



# Особенности построения системы менеджмента качества для авиационных изделий из полимерных композиционных материалов

## В.Ю. Нагаев

инженер лаборатории «Композиционные материалы» кафедры «Проектирование самолетов» Московского авиационного института (НИУ); Москва

## Л.Л. Фирсов

начальник лаборатории «Композиционные материалы» кафедры «Проектирование самолетов» Московского авиационного института (НИУ); Москва

## А.С. Яценко

инженер лаборатории «Композиционные материалы» кафедры «Проектирование самолетов» Московского авиационного института (НИУ); Москва

## С.А. Юргенсон

к.т.н., инженер 2 категории лаборатории «Композиционные материалы» кафедры «Проектирование самолетов» Московского авиационного института (НИУ); Москва

e-mail: sjurg@yandex.ru

**Аннотация.** В данной статье рассмотрены особенности построения системы менеджмента качества для авиационных изделий из полимерных композиционных материалов в РФ, которая может повысить конкурентоспособность производимой продукции и облегчить ее выход на международные рынки; сформирован пакет нормативной документации, необходимой для ее формирования.

**Ключевые слова:** система менеджмента качества, полимерные композиционные материалы, авиационные изделия.

В эпоху глобализации рынков производить продукцию с уникальными свойствами становится все труднее. Все большее количество предприятий различных отраслей выпускает продукцию с похо-

жими характеристиками. В условиях жесткой конкуренции привычные методы привлечения потребителя, такие как новые технологии, более низкие цены, гарантии, становятся схожими, что затрудняет решение данной проблемы. Поэтому для формирования доверия к своей продукции у потребителя компании разрабатывают системы менеджмента качества (СМК) своих предприятий. Наличие сертификата СМК подтверждает способность организации работать в условиях постоянного улучшения качества своей продукции. Сертификаты СМК, выдаваемые третьей независимой стороной, создают базу для получения конкурентоспособных преимуществ, поскольку являются подтверждением того, что СМК организации соответствует требованиям стандарта ГОСТ Р ИСО 9001.

Однако в высокотехнологичных отраслях промышленности, например таких, как авиастроение, соблюдения требований стандарта ГОСТ Р ИСО 9001 недостаточно для всесторонней оценки поставщика, поскольку в отношении авиационных конструкций они носят общий характер и не позволяют обеспечить необходимый уровень качества.

В связи с этим за рубежом были разработаны комплексы стандартов, отражающие отраслевую специфику и предъявляющие дополнительные (по отношению к ИСО 9001) требования к СМК. Для авиакосмической промышленности, в частности, это стандарты AS 9100.

Известно, что на сегодняшний день одним из основных факторов, обуславливающих развитие авиационной и космической техники, является уровень развития технологий и материалов, используемых для ее изготовления. Одним из наиболее значимых материалов здесь являются полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе армирующих наполнителей, поскольку отличаются более высокими удельными упругопрочностными свойствами по сравнению с металлами (табл. 1). И если ранее в конструкциях планера ПКМ использовались сравнительно редко (рис. 1), то сейчас накопленный опыт их использования позволяет изготавливать из них не только вспомогательные, но и высоконагруженные элементы конструкций летательных аппаратов (ЛА). В связи с этим к конструкциям из ПКМ предъяв-

Таблица 1.

Сравнение свойств материалов

Тип материала	Прочность, МПа	Модуль упругости, ГПа	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Композит на основе углеродного среднепрочного волокна УВ СПУ ( <i>S – Strength</i> )	1900	135	1,6
Композит на основе углеродного высокопрочного волокна УВ ВПУ ( <i>HS – High Strength</i> )	3000	154	1,6
Композит на основе углеродного высокомодульного волокна УВ ВМУ ( <i>HM – High Modulus</i> )	2400	>230	1,6
Композит на основе стекловолокна S класса СВ-S	870	40	1,8
Алюминиевый сплав (2024-T4)	450	73	2,7
Титан	950	110	4,5
Малоуглеродистая сталь (55 сорт)	450	205	7,8
Нержавеющая сталь (А5-80)	800	196	7,8
Быстрорежущая сталь (17/4 Н900)	1241	197	7,8

ляются дополнительные требования по безопасности и надежности.

