

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОРАЗМЕРОСТАБИЛЬНОСТИ ФЕРМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

### Введение

Одним из основных направлений развития космических аппаратов (КА) «службы» Земли являются:

- повышение точности ориентации КА на наземные ориентиры;
- повышение разрешающей способности целевой аппаратуры.

Указанные тенденции накладывают определенные требования и на конструкцию КА, т.е. требуют более точной и более стабильной «привязки» целевой аппаратуры к датчикам ориентации КА.

На примере развития космических аппаратов разработки ГKB «Южное» можно оценить эволюцию требований, предъявляемых к взаимной привязке целевой аппаратуры и датчиков ориентации. Для КА разработки 60-х годов ее величина составляла 30 угл. мин (КА «11Ф619»), на КА разработки 80-х годов – 15 угл. мин (КА «11Ф644»), на КА разработки 90-х годов – 2 угл. мин (КА «Лыбидь»), на КА разработки 2000 года – 4 угл. с (телескоп КА «Сич-2»).

Основным дестабилизирующим фактором в процессе эксплуатации КА на орбите являются температурные деформации конструкции вследствие постоянно действующих термоциклов «нагрев-охлаждение». По этой причине и возник закономерный интерес как отечественных, так и зарубежных космических фирм к новым конструкционным материалам, обладающим низкой температурной деформируемостью. Такими материалами являются инварные сплавы и углепластик. Если инварные сплавы имеют плотность  $\approx 8 \text{ г/см}^3$ , то этот параметр у углепластика составляет  $\approx 1,45 \text{ г/см}^3$ . К тому же этот материал обладает высокими упруго-прочностными характеристиками.

Именно эти свойства углепластика позволяют использовать его в размеростабильных ферменных конструкциях КА [1]. Однако до настоящего времени недостаточно изучено влияние факторов космического пространства на свойства углепластика с течением времени.

Исходя из выше сказанного, для успешного использования углепластика в качестве материала силовых конструкций космического аппарата необходимо изучить влияние термоциклов на изменение геометрических параметров конструкций из углепластика в течение длительного времени.

Цель работы – исследование и оценка влияния тепловых нагрузок различной интенсивности и длительности на размеростабильность ферменных конструкций для космических аппаратов.

### **Разработка конструктивно-компоновочной схемы ферменной конструкции**

Использование углепластика в качестве конструкционного материала преследует две основные цели:

- снижение массы;
- повышение терморазмеростабильности.

Если снижение массы является общей задачей при проектировании КА, то повышение размеростабильности является частной задачей [2]. В ряде случаев устраивает размеростабильность конструкций, изготавливаемых из алюминиевых сплавов, хотя последние имеют коэффициент линейного термического расширения (КЛТР) на 1-2 порядка более высокий, чем у углепластика. Однако, при проектировании несущей фермы телескопа КА «Січ-2» рассогласование первоначально полученных размеров (длина фермы ~ 1800 мм) не должно превышать ~ 50 мкм по длине фермы, ~ 20 мкм в поперечном направлении и 2 угл. с по развороту двух торцевых плоскостей. Учитывая, что КА эксплуатируется на орбите 5...15 лет в диапазоне температур  $\sim \pm 50^\circ\text{C}$  (для наружных несущих приборных ферм), становится понятным озабоченность разработчиков ферм необходимостью сохранения размеров в течение столь длительного времени эксплуатации, что требует проведения ресурсных испытаний в реальном масштабе времени с поочередным нагревом и охлаждением фермы. Учитывая отсутствие методик имитации космических условий, предполагается нагрев и охлаждение фермы производить на несколько завышенные температуры, чтобы ускорить появление деформаций фермы. При выборе конструктивно-силовой схемы экспериментальной фермы, предназначенной для ресурсных испытаний, руководствовались следующими требованиями:

- использование наиболее перспективных технологий, а именно – автоматизации процесса намотки волокна;
- применение перспективных форм конструктивных элементов фермы в виде трубы прямоугольного сечения с фитингами с ортогональными лучами;
- выбор конструктивно-силовой схемы фермы, обладающей максимальной жесткостью, обеспечиваемой наличием диагональных раскосов на каждой грани фермы;
- выбор простой конструктивно-компоновочной схемы фермы в форме параллелепипеда.

Наличие раскосов затруднит установку приборов во внутрь фермы, но для сохранения высокой размеростабильности этим фактом можно пренебречь.

В связи с тем, что предполагается производить замеры между торцами фермы микрометром (цена деления – 1 мкм), по торцам фермы были установлены восемь подпятников (по четыре с каждого торца), изготовленных из инварного сплава.

Габаритные размеры модельной фермы: 508×508×834 мм.

Конструкционный материал: углепластик УП-УКН-5000/ЭДТ-10П.

Сечения труб: 50×50 мм.

Толщина стенки труб: 1,5 мм.

Фитинги трехлучевые, с ортогональными лучами.

Крепление раскосов производится с помощью приклеиваемых скрепляющих углепластиковых накладок. Накладки дополнительно скрепляются с трубами с помощью ниточных бандажей.

