

В. Н. МАСЛЕЙ*ГП «Конструкторское бюро «Южное» имени М. К. Янгеля, Днепр, Украина*

О КОМПЛЕКСЕ МЕРОПРИЯТИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПРОЧНОСТНОЙ РЕСУРС КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Предметом работы является процесс создания космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли (КА для ДЗЗ) в рамках решения проблемы получения высокой разрешающей способности оптической системы, путем достижения высокой температурной размерной стабильности (ТРС) с сохранением прочности несущих конструкций (НК) при работе КА на орбите. Цель работы: обосновать комплекс мероприятий прочностного аспекта КА, разработанных и проводимых в ГП "КБ "Южное" в процессе создания КА для ДЗЗ, содержащих в несущих конструкциях слоистые композиционные материалы, в частности, с применением в НК слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) с особыми схемами укладки углеродного армирующего волокна. Задачи работы: провести анализ применения слоистых структур с результирующим коэффициентом температурного линейного удлинения близким к нулю, в том числе и отрицательным в направлении разработки КА ДЗЗ длительного срока эксплуатации; рассмотреть варианты компенсации ослабления жесткостных и прочностных характеристик НК для ТРС слоистых структур, с учетом свойств ПКМ, существенно отличных от свойств металлов и сплавов в направлении повышения надежности КА на различных стадиях разработки; оценить компенсирование высокой стоимости КА для ДЗЗ длительностью периода активной работы на орбите на основе современных информационных технологий. Методами исследования являются анализ существующих технических решений и синтез НК с заданными характеристиками ТРС, жесткости и прочности в процессе создания КА. Результаты состоят в том, что в статье сформированы особенности комплекса мероприятий, непосредственно связанных с обеспечением прочности, жесткости, долговечности и ресурса НК в КА для ДЗЗ. Этот комплекс мероприятий, разработанных и проводимых в ГП "КБ "Южное" в последние годы, первым приоритетом имеет достижение ТРС НК и охватывает весь жизненный цикл КА: проектирование, изготовление (технология), испытания и эксплуатацию. В эксплуатацию включается хранение, транспортировка, предпусковые испытания, вывод на орбиту и работа на орбите. Научная новизна состоит в том, что комплексом учтены всевозможные технологические процессы, испытания на нескольких вариантах макетов и моделей при максимально полной имитации штатных условий эксплуатации по схеме: бортовое оборудование → бортовые системы → КА в целом. Проблемы решаются с применением информационных технологии класса CALS, для полной реализации которых запущена в эксплуатацию суперЭВМ с пиковой производительностью 300 терафлоп. Это позволяет непрерывно совершенствовать КА для ДЗЗ с применением ПКМ в ТРС НК.

Ключевые слова: космический аппарат; дистанционное зондирование Земли; полимерный композиционный материал; температурная размерная стабильность; прочность; жесткость; долговечность; ресурс.

Введение. Температурная размерная стабильность как первый приоритет в создании конструкции КА для дистанционного зондирования Земли

ГП "КБ "Южное" с начала XXI века активно занимается разработкой космических систем и

космических аппаратов (КА) с температурной размерной стабильности (ТРС) несущими конструкциями. Назначение таких КА – изучение (зондирование, сканирование) земной поверхности, в первую очередь, в оптическом диапазоне. Работы выполняются в рамках общегосударственных программ, утвержденных специальными законами Украины [1, 2], а также

по индивидуальным заказам других стран.

КА со сканерами высокой разрешающей способности (СВРС) для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) – сложнейшие высокотехнологические изделия, изготавливаемые фактически в единичных экземплярах. Их высокая стоимость может компенсироваться лишь длительным периодом активной работы на орбите: от 5 лет и более.

Температурные деформации элементов КА, как следствие прерывистого (циклического, при заходе в тень Земли и выходе из нее) и одностороннего воздействия лучевой энергии солнца на КА, движущегося по орбите, являются одним из основных факторов, мешающим получать снимки поверхности Земли с высокой разрешающей способностью. Поэтому сохранение ТРС несущих конструкций КА при неизбежных изменениях условий эксплуатации – первый приоритет при создании КА для ДЗЗ.

В ГП "КБ "Южное" необходимые параметры ТРС таких конструкций достигаются разработкой и применением особых схем армирования слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) [3–6, 7–10, 11–13]. Как оказалось, обеспечение ТРС существенно влияет, в частности, на жесткость и прочность конструкции. На рис. 1 изображены схема и графики [13], показывающие, что получение необходимого результирующего коэффициента температурного линейного расширения (КТЛР, тут – в направлении оси Z), достигается изменением угла φ укладки армирующей нити.

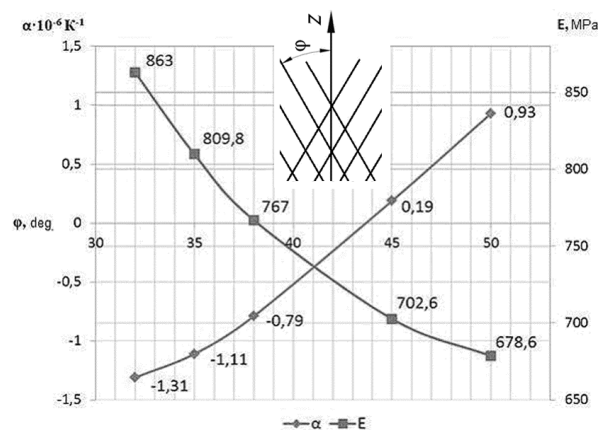


Рис. 1. Схема ориентации волокон ПКМ относительно оси Z; зависимости КТЛР α и модуля упругости E (пересчитанные на направление оси Z) от угла укладки армирующей нити φ [13]

Это приводит к заметному снижению результирующего модуля упругости в том же направлении, т.е. к снижению жесткости (графики на рис. 1 смещены по вертикали так, чтобы пересекались в

точке с желаемым КТЛР). Но и прочность при этом снижается, что заставляет применять высокопрочную углеродную нить.

