

НАДЁЖНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕМРОАЗМЕРОСТАБИЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2024

Л. А. Климакова кандидат технических наук, начальник конструкторской бригады;
Обнинское научно-производственное предприятие «Технология»
им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск;
klimakova@technologiya.ru

Рассматривается проблема обеспечения заданной терморазмеростабильности конструкций из слоистых полимерных композиционных материалов на период срока службы. Предлагается метод надёжно-ориентированного проектирования терморазмеростабильной композитной конструкции, согласно которому её проектные параметры устанавливаются с учётом технологической реализуемости термодформационных свойств в конкретном технологическом процессе и эксплуатационной изменчивости этих свойств для условий и длительности применения изделия. Обсуждаются особенности процесса проектирования по критерию размерной точности и стабильности при удовлетворении требований надёжности, прочности и жёсткости в рамках разработанного подхода, приведён алгоритм комплексного решения задачи.

Полимерные композиционные материалы; терморазмеростабильная конструкция; термодформационные свойства; надёжно-ориентированное проектирование

Цитирование: Климакова Л.А. Надёжно-ориентированное проектирование терморазмеростабильных космических конструкций из полимерных композиционных материалов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 2. С. 40-48. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-2-40-48

Введение

Совершенствование современной космической техники во многом связано с полимерными композиционными материалами (ПКМ), которые позволяют существенно расширить функциональные возможности и улучшить тактико-технические характеристики космических аппаратов (КА), в том числе за счёт таких специальных свойств конструкций, как терморазмеростабильность, являющейся характеристикой размерной точности объекта в условиях тепловых воздействий.

Как известно, проектирование, производство и эксплуатация изделий из ПКМ по некоторым аспектам принципиально отличаются от аналогичных процессов для конструкций из традиционных материалов. В свою очередь, размеростабильные представляют собой отдельный класс композитных (как правило, углепластиковых) конструкций, требующих особого подхода к их созданию.

В инженерной практике решение задачи терморазмеростабильности композитной конструкции преимущественно ограничивается выбором слоистой структуры (тип и характеристики материала, углы укладки, содержание компонентов) с теоретически нулевым (или близким к нулю) температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) при существующих ограничениях и нормированием допустимых отклонений тех или иных структурных параметров [1 – 3]. В ряде случаев такой подход представляется вполне оправданным. В то же время, так как полимерные материалы характеризуются сильной зависимостью свойств от технологии изготовления и подвержены старению, для обеспечения высокой размерной точности в течение всего жизненного цикла изделия требуется учёт реализуемости его термодформационных свойств в конкретном технологическом процессе и изменения этих свойств при воздействии внешних факторов для условий и длительности эксплуатации.

Согласно ГОСТ 27.002 свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, есть надёжность. Поскольку для терморазмеростабильной конструкции «способность выполнять требуемые функции» определяется, в первую очередь, её термодформационными свойствами (термические перемещения или ТКЛР), соответствие этих характеристик регламентным значениям в течение срока службы является комплексным критерием размерной точности и надёжности (безотказности – для объектов одноразового использования) изделия.

Таким образом, принцип учёта технологической и эксплуатационной изменчивости свойств закладывает основу надёжно-ориентированной концепции терморазмеростабильности. Цель работы – показать применимость этой концепции при разработке высокоточных конструкций из слоистых ПКМ для космических систем с длительным сроком активного существования, а также рассмотреть некоторые аспекты проектирования, представляющие методический и практический интерес.

Постановка задачи проектирования геометрически стабильных космических конструкций из полимерных композиционных материалов

С учётом эффекта накопления в композиционном материале структурных изменений термодформационное состояние конструкции при многофакторном внешнем воздействии, согласно принципу суперпозиции перемещений, в общем виде является суммой деформаций от воздействия каждого фактора. К числу факторов, влияющих на размерную точность конструкции КА, помимо производственно-технологических условий изготовления, определяющих термодформационное состояние изделия на начало эксплуатации, относятся силовые нагрузки и окружающая среда, воздействующие на конструкцию в процессе эксплуатации – на этапах выведения КА на орбиту и эксплуатации в космосе.

