

УДК 621.792.053

А.П. Петрова, Н.Ф. Лукина

КЛЕИ ДЛЯ МНОГОРАЗОВОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Представлен перечень клеящих материалов, используемых в изделии «Буран», их основные физико-механические свойства и способы применения. Представлены назначения указанных материалов.

Ключевые слова: изделие «Буран», клей, клей Эластосил, склеивание, подготовка поверхности под склеивание.

A list of adhesive materials used in «Buran» spaceship structures, as well as their basic physical and mechanical properties and ways of application are given. Application fields of the mentioned materials are presented.

Key words: «Buran» spaceship, adhesive, Elastosil adhesive, adhesion, surface preparation prior to adhesion.

В конструкции изделия «Буран» был использован большой ассортимент клеев различного назначения:

– *теплостойкие пленочные клеи* конструкционного назначения ВК-36 и ВК-36РТ – для изготовления сотовых конструкций из алюминиевых сплавов и ПКМ (агрегаты механизации и управления); крупногабаритных агрегатов специального назначения сложного конструктивного исполнения из полимерных композиционных материалов (панели РТО, створки отсеков полезного груза);

– *теплостойкие клеи* – для приклеивания теплозащитных и теплоизоляционных материалов; крепления тензо- и термометрической оснастки высокотемпературных датчиков, а также термуплотнительных соединений;

– *клеи для неметаллических материалов* – для приклеивания кремнийорганических резин к металлам; декоративно-отделочных материалов; склеивания материалов модуля К (внешний и внутренний контур).

Применение клеев в изделии «Буран» позволило обеспечить работоспособность конструкции в процессе полета.

Особенно важной и сложной задачей явилось крепление теплозащитных материалов. К клею, применяемому для этих целей, предъявлялись следующие требования:

– интервал рабочих температур от -130 до $+300^{\circ}\text{C}$;

– удлинение отвержденной пленки – не менее 100%;

– адгезия к широкой номенклатуре материалов, таких как металлы, неметаллические материалы, в том числе теплоизоляционные с гидрофобизацией;

– условия работы – в среде воздуха, вакуума при температуре 300°C в течение 50 ч.

В результате проведенных работ в ВИАМ совместно с ГНИИХТЭОС был разработан клей-герметик Эластосил 137-175М*, представляющий

собой пастообразную вязкотекучую композицию на основе низкомолекулярного кремнийорганического каучука, катализатора и наполнителей, вулканизирующуюся при контакте с влагой воздуха с образованием резиноподобного материала [4]. Клей поставлялся в готовом для применения виде в тубах, что было особенно важно, поскольку позволило получать клей в условиях специализированного химического производства, организованного ГНИИХТЭОС совместно с ВИАМ на Данковском химическом заводе, а не изготавливать его (клей) перед применением на Тушинском машиностроительном заводе.

Одновременно с организацией производства клея-герметика Эластосил 137-175М на Данковском химическом заводе были смонтированы и запущены линия по производству туб, а также линия по расфасовке клея в тубы.

Клей-герметик является взрывобезопасным, в условиях применения при комнатной температуре клей не выделяет в воздух рабочей зоны токсичных химических веществ, оказывающих неблагоприятное воздействие на здоровье человека, работа при нормальном температурном режиме не требует специальных мер индивидуальной защиты. Свойства клея-герметика представлены в табл. 1.

Несмотря на то что температура стеклования клея-герметика составляет -110°C , при склеивании материалов гибкой теплозащитной изоляции (ТЗИ) изделия «Буран» клей обеспечивал работоспособность соединения до -130°C .

Данные по изменению свойств клея-герметика Эластосил 137-175М в процессе термостарения приведены в табл. 2.

Приведенные в табл. 2 данные показывают, что после термостарения при температуре 250 – 300°C в течение 50 ч прочностные характеристики клеевых соединений не изменяются, в то же время эластические свойства значительно снижаются, о чем свидетельствует уменьшение величины относительного удлинения клея с 110 до 60%.

Исследование длительной прочности клеевых соединений при склеивании материалов – фетр и тепло-

* В настоящее время марка Эластосил заменена на Эласил.