### Выбор материалов и технологии изготовления.

Традиционными материалами для изготовления ферменных конструкций являются сплавы алюминия. Однако современные требования, предъявляемые к фермам, используемым на космических летательных аппаратах (минимальная масса, максимальная жесткость, минимальная деформируемость при прохождении цикла «нагрев-охлаждение»), предполагают применение нового класса материалов – композиционных пластиков на основе стекло-, угле- или органонаполнителей [3]. В табл. 1 приведены характеристики указанных материалов в сравнении с алюминиевым сплавом.

Таблица 1 – Характеристики композиционных материалов в сравнении с характеристиками алюминия

Марка материала	Разрушающее напряжение при растяжении $\sigma_e$ , МПа	Модуль упругости при растяжении $E_e$ , ГПа	Плотность, $\rho$ г/см <sup>3</sup>	КЛТР, $\alpha \cdot 10^{-6}$ 1/°C
Стеклопластик ВПС-13	475	22	1,9	6,7
Органопластик ЖСВМ-5+ЭДТ-10	2060	78	1,35	-6,5
Углепластик УКН-5000+ УП-354	1056	138	1,45	0,8
Алюминиевый сплав АМг-6	320	72	2,64	24,6

Как видно из данных, представленных в таблице, для выполнения требований по минимальной массе конструкции предпочтительнее применение органопластика и углепластика, имеющих плотность 1,35 и 1,45 г/см<sup>3</sup> соответственно. В то же время углекомпозиаты обладают существенно более высоким модулем упругости как по отношению к органопластикам, так и еще в большей степени по отношению к АМг-6. Кроме того композиты на основе углеродных волокон обладают минимальным КЛТР, более чем в 30 раз меньшим, чем у АМг-6, что при правильном использовании данного свойства может позволить существенно повысить термостабильность конструкций [4]. Таким образом, для изготовления размеростабильной фермы из композиционных материалов наиболее целесообразно использовать композит на основе углеродных волокон.

Опираясь на опыт создания изделий из композиционных материалов ГKB «Южное», в качестве матрицы для углеродных волокон наиболее предпочтительно использовать связующее эпоксидного класса, поскольку именно эпоксидные связующие обеспечивают получение композитов с наиболее высокими упруго-прочностными свойствами.

Проведенный анализ конструкции фермы показал, что ее целесообразно расчленить для изготовления на следующие основные детали: стержни, фитинги, пластины и разбить технологический цикл изготовления фермы на два основных этапа: изготовление комплектующих и сборочные работы.

Стержни и фитинги изготавливались из углеродного жгута УКН/5000, пропитанного эпоксидным связующим ЭДТ-10 «мокрым» способом методом автоматизированной намотки на станке с числовым программным управлением.

С целью снижения КЛТР стержней был проведен анализ ранее разработанных схем армирования. Для оптимизации схемы армирования угол укладки изменяли от 0° до ±4°. Для достижения толщины стенки стержня 1,5±0,1 мм укладывалось 8 продольных слоев. Намотка стержневых элементов с углами армирования, отличными от 0°, позволила производить укладку армирующего материала на ребрах оправки, тем самым равномерно распределяя материал по всей ее поверхности. Количество лент в слое составляло 44, а количество жгутов в ленте – 2. Контроль КЛТР проводился в диагностической отраслевой лаборатории голографии Днепропетровского национального университета им. О. Гончара (ДОЛГ ДНУ). Результаты данных испытаний приведены в табл. 2.

Стержневые элементы отличались друг от друга только длиной и формой торцевой части. Длина стержней в зависимости от местоположения в ферме изменяется от 407 до 784 мм. Размеры поперечного сечения составляют 50x50x1,5 мм.

Таблица 2 – Результаты испытаний стержней на КЛТР

Номер стержня	$\alpha \cdot 10^{-6}$ , 1/°C				Среднее значение
	Измерение 1	Измерение 2	Измерение 3	Измерение 4	
1	0,751	1,52	1,52	1,25	1,25
2	0,751	0,751	1,126	0,751	0,84
3	1,52	1,52	1,52	1,877	1,59
4	0,675	0,45	0,5	0,3	0,5
5	1,52	1,877	1,5	1,126	1,502
6	0,3	0,35	0,3	0,45	0,35
7	1,05	1,35	1,25	1,35	1,25

Фитинги в модельной ферме трехлучевые объемные с длиной луча 103 мм.

Материал фитинга такой же, как у стержней. Соединение «стержень-фитинг» осуществляется по внутренней поверхности луча фитинга. Схема армирования определялась по технологии Восточноукраинского национального университета им. Владимира Даля (ВНУ) (см. табл. 3).

Накладки изготавливались из углепластика УП-ЛУ-П/ЭДТ-10П (наполнитель – лента ЛУ-П-0,2, связующее – ЭДТ-10П). Схема армирования: 2/0° + 3/60° + 3/-60° + 3/0° + 3/-60° + 3/60° + 2/0°.

Склеиваемые поверхности соединялись под небольшим давлением (0,01–0,02 МПа) и при температуре 20-30°C, время окончательного отверждения составляло 18 – 24 часа.

#### **Выбор схемы армирования стержней.**

При выборе схемы армирования учитывались следующие критерии:

- обеспечение минимального КЛТР;
- обеспечение регламентируемой прочности.

Восточноукраинского национального университета им. Владимира Даля провел работы по выбору оптимальной схемы армирования с точки зрения обеспечения минимального КЛТР [5]. Можно привести комплексную таблицу (табл. 3), составленную по результатам исследований [5], отражающую зависимость КЛТР, прочности и массы полых стержней сечением 50×50 мм (толщина стенки – 1,5 мм) от схемы армирования.