В методологическом аспекте задача обеспечения геометрической стабильности – при снижении влияния дестабилизирующих воздействий – должна рассматриваться в контексте минимизации «отклика» конструкции на эти воздействия [4]:

$$\lim \varepsilon_{\Sigma} \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_1 + \sqrt{\varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_4^2}, \quad (2)$$

где ε_{Σ} – отклонение размера от теоретического значения на конечный момент времени эксплуатации; ε_1 – отклонения размера от теоретического значения на начало эксплуатации (состояние после изготовления); $\varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ – предельные значения деформации при наземной эксплуатации, выведении на орбиту и эксплуатации в космосе соответственно. Выражение (1) есть математическое представление целевой функции проектирования конструкции по критерию размерной точности.

Применительно к задачам терморазмеростабильности выражение (2) с учётом критичности соответствующих факторов влияния преобразуется в соотношение вида

$$\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_1 + \varepsilon_4, \quad (3)$$

которое отражает требование минимизации отклонений термодформационных свойств изделия от теоретических значений при изготовлении и лётной эксплуатации.

В общем виде задача проектирования терморазмеростабильной конструкции формулируется следующим образом. При первоначальных исходных данных, а также

данных, устанавливаемых в процессе предварительного проектирования, определить параметры конструкции, обеспечивающие при существующих ограничениях минимальные деформации в установленном температурном диапазоне в течение назначенного срока службы. Основными исходными данными являются: эксплуатационные условия (силовые нагрузки, факторы внешней среды), требования терморазмеростабильности, массогабаритные ограничения (m, V), ограничения по прочности σ и жёсткости (модуль упругости E , частота собственных колебаний f).

Требования терморазмеростабильности задаются предельными термическими перемещениями $[\varepsilon]$ или интервалом допустимых значений ТКЛР $[\alpha]$. Принадлежность ТКЛР конструкции интервалу допустимых значений на всех этапах жизненного цикла является комплексным показателем её эффективности и надёжности, невыполнение этого условия рассматривается как критерий отказа. В целях снижения неоднородности тепловых полей одновременно с требованиями терморазмеростабильности могут предъявляться требования по теплопроводности λ .

Воздействующие на конструкцию КА в процессе эксплуатации силовые нагрузки и факторы окружающей среды (температура, влажность, ионизирующее излучение, вакуум и т.д.) имеют различную физическую природу и, если парирование силовых воздействий решается стандартными конструктивными приёмами, обеспечивающими требуемую жёсткость, то влияние внешней среды компенсируется свойствами конструкционного материала. Прочностные требования при этом не являются определяющими, так как их уровень, как правило, относительно невысок.

К данным, устанавливаемым в ходе предварительного проектирования, относятся: конструктивная схема; тип конструкции и соединения её конструктивных элементов; способ изготовления; расчётные случаи силового и термического нагружения; материал, геометрические, структурные параметры и свойства основных элементов. Данные, принятые на этапе предварительного проектирования, задаются в качестве первого приближения и подлежат уточнению при последующих итерациях.

Метод надёжно-ориентированного проектирования терморазмеростабильных конструкций из полимерных композиционных материалов

В соответствии с надёжно-ориентированной концепцией разработан метод проектирования космических конструкций из ПКМ, который реализует «встраивание» целевой функции долговременной терморазмеростабильности в комплексную задачу определения рациональных параметров изделия в целом. Структурная схема алгоритма проектирования представлена на рис. 1. В самом общем виде процесс реализуется следующим образом.

1. Выбор конструктивной схемы и способа изготовления изделия на основе проработки различных вариантов схемно-технологических решений.