Таблица 1

Свойства клея-герметика Эластосил 137-175М

Наименование свойств	Значения свойств
Плотность, г/см ³	1,5
Температурный коэффициент линейного расширения, $\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹ , при температуре, °С: -110 +20 +300	160–170 230–250 150–185
Температура стеклования, °С	-110
Интервал рабочих температур, °С	-130÷300
Прочность при равномерном отрыве $\sigma_{от}$, МПа (не менее), при температуре, °С: +20 +300 -130	1,4 0,4–0,6 11,0
Прочность при сдвиге τ_v , МПа, при температуре, °С: 20 300	1,5 0,4
Модуль упругости при растяжении, МПа	0,5
Диэлектрические характеристики при 10 ¹⁰ Гц при 20°С: диэлектрическая проницаемость ϵ тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$	3,47 0,317
Относительное удлинение отвержденной пленки, %, при температуре, °С: +20 +300 -110 -130	120 50 2 25
Срок хранения в тубах, мес (не менее)	6
Жизнеспособность после удаления из тубы (при 22±5°С), мин	60
Теплопроводность λ , Вт/(м·К ⁻¹), при температуре, °С: 20 300	0,36 0,34
Предел прочности при растяжении σ_v , МПа, при температуре, °С: -110 +20 +300	8–9 0,8–1,3 0,4–0,9
Удельное объемное электрическое сопротивление* ρ_v , Ом·м	$2 \cdot 10^{17}$

* Сохраняется после воздействия температуры 250°С в течение 50 ч.

Таблица 2

Влияние термостарения на свойства клеевых соединений на клее-герметике Эластосил 137-175М

Режим термостарения	Температура испытания, °С	Прочность при сдвиге $\tau_{сдв}$	Прочность при разрыве σ_v	Относительное удлинение, %
		МПа		
Без старения (контрольные образцы)	20	2,2	1,4	110
	300	1,1	–	–
250°С, 50 ч	20	3,4	–	–
	250	>1,7	0,9	60
300°С, 50 ч	20	2,5	–	–
	300	1,5	–	–

защитный элемент – с замером их деформации показало, что обеспечивается работоспособность клеевых соединений в течение 100 ч при $\sigma_{от}=0,11$ МПа с деформацией 7,5%. При $\sigma_{от}=0,04$ МПа деформация материалов, склеенных клеем Эластосил 137-175М, составила 3,4%.

Клей-герметик Эластосил 137-175М использован в изделии «Буран» для склеивания широкой гаммы материалов, таких как плиточная теплозащита и теплоизоляционные материалы; кремнийорганические резины; ткани с кремнийорганическим покрытием между собой, а также с алюминиевыми, титановыми сплавами, сталью и фетром; стеклоткани и текстильные застежки с алюминиевыми сплавами, стеклопластиком и углепластиком; пленки ПЭТФ со стеклотканью и стеклопластиком.

Расход клея-герметика Эластосил 137-175М отличался при склеивании различных материалов и составлял: для металлов 200–250 г/м², для резин и тканей 300–400 г/м², для пористых и волокнистых материалов 500–550 г/м².

После нанесения клея-герметика на склеиваемые поверхности их соединение производится практически сразу. Это связано с тем, что вулканизация клея-герметика начинается после удаления из трубы за счет контакта с влагой воздуха с образованием поверхностной пленки. Жизнеспособность клея-герметика характеризуется временем образования поверхностной пленки и составляет 60 мин при условии, что температура воздуха помещения, в котором проводятся работы по склеиванию, не ниже 17°C, а относительная влажность 35–80%.

Давление при склеивании должно создаваться не позднее чем через 50 мин с момента нанесения клея на склеиваемые поверхности и составлять 0,01–0,02 МПа. Давление может быть снято через 18 ч после начала процесса отверждения с последующей выдержкой клеевого соединения дополнительно при температуре 100°C в течение 2 ч без давления.