Анализ данных применения ПКМ в авиационной промышленности показывает, что наблюдается тенденция значительного увеличения их использования при изготовлении современных ЛА. Это обусловлено меньшим весом ПКМ по сравнению с металлами, что позволяет снизить вес сухого ЛА при сохранении его тактико-технических характеристик. Так, если 30 лет назад ПКМ составляли до 15% от массы ЛА, то сейчас их доля в планере широкофюзеляжного самолета может составлять до 50%, а в спортивных ЛА – до 80% от общей массы.

В связи с этим были разработаны гармонизированные национальные стандарты по СМК в авиационной промышленности ГОСТ Р ЕН 9100

и ГОСТ Р ЕН 9120 на основе зарубежных стандартов серии *AS/EN 9100*, отражающие отраслевую специфику и предъявляющие дополнительные требования к СМК.

Стандарт ГОСТ Р ЕН 9100–2011 «Системы менеджмента качества. Организации авиационной, космической и оборонных отраслей промышленности. Требования» (на базе стандарта *AS/EN 9100:2009*) содержит требования ГОСТ Р ИСО 9001, а также дополнения к ним, отражающие специфику обеспечения качества на всех стадиях жизненного цикла продукции авиационной, космической и оборонных отраслей промышленности. При создании и оценке СМК организаций приведенных отраслей промышленности необходимо использовать совокупность требований ГОСТ Р ИСО 9001 и дополнений к ним. Стандарт необходимо применять организациям, выполняющим работы, которые влияют или могут повлиять на характеристики или соответствие продукции установленным требованиям. Стандарт может быть использован для совершенствования деятельности предприятий (организаций), в том числе в целях выхода на международные рынки, а также для сертификации и периодического аудита созданных на этих предприятиях систем менеджмента качества.

Стандарт ГОСТ Р ЕН 9120–2011 «Системы менеджмента качества. Организации авиационной, космической и оборонных отраслей промышленности. Требования к дистрибьюторам продукции» (на базе стандарта *AS/EN 9120:2010*) устанавливает единые требования к СМК предприятий и организаций, осуществляющих приобретение и реализацию материалов, полуфабрикатов, деталей и отдельных агрегатов, используемых в производстве, ремонте и обслуживании соответствующего вида техники. К их

academquality.ru, qi-journal.ru

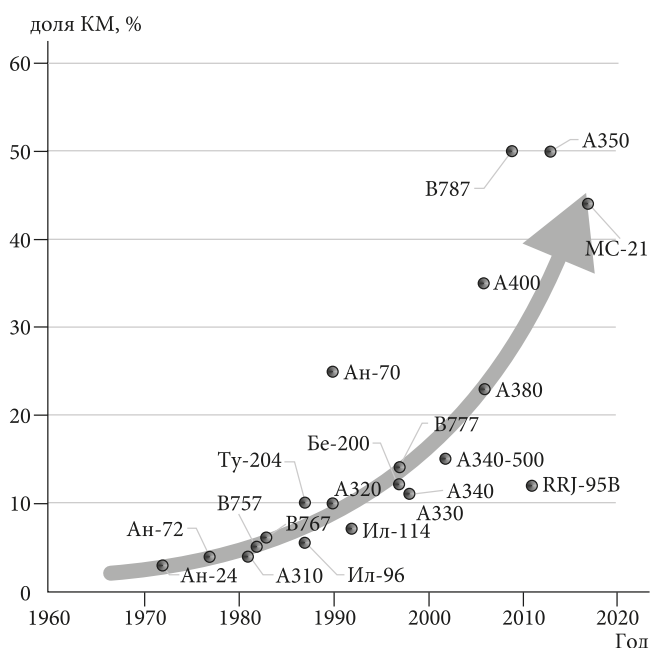


Рис. 1. Доля ПКМ в гражданских ВС



числу также относятся *организации, приобретающие продукцию* (например, исходные компоненты для создания полимерных композиционных материалов) и *разделяющие ее на небольшие партии для перепродажи потребителям*. Стандарт ГОСТ Р ЕН 9120 – 2011 может быть применен для совершенствования деятельности *предприятий и организаций, осуществляющих материально-техническое снабжение производителей, эксплуатантов и ремонтных организаций по всему миру*.

Кроме того, данные стандарты позволяют гармонизировать отечественные требования к СМК предприятий с требованиями зарубежных норм и правил, что облегчает выход на международные рынки и процессы сертификации.

