологии путем послойной выкладки аппретированных стеклотканей и пленок толщиной 50–70 мкм на основе полисульфона ПСФ-150. Формование стеклопластиков осуществляли способом прямого прессования на гидравлическом прессе при температуре, на 110–130°C превышающей температуру стеклования термопластичного связующего, и удельном давлении – до 1,5 МПа [13–15].

Исследование свойств стеклопластиков осуществляли по стандартным методикам в соответствии с ГОСТ 4651 и ГОСТ 4648. Механические свойства материала определяли на образцах, полученных механической обработкой из листового пластика толщиной ≥ 2 мм, вырезанных по основе. Результаты проведенных исследований приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Влияние природы аппрета на прочность термопластичного стеклопластика на связующем ПСФ-150

Стеклоткань	Аппретирующий состав	$\sigma_{в.сж}$		$\sigma_{в.и}$
		МПа, при температуре испытания, °С		
		20	100	20
ЭЗ-200	«76»	109	–	300
	«А»	63	–	180
Т-15(П)-76	«76»	320	265	440
	10%-ный раствор смолы ЭД-20 (т.о.)	420	300	540
	10%-ный раствор смолы ЭД-20 с отвердителем	300	250	–
	5%-ный раствор диапласта	460	240	–
	5%-ный раствор полисульфона ПСК-1	270	240	350
	10%-ный раствор КДА	510	380	450
	5%-ный раствор ПСК-1+КДА	530	380	450
	5%-ный раствор роливсана	260	250	–
	5%-ный раствор роливсана (т.о.)	294	250	500

Видно, что оптимальными прочностными свойствами обладают стеклопластики, аппретированные составами, содержащими эпоксидные смолы. Установлено, что сушка при 150°C в течение 30 мин (термическая обработка) с последующим формованием стеклопластика обеспечивают условия, при которых аппрет активно взаимодействует с поверхностью стеклоткани и термопластичным связующим, обеспечивая достаточную адгезионную связь на границе раздела «стеклянное волокно–полисульфоновое связую-

щее». Отверждение аппретов приводит к снижению механических свойств термопластичного стеклопластика.

Таблица 2

Влияние содержания аппрета на свойства термопластичного стеклопластика						
Состав ПКМ	Аппретирующий состав	Содержание аппрета, % (по массе)	$\sigma_{в.сж}$		$\sigma_{в.н}$	
			МПа, при температуре испытания, °С			
			20	100	20	100
Стеклоткань Т-15(П)-76+ +полисульфон ПСФ-150	Без аппрета (в исходном состоянии) ЭД-20	–	270	240	410	360
		2	330	300	600	410
		5	400	330	600	530
		7	420	350	540	430
		8,5	330	290	520	430
		12	300	270	500	430

Видно, что для стеклопластика на основе связующего ПСФ-150 наиболее высокие прочностные характеристики достигаются при обработке стеклоткани Т-15(П)-76 с помощью 10%-ного раствора эпоксидной смолы ЭД-20 в спиртоацетоновой смеси. Оптимальное содержание смолы на стеклоткани составляет 5–7% (по массе). В этом случае $\sigma_{в.сж}$ материала, изготовленного при температуре 260°С, возрастает до 420 МПа по сравнению с 270 МПа, полученными при использовании неаппретированной стеклоткани. Уровень сохранения свойств при температуре 100°С составляет 83%.

Исследовано влияние аппретов на пожаробезопасные свойства стеклопластиков на основе термопластичной матрицы ПСФ-150 и соответствие ПКМ требованиям отечественных (АП-25) и зарубежных (FAR-25) норм по пожаробезопасности: горючести, дымообразованию и тепловыделению [16–19]. Результаты испытаний приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Горючесть термопластичных стеклопластиков (горение каплеь отсутствует)					
Наполнитель+аппрет	Толщина образца, мм	Продолжительность экспозиции пламенем горелки, с	Продолжительность остаточного горения, с	Длина обугливания, мм	
ЭЗ-200+«А»	0,35–0,38	12	3	20	
		60	1	25	
ЭЗ-200+«У»	0,36–0,38	12	6	20	
		60	1	25	
ЭЗ-200+«Э»	0,35–0,36	12	1	20	
		60	1	30	
ЭЗ-200+«76»	0,33–0,37	12	6	25	
		60	1	30	
Т-15(П)-76	0,35	– без аппрета	12	22	
		– аппрет ЭД-20	12	23	
	0,31–0,33	– аппрет роливсан (т.о.)	12	2	20
		– аппрет ФС (т.о.)	60	1	20

Установлено, что при продолжительности экспозиции пламенем в течение 12 и 60 с рецептура и природа аппрета практически не сказываются на горючести термопластичных стеклопластиков. Все исследованные стеклопластики на связующем ПСФ-150 относятся к самозатухающим материалам и полностью отвечают отечественным (АП-25) и международным (FAR-25.853) нормам пожаробезопасности (продолжительность остаточного горения – не более 15 с).