Анализ таблицы показывает, что схемы № 8 и № 11 обладают более низким КЛТР. Схема № 2 является наиболее близкой к схеме армирования волокна, используемой при изготовлении фермы КА «Либідь». На основании таблицы можно сделать вывод, что при незначительной потере прочности (21% при сравнении схем № 2 и № 8) КЛТР уменьшается в 7,7 раза.

Таблица 3 – Выбор схемы армирования стержней

№ п/п	Схема армирования	Погонная масса, г/м	Разрушающая нагрузка на сжатие $P_p$ , кН	КЛТР, $\alpha \cdot 10^{-6}$ , 1/°С
1	1/90°+6/0°+1/90°	398,0	39,60	1,49
2	1/90°+3/3°+3/-3°+1/90°	403,5	42,40	1,23
3	1/90°+3/0°+1/90°+2/0°+1/90°	401,5	43,40	2,06
4	2/0°+1/90°+2/0°+1/90°+2/0°	412,0	54,20	1,51
5	2/3°+1/90°+2/3°+1/90°+2/-3°	422,5	59,40	1,95
6	1/80°+3/3°+1/90°+3/-3°+1/80°	392,5	45,00	1,55
7	1/80°+2/3°+1/80°+2/3°+1/80°+2/3°+1/80°	384,0	40,60	1,21
8	8/0°	419,0	33,40	0,16
9	7/90°	403,5	16,60	0,31
10	3/3°+2/90°+3/-3°	414,5	48,70	1,35
11	2/3°+2/-3°+2/3°+2/-3°	406,0	35,90	0,25

При выборе схемы армирования модельной фермы за основу была принята схема №11. Учитывая, что ферма сечения трубы квадратная, то для того, чтобы волокна не «сползали» с ребра трубы, принимается геодезическая намотка с малым углом.

### Сборка модельной фермы

Модельная ферма представляет собой клееную стержневую конструкцию. Конструктивно–технологически модельную ферму можно разделить на следующие составные части: каркас, состоящий из двух оснований, соединенных боковыми стержнями и усиливающих элементов (подкрепляющих стержней, накладок, бандажей).

Сборка фермы производилась по технологическому процессу, в котором реализована следующая последовательность операций:

- сборка оснований каркаса;
- сборка каркаса;
- клейка подкрепляющих стержней;
- клейка накладок;
- намотка бандажей;
- сверловка отверстий в основаниях под установку бобышек;
- клейка бобышек.

Требования по геометрическим параметрам фермы обеспечиваются точностью сборки каркаса. Требования по точности сборки оснований (неплоскостности, геометрическим размерам) обеспечены сборочной оснасткой.

Оснастка представляет собой плиту (с неплоскостностью поверхности не более 0,05 мм) с закрепленной на ней рамкой. Внутренние размеры рамки соответствуют геометрическим параметрам основания фермы.

Требования по непараллельности и высоте фермы обеспечиваются при сборке каркаса.

При сборке оснований с боковыми стержнями высота фермы выдерживается с точностью  $\pm 0,2$  мм, контроль производится замером расстояния между поверхностями оснований по четырем плоскостям микрометрическим инструментом.

При сборке фермы использовался клей «холодного» отверждения К-153.

Разработанная технология обеспечила сборку модельной фермы в соответствии с регламентируемыми требованиями.

### **Разработка методики тепловых испытаний модельной фермы**

Конструкция разрабатываемого ГКБ «Южное» орбитального телескопа такова, что его основные оптические элементы (зеркала, линзы, фотоприемники) монтируются непосредственно на каркасе. Эффективность работы телескопа, качество полученного изображения как уже отмечалось выше, в значительной степени зависит от стабильности оптической системы, т.е. от размеростабильности каркаса. Поэтому требования к размеростабильности каркаса телескопа существенно повышены. В связи с этим большой интерес вызывает применение углепластиковых материалов в качестве основных элементов каркаса. Но, наряду с очевидными преимуществами по сравнению с металлами (малая масса, более низкий КЛТР), композиционные материалы обладают рядом недостатков, которые сдерживают их широкое применение в практике космического аппаратостроения. Один из них – отсутствие достаточного опыта долговременной эксплуатации конструкций из углепластика в условиях воздействия космического излучения, значительного и многократного знакопеременного термонагружения.

С целью накопления такого опыта была изготовлена модельная ферма, имитирующая каркас телескопа, основных его частей и соединительных элементов. Модельная ферма представляет собой конструкцию из углепластиковых труб с габаритными размерами 834x508x508 мм (рис. 1). В процессе изготовления на ее торцевых поверхностях устанавливаются металлические опоры из инварметалла, имеющего КЛТР, близкие к КЛТР углепластика. Контрольные поверхности опор выполняются полированными.

Испытания состоят в проведении нескольких серий термоциклических нагружений модельной фермы различной интенсивности и продолжительности. Для оперативной оценки влияния

различных видов нагрузок на геометрические параметры фермы возникла необходимость в создании методики и соответствующего инструмента, позволяющего измерить изменение габаритных размеров фермы с точностью до 2 мкм и угловых деформаций с точностью до двух угловых с.