Трехопорная схема присоединения блоков КА к несущим конструкциям позволяет назначать основное направление, в котором должна быть достигнута ТРС. А в осесимметричных оболочечных конструкциях корпусов оптических сканеров таким направлением является ось вращения [13].

Таким образом, актуальность работы вытекает из необходимости получения НК для КА ДЗЗ с требуемыми параметрами ТРС и прочности в заданном ресурсе.

1. Постановка задачи.

Особенности жизненного цикла КА для ДЗЗ, содержащих в несущих конструкциях полимерные композиционные материалы

В жизненный цикл сложного изделия длительной эксплуатации входят ([14], на примере авиации): проведение научно-поисковых и поисково-конструкторских работ; оценка технического уровня изделий; маркетинговые исследования; проектирование; конструирование; технологическая подготовка производства; организация и управление серийным производством; материально-техническое обеспечение; сертификация; поставки продукции; эксплуатация; гарантийное и послегарантийное обслуживание; ремонт и устранения неисправностей; модернизация; капитально-восстановительный ремонт; демонтаж и утилизация; непрерывная подготовка и переподготовка специалистов.

Относительно космической техники, в частности, КА для ДЗЗ, основное место эксплуатации которых – открытый космос, некоторые из пересчитанных пунктов жизненного цикла отсутствуют или изменены. А именно, производство не является серийным, даже малосерийным: оно единично. Обслуживание – только гарантийное, а в космосе – дистанционное. Ремонт и устранение неисправностей на орбите может проводиться только манипулированием резервными модулями. Модернизация, капитально-восстановительный ремонт, возврат на Землю, дефектация и демонтаж КА для ДЗЗ, по состоянию на начало XXI века, не проводятся, а утилизация – только сгоранием КА в плотных слоях атмосферы, причем по обыкновению отложена на длительное время.

В несколько другой классификации жизненный цикл каждого КА включает такие стадии: **проектирование, изготовление, испытания, эксплуатация**. Последняя стадия объединяет в себе пять стадий: хранение, транспортировка, предпусковые испытания, вывод на орбиту, эксплуатация на орбите.

Опыт создания надежных технических систем длительной эксплуатации, в прочностном аспекте, был обобщен в публикации [15].

Таким образом, постановка задачи заключается в обосновании комплекса мероприятий прочностного аспекта КА, разработанного и проводимого в ГП "КБ "Южное" в процессе создания КА для ДЗЗ, содержащих в несущих конструкциях слоистые полимерные композиционные материалы.

2. Решение задачи

2.1. Схематизация жизненного цикла КА и комплекса мероприятий, обеспечивающих прочностной ресурс КА для ДЗЗ, содержащих в несущих конструкциях композиционные материалы

В связи с вышеизложенными обстоятельствами, отработанные ранее методики прогнозирования прочности, надежности и ресурса сложных технических систем, в том числе и КА с несущими конструкциями из металла, претерпели коррективы. На рис. 2 приведена [15] блок-схема, отражающая комплекс соответствующих мероприятий, разработанных и проводимых в ГП "КБ "Южное" в процессе создания КА для ДЗЗ, содержащих композиционные материалы в несущих конструкциях. В качестве примера реализации ее элементов можно назвать такие документы, как [16–18].

В стадию **ПРОЕКТИРОВАНИЕ** современных КА для ДЗЗ привнесены два новых элемента. Это ТРС (рассмотрено во Введении), а также **ЭЛЕКТРОННЫЙ МАКЕТ** (будет рассмотрен в разделе про информационные технологии).

Стадия проектирования, как обычно, начинается с разработки технического задания (ТЗ): на основе маркетинговых исследований, научно-поисковых и поисково-конструкторских работ, оценки технического уровня подобных изделий. В ТЗ закладываются допустимые значения параметров нового изделия. Затем следует ряд проектов.

Стадия **ИЗГОТОВЛЕНИЕ** формально осталась неизменной. Однако есть и специфика.

В частности, для получения ТРС элементов КА реальные схемы укладки многих слоев армирующей нити (рис. 3) должны также иметь продольные и поперечные направления ее укладки [12, 13], что приводит, используя описанный выше эффект, к изменению угла φ (см. рис. 1) вплоть до значений, не предусмотренных стандартным оборудованием, т.е. требует его модификации.

Как известно, на прочность и связанные с ней характеристики существенно влияет **технология** изготовления материалов и отдельных изделий. На рис. 4 изображена "схема взаимодействия технологических факторов и их влияние на прочность, долговечность и другие качественные характеристики изделия" из КМ, приведенная в книге [20]. По отношению к изделиям из ПКМ в КА для ДЗЗ она вполне корректна. В связи с наличием такого влияния важен хорошо поставленный контроль качества изделий из КМ.

На размерную стабильность и прочность ПКМ влияют процессы образования и фильтрации летучих продуктов, значительно повышающие свою интенсивность в условиях космоса.

После обеспечения ТРС (см. Введение) и отработки процессов изготовления, одними из основных проблем КА для ДЗЗ являются проблемы жесткости, устойчивости, прочности, надежности и ресурса. Эти вопросы, при наличии НК из композиционных материалов, решаются значительно сложнее, чем при их изготовлении из металлов и сплавов. Причины – в существенном отличии многих свойств композиционных материалов по сравнению с металлами и сплавами.