Выбор конструктивной схемы как совокупности конструктивных элементов, обеспечивающих геометрическую неизменяемость конструкции при внешних воздействиях, производится по критерию рациональности: удовлетворение жёсткостным требованиям при минимально возможной массе, максимальной компактности и совместимости с термомодеформационными ограничениями.

Способ изготовления конструкции зависит от её типа и габаритов, применяемых материалов и производственных возможностей. При этом, с точки зрения размерной стабильности, предпочтительны малостадийные технологические схемы, так как многоступенчатость процесса переработки ПКМ приводит к накоплению технологических дефектов и значительному рассеянию термоупругих свойств [5].

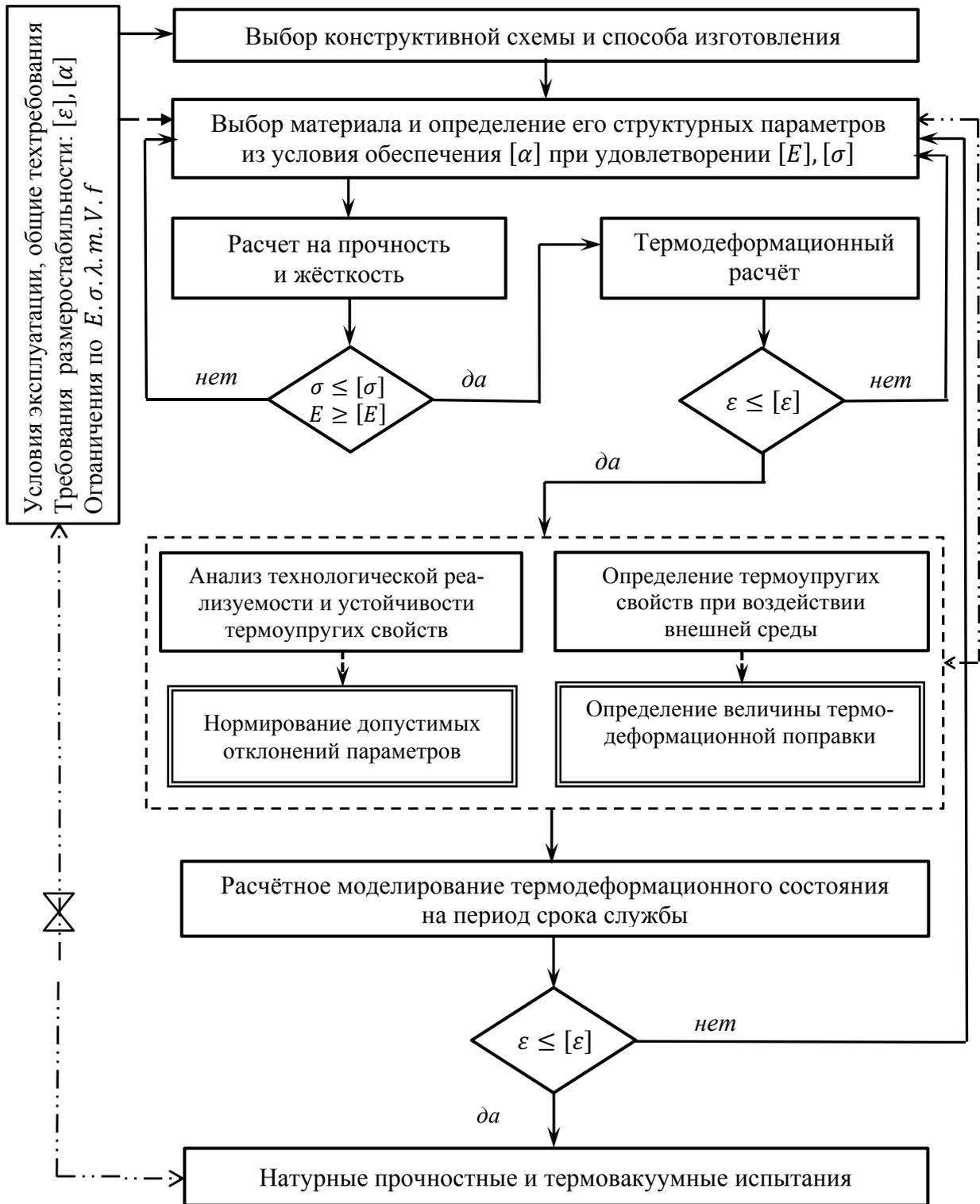


Рис. 1. Структурная схема алгоритма надёжностно-ориентированного проектирования терморазмеростабильных космических конструкций из полимерных композиционных материалов с учётом технологической и эксплуатационной изменчивости свойств

Вопросы организации соединений элементов конструкции в контексте размерной точности приобретают особый статус, так как помимо обычных требований прочности и жёсткости, на соединения распространяются требования минимальных деформаций. Совмещенные технологические схемы изготовления в этом аспекте также являются более предпочтительными, поскольку реализуемые при таком методе интегральные соединения характеризуются лучшей, по отношению, например, к механическим соединениям, точностью взаимного позиционирования сопрягаемых элементов и однородностью напряжённо-деформированного состояния [6].

2. Формирование термдеформационных свойств изделия посредством выбора типа и структуры композиционного материала.

Выбор материала и определение структурных параметров слоистого пакета (углов ориентации, числа и относительной толщины слоёв) выполняется по термоупругим свойствам (и теплопроводности) материала из условия обеспечения требуемых значений ТКЛР при удовлетворении жёсткостных и прочностных требований [7; 8]. При этом должен быть учтён вклад всех элементов в общие термические деформации конструкции (например, влияние сотозаполнителя и клея на интегральный ТКЛР трёхслойной конструкции [9]).