В ДНУ разработана методика измерения угловых деформаций модельной фермы при тепловых испытаниях. Указанная методика предполагает прямое измерение изменений линейных размеров фермы между контрольными поверхностями, расположенными на одном продольном стержне 1 и 1', 2 и 2', 3 и 3', 4 и 4' (рис. 1), с помощью специально разработанного и изготовленного микрометра (рис. 2).

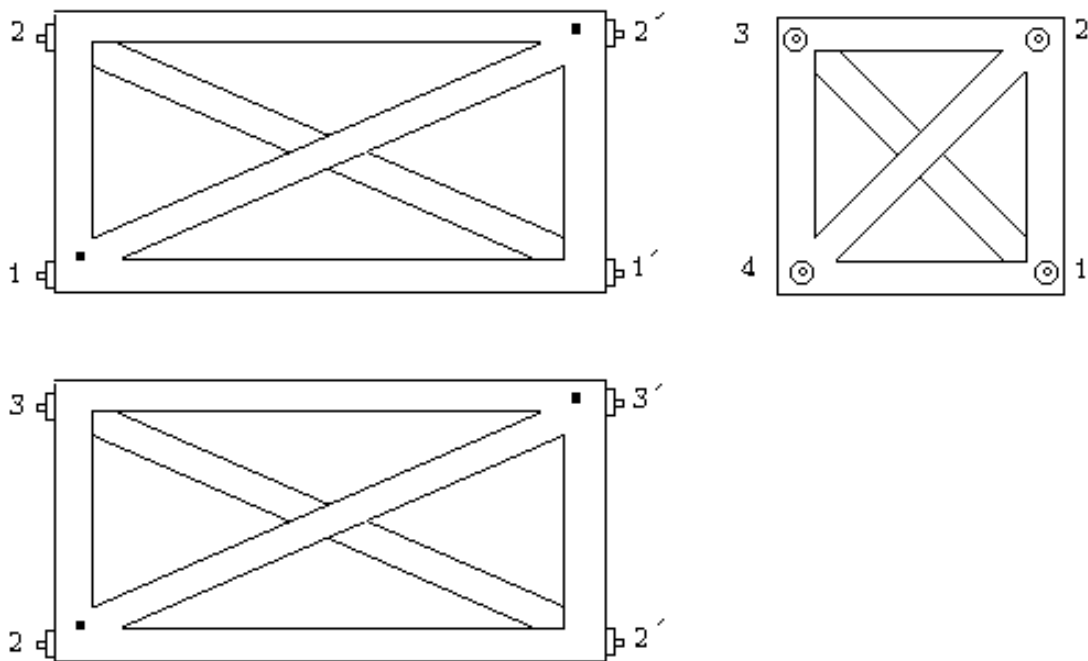


Рисунок 1 – Конструкция модельной фермы

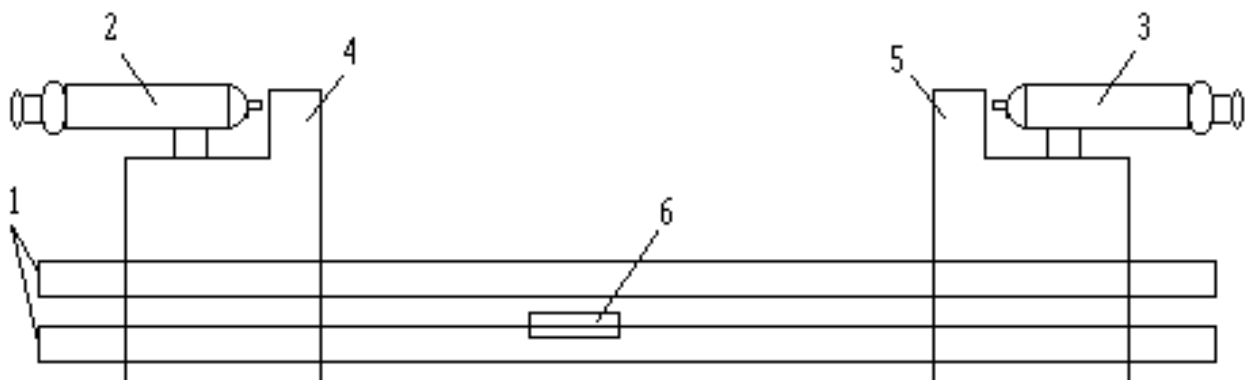


Рисунок 2 – Специальный микрометр:

1 – инваровые стержни; 2, 3 – микрометричные головки;  
4, 5 – ложементы; 6 – блок термопар



Он состоит из двух инваровых стержней 1, двух микрометрических головок 2 и 3, двух ложементов 4 и 5 и блока термодпар 6. Этот микрометр позволяет производить замер изменений линейных размеров стержней, имеющих размер 800 – 850 мм.

Для периодической поверки микрометр комплектуется двумя эталонами длиной 800 мм диаметром 20 мм и законцовками, аналогичными опорам, изображенными на рис. 2. Эталон 1 из инвара предназначен для поверки микрометра. Эталон 2 изготавливается из стали и предназначен для поверки измерительной системы в целом. Микрометр и эталоны хранятся в специальном футляре при стабильной температуре.

Измерения проводятся при температуре в помещении  $T=20\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ . Температура поддерживается автоматически системой электронагревателей и контролируется с помощью двух термодпар. Одна из них измеряет температуру воздуха в зоне измерений, другая – температуру микрометра. Для проведения замеров ферма устанавливалась в микрометр в соответствии с рис. 3.