Давление создавалось механически или с помощью вакуума. Технология приклеивания ТЗИ на отдельные участки крупногабаритного изделия с помощью вакуума непосредственно на изделии была отработана впервые в нашей стране, для ее реализации было организовано производство необходимых материалов. При создании давления вакуумом, к алюминиевой обшивке, загрунтованной одним слоем грунтовки ЭП-0214, за пределами склеиваемого участка с помощью герметизирующего жгута типа Герлен-12 или 51Г-27 крепится пленка ПА-6, которая образует вакуумный мешок. Этот способ передачи давления весьма удобен, особенно для изготовления агрегатов со сложной конфигурацией поверхности. Однако после завершения процесса склеивания необходимо тщательно удалить герметизирующий жгут с поверхности, на которую его наносили, с помощью тампона из х/б ткани и

аэросила, так как следы жгута на поверхности отрицательно сказываются на адгезии клея к такой поверхности. Клей Эластосил 137-175М отличается плохой текучестью, поэтому обеспечение равномерного и постоянного давления при склеивании является одним из основных условий получения качественного склеивания. Режим отверждения клея: 5 сут при комнатной температуре с момента запрессовки изделия или 18–24 ч под давлением при комнатной температуре, с последующей выдержкой в течение 4 сут (без права проведения монтажных работ на соседних участках).

Важным этапом является подготовка поверхности под склеивание из-за огромных масштабов работ (приклеено более 38 тыс. плиток) и большой поверхности склеивания. Листы из алюминиевых сплавов подвергались анодированию в серной кислоте при температуре электролита 10–20° С, с наполнением анодной пленки хромпиком, при этом толщина анодной пленки составляла 5–8 мкм. Непосредственно после анодирования (не позднее чем через 3 ч) наносили один слой эпоксидной грунтовки ЭП-0214 горячей сушки. Грунтовку наносили в два слоя: первый слой – сразу после анодирования, второй – непосредственно перед операцией склеивания. Время между нанесением 1-го и 2-го слоев грунтовки не ограничено, что очень удобно, особенно для серийного производства крупногабаритных изделий. Экспериментально установлено, что толщина слоя грунтовки ЭП-0214 не должна превышать 50 мкм. При большей толщине резко снижается прочность клеевых соединений, (особенно при циклическом воздействии температур от -130 до +180°C) и наблюдается отслоение грунта от поверхности алюминиевой обшивки.

Детали из титановых сплавов и нержавеющей сталей после обезжиривания подвергали гидропескоструйной обработке или обдувке корундовым песком. Не позднее чем через 12 ч после гидропескоструйной обработки детали из нержавеющей сталей пассивируют. Перед приклеиванием ТЗИ обезжиренные поверхности тщательно протирают очистительной пастой на основе микропорошка электрокорунда белого марки К-07 или М-7, нанесенной на слегка влажную губку из поролона или салфетку из х/б ткани. По смачиваемости поверхности пастой в процессе протирки оценивают качество предварительной очистки. Протирку заканчивают, когда слой пасты будет хорошо смачивать поверхность и не собираться в капли. Слой высохшей пасты способствует сохранению чистоты и активности подготовленной поверхности в течение 24 ч. Паста с поверхности удаляется с помощью пылесоса, а также губкой или салфеткой, смоченной в воде и туго отжатой. После удаления пасты на чистую и сухую поверхность наносится 5%-ный раствор продукта К-10С в бензине. После сушки подслоя из продукта К-10С при температуре 17–30°C в течение 1 ч можно приступить к склеиванию. Разрыв во времени

Таблица 3

**Влияние подготовки поверхности полимерных композиционных материалов
на основе углеродного волокна на прочность склеивания клеем-герметиком Эластосил 137-175М**

Способ подготовки поверхности	$\tau_{сдв}$, МПа, при температуре, °С	
	20	180
Удаление «жертвенного» слоя	2,4	1,5
Удаление «жертвенного» слоя, обработка продуктом К-10С	2,3	1,3
Удаление «жертвенного» слоя, нанесение I слоя грунта ЭП-0214 (холодная сушка 48 ч)	2,5	1,0

между обработкой поверхности, нанесением подслоя из продукта К-10С и нанесением клея-герметика Эластосил 137-175М не должен превышать 12 ч.

Детали из бериллиевого сплава АБМ-1 перед нанесением клея подвергаются анодированию в хромовокислом электролите или оксидированию в растворе $\text{Na}_2\text{SiF}_6 + \text{CrO}_3$. Затем на них наносят грунтовку ЭП-0214 (аналогично подготовке поверхности алюминиевых сплавов под склеивание).