Жесткость (размерная стабильность) НК в КА для ДЗЗ оценивается смещениями и углами поворота установочных поверхностей (зеркал), а также первыми собственными частотами колебаний, которые можно определить расчетными или экспериментальными методами.

Устойчивость геометрической формы элементов НК из КМ, как и из однородных конструкционных материалов, в расчетах оценивается методом Эйлера или локальных возмущений. Первый основан на определении частотных характеристик и форм колебаний нагруженного объекта, второй – на уравнениях больших деформаций. В частности, устойчивость могут потерять ячейки сотового наполнителя трехслойных композитных панелей, используемых в качестве НК в КА для ДЗЗ.

Прочность анализируется: статическая, квазистатическая, при динамическом гармоническом возбуждении, при динамическом стохастическом возбуждении, при импульсном нагружении. Аэродинамические нагрузки на КА для ДЗЗ незначительны, поскольку при запуске ракеты-носителя в космос КА находится под защитой обтекателя.

Надежность является вероятностной оценкой стабильности характеристик, оговоренных в ТЗ. В частности, она может оцениваться по показателям размерной точности либо сплошности композита в процессе выработки ресурса [21]. А на рис. 5 приведена описанная в работе [22] структурная схема оценки надежности по критерию прочности, из которой

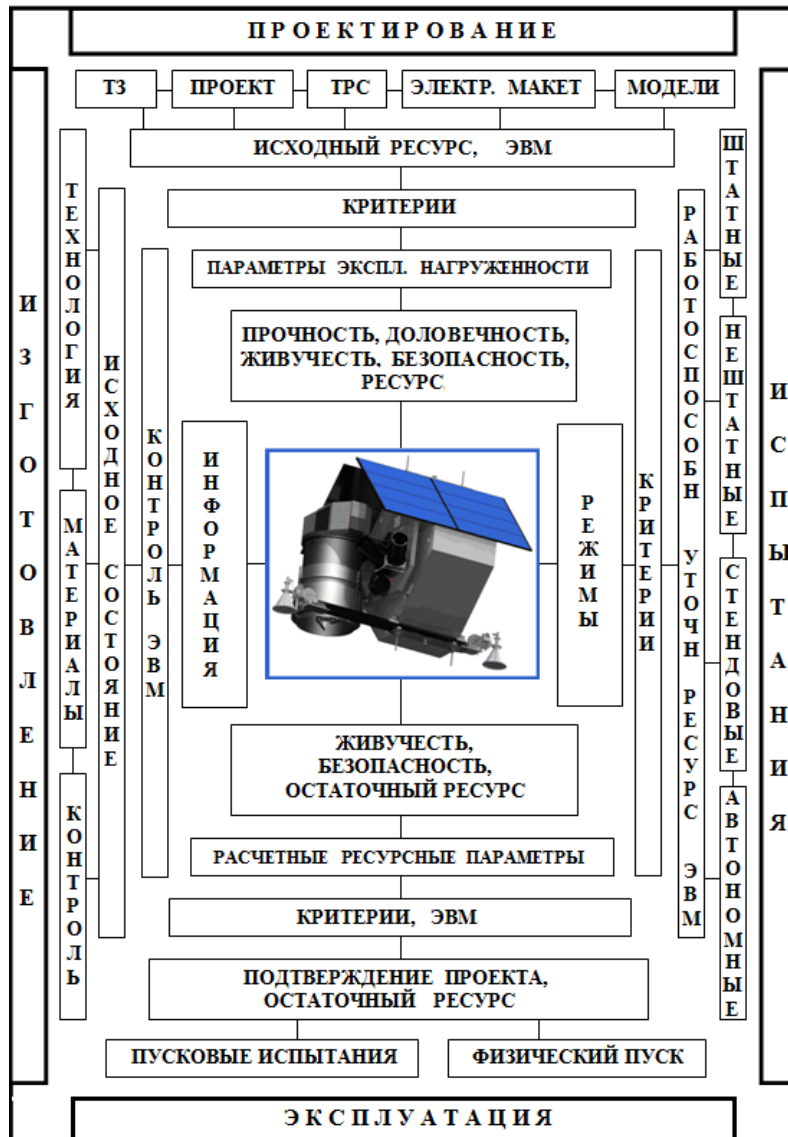


Рис. 2. Блок-схема комплекса мероприятий, обеспечивающих прочность, долговечность и ресурс при конструировании и создании КА для ДЗЗ, содержащих ПКМ в несущих конструкциях

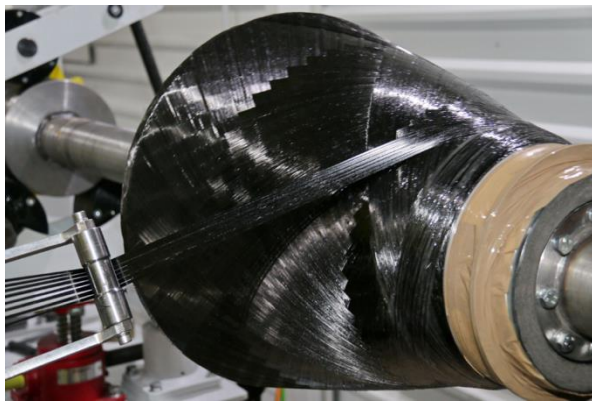


Рис. 3. Создание осесимметричной композитной оболочки на 5-координатном намоточном станке с рабочим диаметром до 1 м и длиной до 6 м [19]

для КА необходимо исключить все, что касается вторичного сырья и переработки на стадии изготовления КА для ДЗЗ.

