

УДК 729.68

В. Є. Шатіхін<sup>1</sup>, Л. П. Семенов<sup>1</sup>,  
Ю. Г. Артеменко<sup>2</sup>, С. Р. Ігнатович<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Національне космічне агентство України, Київ

<sup>2</sup>Державне конструкторське бюро «Південне», Дніпропетровськ

<sup>3</sup>Національний авіаційний університет — Аерокосмічний інститут, Київ

## Вплив вуглепластикових фермових конструкцій сонячних батарей на динамічні характеристики механізму їхнього приводу

Надійшла до редакції 06.09.04

Розглянуто вплив фермових конструкцій з вуглепластику, що призначені для розміщення блоків з фотоперетворювачами, на динамічні характеристики механізму приводу сонячних батарей космічного апарата. Проведено аналіз власних частот коливань фермових конструкцій сонячних батарей та динамічних характеристик механізму їх приводу для конструкцій з вуглепластику і алюмінієвого сплаву АМг-6. Обґрунтовано переваги виготовлення фермових конструкцій каркасів з вуглепластику методом намотування стосовно досягнення більшої жорсткості конструкції.

Розвиток сучасних космічних апаратів дистанційного зондування Землі (КА ДЗЗ) передбачає досягнення роздільної здатності бортової апаратури спостереження в 1 м та краще. Такі результати отримано не тільки за рахунок використання якісної оптичної апаратури, але і завдяки зменшенню збурень КА, що викликані дією зовнішніх сил на КА, пружними властивостями конструкції КА та її елементами, а також зменшенням віброактивності механізмів забезпечуючого та спеціального комплексів.

Актуальність цієї статті полягає в аналізі фермових конструкцій (ФК), що призначені для розміщення блоків фотоперетворювачів сонячних батарей (СБ), та виготовлених з алюмінієвого сплаву і вуглепластику з урахуванням технології створення останніх щодо їх впливу на динамічні характеристики механізму приводу сонячних батарей (МПСБ) та визначення перспектив подальшого розвитку ФК СБ з вуглепластику.

Аналіз динамічних характеристик просторової стержневої конструкції КА викладено в роботі [15]. Динамічні характеристики стержневої виносної ФК СБ та їхній зв'язок із динамічними характеристиками МПСБ раніше не розглядалися. Вибір для

дослідження МПСБ зумовлений тим, що це є один з найбільш віброактивних джерел КА ДЗЗ [18].

Врахування пружних властивостей конструкції СБ необхідне для точного розрахунку динамічних характеристик МПСБ та прогнозування їх протягом терміну активного існування КА. Це особливо важливо при терміні активного існування КА 10—15 років.

Основні способи напрямків вдосконалення конструкції КА для реалізації досягнення високої роздільної здатності та довготривалого терміну активного існування такі:

1) зменшення амплітуди власних та вимушених коливань конструкції КА за рахунок підвищення жорсткості несучих і обертових елементів конструкції з одночасним збереженням або зменшенням маси конструкції;

2) зменшення теплової деформації конструкції КА завдяки застосуванню термостабільних та ізотермічних конструкцій.

Основним несучим елементом негерметичних КА є фермові та рамні конструкції, що функціонують у широкому діапазоні силових та температурних навантажень і призначені для розміщення приладів

спеціального комплексу, антенно-фідерних пристроїв, двигунних установок, блоків з фотоперетворювачами тощо. До цих конструкцій ставляться високі вимоги щодо високої стабільної міцності та жорсткості при мінімальній масі та стабільному коефіцієнту лінійного термічного розширення (КЛТР).

Реалізація цієї та інших основних вимог до вдосконалення конструкції КА для досягнення високої роздільної здатності неможлива без широкого застосування нових конструкційних матеріалів, в першу чергу композиційних матеріалів на основі полімерних матриць. Великий спектр волокнистих армуючих матеріалів (скло-, органо-, базальто-, вуглецеві волокна та ін.) дозволяє створювати конструкції з унікальним сполученням властивостей. При цьому вдасться задовольнити низку суперечливих вимог, чого не можна досягти для «традиційних» матеріалів. Найперспективнішими є композиційні матеріали на основі вуглецевих волокон, які за основними фізико-механічними (термостабільність, жорсткість, питома вага) суттєво перевищують алюмінієві сплави (табл. 1).