На детали из полимерных композиционных материалов (толщиной 0,4 мм и более) на основе углеродного волокна в процессе формования с двух сторон наносили лавсановую ткань – «жертвенный» слой. Фиксацию ткани на поверхности, имеющей кривизну, осуществляли путем приглаживания утюгом, роликом или другими прикаточными средствами, нагретыми до температуры 70–80°С. Склеивание производили после удаления с поверхности ПКМ «жертвенного» слоя и нанесения на нее грунтовки ЭП-0214.

Грунтовка, с одной стороны, является адгезионным подслоем, с другой – обеспечивает проведение разметки, поскольку она желтого цвета – на черной поверхности композиционных материалов разметка не видна.

Нанесение «жертвенного» слоя на поверхности композиционных материалов и удаление его с поверхности перед проведением работ по склеиванию – ответственная операция, поскольку, во-первых, он (слой) должен прочно удерживаться на поверхности и служить технологическим элементом защиты от механических повреждений и загрязнения детали вплоть до момента склеивания, и во-вторых – удаляться с поверхности ПКМ без повреждения углеродных волокон (на поверхности не должно оставаться его следов).

В связи с этим были тщательно проработаны следующие вопросы:

- выбор материала «жертвенного» слоя;
- размер элементов «жертвенного» слоя и их конфигурация (для облегчения качественного удаления);
- использование перед выкладкой «жертвенного» слоя предварительно уложенных и закрепленных на поверхности ПКМ полосок антиадгезионной пленки, например триацетатцеллюлозной или фторопластовой, строго определенной толщины;
- технология выкладки «жертвенного» слоя на плоские и криволинейные поверхности;

– технологические приемы и инструмент для удаления жертвенного слоя.

Для проведения ремонтных работ был разработан клей-герметик Эластосил 137-175М-2, продолжительность отверждения которого сокращена до 24 ч, при этом продолжительность операций – с начала нанесения клея на обшивку до приложения давления склеивания – составила 30 мин (остальные свойства – на уровне свойств клеев-герметиков Эластосил 137-175М и Эластосил 137-175М-1).

Влияние способа подготовки поверхности полимерных композиционных материалов на прочность склеивания клеем Эластосил 137-175М иллюстрируют данные, приведенные в табл. 3.

Теплозащитные материалы на основе кварцевых волокон характеризуются высокой пористостью, поэтому при нанесении клея-герметика Эластосил 137-175М он впитывается в них и для обеспечения хорошей прочности требуется большой расход клея, что отрицательно сказывается на весовых параметрах изделия. В связи с этим разработка технологии склеивания теплозащитных элементов изделия проводилась с учетом необходимости обеспечения высоких адгезионных характеристик клея-герметика Эластосил 137-175М при небольшом его расходе на 1 м² склеиваемой поверхности. Для снижения расхода клея, перед его нанесением на поверхность пористых материалов применяли подслои, представляющий собой 30%-ный раствор клея Эластосил 137-175М в бутилацетате. Подслои наносили равномерным слоем с расходом 100–150 г/м². После нанесения подслоя – для удаления растворителя – проводилась «открытая» выдержка при температуре 17–30°С в течение не менее 1 ч и не более 12 ч.

При склеивании клеем-герметиком Эластосил 137-175М материалов на основе фенолоновых и терлоновых волокон поверхности обезжиривали с помощью тампонов, смоченных в бензине и туго отжатых, затем аналогичным образом смоченных в ацетоне. После каждого обезжиривания проводилась открытая выдержка при комнатной температуре в течение 15–20 мин (для удаления растворителя).

При склеивании пенопластов на их поверхность наносили два слоя грунта ЭП-0214 с расходом 200–250 г/м²: сушка первого слоя – в течение 90 мин при 17–30°С, второго – в течение 24 ч при 20°С. Загрунтованный пенопласт до нанесения клея разрешалось хранить 30 сут в полиэтиленовых мешках, предохра-

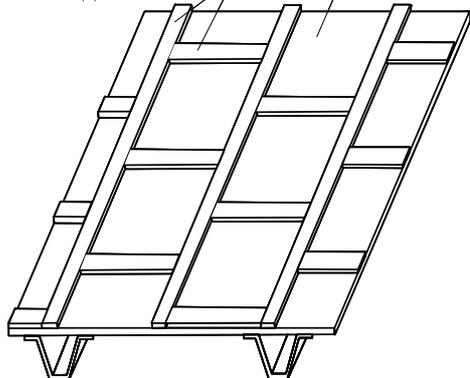
няющих от попадания на его поверхности загрязнений.