3. Проектно-расчётный расчёт конструкции при силовом и тепловом нагружении.

К основным расчётным случаям силового нагружения конструкций КА относятся транспортные нагрузки (статика, низкочастотные вибрации) на стадии наземной эксплуатации и вибрационные и акустические нагрузки при выводе на орбиту, при этом основным силовым расчётом является динамический анализ (расчёт на жёсткость) [10]. Расчёт на прочность при этом имеет, скорее, характер поверочного, так как для таких конструкций статические силовые нагрузки невысоки. Задача расчёта на жёсткость с точки зрения геометрической стабильности состоит в выборе инерционных параметров (толщины и упругих свойств основных силовых элементов) для рассматриваемых вариантов конструктивного исполнения, обеспечивающих требуемые значения низших собственных частот конструкции и отсутствие остаточных силовых деформаций.

Моделирование поведения при тепловой нагрузке имеет принципиальное значение при проектировании конструкции по критерию терморазмеростабильности. Оценка термдеформационных свойств конструкции выполняется сравнением величины термических деформаций ε , полученных расчётным путём в установленном диапазоне температур, с заданным значением $[\varepsilon]$. Невыполнение условия $\varepsilon \leq [\varepsilon]$ или $\alpha \leq [\alpha]$ влечёт за собой необходимость изменения проектных параметров (схемы армирования, основных материалов, типа конструкции, способа организации соединений и т.д.) с соответствующим пересчётом свойств элементов конструкции.

Важной составляющей термдеформационного расчёта является определение проектных значений термоупругих свойств конструктивных элементов, при которых реализуются минимальные термические деформации конструкции в целом. Кроме этого, анализ напряжённо-деформированного состояния (НДС) позволяет оценить термдеформационную эффективность конструктивных материалов и конструктивной схемы, выявить и минимизировать факторы негативного термдеформационного взаимовлияния, к которым относятся несогласованность ТКЛР (например, в случае использования металлических комплектующих) и наличие нерегулярностей (соединительные элементы, локальные усиления, местные вырезы, заделки и т.п.).