Исходный ресурс оценивается применением расчетных формул, учитывающих статистические разбросы прочностных характеристик материалов, закладываемые запасы прочности, надежности и живучести, взаимовлияния и другие параметры, имеющие стохастические и изменяющиеся во времени составляющие.

Невозможность осуществлять в процессе эксплуатации на орбите ремонтные работы, связанные с прочностными характеристиками, а также высокая стоимость КА, значительно повышает ответственность в прогнозировании их срока службы. Некоторые процессы и состояния материалов и/или



Рис. 4. Схема взаимодействия технологических факторов и их влияния на прочность, долговечность и другие характеристики изделий из КМ [20, рис. 9.1]



Рис. 5. Структурная схема оценки надежности по критерию прочности [22]

конструкции, допустимые в условиях работы на Земле, для открытого космоса весьма нежелательны. Например, необратимые деформации (пластичности, ползучести), возникновение и развитие макротрещин, хладноломкость.

Однако в космосе деградация механических характеристик КМ происходит непрерывно, поэтому актуальны расчеты и на усталость, и на термоциклическую усталость, и на устойчивость к радиационному излучению солнца.

Воздействие факторов земного и космического пространства приводит к старению. **Старение КМ** – это ухудшение механических характеристик, а **старение конструкции из КМ** – изменение формы и размеров, коробление. Механизмы старения многообразны: химические (коррозионно-эрозионный износ; коррозионное растрескивание; обезвоживание, охрупчивание; питтинговая коррозия; общая коррозия; другие), физические (изменение состояния; термическое старение; другие), механические (многоцикловая усталость; накопление микроповреждений; объединение микроповреждений в макроповреждения, расслоение; механический износ; другие). В результате старения постепенно снижается остаточный ресурс КА.

Численные расчеты еще не в состоянии полностью моделировать реальность, т.к. многие процессы недостаточно формализованы или изучены. Поэтому, как и ранее, еще на Земле проводятся различные испытания, имитирующие условия эксплуатации КА, характерные для работы на орбите.

ИСПЫТАНИЯ должны подтвердить наличие и стабильность характеристик, заложенных в ТЗ, в частности, характеристик ТРС, РС, жесткости, прочности, а также исходный ресурс изделия.

В ГП "КБ "Южное" разработана и реализуется система экспериментальной наземной отработки на макетах и моделях при максимально полной имитации штатных условий эксплуатации по схеме: бортовое оборудование → бортовые системы → КА в целом. Для этого создаются макеты: антенный, полномасштабный, силовой, а также модели: электрическая, инженерная, протолетная.

Механические испытания проводятся:

а) на силовых моделях (испытания на уровни нагрузок при транспортировке КА):

– статические (перегрузки на центрифуге [23], аналогичные нагрузкам при транспортировке и выводе КА на орбиту);

– динамические (вибрации гармонические (воздушный транспорт) и случайные (ж/д транспорт), на электродинамических вибростендах, в 3-х направлениях);

– натурные (автомобильный транспорт);

б) на инженерной или протолетной моделях:

– виброимпульсные (на вибропрочность);

Имеются и другие испытания, в частности:

– на оценку фактической ТРС несущей конструкции;

– термовакуумные.

В динамических испытаниях, в частности, определяются реальные собственные частоты колебаний, коэффициенты демпфирования, коэффициенты усиления виброускорений.

Следует добавить, что при работе в космосе КА для ДЗЗ должен периодически проходить дистанционную верификацию выполнения условий ТЗ [24].

2.2. Об информационных технологиях класса CALS для КА

Для выполнения комплекса мероприятий блок-схемы рис. 2 большую роль играют информационные технологии (ИТ), реализованные на ЭВМ.

Современное развитие ИТ привело к созданию ИТ класса CALS: Continuous Acquisition and Life Cycle Support – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукции (другое употребительное название: PLM, от Product Lifecycle Management).

ИТ класса CALS есть смысл применять для сложных изделий длительной эксплуатации, т.е. и для КА для ДЗЗ.

Для перехода на ИТ класса CALS необходимо провести процедуру электронного определения изделия [14]. При этом создается свободная от бумаг электронная модель изделия – ЭМИ, содержащая все данные об изделии. КА для ДЗЗ – изделие материальное, поэтому его геометрическая модель (электронный макет – ЭМ) является обязательной частью ЭМИ.

Назначение ЭМИ: интерпретация и визуализация всех данных; создание чертежей и другой производственной документации; создание технологической документации; ведение всей документации (внесение актуальных изменений).

Назначение ЭМ: проведение компоновочных работ на этапе эскизного проекта; проверка изделия на технологичность сборки; размещение, трассирование коммуникаций; замена натурального макетирования виртуальным; разработка трехмерных (3D) моделей и выпуск конструкторской документации (КД); создание эксплуатационной документации. ЭМ имеет два уровня: верхний (разрабатывается и утверждается) и нижний – уровень спецификаций (может непрерывно обрабатываться) [14].

Для применения ИТ класса CALS необходимо, в частности, провести разработку требований к: созданию ЭМ сборочных единиц (деталей) и КД; ведению ЭМ; формам обмена; структуре и правилам наполнения ЭМ. А также – определиться с базовым наполнением CAD/CAM/CAE систем, с системой управления изделиями (PDM), провести обучение персонала.

Для надежного функционирования ИТ класса CALS необходимо иметь унифицированную структуру электронных документов – SGML. Например, для авиации в Европейском союзе существует международный стандарт AECMA SPEC 1000 D.