Аналогичные результаты получены при испытании образцов термопластичных стеклопластиков в диапазоне толщин от 0,35 до 1,0 мм с разными аппретирующими составами на дымообразование.

Установлено, что все исследованные стеклопластики относятся в основном ко II группе материалов – «слабодымящий» (D_4 – от 1 до 14) и к III группе – «среднедымящий» (D_4 – от 21 до 50), что также удовлетворяет требованиям норм АП-25 ($D_4=200$) [11].

Таблица 4

Тепловыделение термопластичных стеклопластиков

Наполнитель+аппрет	Толщина образца, мм	Максимальная интенсивность выделения тепла (пик), кВт/м ²	Общее количество выделившегося тепла за первые 2 мин испытания, (кВт·мин)/м ²
Э3-200+«А»	0,35–0,38	30	24
Э3-200+«У»	0,36–0,38	34	28
Э3-200+«76»	0,35–0,38	37	29
Э3-200+«Э»	0,33–0,37	32	30
	1,0	60	71
Т-15(П)-76 – без аппрета	0,35	40	30
	1,0	44	32
	1,2	49	50
– аппрет ЭД-20	0,35	61	47
	1,0	64	78
– аппрет роливсан (т.о.)	0,33–0,36	49	35
	1,0	63	55
– аппрет ФС (т.о.)	0,29–0,33	38	25

Испытания на тепловыделение показали, что значение максимальной интенсивности выделения тепла термопластичного (неаппретированного) стеклопластика на полисульфоне ПСФ-150 при изменении толщины с 0,35 до 1,2 мм составляет от 40 до 49 кВт/м² и общее количество выделившегося тепла при горении материала под воздействием внешнего теплового потока 35 кВт/м² за первые 2 мин не превышает 50 (кВт·мин)/м², что соответствует требованиям норм АП-25 (<65 кВт/м²).

Установлено, что аппретирование стеклоткани повышает тепловыделение термопластичных стеклопластиков.

Из приведенных данных следует, что разработанные стеклопластики на основе полисульфона ПСФ-150 имеют высокие прочностные свойства и удовлетворяют нормам АП-25 и FAR-25.853 по пожаробезопасности.

Обсуждение и заключения

Таким образом, исследование влияния аппретов на механические и пожаробезопасные свойства стеклопластиков на основе термопластичной матрицы (полисульфона ПСФ-150) позволило определить, что аппретирующие составы, содержащие эпоксидные смолы, в 1,3–1,8 раза повышают прочностные свойства ($\sigma_{в.сж}$, $\sigma_{в.и}$) разработанных стеклопластиков, но снижают их пожаробезопасные (тепловыделение) характеристики.

Установлено, что для изготовления деталей конструкционного назначения из термопластичных стеклопластиков с высокими прочностными свойствами целесообразно применять аппретированные стеклоткани. Для изготовления деталей, для которых основным требованием является пожаробезопасность (для слабонагруженных деталей – интерьер, перегородки, потолок), аппретирование стеклотканей не требуется, достаточно наличие замасливателя. Разработанные термопластичные стеклопластики нашли применение в промышленности для изготовления деталей радиотехнического и конструкционного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия. 2006. С. 267–272.
2. Бейдер Э.Я., Малышенко С.В., Петрова Г.Н. Композиционные термопластичные материалы – свойства и способы переработки //Пластические массы. 2013. №7. С. 56–60.
3. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я. Конструкционные материалы на основе армированных термопластов //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 30–40.
4. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №8. С. 7–17.
5. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
6. Агафонова А.С., Кондрашов С.В. Особенности технологии изготовления монолитного стеклопластика радиотехнического назначения (МСРТ) //Авиационные материалы и технологии. 2014. №1. С. 30–33.

7. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
8. Комаров Г.А. Состояние, перспективы и проблемы применения ПКМ в технике //Полимерные материалы. 2009. №2. С. 5–9.
9. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Стеклопластики – многофункциональные композиционные материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 253–260.
10. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия. 2011. С. 32–33, 104–140, 180–188.
11. Степашкин А.А., Чурков Д.Н. и др. Поверхностная обработка углеродных волокон //Материаловедение. 2013. №2. С. 44–50.
12. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Изотова Т.Ф., Барботько С.Л. Стеклопластики на термопластичной матрице //Труды ВИАМ. 2013. №7. Ст. 03 (viam-works.ru).
13. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я., Изотова Т.Ф., Малышенко С.В. Композиционные термопластичные материалы – способы получения и переработки //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. №10. С. 10–17.
14. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Изотова Т.Ф., Гуреева Е.В. Композиционные термопластичные материалы и пенополиимиды //Труды ВИАМ. 2013. №11. Ст. 01 (viam-works.ru).
15. Петрова Г.Н., Барботько С.Л., Болотина Л.М., Чеботарев В.П. и др. Пожаробезопасные свойства полисульфонов //Пластические массы. 2005. №1. С. 46–48.
16. Барботько С.Л., Вольный О.С., Изотова Т.Ф. Математическое моделирование тепловыделения при горении для полимерных композиционных материалов различной толщины //Пожаровзрывобезопасность. 2007. Т. 16. №4. С. 16–20.
17. Коротков М.М., Изотова Т.Ф., Зуев А.В., Барботько С.Л. Влияние теплофизических свойств на пожаробезопасность термостойких полимеров на основе полисульфона //Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 17. №6. С. 11–15.
18. Шуркова Е.Н., Вольный О.С., Изотова Т.Ф., Барботько С.Л. Исследование возможности снижения тепловыделения при горении композиционного материала путем изменения его структуры //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 27–30.