Таблиця 1. Фізико-механічні характеристики вуглепластика та сплаву АМг-6 (коефіцієнт лінійного термічного розширення, модуль пружності на стиск, густина)

Матеріали	КЛТР, $10^{-7}$ 1/К	$E_{ст}$ , г/мм <sup>2</sup>	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>
Сплав алюмінієвий АМг6	240	7.2	2.64
Вуглепластик (однонаправлений)	0.2	14–20	1.5

Одночасно необхідно відмітити, що створення конструкцій КА з композиційних матеріалів є досить трудомістким процесом, що потребує обґрунтованого вибору матеріалу та матриці, проектування та виготовлення складного технологічного оснащення, використання унікального обладнання, високопрофесійного відпрацювання технології виробництва, а також проведення комплексу досліджень виготовленої конструкції.

Нижче буде подано аналіз коливань ФК СБ, виготовлених з алюмінієвого сплаву та вуглепластику із застосуванням методу автоматизованого намотування.

Розглянемо рівняння руху КА з урахуванням збурюючого моменту, що створює ПСБ, функціонуючи за режимом сеансного (дискретного) стеження за Сонцем. При цьому вважатимемо, що:

- зовнішні сили та сили управління КА не діють;
- вісь обертання колінеарна з однією з осей зв'язаної системи координат;
- моменти, що діють внаслідок наявності перехресних зв'язків між віссю обертання СБ та іншими осями зв'язаної системи координат, мізерні.

Це дозволяє розглядати кутовий рух механічної системи МПСБ + СБ тільки навколо осі обертання СБ, в даному випадку — осі  $x$ . Розглядаються максимальні кутові переміщення, що зумовлені роботою МПСБ без компенсуючого маховика та запобіжної муфти:

$$(J_{КА} + J_{СБ}) \frac{d^2\Psi}{dt^2} = J_{СБ} \frac{d^2\gamma}{dt^2}, \quad (1)$$

$$J_{СБ} \frac{d^2\gamma}{dt^2} = C_{П\delta} + M_{Т СБ} + M_{ПР}, \quad (2)$$

де  $J_{КА}$  — момент інерції КА без урахування моменту інерції СБ,  $J_{СБ}$  — момент інерції СБ,  $\Psi$  — кут повороту КА відносно осі  $x$ ,  $\gamma$  — кут повороту СБ відносно корпусу КА,  $\delta$  — кут повороту вихідного валу редуктора з урахуванням кінематичних похибок та мертвого ходу зубчатих передач,  $C_{П}$  — сумарна жорсткість кінематичної передачі, що приведена до осі обертання СБ,  $M_{Т СБ}$  — момент сил тертя на осі обертання СБ,  $M_{ПР}$  — момент сил пружності СБ.

У більшості випадків динаміка просторової стержневої конструкції описується такою системою диференціальних рівнянь [4]:

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = F, \quad (3)$$

де  $M$  — матриця мас конструкції,  $C$  — матриця демпфування,  $K$  — матриця жорсткості елементів конструкції,  $F$  — вектор узагальнених сил, що діють на конструкцію,  $q$  — вектор узагальнених переміщень конструкції.

Алгоритм розв'язування зазначеного рівняння реалізується за допомогою кінцевоелементної схеми моделювання, і ця схема може застосовуватись до конструкцій будь-якої складності [4].

Питання про моделювання виносних, у тому числі стержневих конструкцій, розглядалось в багатьох роботах [4, 14]. В статті розглядаються коливання ФК СБ у вигляді моделі центральної силової балки.