Результат функционирования CALS-технологий на предприятии – значительное повышение качества изделий с одновременным сокращением затрат разнообразных ресурсов (средств, времени и прочее) на разработку нового изделия и его дальнейшего сопровождения.

Для реализации ИТ класса CALS в применении к КА для ДЗЗ (и для других целей) ГП "КБ "Южное" приобрело и запустило в эксплуатацию современный суперкомпьютер [25] (рис. 6).

Заключение

Прочностные аспекты КА для ДЗЗ, содержащих в несущих конструкциях композиционные материалы, весьма разнообразны. Высокая стоимость таких аппаратов приводит к необходимости проводить в процессе их создания массу расчетов и испытаний. Для этого необходимо иметь отработанную методику проведения всех работ. Этой цели способствует создание комплекса мероприятий, отражаемых структурными схемами, подобными рассмотренным в данной работе. В них заложен колоссальный опыт, который, непрерывно накапливаясь, и далее будет совершенствовать пути, методы и алгоритмы создания новых КА для ДЗЗ со все возрастающей разрешающей способностью.

Литература

1. *Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма України на 2008-*

2012 роки". Закон України від 30 вересня 2008 року № 608-VI. [Електронний ресурс] : Верховна Рада України. Законодавство України. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/608-17>. – 30.09.2008.

2. *Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма України на 2013—2017 роки". Закон України від 5 вересня 2013 року № 439-VII. [Електронний ресурс]: Верховна Рада України. Законодавство України. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/439-18>. – 05.09.2013.*

3. *Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці [Текст] / Є. О. Джур, Л. Д. Кучма, Т. А. Манько, В. Г. Сітало, Ф. П. Санін, А. Ф. Санін. – К. : Вища освіта, 2003. – 399 с.*

4. *Корпус сканера високої розрешаючої способности "Корпус-СВРЗ". [Текст] : Эскизный проект. Пояснительная записка. Основные характеристики корпуса сканера высокой разрешающей способности. "Корпус-СВРЗ" ПЗ. – ГП "КБ "Южное им. М. К. Янгеля", 2009. – 103 с.*

5. *Дегтярев, А. В. Применение композиционных материалов при создании перспективных образцов ракетной техники [Текст] / А. В. Дегтярев, В. А. Коваленко, А. В. Потапов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 2(89). – С. 34-38.*

6. *Каркас сканера высокой разрешающей способности из углепластика для крепления оптических элементов и узлов космического аппарата [Текст] / А. Л. Макаров, А. М. Потапов, В. А. Коваленко, А. В. Кондратьев // Вопросы проектирования*



Рис. 6. Суперкомпьютер ГП "КБ "Южное" с пиковой производительностью 300 терафлоп [25]

и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского "ХАИ". – Вып.1(73). – X., 2013. – С. 40-51.

7. Тактико-техническое задание (ТТЗ) концепции создания национальной космической системы оптико-электронного наблюдения Земли. [Текст]. – ГП "КБ "Южное им. М. К. Янгеля", 2014. – 30 с.

8. Борщева, Г. А. Структура и основные характеристики космической системы "Сич-2" [Текст] / Г. А. Борщева, В. Н. Маслей, Ю. А. Шовкопляс, Е. Д. Ярмольчук // Государственно-предпринимательское "Конструкторское Бюро "Южное" им. М. К. Янгеля" "Космическая техника. Ракетные вооружения" : Научно-технический сборник. – Выпуск 2(109). – Днепропетровск, 2015. – С. 16-24.

9. Вайсеро, М. В. Конструктивные особенности платформы малого космического аппарата "Сич-перспектива" [Текст] / М. В. Вайсеро, М. Г. Добрушина, В. В. Кавун, В. Н. Маслей, С. И. Москалев, Ю. А. Шовкопляс, А. П. Щудро // Государственно-предпринимательское "Конструкторское Бюро "Южное" им. М. К. Янгеля" "Космическая техника. Ракетные вооружения" : Научно-технический сборник. – Выпуск 2(109). – Днепропетровск, 2015. – С. 25-29.

10. Методика проектирования размеростабильной оболочечной конструкции из композиционного материала. [Текст]. ГП "КБ "Южное", 2016. – №311/358-2016 М.

11. Аспекты разработки размеростабильной конструкции сканера высокого разрешения [Текст] / М. Г. Добрушина, В. В. Кавун, Д. А. Галабурда, В. Н. Маслей, С. И. Москалев, И. Н. Боклагова, С. И. Куширенко // Технологические системы. – 2017. – № 3(80). – С. 87-92.

12. Маслей, В. Н. Методы проектирования изделий из полимерных композиционных материалов [Текст] / В. Н. Маслей, А. С. Кулик // Космічна наука і технологія. – 2017. – Т. 23, № 5(108). – С. 44-48.

13. Development of dimensionally stable structure of drawtube of optical device made of composite material [Text] / V. Maslyey, A. Kulyk, A. Sanin, S. Moskal'ov, V. Kavun, A. Schudro // European Commission funded International Workshop "Materials resistant to extreme conditions for future energy systems", 12-14 June 2017, Kyiv – Ukraine. – P. 72. Book of abstracts.

14. Братухин А. Г. Основополагающие интегрированные информационные технологии конкурентоспособных изделий машиностроения [Текст] / А. Г. Братухин // Технологические системы. – 2012. – № 3(60). – С. 7-32.

15. Прочность, ресурс и безопасность технических систем [Текст] / А. Ф. Фролов, Н. А. Махутов, Г. Х. Хуришудов, М. М. Гаденин // Проблемы прочности. – 2000. – № 5. – С. 8-18.

16. Руководство для конструкторов по расчету объектов на прочность. [Текст]. – ГП "КБ "Южное", 1972. – Исх. №321/124.