Теплозащитная конструкция изделия «Буран» монтировалась с применением клея-герметика Эластосил 137-175М в следующей последовательности.

Первым этапом являлось изготовление теплозащитного элемента, состоящего из керамической плитки и приклеенного к ней клеем-герметиком Эластосил 137-175М материала АТМ-15ПК (по описанной технологии).

Плиточные теплозащитные элементы устанавливали на поверхности обшивки практически всего изделия в «гнезда», получаемые после приклеивания (также клеем-герметиком Эластосил 137-175М) вкладышей из материала АТМ-16ПКП. Приклеивание вкладышей проводили по предварительно сделанной разметке, что обеспечивало заданный рисунок расположения плиток и величину межплиточных зазоров.

На рисунке показан фрагмент плоского участка изделия с приклеенными вкладышами и «гнездами» для установки кварцевых керамических теплозащитных конструкций плиточного типа. Затем поверхность обшивки и приклеенной к элементу демпфирующей подложки обезжирили рекомендованными растворителями, выдерживали на воздухе для выветривания растворителей и наносили клей. На поверхность демпфирующей подложки он наносился по всей площади, на поверхность обшивки – по площади соприкосновения с прокладкой. После рекомендованной выдержки на воздухе плитку с приклеенной к ней демпфирующей подложкой устанавливали в «гнездо» и подавали равномерно распределенное давление 0,03 МПа. Давление разрешалось снять через 18–24 ч с начала отверждения при условии дальнейшего проведения работ на данном участке не ранее чем через 4 сут. В течение этого времени работы по склеиванию проводились на других участках изделия.



Фрагмент плоского участка изделия с установленными вкладышами: 1 – обшивка изделия; 2 – вкладыш

Соединение склеиваемых поверхностей должно проводиться не позднее чем через 30 мин после

нанесения на них Эластосила 137-175М. Это не всегда удобно, особенно в случае изготовления большого количества ТЗК одновременно. В связи с этим был разработан клей-герметик Эластосил 137-175М-1 с полностью идентичными свойствами (по сравнению с клеем Эластосил 137-175М), но с жизнеспособностью, увеличенной до двух часов за счет изменения вулканизирующего агента. Это позволило, в свою очередь, увеличить разрыв во времени с начала нанесения клея на обшивку до приложения давления склеивания с 50 мин до 1,5 ч.

Для склеивания трехслойных сотовых панелей разнообразных габаритов, в том числе сложной конфигурации, в орбитальном корабле «Буран» применен тепломорозостойкий пленочный клей ВК-36. Он хорошо склеивает алюминиевые сплавы, полимерные композиционные и неметаллические материалы. Склеивание производится в автоклаве или под прессом.

Основные характеристики клея ВК-36:

– Предел прочности при сдвиге клеевых соединений из алюминиевого сплава, МПа, при температуре, °С:

20 35
160 25

– Масса клеевой пленки, г/м² 310

– Рабочая температура, °С -130...+160

– Продолжительность, ч, операции склеивания при 175°С и давлении 0,08–0,2 МПа 3.

В конструкциях радиотехнического назначения использован клей ВК-36РТ, отличающийся от клея ВК-36 тем, что не содержит в своем составе наполнителя.

Для предотвращения проникновения теплового потока между элементами конструкции теплозащиты (или другими элементами конструкции), а также в зоны разъемно-стыковых узлов с изменяющимися в процессе эксплуатации зазорами, в «Буране» использованы жгутовые и щеточные уплотнения. Для крепления этих уплотнений применяется элементоорганический клей холодного отверждения ВК-54М (табл. 4). В конструкциях замкового типа клей рекомендован для многократного использования, а в подвижных конструкциях – для одноразового применения.