Модель конструкції СБ у вигляді центральної силової балки є спрощеною у порівнянні з реальною ФК СБ, але може бути достатньою для попереднього аналізу порівняльних динамічних харак-

теристик конструкцій СБ з вуглепластику, а головне — для аналізу їхнього впливу на динамічні характеристики МПСБ.

Зокрема, варіант моделі центральної силової балки розглядався як один з можливих при проектуванні КА «Океан-О» і показав задовільні результати як щодо характеристик жорсткості конструкції СБ, так і щодо запобігання збігу власних частот системи управління та силової балки.

Були вибрані ФК СБ з АМг-6 та вуглепластику у вигляді просторової силової конструкції. Діаметри більшої частини фітингів становлять 2.5 см.

При розгляді коливань, що зумовлені СБ, вважаємо КА жорстким тілом, до якого закріплено стержень. Для спрощення вважаємо, що КА має форму циліндра, напрямленого вздовж осі  $y$ , стержень — однорідний, ізотропний, має сталу товщину, направлений вздовж осі  $x$ .

Власні коливання балки описуються рівнянням [2]

$$\mu \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( P \frac{\partial y}{\partial x} \right) - f + \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} \left( J_0 \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} \right) = 0, \quad (4)$$

де  $x$  — координати точок балки вздовж осі  $x$ ,  $y$  — відхилення точок балки від осі  $x$ ,  $f$  — розподілене поперечне навантаження, появу якого спричиняють зовнішні сили, що діють на КА та сили внутрішньої взаємодії,  $\mu$  — маса одиниці довжини балки,  $E$  — модуль пружності матеріалу балки,  $J$  — момент інерції поперечного перерізу відносно нейтральної осі перерізу, перпендикулярної до площини коливань,  $J_0$  — момент інерції одиниці довжини балки відносно центральної осі, перпендикулярної до площини коливань,  $P$  — поздовжня сила, що спрямована вздовж балки.

Довжина балки значно більша від її товщини, тому останнім членом у лівій частині рівняння (4) знехтуємо. Крім того, знехтуємо також поздовжньою силою.

Після спрощення рівняння (4) набуде вигляду

$$\mu(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) = 0. \quad (5)$$

Момент  $M_{\text{пр}}$  у випадку балкової моделі СБ у цьому випадку визначається за формулою [4]

$$M_{\text{пр}} = \left[ \mu(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) \right] \times \int_0^l (r+x) dx, \quad (6)$$

де  $r$  — відстань від центра осі КА до початку балки, тобто  $l = x + r$ .

Як видно з рівняння (4), збільшення жорсткості конструкції каркасу забезпечує зменшення коливань СБ. Розв'язки цього рівняння дадуть змогу визначити та порівняти параметри власних коливань із застосуванням вуглепластику та сплаву АМг-6. У табл. 2 наведено порівняльні характеристики фізико-механічних властивостей застосованого вуглепластику та сплаву АМг-6.

Таблиця 2. Фізико-механічні та геометричні характеристики моделей з вуглепластику та сплаву АМг-6

Матеріал	$E_{\text{розт}}$ $10^5 \text{ кг/см}^2$	$\mu$ , кг	Довжина балки, см	Товщина стінок балки, см	Діаметр балки, см
Сплав АМг-6	6.8	0.0335	910	0.2	10
Вуглепластик	9.5	0.01724	910	0.2	10

Рівняння (5) запишемо у вигляді

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + c^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0, \quad (7)$$

де

$$c = \sqrt{\frac{EJ}{\mu}}. \quad (8)$$

Розглядається жорстке закріплення центральної балки до корпусу КА, тобто

$$y = 0, \quad \frac{\partial y}{\partial x} = 0.$$

Вирішення таких рівнянь детально описується у роботі [1], тому далі розглянемо лише основні викладки.

Функція  $\varphi(x)$  встановлює закон розподілу амплітудних відхилень точок осі балки від рівноважного положення і є формою головного коливання. Кожній власній формі відповідає власна частота  $p$ .