17. Корпус СВРС 03.1019. Расчет на прочность. 03.1019 03.1019.0000.0000.00.0 P14. [Текст]. – ГП "КБ "Южное им. М. К. Янгеля", 2016. – 51 с.

18. Корпус СВРС 03.1019. Комплексная программа экспериментальной отработки 03.1019.13.0412.311 КПЭО. [Текст]. – ГП "КБ "Южное им. М. К. Янгеля", 2016. – 30 с.

19. КБ "ЮЖНОЕ" развивает новые технологии создания РКТ с применением композитов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.yuzhnoye.com/press-center/news/copy_news_496.html. – 04.06.2019.

20. Болотин, В. В. Механика многослойных конструкций [Текст] / В. В. Болотин, Ю. Н. Новичков. – М. : Машиностроение, 1980. – 375 с.

21. Канович, М. З. Сопротивление композиционных материалов [Текст] / М. З. Канович, Н. Н. Трофимов. – М. : Мир, 2004. – 504 с.

22. Реутов, А. И. Надежность изделий из полимерных композиционных материалов с учетом статистической изменчивости их характеристик [Текст] : Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. – Томск : Нац. иссл. Томский политехн. ун-т, 2011. – 38 с.

23. В КБ "ЮЖНОЕ" открылся многофункциональный испытательный центр [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.yuzhnoye.com/press-center/news/copy_news_483.html. – 04.06.2019.

24. Методика проведения верификации выполнения условий ТТЗ после каждого полугодия эксплуатации в космосе. [Текст]. – ГП "КБ "Южное", 2016. – 36 с.

25. В КБ "ЮЖНОЕ" открыт новый вычислительный центр с суперкомпьютером [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.yuzhnoye.com/press-center/news/copy_news_486.html. – 04.06.2019.

References

1. Zahal'noderzhavna tsil'ova naukovotekhnichna kosmichna prohrama Ukrayiny na 2008-2012 roky". Zakon Ukrayiny vid 30 veresnya 2008 roku # 608 VI [The nation-wide target technological space program of Ukraine for 2008-2012 ". The law of Ukraine from September, 30th, 2008. no. 608-VI]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/608-17> (accessed 30.09.2008).

2. Zahal'noderzhavna tsil'ova naukovotekhnichna kosmichna prohrama Ukrayiny na 2013–2017 roky". Zakon Ukrayiny vid 5 veresnya 2013 roku. # 439 VII [The nation-wide target technological space program of Ukraine for 2013-2017 ". The law of Ukraine from September, 5th, 2013. no. 439 VII].

Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/439-18> (accessed 5.09.2013).

3. Dzhur, Ye.O., Kuchma, L.D., Man'ko, T.A., Sitalo, V.H., Sanin, F.P., Sanin, A.F. Polimerni kompozytsiyini materialy v raketno-kosmichniy tekhnitsi [Polymeric composite materials in the space-rocket engineering]. Kyiv, "Vyshcha osvita" Publ., 2003. 399 p.

4. *Eskiznyi proekt. Korpus skanera vysokoi razreshayushchei sposobnosti "Korpus-SVRZ". Poyasnitel'naya zapiska. Osnovnye kharakteristiki korpusa skanera vysokoi razreshayushchei sposobnosti. "Korpus-SVRZ" P3* [The preliminary design. A body of the scanner of high resolution "Body-SVRZ". An explanatory note. Basic performances of a body of the scanner of high resolution. "Body-SVRZ" P3]. GP "KB "Yuzhnoe im. M. K. Yangelya", 2009. 103 p.

5. Degtyarev, A. V., Kovalenko, V. A., Potapov, A. V. Primenenie kompozitsionnykh materialov pri sozdaniy perspektivnykh obraztsov raketnoi tekhniki [Application of composite materials at creation of perspective samples of rocket engineering]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2012. no. 2(89), pp. 34-38.

6. Makarov, A.L., Potapov, A.M., Kovalenko, V.A., Kondrat'ev, A.V. Karkas skanera vysokoi razreshayushchei sposobnosti iz ugleplastika dlya krepleniya opticheskikh elementov i uzlov kosmicheskogo apparata [A skeleton of the scanner of high resolution from carbon plastic for attachment of optical elements and space vehicle knots]. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruksii letatel'nykh apparatov : sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. un-ta im. N.E. Zhukovskogo "KhAI"*, vol. 1(73), 2013, pp. 40-51.

7. *Taktiko-tekhnicheskoe zadanie (TTZ) kontseptsii sozdaniya natsional'noi kosmicheskoi sistemy optiko-elektronnogo nablyudeniya Zemli* [The Taktiko-technical project (TTP) concepts of creation of national space system of optiko-electronic supervision of the Earth]. GP "KB "Yuzhnoe im. M.K. Yangelya", 2014. 30 p.

8. Borshcheva, G. A., Maslei, V. N., Shovkoplyas, Yu. A., Yarmol'chuk, E. D. Struktura i osnovnye kharakteristiki kosmicheskoi sistemy "Sich-2" [Structure and basic performances of space system "Sich-2"]. *Gosudarstvenno predpriyatie "Konstruktorskoe Byuro "Yuzhnoe" im. M. K. Yangelya" "Kosmicheskaya tekhnika. Raketye vooruzheniya"*: Nauchno-tekhnicheskii sbornik, vol. 2(109), 2015, pp. 16-24.