На сегодняшний день при планировании создания новых ЛА наблюдается тенденция в предъявлении требований разработчиков и производителей к своим поставщикам в части сертификации их специальных технологических процессов (СПТП).

Согласно ГОСТ РВ 0015-002-2012, СПТП – технологический процесс, результат выполнения которого не может быть оценен последующим мониторингом или измерениями, из-за чего недостатки становятся очевидными только после начала использования продукции (предоставления услуги).

Производство ПКМ относится к СПТП, что затрудняет сертификацию и, как следствие, возрастает цена на конечный продукт.

В последние годы аэрокосмическая промышленность, NASA и FAA совместно разработали экономически эффективный метод классификации систем композиционных материалов путем обмена базами данных о квалификации материалов, такими как MIL-HDBK-17 и AGATE (*Advanced General Aviation Transport Experiment*). Используя общие базы данных, производитель может выбрать одобренную систему композитных материалов для изготовления требуемых деталей и проверки с помощью небольшого количества тестирований. Для материалов, принимаемых в эти общие базы данных, сырье требуется изготовить в соответствии со спецификацией материала, которая устанавливает контроль основных характеристик (физических, химических и механических свойств), и обработка осуществляется в соответствии со спецификацией процесса, которая контролирует ключевые характеристики (параметры обработки).

Как известно, при производстве конструкций из КМ с заданными физико-механическими характеристиками (ФМХ) имеется ряд особенностей:

- свойства КМ формируются в процессе производства конкретной конструкции;

- без учета особенностей технологии производства нельзя правильно назначить требования к КМ (как к конструкционному материалу) и тем более к самой конструкции.

Использование данных документов позволяет учесть названные особенности и требования пункта 605 «Технология производства» авиационных правил (АП-23, АП-25, АП-27, АП-29). Важным моментом является то, что это позволяет не только контролировать наличие технологической документации (ТД), но и регулирует постоянство необходимого качества изготовления конструкций при использовании данной ТД, т.е. обеспечивает высокую воспроизводимость и сведение к минимуму изменчивости материала.

Особенность рассматриваемого подхода заключается в том, что в спецификациях процесса и материала описывается, помимо подробного технологического процесса, также оборудование, которое должно быть использовано. Этот факт создает уверенность в том, что все изделия, изготовленные по спецификации процесса, из материалов, соответствующих спецификации материала, будут обладать аналогичными ФМХ.

Для создания спецификаций материалов и процессов возможно использование ряда документов, разработанных FAA, в которых изложены руководящие принципы и рекомендуемые критерии по их созданию:

- DOT/FAA/AR-02/109 «*Guidelines and Recommended Criteria for the Development of a Material Specification for Carbon Fiber/Epoxy Unidirectional Prepregs*»;
- DOT/FAA/AR-02/110 «*Guidelines for the Development of Process Specifications, Instructions, and Controls for the Fabrication of Fiber-Reinforced Polymer Composites*»;
- DOT/FAA/AR-03/19 «*Material Qualification and Equivalency for Polymer Matrix Composite Material Systems: Updated Procedure*»;
- DOT/FAA/AR-02/121 «*Guidelines for Analysis, Testing, and Nondestructive Inspection of Impact-Damaged Composite Sandwich Structures*»;
- DOT/FAA/AR-03/53 «*Effects of Surface Preparation on the Long-Term Durability of Adhesively Bonded Composite Joints*»;
- DOT/FAA/AR-03/74 «*Bonded Repair of Aircraft Composite Sandwich Structures*»;
- DOT/FAA/AR-05/13 «*Assessment of Industry Practices for Aircraft Bonded Joints and Structures*».

Существует не так много специфических правил для сертификации ВС из КМ. В отсутствие конкретных сводных правил для применения КМ необходимо показать, что их использование в отношении любого регулирования не снижает уровня безопасности в сравнении с металлами.

Поскольку метод показа соответствия требованиям не всегда очевиден, чтобы помочь заявителям, агентства летной годности разработали рекомендации, известные как «консультативные циркуляры (АС)», которые обеспечивают средства (но не единственные средства) обоснования. Основными здесь являются:

- AC 20-107B «Composite Aircraft Structure»;
- AC 23-20 «Acceptance Guidance on Material Procurement and Process Specifications for Polymer Matrix Composite Systems»;
- AC 27-1 «Certification of Normal Category Rotorcraft»;
- AC 29-2 «Certification of Transport Category Rotorcraft»;
- AC 29 MG 8 «Substantiation of Composite Rotorcraft Structure»;
- EASA AMC 20-29 «Composite Aircraft Structure».