REFERENCES LIST

1. Mihajlin Ju.A. Termoustojchivye polimery i polimernye materialy [Heat resistant polymers and polymeric materials]. SPb.: Professija. 2006. S. 267–272.
2. Bejder Je.Ja., Malysheok S.V., Petrova G.N. Kompozicionnye termoplastichnye materialy – svojstva i sposoby pererabotki [The composite thermoplastic materials – Properties and processing methods] //Plasticheskie massy. 2013. №7. S. 56–60.
3. Petrova G.N., Bejder Je.Ja. Konstrukcionnye materialy na osnove armirovannyh termoplastov [Structural materials based on reinforced thermoplastics] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 30–40.
4. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
5. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace Materials] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2008. №3. S. 2–14.
6. Agafonova A.S., Kondrashov S.V. Osobennosti tehnologii izgotovlenija monolitnogo stekloplastika radiotekhnicheskogo naznachenija (MSRN) [Features reinforced fiberglass manufacturing technology of Radio destination (MTRD)] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №1. S. 30–33.
7. Kablov E.N. Himija v aviacionnom materialovedenii [Chemistry aviation materials] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 3–4.
8. Komarov G.A. Sostojanie, perspektivy i problemy primenenija PKM v tehnikе [Condition, prospects and problems of application of PCM in the art] //Polimernye materialy. 2009. №2. S. 5–9.
9. Davydova I.F., Kavun N.S. Stekloplastiki – mnogofunkcional'nye kompozicionnye materialy [GRP – multifunctional composite materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 253–260.
10. Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S. i dr. Polimernye kompozicionnye materialy: struktura, svojstva, tehnologija [Polymer composites: Structure, properties and Technology]. SPb.: Professija. 2011. S. 32–33, 104–140, 180–188.
11. Stepashkin A.A., Churkov D.N. i dr. Poverhnostnaja obrabotka uglerodnyh volokon [Surface treatment of carbon fibers] //Materialovedenie. 2013. №2. S. 44–50.

12. Bejder Je.Ja., Petrova G.N., Izotova T.F., Barbot'ko S.L. Stekloplastiki na termoplastichnoj matrice [Glass-reinforced thermoplastic matrix on] //Trudy VIAM. 2013. №7. St. 03 (viam-works.ru).
13. Petrova G.N., Bejder Je.Ja., Izotova T.F., Malysheok S.V. Kompozicionnye termoplastichnye materialy – sposoby poluchenija i pererabotki [Composite thermoplastic materials – methods of obtaining and processing] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2013. №10. S. 10–17.
14. Bejder Je.Ja., Petrova G.N., Izotova T.F., Gureeva E.V. Kompozicionnye termoplastichnye materialy i penopoliimidy [Thermoplastic composite materials and partly penopoliimidy] //Trudy VIAM. 2013. №11. St. 01 (viam-works.ru).
15. Petrova G.N., Barbot'ko S.L., Bolotina L.M., Chebotarev V.P. i dr. Pozharobezopasnye svojstva polisul'fonov [Fireproof properties of polysulfones] //Plasticheskie massy. 2005. №1. S. 46–48.
16. Barbot'ko S.L., Vol'nyj O.S., Izotova T.F. Matematicheskoe modelirovanie teplovydelenija pri gorenii dlja polimernih kompozicionnyh materialov razlichnoj tolshhiny [Mathematical modeling of heat during combustion to polymer composite materials of different thicknesses] //Pozharovzryvobezopasnost'. 2007. T. 16. №4. S. 16–20.
17. Korotkov M.M., Izotova T.F., Zuev A.V., Barbot'ko S.L. Vlijanie teplofizicheskikh svojstv na pozharobezopasnost' termostojkih polimerov na osnove polisul'fona [Influence of thermo-physical properties on heat-resistant fire safety polysulfone-based polymers] //Pozharovzryvobezopasnost'. 2008. T. 17. №6. S. 11–15.
18. Shurkova E.N., Vol'nyj O.S., Izotova T.F., Barbot'ko S.L. Issledovanie vozmozhnosti snizhenija teplovydelenija pri gorenii kompozicionnogo materiala putem izmenenija ego struktury [Feasibility study for reducing the combustion heat of the composite material by modifying its structure] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 27–30.