9. Vaisero, M. V. Dobrushina, M. G., Kavun, V. V., Maslei, V. N., Moskalev, S. I., Shovkoplyas, Yu. A., Shchudro, A. P. Konstruktivnye osobennosti platformy malogo kosmicheskogo apparata "Sich-perspektiva" [Design features of a platform of a small space vehicle "Sich-prospect"]. *Gosudarstvenno predpriyatie "Konstruktorskoe Byuro "Yuzhnoe" im. M.K. Yangelya" "Kosmiche-skaya tekhnika. Raketye vooruzheniya"*: Nauchno-tekhnicheskii sbornik, vol. 2(109), 2015, pp. 25-29.

10. *Metodika proektirovaniya razmerostabil'noi obolochечноi konstruksii iz kompozitsionnogo materiala* [A technique of designing the size of a stable shell design from a composite material]. GP "KB "Yuzhnoe", 2016. no. 311/358-2016 M.

11. Dobrushina, M. G., Kavun, V. V., Galaburda, D. A., Maslei, V. N., Moskalev, S. I., Boklagova, I. N., Kushnirenko, S. I. Aspekty razrabotki razmerostabil'noi konstruksii skanera vysokogo razresheniya [Aspekty of working out the size of a stable designs of the scanner of the high permission]. *Tekhnologicheskije sistemy*, 2017, no. 3(80), pp. 87-92.

12. Maslei, V. N., Kulik, A. S. *Metody proektirovaniya izdelii iz polimernykh kompozitsionnykh materialov* [Methods of designing of products from polymeric composite materials]. *Kosmichna nauka i tehnologiya – Space Science and Technology*, 2017, vol. 23, no. 5(108), pp. 44-48.

13. Maslyey, V., Kulyk A., Sanin, A., Moskal'ov, S., Kavun, V., Schudro, A. Development of dimensionally stable structure of drawtube of optical device made of composite material. *European Commission funded International Workshop "Materials resistant to extreme conditions for future energy systems"*, 12-14 June 2017, Kyiv – Ukraine, pp. 72. Book of abstracts.

14. Bratukhin, A. G. *Osnovopolagayushchie integrirovannye informatsionnye tekhnologi konkurentosposobnykh izdelii mashinostroeniya* [The basic integrated information technologists of competitive products of engineering]. *Tekhnologicheskije sistemy*, 2012. no. 3(60), pp. 7-32.

15. Frolov, A. F., Makhutov, N. A., Khurshudov, G. Kh., Gadenin, M. M. Prochnost', resurs i bezopasnost' tekhnicheskikh sistem [Strength, resource and safety of technical systems]. *Problemy prochnosti*, 2000, no. 5, pp. 8-18.

16. *Rukovodstvo dlya konstruktorov po raschetu ob'ektov na prochnost'* [A management for designers by calculation of objects on strength]. GP "KB "Yuzhnoe", 1972. Iskh. no. 321/124.

17. *Korpus SVRS 03.1019. Raschet na prochnost'. 03.1019 03.1019.0000.0000.00.0 R14* [A body of the Scanner of high resolution 03.1019. The Strength calculation. 03.1019 03.1019.0000.0000.00.0 P14]. GP "KB "Yuzhnoe im. M. K. Yangelya", 2016. 51 p.

18. *Korpus SVRS 03.1019. Kompleksnaya programma eksperimental'noi otrabotki 03.1019.13.0412.311 KPEO* [A body of the Scanner of high resolution 03.1019. The complex program of experimental optimisation 03.1019.13.0412.311 KPEO]. GP "KB "Yuzhnoe im. M. K. Yangelya", 2016. 30 p.

19. *KB "YuZhNOE" razvivaet novye tekhnologii sozdaniya RKT s primeneniem kompozitov* [Yuzhnoye State Design Office advances new technologies of creation PKT with application of composites]. Available at: https://www.yuzhnoye.com/press-center/news/copy_news_496.html (accessed 04.06.2019).

20. Bolotin, V. V., Novichkov, Yu. N. *Mekhanika mnogoslloinykh konstruksii* [Of the Mechanics of multi-

layered designs]. Moscow, "Mashinostroenie" Publ., 1980. 375 p.

21. Kanovich, M. Z., Trofimov, N. N. *Soprotivlenie kompozitsionnykh materialov* [Resistance of composite materials]. Moscow, "Mir" Publ., 2004. 504 p.

22. Reutov, A. I. *Nadezhnost' izdelii iz polimernykh kompozitsionnykh materialov s uchetom statisticheskoi izmenchivosti ikh kharakteristik*. Avtoref. diss. ... d.t.n. [Reliability of products from polymeric composite materials taking into account statistical variability of their characteristics. Autoref. diss. ... dr. eng. sci.]. Tomsk, Nats. issl. Tomskii politekhn. un-t Publ., 2011. 38 p.

23. V KB "YuZhNOE" *otkrylsya mnogofunktsional'nyi ispytatel'nyi tsentr* [In Yuzhnoye State Design

Office the multipurpose test centre was opened]. Available at: https://www.yuzhnoye.com/press-center/news/copy_news_483.html (accessed 04.06.2019).

24. *Metodika provedeniya verifikatsii vypolneniya uslovii TTZ posle kazhdogo polugodiya ekspluatatsii v kosmose* [A technique of carrying out of verification of fulfilment of conditions TT3 after every half-year operation in space]. GP "KB "Yuzhnoe", 2016. 36 p.

25. V KB "YuZhNOE" *otkryt novyi vychislitel'nyi tsentr s superkomp'yuterom* [In Yuzhnoye State Design Office the new computer centre with a supercomputer is opened]. Available at: https://www.yuzhnoye.com/press-center/news/copy_news_486.html (accessed 04.06.2019).