Після перетворень рівняння (7) має вигляд

$$EJ\varphi^{IV}(x) - p^2\mu\varphi(x) = 0, \quad (9)$$

або

$$\varphi^{IV}(x) - k^4\varphi(x) = 0, \quad (10)$$

де

$$k^4 = \frac{\mu p^2}{EJ}. \quad (11)$$



Рівняння (11) має чотири незалежних розв'язки

$$\cos kx, \sin kx, \operatorname{ch} kx, \operatorname{sh} kx. \quad (12)$$

Його загальний інтеграл

$$\varphi(x) = A \cos kx + B \sin kx + C \operatorname{ch} kx + D \operatorname{sh} kx \quad (13)$$

містить чотири довільні сталі  $A, B, C, D$ , які мають задовольняти крайові умови, тобто умови закріплення кінців балки. Власні частоти коливань  $p$  отримуємо за формулою

$$p_i = \frac{(k_i l)^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\mu}}, \quad (14)$$

де  $l$  — довжина балки,  $i$  — номер частоти коливання.

Амплітуду коливань визначаємо з рівняння

$$\varphi_i(x) = C \left[ U(k_i x) - \frac{V(k_i l)}{S(k_i l)} V(k_i x) \right], \quad (15)$$

де  $V, S, U$  — функції Кривола.

Для балки, виготовленої з алюмінієвого сплаву АМг-6, з рівняння (15) отримано частоту власних коливань  $p = 0.288$  Гц (перша гармоніка) та максимальну амплітуду коливань (лінійне переміщення)  $\varphi = 1.147$  см; а для балки, виготовленої з вуглепластику, —  $p = 0.403$  Гц і  $\mu = 0.986$  см відповідно.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування вуглепластику в конструкціях, виготовлених методом автоматизованого намотування.

Знаючи характеристики коливань ФК СБ, а також геометричні, масові та швидкісні характеристики елементів МПСБ, можна визначити характеристики кількісного впливу ФК СБ на величину збурюючого моменту МПСБ.

Вважаємо за доцільне стисло нагадати концептуальні основи методу автоматизованого намотування та основні результати експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей ФК (детально див. [6—8, 10—12]).

Метод намотування, який існує майже 60 років, постійно розвивається та надає виробнику нові потенційні можливості. Сьогодні вирішуються питання про намотування конструкцій складніших форм, значного розширення застосування технології намотки при створенні принципово нового технологічного обладнання та виробів з новими структурами армування.

В основі концепції створення ФК автоматизованим намотуванням покладено принцип одночасного підвищення функціональної гнучкості при збереженні точності та стабільності технологічного процесу виготовлення, функціональної надійності ФК із скороченням часу на виготовлення та контроль.

При цьому основний упор зроблено на особливості функціонального призначення ФК КА, що полягають у забезпеченні фізико-механічних (схема навантаження) та теплофізичних (КЛТР) характеристик при збереженні ряду геометричних обмежень (габарити, форма).

Оцінка переваг та недоліків існуючих ферм з урахуванням зміни умов їхньої роботи дозволяє розробити функціональні схеми ФК КА (фітингові, безфітингові), а потім на їхній основі — конструктивно-технологічні (збиральні, модульні, інтегральні тощо).

Результати досліджень показали, що виготовлені методом автоматизованого намотування стержні мають більш стабільний КЛТР в межах однієї партії (не більш 13 відсотків) у порівнянні з викладочним варіантом (35 відсотків).

Реалізація технології автоматизованого намотування у виготовленні багатопроблемних фітингів (БПФ) передбачає два методи формоутворення намотуванням композитних структур БПФ: диференційний та інтегральний (детально див. [8]). В основі диференційного методу покладено принцип декомпозиції конструкції БПФ на окремі елементи-проблеми з наступним синтезом композитних структур методом намотування. Інтегральний метод виготовлення БПФ базується на принципі перепрофілювання сформованих шарів з інтегральної форми на початкову форму оправки.