4. Расчётно-экспериментальный анализ технологической реализуемости и устойчивости термоупругих свойств.

Неотъемлемой составляющей процесса проектирования терморазмеростабильной конструкции из ПКМ является расчётно-экспериментальный анализ технологической

реализуемости и устойчивости термоупругих характеристик с нормированием допустимых диапазонов изменения структурных параметров материала и технологических параметров изготовления.

ТКЛР может зависеть от целого ряда структурных и технологических параметров, степень влияния каждого из которых зависит от величины отклонения параметра, структуры слоистого пакета, и определяется индивидуально для конкретной конструкции и конкретного технологического процесса с учётом реальных производственных диапазонов отклонений и возможности их контроля и управления. Вместе с тем, для большинства схем армирования наиболее критичными являются разбросы соответствующих термоупругих характеристик материала и углов его укладки, в связи с чем именно эти параметры подлежат обязательному нормированию в технической документации на изделие.

К основным технологическим параметрам, обеспечивающим стабильность процесса формования и непосредственно влияющим на точностные характеристики изделия, относятся вязкость связующего, температура отверждения, скорости нагрева-охлаждения, время выдержки, давление [11]. Допустимые диапазоны их изменения устанавливаются на основе анализа кинетики отверждения полимерного материала.

5. Определение термоупругих свойств при воздействии внешней среды.

Для обеспечения надёжности (заданной терморазмеростабильности) конструкции в течение срока службы налагаемые на неё при проектировании и контролируемые при изготовлении требования должны устанавливаться с учётом ожидаемого изменения свойств – в первую очередь, ТКЛР – от действия эксплуатационных факторов внешней среды. Это означает введение при необходимости в проектные характеристики конструкции соответствующей термомодеформационной поправки $\Delta\alpha$, требуемая величина которой может быть достоверно определена только прямым экспериментом. Экспериментальная оценка свойств при эксплуатационных воздействиях является также обязательной для квалификации композиционного материала и получения заключения о возможности его применения по назначению в составе конструкции КА.

В соответствии с принципом суперпозиции перемещений методика проведения эксперимента основывается на последовательном нагружении репрезентативных образцов конструкции воздействиями, имитирующими условия внешней среды при наземной и лётной эксплуатации. К основным факторам внешней среды относятся: температура и влажность для наземного этапа, радиационное облучение и циклическое воздействие знакопеременных температур для лётного этапа эксплуатации. Режимы и продолжительность воздействий устанавливаются в соответствии с условиями эксплуатации изделия. Результирующими данными испытаний являются свойства, соответствующие начальному и конечному моментам времени эксплуатации изделия.

6. Расчётное моделирование термомодеформационного состояния на период срока службы.

Вследствие определяющей роли в надёжности композитной конструкции стабильности свойств материала метод теоретического анализа НДС на основе экспериментальных данных о свойствах материала в зависимости от условий и времени эксплуатации рассматривается в качестве основного в задачах прогнозирования надёжности полимерных изделий [12].

Оценка надёжности терморазмеростабильной конструкции на период срока службы выполняется методом численного моделирования её термомодеформационного поведения с использованием фактических свойств изделия в исходном (после изготовления) и конечном (по завершении эксплуатации) состояниях. В качестве информации об изделии используются данные, полученные при испытании образцов в рамках определения свойств при эксплуатационных воздействиях факторов внешней среды.

7. Натурные прочностные и термовакуумные испытания.

Завершающим этапом проектирования являются прочностные и термовакуумные испытания натурной конструкции (макета), целью которых является подтверждение соответствия реализованных характеристик терморазмеростабильности, прочности и жёсткости заданным значениям. Достигнутые показатели терморазмеростабильности конструкции определяются прямыми измерениями термических перемещений для тепловых режимов штатного функционирования изделия в условиях, воспроизводящих основные факторы космического пространства.