В дополнение к АС, FAA также формирует заявления о политике (PS), касающиеся использования композитных материалов на воздушных судах. Здесь следует рассмотреть следующие документы:

- Memorandum, Rotorcraft Directorate Policy, Certification Secondary Composite Structure, dated October 28, 1998;
- PSACE100-2-18-1999 «Policy on Acceptability of Temperature Differential between Wet Glass Transition Temperature (T<sub>g</sub>wet) and Maximum Operating Temperature (MOT) for Epoxy Matrix Composite Structure»;
- PS-ACE100-2001-006 «Static Strength Substantiation of Composite Airplane Structure»;
- PS-ACE100-2002-006 «Material Qualification and Equivalency for Polymer Matrix Composite Material Systems»;
- PS-ACE100-2004-10030 «Substantiation of Secondary Composite Structures»;
- PS-ACE100-2005-10038 «Bonded Joints and Structures-Technical Issues and Certification Considerations»;
- AIR100-2010-120-003 «Acceptance of Composite Specification and Design Values Developed using the NCAMP Process»;
- EASA CM-S-002, EASA CM-S-004 «Composite Materials – Shared Databases - Acceptance of Composite Specifications and Design Values Developed using the NCAMP Process»;
- PS-AIR-100-120-07 «Policy Memo on Guidance for Component Contractor Generated Composite Design Values for Composite Structure»;
- PS-AIR-20-130-01 «Bonded Repair Size Limits»;
- PS-ANM-25-20 «High-Energy Wide-Area Blunt Impact for Composite Structures».

Все материальные системы (например, препреги, клеи и т.д.) и компоненты (например, волок-

на, смолы и т.д.), используемые при изготовлении деталей ЛА, должны быть квалифицированы для обеспечения контроля композитных материалов и повторяющихся процессов. Оригинальная квалификация (*First Time Qualification*) материала обеспечивает репрезентативную совокупность данных ключевых свойств, которые используются для контрольных целей в непрерывном контроле материалов и процессов. Последующие незначительные изменения материалов и процессов потребуют дополнительного тестирования для установления эквивалентности исходным данным. Новая квалификация необходима для существенных изменений материалов и процессов или использования материалов-заменителей.

Квалификация материала является ключевым элементом процесса валидации. Именно во время квалификации композитный материал полностью определяется и охарактеризовывается. Квалификационные испытания планируются и проводятся с целью:

- определения ключевых атрибутов материала;
- установления эксплуатационных свойств материала;
- проверки характеристик материала, который будет работать в заданном режиме.

Целью определения атрибутов материала является установление пределов его прочности. Примерами данных атрибутов являются:

- содержание смолы;
- удельный вес волокна;
- отвержденная толщина слоя;
- объем волокна.

Эти атрибуты определяют материал и контролируют его получаемые эксплуатационные свойства. Другие атрибуты, которые часто упускают, связаны с физической структурой материала, что влияет на технологические характеристики. Примеры атрибутов этого типа включают:

- уровень волоконной проклейки и тип;
- уровень пропитки;
- метод пропитки смолой (термоплавкая пленка или раствор);
- ширина допуска;
- выбор материала подложки.

Есть и другие свойства, связанные с производительностью, имеющие непосредственное отношение к большинству привычных механических свойств. Несколько партий материала (обычно три) тестируются для установления изменчивости материала. Результаты, полученные из этих испытаний, используются для определения минимальных и максимальных значений в рамках спецификации материала.

Перед использованием композитов в структурных компонентах обычно разрабатывается



программа, в ходе которой оценивается производительность структуры. Этот процесс подтверждения структурных характеристик и долговечности составных компонентов обычно представляет собой сложное сочетание испытаний и анализа. Объем необходимых испытаний для подтверждения физико-механических характеристик композиционных материалов и изделий из них включает в себя десятки тысяч образцов, что приводит к значительным затратам. Как правило, методы анализа не позволяют адекватно прогнозировать результаты при каждом наборе условий. При комбинировании тестирования и анализа аналитические прогнозы проверяются с помощью теста, планы тестирования ориентируются на анализ, стоимость общих усилий снижается, а надежность повышается.