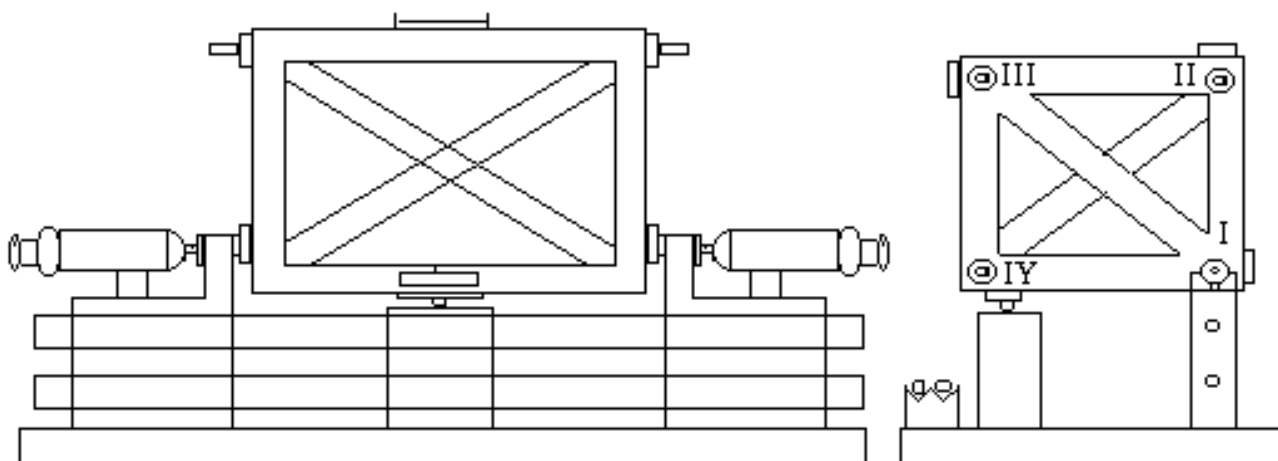


Рисунок 3 – Схема установки модельной фермы в специальный микрометр

В процессе исследований ферма подвергалась воздействию тепловых нагрузок – циклам нагрева от  $+20$  до  $+65^{\circ}\text{C}$ . После каждых 10 циклов нагрева ферма термостабилизировалась в течение суток при температуре  $T=20\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ , после чего проводились замеры.

Под угловыми деформациями фермы в данной методике понимаются изменения углов  $\varphi_m^{kj}$ , изображенных на рис. 4.

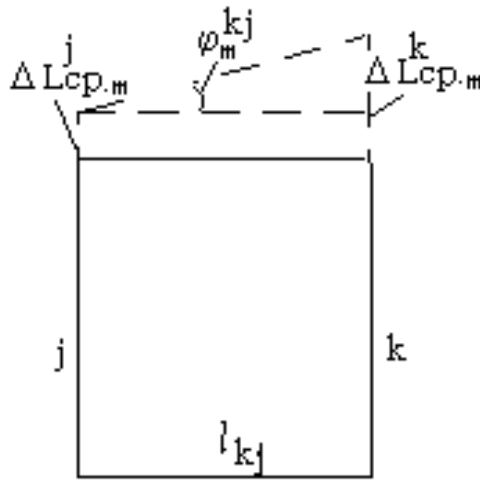


Рисунок 4 – Определение угловых деформаций фермы

Угловые деформации вычисляются по формуле

$$\varphi_m^{kj} = \frac{\Delta L_{cp.m}^k - \Delta L_{cp.m}^j}{l_{kj}} \cdot 3,439 \text{ (угл. мин)}, \quad (1)$$

где  $l_{kj}$  – расстояние, мм, между центрами опор труб с номерами  $k$  и  $j$ ;  $\Delta L_{cp.m}^j$  – среднее значение приращения длины  $j$ -го стержня на  $m$ -м этапе испытаний, измеренное в микрометрах.

Для исключения из рассмотрения факторов, связанных с линейным температурным расширением элементов фермы и измерительной системы, измерения проводились всегда при одной и той же температуре  $-20 \pm 0,1^\circ\text{C}$  на специально организованном измерительном участке.

Методика устанавливает правила и порядок проведения измерения изменений линейных размеров фермы, правила вычисления изменения угловых размеров, а также требования к рабочему месту и персоналу.

Разработанная методика удовлетворяет регламентируемым требованиям и позволяет измерить линейные изменения размеров фермы с точностью до 2 мкм и угловые деформации с точностью до двух угловых с.

Работоспособность методики была подтверждена при анализе изменений геометрических параметров фермы, произошедших после серии термоциклических нагружений.

### Тепловые испытания модельной фермы и их результаты

Проведены термоциклические испытания модельной фермы. Каждый цикл нагружений включал в себя нагрев фермы от температуры 20 до  $65^\circ\text{C}$ , выдержку в печи при температуре  $65^\circ\text{C}$  в течение 1 часа и последующее охлаждение до  $20^\circ\text{C}$ .