Заключение

Как показывает опыт практического применения, предложенная надёжностно-ориентированная концепция терморазмеростабильности и разработанный на её основе метод проектирования обеспечивают возможность создания высокоточных композитных конструкций с прогнозируемой технологической и эксплуатационной надёжностью термодформационных свойств. Функциональная эффективность нового подхода и принципиальных положений метода подтверждена примерами ряда конструкций космического назначения, в том числе крупногабаритных откидных платформ, штатно эксплуатируемых в составе космического аппарата.

Библиографический список

1. Зиновьев П.А. Термостабильные структуры многослойных композитов // В сб.: «Механика конструкций из композиционных материалов». М.: Машиностроение, 1992. С. 193-207.
2. Комиссар О.Н. Разработка расчётно-экспериментального метода проектирования технологически несимметричных многослойных труб формостабильных космических конструкций. Дис. ... канд. техн. наук. Обнинск, 2004. 146 с.
3. Смердов А.А. Разработка методов проектирования композитных материалов и конструкций ракетно-космической техники. Дис. ... докт. техн. наук. Москва, 2007. 412 с.
4. Моишеев А.А. Методология создания прецизионных космических аппаратов // В кн.: «Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований». Т. 1. М.: МАИ-Принт, 2013. С. 57-91.
5. Молодцов Г.А., Биткин В.Е., Симонов В.Ф., Урмансов Ф.Ф. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 2000. 352 с.
6. Klimakova L., Polovy A., Vymorkov N., Zinoviev P., Catinaccio A. Functional designing of CFRP precision large-sized support structure // Proceedings of the 25th Jubilee International SAMPE Europe Conference 2004: Material & Process Technology (March 30, April 1, 2004, Paris, France). P. 260-265.
7. Климакова Л.А., Половый А.О. Возможности использования углепластиков в термостабильных структурах прецизионных конструкций // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2008. № 2 (71). С. 22-28.
8. Климакова Л.А., Половый А.О. Теплопроводность углепластиков на основе термостабильных структур для прецизионных конструкций // Механика композиционных материалов и конструкций. 2009. Т. 15, № 3. С. 319-326.

9. Климакова Л.А., Половый А.О. Экспериментальные исследования влияния сотозаполнителя и клея на ТКЛР углепластиковой трёхслойной конструкции // Механика композиционных материалов и конструкций. 2011. Т. 17, № 4. С. 539-544.

10. Конструирование автоматических космических аппаратов / под ред. Д.И. Козлова. М.: Машиностроение, 1996. 448 с.

11. Балашов В.М., Дарьев Д.В., Семёнова Е.Г. Особенности проектирования и технологии производства сложнопрофильных антенных конструкций антенн из композиционных материалов // Сборник докладов III Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» (26-30 октября 2009 г., Москва, Россия). М.: ИРЭ РАН, 2009. С. 108-121.

12. Реутов А.И. Надёжность изделий из полимерных композиционных материалов с учётом статистической изменчивости их характеристик. Дис. ... докт. техн. наук. Томск, 2016. 122 с.

RELIABILITY-ORIENTED DESIGN OF PCM THERMODIMENSIONALLY STABLE SPACE STRUCTURES

© 2024

L. A. Klimakova Candidate of Science (Engineering), Head of the Design Team;
JSC Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya
named after A.G. Romashin, Obninsk, Russian Federation;
klimakova@technologiya.ru

The problem of ensuring the specified thermo-dimensional stability of structures from laminated polymer composite materials for the service life period is considered. A method of reliability-oriented design of a thermo-dimensionally stable composite structure is proposed, according to which its design parameters are set with regard to the possibility of obtaining thermal strain properties under specific processing and the changes of these properties for the operational conditions and duration of using the article as intended. Within the framework of the presented approach, the features of design upon the dimensional accuracy and stability criterion when meeting the requirements of strength and stiffness are discussed, an algorithm of a packaged solution of the design task is given.