На основі диференційного та інтегрального методів формування композитних структур розроблено принципово нове технологічне обладнання для виготовлення БПФ.

Незалежно від методу виготовлення фітинги конструктивно виконуються із внутрішньою поверхнею сполучення зі стержнями. Передача зусиль від стержнів до промсів фітингів забезпечується клейовим з'єднанням, а жорсткість вузла — структурою матеріалів.

Порівняльний аналіз залежностей величин вигину променя фітингу із склопластику (СП) та вуглепластику від схем армування для різних рівнів навантаження відповідно до досліджень роботи [12] показав, що базовий фітинг з вуглепластику перевищує базовий СП-фітинг за жорсткістю на 14%. Удосконалені фітинги з вуглепластику з локально підсиленнями схемами армування перевищують жорсткість СП-фітингів в 2.25 рази. Крім того, фітинги з вуглепластику на 8...18% легші від СП-фітингів.

Одним з напрямків підвищення жорсткості ФК з конструкційних матеріалів є створення безфітингової конструкції інтегральної схеми. В її основу покладено принцип декомпозиції та поетапного

Таблиця 3. Кут повороту стержня  $\gamma$  по його довжині  $L$  при тепловому випробуванні ферми з алюмінієвого сплаву та вуглепластику

L, мм	$\gamma$	
	Алюмінієвий сплав	Вуглепластик
50	40°	5°
250	0	15
500	40	20
750	80	15
1000	95	10
1250	110	9
1500	110	9

формування структури стінок силових елементів. Характеристика ФК залежить від схеми її поділу на модулі. Поділ на модулі здійснюється в залежності від виду навантаження ФК. Модуль є фрагментом ферми, до складу якого входять кілька стержнів-заготовок з не остаточно сформованими стінками та з'єднаними між собою в єдине ціле під час процесу суміщеного формування. При цьому в залежності від вибраної схеми поділу ФК на модулі схеми армування стержней-заготовок будуть різними і залежатимуть від місця розміщення у фермі.

Експериментальні дослідження теплофізичних характеристик безфітингових ферм методом голографічної інтерферометрії підтвердили теоретичні висновки щодо більшої жорсткості вуглепластикової ферми, виготовленої методом намотування (табл. 3). Випробування було здійснено на стержнях, що входять до складу ФК [12].

Згідно з цими результатами кут повороту стержня у вуглепластиковій фермі значно менший від кута повороту аналогічного стержня в алюмінієвій фермі.

Це доводить безсумнівну перевагу ФК інтегрального типу, створених методом намотування.

## ВИСНОВКИ

1. Моделювання коливань даної ФК СБ у вигляді центральної балки показало зменшення амплітуди лінійних переміщень ФК СБ з вуглепластику у порівнянні з ФК СБ, виготовлених з АМг-6, що має наслідок зменшення збурюючого моменту, зумовленого функціонуванням МПСБ.

2. Застосування вуглепластику для даної ФК СБ привело до збільшення нижньої частоти коливань ФК СБ приблизно на 20 %, що важливо для запобігання збігу власних частот системи управління КА та силової балки.

3. Експериментальні випробування на стержнях з вуглепластику, виготовлених методом намотування, що входять до складу ФК, показали зменшення кутових переміщень у порівнянні із стержнями, виготовленими з алюмінієвих сплавів, у кілька разів.

Фітинги з вуглепластику, виготовлені методом намотування, мають жорсткість більшу, ніж фітинги із склопластику, на 14—225 % у залежності від схеми армування.

4. Вимагають подальшого продовження роботи з автоматизованого намотування елементів ФК КА, а також розробка та створення нового обладнання для формоутворення складнопрофільних конструктивних елементів при дослідному та серійному виробництві ФК КА нового покоління.

5. Застосування ФК СБ з вуглепластику є доцільним для розробки та створення для КА з довготривалим терміном активного існування.

6. Потребують подальшого продовження роботи з дослідження фізико-механічних характеристик конструкцій з вуглепластику з імітацією умов факторів космічного простору для прогнозування динамічних характеристик МПСБ КА з довготривалим терміном активного існування.