После проведения термоциклирования производились измерения изменений геометрических параметров модельной фермы в соответствии с разработанной методикой. Результаты измерений приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Результаты измерения изменений геометрических параметров модельной фермы после проведения первого этапа термоциклирования

Температура проведения испытаний	T, °C	T=20±0,1°C
Расстояние $l_{kj}$ между центрами опор труб с номерами $k$ и $j$ , мм	$l_{12}$	449
	$l_{23}$	450
	$l_{34}$	452
	$l_{14}$	449
Удлинение продольных стержней, мкм	$\Delta L_{cp}^1$	-3
	$\Delta L_{cp}^2$	-3
	$\Delta L_{cp}^3$	-3
	$\Delta L_{cp}^4$	-2,66
Угловые деформации фермы, угл. с	$\varphi^{12}$	0"
	$\varphi^{23}$	0"
	$\varphi^{34}$	0,15"
	$\varphi^{14}$	-0,15"

По результатам измерений вычисляются средние значения удлинений четырех стержней, КЛТР и угловых деформаций на одном этапе термоциклирования по формулам

$$\Delta L_{cp}^{\Sigma} = \frac{\Delta L_{cp}^1 + \Delta L_{cp}^2 + \Delta L_{cp}^3 + \Delta L_{cp}^4}{4}, \quad (2)$$

$$\alpha_{cp}^{\Sigma} = \frac{\Delta L_{cp}^{\Sigma} \cdot 10^{-6}}{L \cdot (T_2 - T_1)}, \quad (3)$$

$$\varphi_{cp}^{\Sigma} = \frac{\varphi_{12} + \varphi_{23} + \varphi_{34} + \varphi_{14}}{4}, \quad (4)$$

где  $L$  – длина продольных стержней;  $T_1$ ,  $T_2$  – начальная и конечная температура нагрева фермы.

Полученные расчетные значения средних суммарных КЛТР и средних суммарных угловых деформаций для 24-х этапов термоциклирования представлены в табл. 5, а также на графиках  $\alpha_{cp} = f(t)$  (рис. 5) и  $\varphi_{cp} = f(t)$  (рис. 6).

Таблица 5 – Средние суммарные КЛТР и угловые деформации для 24-х этапов термоциклирования

Этапы термоциклирования	$\alpha_{cp}$ , 1/°С	$\varphi_{cp}$ , угл. сек.	Этапы термоциклирования	$\alpha_{cp}$ , 1/°С	$\varphi_{cp}$ , угл. с
1	$-9,992 \cdot 10^{-8}$	0,1525	13	$-3,009 \cdot 10^{-7}$	-0,7275
2	$-1,487 \cdot 10^{-7}$	0,35	14	$-1,865 \cdot 10^{-7}$	-0,535
3	$-2,005 \cdot 10^{-8}$	-0,195	15	$-1,132 \cdot 10^{-7}$	-0,345
4	$-1,232 \cdot 10^{-7}$	-0,6125	16	$1,112 \cdot 10^{-8}$	-0,27
5	$-1,310 \cdot 10^{-7}$	-0,765	17	$4,103 \cdot 10^{-8}$	-0,23
6	$-2,005 \cdot 10^{-8}$	-2,4475	18	$2,665 \cdot 10^{-8}$	-0,28
7	$-8,766 \cdot 10^{-8}$	-0,345	19	$1,885 \cdot 10^{-8}$	-0,42
8	$-1,365 \cdot 10^{-7}$	-3,61	20	0	-0,9175
9	$-1,310 \cdot 10^{-7}$	-2,5825	21	$3,297 \cdot 10^{-7}$	-0,265
10	$-8,766 \cdot 10^{-8}$	-1,1625	22	$5,595 \cdot 10^{-7}$	-0,065
11	$-5,548 \cdot 10^{-8}$	-0,9175	23	$1,888 \cdot 10^{-7}$	-1,985
12	$-9,992 \cdot 10^{-8}$	-0,155	24	$1,531 \cdot 10^{-7}$	-1,525

Аппроксимация экспериментальных данных позволила получить зависимости КЛТР стержней и угловых деформаций фермы от длительности термоциклирования в виде

$$\alpha_{cp} = 1 \cdot 10^{-7} \cdot \ln(t) - 2 \cdot 10^{-7}, \quad (5)$$

$$\varphi_{cp} = -1,4 \cdot 10^{-3} \cdot t - 0,81. \quad (6)$$

Анализ зависимости КЛТР стержней фермы от длительности термоциклирования показывает, что с увеличением количества термоциклов растет и абсолютная величина термических деформаций, то есть происходит термостабилизация, причем начиная примерно с 10...12 этапа термоциклирования изменение закона термического деформирования становится незначительным. Это показывает необходимость введения в процесс изготовления элементов размеростабильных конструкций такого технологического процесса, как предварительное термоциклирование. Угловые деформации фермы от длительности термоциклирования практически не зависят и остаются постоянными на уровне – 0,8 угл.с в течение всего периода термического нагружения.