Поступила в редакцию 25.09.2019, рассмотрена на редколлегии 14.10.2019

ПРО КОМПЛЕКС ЗАХОДІВ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ПРОЧНОСТНИЙ РЕСУРС КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

В. М. Маслій

Предметом роботи є процес створення космічних апаратів для дистанційного зондування Землі (КА для ДЗЗ) у рамках рішення проблеми одержання високої роздільної здатності оптичної системи, шляхом досягнення високої температурної розмірної стабільності (ТРС) зі збереженням міцності несучих конструкцій (НК) при роботі КА на орбіті. Мета роботи: обґрунтувати блок-схему комплексу заходів аспекту міцності КА, розроблену й проведену в ДП "КБ "Південне" у процесі створення КА для ДЗЗ, що містять у несучих конструкціях шаруваті композиційні матеріали, зокрема, із застосуванням у НК шаруватих полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) з особливими схемами укладання вуглецевого волокна, що армує. Завдання роботи: провести аналіз застосування шаруватих структур з результируючим коефіцієнтом температурного лінійного подовження близьким до нуля, в тому числі і негативним в напрямку розробки КА ДЗЗ тривалого терміну експлуатації; розглянути варіанти компенсації ослаблення характеристик жорсткості та міцності НК для ТРС шаруватих структур, з урахуванням властивостей ПКМ, істотно відмінних від властивостей металів і сплавів в напрямку підвищення надійності КА на різних стадіях розробки; оцінити компенсацію високої вартості КА для ДЗЗ тривалого періоду активної роботи на орбіті на основі сучасних інформаційних технологій. Методами дослідження є аналіз існуючих технічних рішень і синтез НК із заданими характеристиками ТРС, твердості й міцності в процесі створення КА. Результати полягають у тому, що в статті сформовані особливості комплексу заходів, безпосередньо пов'язаних із забезпеченням міцності, жорсткості, довговічності й ресурсу НК у КА для ДЗЗ. Цей комплекс заходів, розроблених і проведених у ДП "КБ "Південне" в останні роки, першим пріоритетом має досягнення ТРС НК й охоплює весь життєвий цикл КА: проектування, виготовлення (технологію), випробування й експлуатацію. В експлуатацію включається зберігання, транспортування, передпускові випробування, виведення на орбіту й робота на орбіті. Наукова новизна полягає в тому, що комплексом враховані всілякі технологічні процеси, випробування на декількох варіантах макетів і моделей при максимально повній імітації штатних умов експлуатації за схемою: бортове встаткування → бортові системи → КА в цілому. Проблеми вирішуються із застосуванням інформаційних технологій класу CALS, для повної реалізації яких запущена в експлуатацію супер-ЕОМ із піковою продуктивністю 300 терафлоп. Це дозволяє безупинно вдосконалювати КА для ДЗЗ із застосуванням ПКМ у ТРС НК.

Ключові слова: космічний апарат; дистанційне зондування Землі; полімерний композиційний матеріал; температура розмірна стабільність; міцність; жорсткість; довговічність; ресурс.

ABOUT THE COMPLEX OF THE ACTIONS PROVIDING STRENGTH THE RESOURCE OF SPACE VEHICLES FOR REMOTE SOUNDING OF THE EARTH*V. Maslyey*

The subject of the work is the process of creating Earth remote sensing spacecraft (ERS SC) within the framework of solving the problem of obtaining a high-resolution optical system by achieving high temperature dimensional stability (TDS) while retaining the strength of load-bearing structures (LBSs) during SC operation in orbit. **The purpose of the work is** to substantiate the block diagram of a package of SC strength measures that has been developed and is being implemented at Yuzhnoye SDO in the process of creating ERS SC containing laminar composite materials in their load-bearing structures, in particular using in their LBSs laminar polymer composite materials (PCMs) with special patterns of reinforcing carbon fibers. **Objectives** of the work: to analyze the use of layered structures with a resulting coefficient of temperature linear elongation close to zero, including negative in the direction of developing a long-term satellite remote sensing; to consider options for compensating for the weakening of the stiffness and strength characteristics of nanocrystals for TRS layered structures, taking into account the properties of PCM, significantly different from the properties of metals and alloys in the direction of increasing the reliability of spacecraft at various stages of development; to evaluate the compensation for the high cost of spacecraft for remote sensing with the duration of the period of active work in orbit based on modern information technologies. **The results** consist in that the article formulates features of a package of measures directly linked with ensuring the strength, stiffness, durability, and operating life of LBSs in ERS SC. This package of the measures Yuzhnoye SDO has developed and been implementing in the last years has its first priority to attain the TDS of LBSs and covers the whole life cycle of SC: design, manufacture (technology), testing and service. The service includes storage, transportation, prelaunch tests, injection into orbit and operation in orbit. **The scientific novelty** consists in the fact that the package takes into account all possible technological processes, tests on several versions of mockups and models with maximally full imitation of standard service conditions according to the scheme: onboard equipment → onboard systems → SC in whole. Problems are solved using CALS-class information technologies, for the complete realization of which a super computer has been put into operation with a peak speed of 300 teraflops. This enables to continuously improve ERS SC using PCMs for the TDS of LBSs.

Keywords: spacecraft; Earth remote sensing; polymer composite material; temperature dimensional stability; strength; stiffness; durability; operating life.

Маслей Владимир Никитович – канд. техн. наук, Главный конструктор-начальник проектно-конструкторского бюро космических аппаратов, систем и комплексов, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» имени М. К. Янгеля», Днепр, Украина.

Volodymyr Maslyey – Candidate of Technical Science, Chief-Designer – Head of Design office of spacecraft, space systems and complexes, Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, Ukraine, e-mail: info@yuzhnoye.com.