Отверждение клея проходит при комнатной температуре в течение 5 сут.

Клеи, разработанные в ВИАМ, применены в конструкции «Буран» также для приклеивания датчиков различного назначения (тензорезисторов, термометров сопротивления, термоэлектрических термометров и акселерометров), что позволило получить полную информацию о поведении изделия при воздействии вибрации, температуры, деформации и других факторов как при стендовых, так и при эксплуатационных испытаниях.

Клеи холодного отверждения ВК-9 и горячего отверждения ВС-350 применены для крепления тензорезисторов ЕТ-286, предназначенных для замера деформации в изделии.

Таблица 4

Характеристики клея ВК-54М

Показатель	Значения показателей
Жизнеспособность, мин	15
Прочность при сдвиге, МПа: 20°C 350°C	2 1,5
Диапазон рабочих температур, °C	От -130 до +1200

Таблица 5

Краткая характеристика клеев для датчиков

Марка клея	Химическая основа	Режим отверждения		Прочность при сдвиге $\tau_{сдв}$, МПа, при 20°C
		промежуточный	окончательный	
ВК-9	Эпоксидный олигомер, полиамидный отвердитель	20°C, 24 ч	70°C, 1 ч	14,0
ВС-350	Фенолформальдегидно-фурфуральный олигомер, поливинилацеталь	70°C, 1 ч + + 140°C, 1 ч	230°C, 2 ч	15,0
ВК-19М	Эпоксидный олигомер, ароматическое соединение	–	20°C, 5 сут или 80°C, 2 ч	3,0
ВК-20МП	Полиуретановая модифицированная	–	20°C, 5 сут или 80°C, 2 ч	10,0

Клеи ВК-19М и ВК-20МП обеспечили работоспособность термометра сопротивления ТП-251, предназначенного для измерения воздействующей на изделие температуры: от -130 до +200°C (клей ВК-19М) и от -130 до +350°C (клей ВК-20МП).

В табл. 5 представлена краткая характеристика клеев, использованных для установки датчиков.

Таким образом, в изделии «Буран» использована широкая номенклатура клеев, что позволило обеспечить надежное крепление теплозащитных конструкций на элементах конструкции орбитального корабля, изготовленных из различных материалов, на сотовых конструкциях створок отсека

полезного груза; обеспечить установку термических уплотнений для исключения зазоров между жаростойкими элементами конструкции и ответной частью планера (носовой кок и носовая часть фюзеляжа), между секциями жаростойких конструкций носка крыла, а также между теплозащитными плитками и другими элементами планера; осуществить контроль за поведением изделия при воздействии различных эксплуатационных факторов как при стендовых, так и при эксплуатационных испытаниях благодаря созданию клеев для приклеивания датчиков различного назначения [10, 11].

ЛИТЕРАТУРА

- Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Сереженков А.А. Конструкционные и термостойкие клеи //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 328–335.
- Петрова А.П., Лукина Н.Ф. Применение клеев и герметиков в изделии «Буран» //Клеи. Герметики. Технологии. 2009. №1. С. 27–32.
- Демонис И.М., Петрова А.П. Материалы ВИАМ в космической технике //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2011. №6. С. 2–9.
- Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Тюменева Т.Ю., Авдонина И.А., Жадова Н.С. //Российский химический журнал. 2010. ТЛ IV. №1. С. 46–52.
- Гращенков, Д.В., Щетанов Б.В., Тинякова Е.В., Щеголова Т.М. О возможности использования кварцевого волокна в качестве связующего при получении легковесного теплозащитного материала на основе волокон Al_2O_3 //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 8–14.
- Каблов Е.Н., Гращенков, Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы //Российский химический журнал. 2010. ТЛ IV. №1. С. 5–11.
- Гращенков, Д.В., Балинова Ю.А., Тинякова Е.В. Керамические волокна оксида алюминия и материалы на их основе //Стекло и керамика. 2012. №4. С. 32–35.
- Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Сереженков А.А. Конструкционные и термостойкие клеи //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 328–335.
- Петрова А.П., Донской А.А. Клеящие материалы. Герметики. С.-Пб.: НПО «Профессионал». 2008. 598 с.
- Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
- Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 231–242.