Polymeric composite materials; thermo-dimensionally stable structure; thermal strain properties; reliability-oriented design

Citation: Klimakova L.A. Reliability-oriented design of PCM thermodimensionally stable space structures. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 2. P. 40-48. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-2-40-48

References

1. Zinov'ev P.A. Termostabil'nye struktury mnogosloynnykh kompozitov. *V sb.: «Mekhanika Konstruktsiy iz Kompozitsionnykh Materialov»*. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1992. P. 193-207. (In Ruus.)

2. Komissar O.N. *Razrabotka raschetno-eksperimental'nogo metoda proektirovaniya tekhnologicheskoi nesimmetrichnykh mnogosloynnykh trub formostabil'nykh kosmicheskikh konstruktsiy*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Development of a calculation and experimental design method for technologically unsymmetrical multilayered tubes of dimensionally stable space structures. Thesis for a Candidate Degree (Engineering)]. Obninsk, 2004. 146 p.

3. Smerdov A.A. *Razrabotka metodov proektirovaniya kompozitnykh materialov i konstruktsiy raketno-kosmicheskoy tekhniki*. Diss. ... dokt. tekhn. nauk [Development of methods of designing composite materials and structures of aerospace equipment. Thesis for a Doctor's Degree (Engineering)]. Moscow, 2007. 412 p.

4. Moisheev A.A. Metodologiya sozdaniya pretsizionnykh kosmicheskikh apparatov. *V kn.: «Proektirovanie Avtomaticheskikh Kosmicheskikh Apparatov Dlya Fundamental'nykh Nauchnykh Issledovaniy»*. V. 1. Moscow: MAI-Print Publ., 2013. P. 57-91. (In Russ.)
5. Molodtsov G.A., Bitkin V.E., Simonov V.F., Urmansov F.F. *Formostabil'nye i intellektual'nye konstruksii iz kompozitsionnykh materialov* [Dimensionally stable and intellectual structures from composite materials]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2000. 352 p.
6. Klimakova L., Polovy A., Vymorkov N., Zinoviev P., Catinaccio A. Functional designing of CFRP precision large-sized support structure. *Proceedings of the 25th Jubilee International SAMPE Europe Conference 2004: Material & Process Technology (March 30, April 1, 2004, Paris, France)*. P. 260-265.
7. Klimakova L.A., Polovyi A.O. Possible usage of carbon fiber reinforced plastics in thermostable structures of precision constructions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2008. No. 2 (71). P. 22-28. (In Russ.)
8. Klimakova L.A., Polovy A.O. Thermal conductivity of CFRP based on thermostable lay-ups for precision structures. *Journal on Composite Mechanics and Design*. 2009. V. 15, no. 3. P. 319-326. (In Russ.)
9. Klimakova L.A., Polovy A.O. Experimental studies of honeycomb and adhesive effects on CFRP sandwich structure CTE. *Journal on Composite Mechanics and Design*. 2011. V. 17, no. 4. P. 539-544. (In Russ.)
10. *Konstruirovaniye avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov* [Design of unmanned space vehicles / ed. by Kozlov D.I.]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1996. 448 p.
11. Balashov V.M., Dar'ev D.V., Semenova E.G. Osobennosti proektirovaniya i tekhnologii proizvodstva slozhnoprofil'nykh antennykh konstruksiy antenn iz kompozitsionnykh materialov. *Sbornik dokladov III Vserossiyskoy konferentsii «Radiolokatsiya i Radiosvyaz'» (September, 26-30, 2009, Moscow, Russia)*. Moscow: IRE RAN Publ., 2009. P. 108-121. (In Russ.)
12. Reutov A.I. *Nadezhnost' izdeliy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov s uchetom statisticheskoy izmenchivosti ikh kharakteristik. Dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Reliability of products from polymeric composite materials with regard to statistical variation of their characteristics. Thesis for a Doctor's Degree (Engineering)]. Tomsk, 2016. 122 p.