Суть этого подхода заключается в проведении анализа и соответствующих тестов на различных уровнях сложности структуры, часто начиная с малых образцов и продвигаясь через структурные элементы и детали, подкомпоненты, компоненты и, наконец, полномасштабный продукт (рис. 2). Каждый уровень основывается на знаниях, полученных на предыдущих, менее сложных уровнях. Этот процесс обоснования, использующий как тестирование, так и анализ в программе все более сложных уровней, стал известен как подход «Building Block».

Спецификации материалов и процессов, которые были использованы при производстве каждого из элементов воздушного судна на всех уровнях сложности структуры, входят в общий пакет нормативной документации (НД) и в дальнейшем используются в качестве сертификационной документации ВС.

Проверка соответствия технологической документации стандартам выполняется по программе стандартизации и аккредитации производителей в аэрокосмической и военной промышленности *National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program (Nadcap)*, которая осуществляется на основе специальных опросных ведомостей.

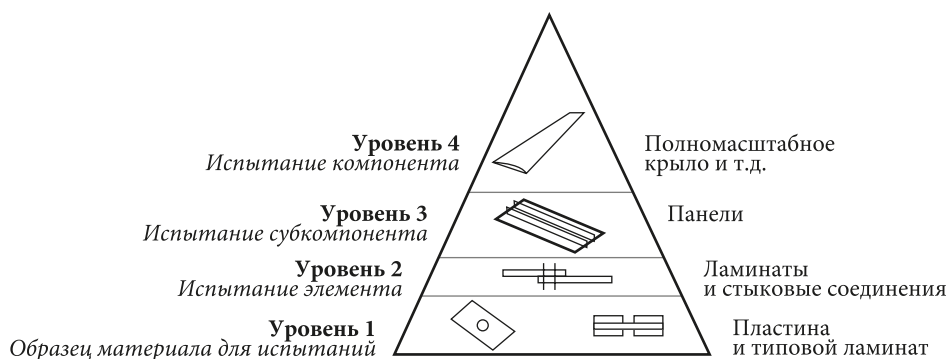


Рис. 2. Уровни подхода *Building Block* и примеры тестовых изделий

В итоге модель SMK (рис. 3) организации, производящей авиационные изделия из ПКМ, построенная с использованием предложенного пакета документов, должна быть основана на:

- общих требованиях ГОСТ Р ИСО 9001;
- требованиях стандартов ГОСТ Р ЕН 9100 и ГОСТ Р ЕН 9120, отражающих специфику обеспечения качества авиационной отрасли;
- требованиях сформированного пакета НД, регламентирующих создание спецификаций процессов и материалов.

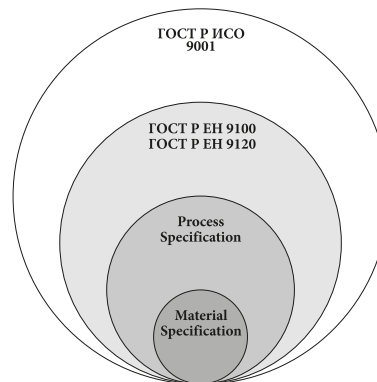


Рис. 3. Модель SMK

Таким образом, в рамках данного исследования был предложен пакет нормативной документации, использование которой в РФ для создания SMK авиационных изделий из ПКМ может обеспечить постоянство необходимого качества изготовления конструкций. Это позволит, поддерживая высокую воспроизводимость и минимальную изменчивость материала, значительно снизить стоимость и объем испытаний в процессе серийного производства за счет применения подхода «Building Block» и, повысив тем самым конкурентоспособность продукции, облегчить выход российской техники на международные рынки.

### Литература

1. СМН-17. Composite Materials Handbook. V.3. Polymer matrix composites materials usage, design, and analysis. – 2009.

2. DOT/FAA/AR-02/109. Aviation Research. Guidelines and Recommended Criteria for the Development of a Material Specification for Carbon Fiber/Epoxy Unidirectional Prepregs / U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. – Springfield, Virginia, March 2003. – 64 p.

3. DOT/FAA/AR-02/110. Aviation Research. Guidelines for the Development of Process Specifications, Instructions, and Controls for the Fabrication of Fiber-Reinforced Polymer Composites / U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. – Springfield, Virginia, March 2003. – 48 p.