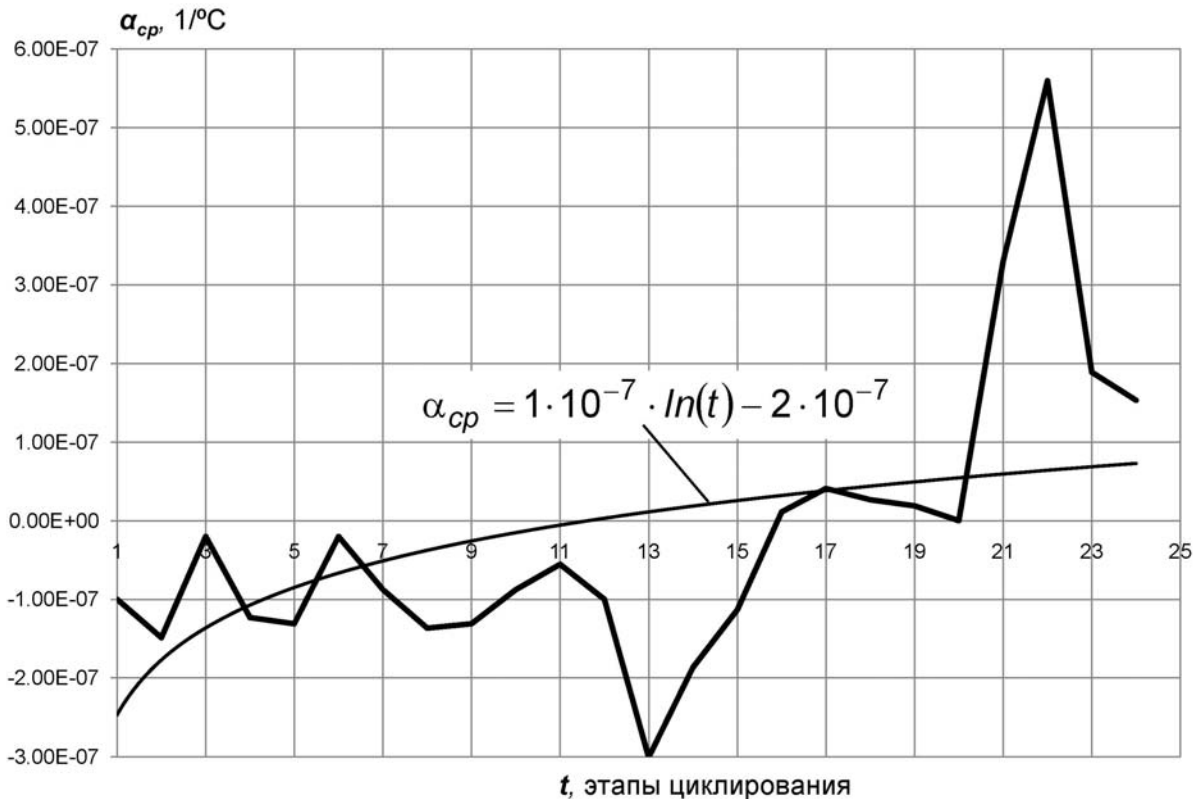


Рисунок 5 – Зависимость КЛТР стержней фермы от длительности термоциклирования

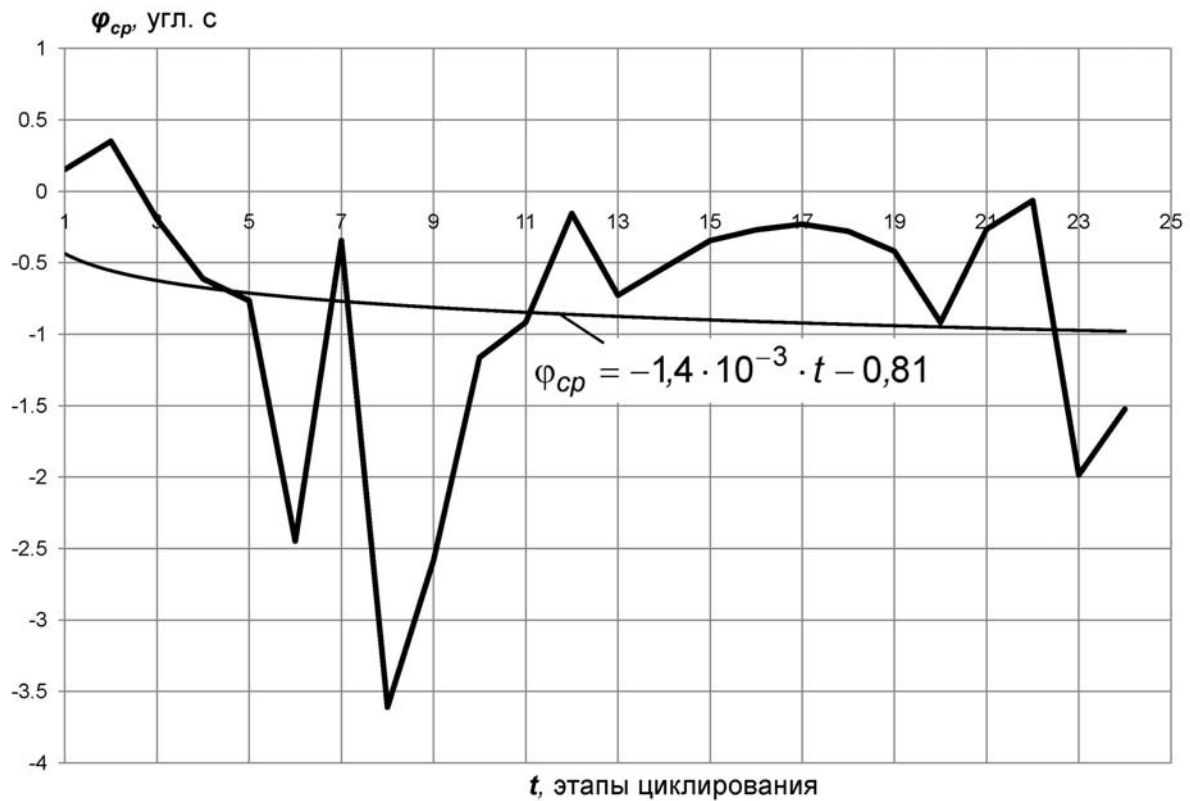


Рисунок 6 – Зависимость угловых деформаций фермы от длительности термоциклирования

Результаты исследований термических деформаций практически всех основных классов арматуры и однонаправленных углеродных композиционных материалов (УКМ) на их основе показывают, что эти материалы обладают существенно низким уровнем термических деформаций по сравнению с традиционно применяемыми материалами [6 – 8].