1. Ананьев И. В. Справочник по расчету собственных колебаний упругих систем. — М.: Гостехиздат, 1946.—354 с.
2. Бабаков И. М. Теория колебаний. — М.: Наука, 1965.—556 с.
3. Волошин В. І., Драновський В. Й., Бушуев Е. І. Стан, перспективи та проблеми ринку послуг дистанційного зондування Землі з космосу // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 41—51.
4. Згуровский М. З., Бидюк П. И. Анализ и управление большими космическими конструкциями. — К.: Наук. думка, 1997.—450 с.
5. Корневский Д. Г. Устойчивость динамических систем при случайных возмущениях параметров. — К.: Наук. думка, 1989.—208 с.
6. Малков И. В. Классификация стержневых элементов из композиционных материалов // Вісн. Східноукр. держ. ун-ту.—1999.—№ 6.—С. 75—78.
7. Малков И. В. К выбору критериев эффективности ферменных конструкций из композиционных материалов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Гос. аэрокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».—1999.—Вып. 17(4).—С. 60—67.
8. Малков И. В. Моделирование технологического процесса формообразования многолучевых фитингов намоткой // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту.—2000.—№ 8(30).—С. 81—85.
9. Разыграев А. П. Основы управления полетом космических аппаратов и кораблей. — М.: Машиностроение, 1977.—472 с.
10. Рач В. А., Малков И. В. Классификация многолучевых фитингов ферменных конструкций из композиционных материалов // Вестник Восточноукр. гос. ун-та. Сер. Машиностроение.—1996.—С. 168—172.
11. Рач В. А., Малков И. В. Концепция создания ферменных

- конструкцій космічних апаратів із композиційних матеріалів // Вісник Східноукр. держ. ун-ту.—1997.— № 2(6).—С. 138—142.
12. Ситало В. Г., Артеменко Ю. Г., Рач В. А. и др. Размеростабильные элементы ферменных конструкций // Технологические системы.—2004.—3 (23).—С. 5—12.
  13. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. — М.: Наука, 1967.—444 с.
  14. Труды VI Международного симпозиума ИФАК по автоматическому управлению в пространстве: В 2 т. — М.: Наука, 1974.—760 с.
  15. Трякин В. П., Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Матюхин Ю. И. Оценка резонансных режимов космического аппарата // Космічна наука та технологія.—2004.—9, № 4.—С. 40—44.
  16. Черноусько Ф. И., Акуленко Л. Д., Соколов Б. Н. Управление колебаниями. — М.: Наука, 1984.—384 с.
  17. Gladilin V. S., Sitalo V. G., Artemenko Y. G., et al. Manufacturing of carbon fiber reinforced plastic elements of spacecraft truss structures by winding // Proc. of fourth Ukraine-Russia-China symposium on space science and technology, Ukraine, September 12-17, 1996. — Kiev, 1996.—Vol. II.—P. 552—554.
  18. Shlomi Arnon, Kopeika N. S. Laser satellite communications network — vibration effect and possible solutions // Proc. IEEE.—1997.—85, N 10.—P. 1646—1661.

---

**THE EFFECT OF CARBON PLASTIC TRUSS STRUCTURES OF SOLAR ARRAYS ON DYNAMICAL CHARACTERISTICS OF THEIR DRIVE MECHANISM**

*V. Ye. Shatikhin, L. P. Semenov, Yu. H. Artemenko, S. R. Ihnatovych*

We consider the effect of carbon plastic truss structures on dynamical characteristics of drive mechanism of space vehicle solar arrays. An analysis is made for frequencies of own oscillations of the truss structures of solar arrays and for dynamical characteristics of their drive mechanism for the case of structures from the carbon and plastic as well as from the aluminium alloy AMh-6. We substantiate the advantages of the manufacturing of truss structures of frameworks from the carbon and plastic by the winding method in respect of deriving a higher rigidity of a structure.