4. ГОСТ Р ИСО 9001 – 2015. Системы менеджмента качества. Требования. – М.: Стандартинформ, 2015. – 24 с.

5. ГОСТ Р ЕН 9100 – 2011. Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонных отраслей промышленности. Требования. – М.: Стандартинформ, 2012. – 31 с.

6. ГОСТ Р ЕН 9120 – 2011. Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонных отраслей промышленности. Требования к дистрибьютерам продукции. – М.: Стандартинформ, 2012. – 30 с.

7. Воробей В.В. Проектирование технологических процессов изготовления деталей и узлов двигателей летательных аппаратов из композиционных материалов: Учебное пособие / В.В. Воробей, В.Н. Ботышин. – М. Изд-во МАИ, 1992, – 77 с.

8. ГОСТ РВ 0015-002-2012. Система разработки и постановки на производство военной техники системы менеджмента качества. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2011. – 42 с.

9. «Российские наноконпозиционные материалы: стратегия захвата рынков»: Доклад Генерального директора ЗАО «Холдинговая компания «Композит» Л.Б. Меламеда / Гайдаровский форум 2011 «Россия и мир: в поисках инновационной стратегии». – 17.03.2011.

10. Larry Ilcewicz. FAA Composite Guidance & Relevant Resource. Composite Safety Meeting & Workshop New Zealand / Federal Aviation Administration, – Wellington, New Zealand, – 01.04.2016.

### Features of Creation of a Quality Management System for Aviation Products from Polymeric Composite Materials

V.Yu. Nagaev, engineer of laboratory «Composite materials» of the Department «Design of planes» of the Moscow aviation institute (National research university); Moscow

L.L. Firsov, head of laboratory «Composite materials» of the Department «Design of planes» of the

Moscow aviation institute (National research university); Moscow

A.S. Yatsenko, engineer of laboratory «Composite materials» of the Department «Design of planes» of the Moscow aviation institute (National research university); Moscow

S.A. Yurgenson, candidate of technical sciences, 2nd category engineer of laboratory «Composite materials» of the Department «Design of planes» of the Moscow aviation institute (National research university); Moscow

e-mail: sjurg@yandex.ru

**Summary.** In this article features of creation of a quality management system for aviation products from polymeric composite materials in the Russian Federation which can increase competitiveness of the made production are considered and facilitate her entry into the international markets; the package of the standard documentation necessary for her formation is created.

**Keywords:** quality management system, polymer composite materials, aviation products.

### References:

1. CMH-17. Composite Materials Handbook. V.3. Polymer matrix composites materials usage, design, and analysis. 2009.

2. DOT/FAA/AR-02/109. Aviation Research. Guidelines and recommended criteria for the development of a material specification for carbon fiber. Epoxy Unidirectional Prepregs. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. March 2003. Springfield, Virginia, 64 p.

3. DOT/FAA/AR-02/110. Aviation Research. Guidelines for the development of process specifications, instructions, and controls for the fabrication of fiber-reinforced polymer composites. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. March 2003. Springfield, Virginia, 48 p.

4. State Standard R ISO 9001 – 2015. Quality management system. Requirements. Standartinform. 2015. Moscow, 24 p.

5. State Standard R EN 9100 – 2011. Quality management system of the organization's aviation, space and defensive industries. Requirements. Standartinform. 2012. Moscow, 31 p.

6. State Standard R EN 9120 – 2011. Quality management system of the organization's aviation, space and defensive industries. Requirements to distributors of production. Standartinform. 2012. Moscow, 30 p.

7. Vorobey V.V., Botyashin V.N. Design of technological processes of production of details and knots of engines of aircraft from composite materials: Manual. Publishing house of the Moscow aviation institute. 1992. Moscow, 77 p.

8. State Standard RV 0015-002-2012. The system of development and statement on production of military equipment of a quality management system. General requirements. Standartinform. 2012. Moscow, 42 p.

9. Melamed L.B. «Russian nanocomposite materials: strategy of capture of the markets». Report of the general director of CJSC Kompozit Holding Company. Gaidar forum of 2011 «Russia and world: in search of innovative strategy» 17.03.2011.

10. Larry Ilcewicz. FAA Composite Guidance & Relevant Resource. Composite Safety Meeting & Workshop New Zealand. Federal Aviation Administration. Wellington, New Zealand 01.04.2016.