Существенная анизотропия упругих и теплофизических характеристик однонаправленных УКМ позволяет создавать многонаправленные структуры с прогнозируемыми в любом направлении свойствами [9]. Это иллюстрирует широкие перспективы применения УКМ в размеростабильных конструкциях и возможности управления законом их термического деформирования при наложении ограничений на прочность и жесткость.

### **Выводы**

1. При использовании углепластика в качестве конструкционного материала можно снизить массу фермы в 1,7...2,8 раза по сравнению с изготовленной из алюминиевого сплава.

2. Испытания на тепловую деформацию показывают, что линейные и угловые деформации фермы в  $\sim 7$  раз меньше, чем аналогичной, изготовленной из алюминиевого сплава АМг6.

3. Доля углепластика для большинства ферм составляет 47...64%, что свидетельствует о наличии резервов дальнейшего совершенствования ферм по массе и термостабильности.

4. В ДНУ и ГKB «Южное» совместно разработаны методика и испытательное оборудование, позволяющие с высокой точностью определять КЛТР углепластиковых стержней (точность определения -  $\sim 1 \cdot 10^{-8} 1/^\circ\text{C}$ ). Методика основана на голографической интерферометрии и на порядок точнее традиционных, использующих в качестве измерительного средства микроскоп.

5. В ВНУ и ГKB «Южное» совместно разработана оптимальная схема армирования трубчатых стержней, позволяющая на порядок снизить их КЛТР и довести его до уровня лучших марок инварных сплавов.

6. Для определения степени деформации углепластиковых ферменных конструкций с течением времени при воздействии предельных температур изготовлена модельная ферма и проведены ее ресурсные испытания, на которых она подвергалась воздействию 15 циклов теплового нагружения по схеме  $20^\circ\text{C} \rightarrow 65^\circ\text{C} \rightarrow 20^\circ\text{C}$ , в результате которых получены зависимости КЛТР стержней и угловых деформаций фермы от длительности термоциклирования.

7. Установлено, что с увеличением количества термоциклов происходит термостабилизация. Это показывает необходимость

введения в процесс изготовления элементов размеростабильных конструкций предварительного термоциклирования.

8. Показано, что угловые деформации фермы практически не зависят от длительности термоциклирования и остаются постоянными в течение всего периода термического нагружения.

#### **Список использованных источников**

1. Гаврюсев В.И. Размерная стабильность материалов и элементов конструкций: обзор. / В.И. Гаврюсев. – Л.: ЦНИИ «Румб», 1990. – 112 с.

2. Вышванюк В.И. Тепловое расширение гибридных однонаправленных композитных материалов с малым температурным коэффициентом линейного расширения / В.И. Вышванюк, В.Т. Алымов // Механика композитных материалов. – 1985. – № 2. – С. 357 – 360.

3. Плуме Э.З. Термическое деформирование композита, армированного гибридными ткаными лентами / Э.З. Плуме, В.М. Пономарев // Механика композитных материалов. – 1988. – №3. – С.392 – 401.

4. Кирулис Б.А. Методика проектирования оптимальной структуры несущих стержней из углепластика с учетом термического расширения / Б.А. Кирулис // Механика композитных материалов. – 1982. – С. 61 – 67.

5. Оптимизация технологии формообразования намоткой размеростабильных трубчатых элементов / И.В. Малков, Ю.М. Тарасов, В.Н. Рыбаков, В.И. Воскобойников // «Теория и практика технологии производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов»: тр. 5-й Московской Междунар. конф., 24 – 27 апреля 2007 г., МГУ – М.: SAMPE-Европа, НИАТ. – С. 403 – 408.

6. Кочетков В.А. Термическое деформирование однонаправлено армированных гибридных композитов. Сообщение 1 / В.А. Кочетков, Р.Д. Максимов // Механика композитных материалов. – 1989. – № 2. – С. 229 – 236.

7. Углеродные волокна и углекомпози́ты / под. ред. Э. Фитцера. – М.: Химия, 1988. – 336 с.

8. Термическое деформирование композитов для размеростабильных конструкций / А.В. Суханов, В.А. Лапоткин, В.Я. Артемчук, Л.А. Соболев // Механика композитных материалов. – 1990. – № 4. – С. 599 – 604.

9. Гурвич М.Р. Влияние схемы армирования на прочность многонаправленных углепластиков при одноосном нагружении / М.Р. Гурвич, А.В. Суханов // Механика композитных материалов. – 1989. – № 2. – С.346 – 348.

*Поступила в редакцию 7.04.2011.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Е. Гайдачук,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*