

## МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЛЕГЧЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ.

Гайдачук А.В., Кириченко В.В., Литвин Н.В., Сидоренкова М.А.,

Синюков В.П., Сливинский В.И.

Снижение массы космических аппаратов, их функциональных систем и объектов, используемых на орбитах, определяющим образом связано с их дальнейшим совершенствованием, повышением эффективности и снижением прямых и косвенных затрат.

В связи с этим решаемые в настоящем исследовании задачи оптимизации массы конструкций секций солнечных батарей (ССБ) космического корабля с учетом технологических ограничений представляются актуальными и направлены на разработку простых, но эффективных методов и методик, реализующих на ранних этапах проектирования этих объектов потенциальные материаловедческие, технологические и экономические возможности (ресурсы) предприятий Украины и СНГ в авиационно-космической отрасли.

Ставится задача *разработать методы и реализующие их методики, обеспечивающие определение минимальной массы ССБ при заданных расчетных перегрузках изделия и регламентированных технологических (эксплуатационных) ограничениях.*

*Исходными данными являются:*

- равномерно распределенная инерционная нагрузка от массы ССБ и присоединенных к ней фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), возникающая от коэффициента перегрузки  $n_z$  при коэффициенте безопасности  $f$  (ось  $Z$  направлена перпендикулярно к плоскости срединной поверхности ССБ;
- перегрузка по оси  $X$   $n_x$ ;
- габаритные размеры:  $a$ ,  $b$  (размер  $a$  направлен по координатной оси  $X$ ,  $b$  - по координатной оси  $Y$ );
- закрепление ССБ в четырех симметрично расположенных относительно ее осей симметрии точках с координатами  $(\pm a_1/2, \pm b_1/2)$ .
- максимальный прогиб срединной поверхности регламентирован нефиксированной величиной  $[W]$ ;



- ССБ является трехслойной пластиной с симметрично расположенными относительно срединной поверхности несущими слоями и легким заполнителем;

- в качестве несущих слоев ССБ используется углепластик на основе углеродных волокон и полимерного связующего, физико-механические характеристики которых подлежат определению (не заданы);

- в качестве сотового заполнителя (СЗ) применяются металлические соты;

*Выходными параметрами являются:*

- характеристики материала несущих слоев и заполнителя в объеме, необходимом для его проектирования и технологической реализации (исходное сырье или полуфабрикаты, компоненты, схема армирования, материал СЗ, размеры, ячеек сот, их ориентация, технология получения полуфабрикатов и изделия;
- толщины несущих слоев и заполнителя;
- координаты точек крепления ССБ;
- погонная масса ССБ.

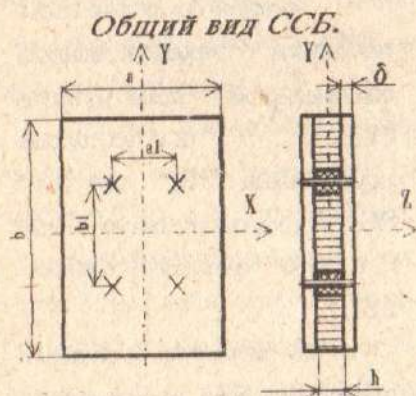
На основе проведенного теоретического анализа и анализа НДС ССБ методом конечных элементов (МКЭ), реализованного программным пакетом "COSMOS/M", поиск математической модели для разработки методики проектирования ССБ был сконцентрирован на рассмотрении пластин, подверженных цилиндрическому изгибу.

Принятие этой математической модели позволило:

- Определить в аналитическом виде координаты оптимального размещения опор и оптимальное соотношение модулей

упругости  $E_x/E_y$  несущих слоев из условия равенства центрального и углового прогибов ССБ.

Показать, что для ССБ рациональной является ортогональная система укладки монослоев и вычислить, в соответствии с теорией армирования



*Рис 1.*



[1], соответствующие суммарные толщины монослоев, ориентированных по осям X и Y при заданной общей толщине несущего слоя ССБ.

- Используя ограничение максимального прогиба ССБ величиной  $[W]$  и требование устойчивости несущего слоя при сжатии в пределах сотовой ячейки, получить в аналитическом виде минимальную толщину сотового заполнителя при заданной суммарной толщине несущего слоя.

- Из условия минимальности толщины заполнителя определить оптимальную ориентацию ячеек сотового заполнителя.

Отмеченное выше позволило представить многопараметрическую целевую функцию поверхностной массы ССБ в виде сложной зависимости от единственного аргумента - толщины несущего слоя.

*Вычисление значения целевой функции осуществляется в три основных этапа:*

1. Вычисление минимальной толщины заполнителя  $h_c$  из условия устойчивости несущего слоя в пределах ячейки СЗ.
2. Определение минимальной толщины заполнителя  $h_w$  из условия ограничения максимального прогиба ССБ.
3. Выбор толщины СЗ и вычисление целевой функции.

Для одномерной минимизации полученной целевой функции использован метод "золотого сечения" [2], обеспечивающий высокую скорость сходимости при

минимальном количестве вычисления ее значений.

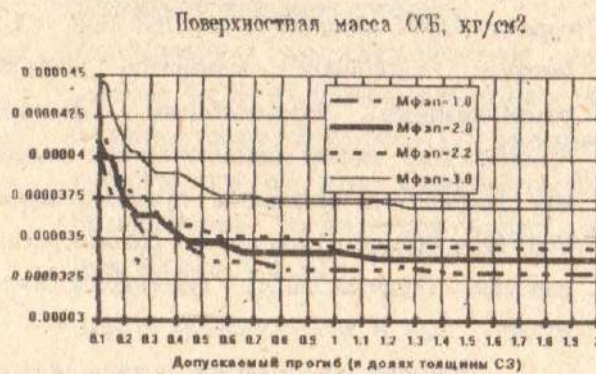


Рис 2.

Численная реализация методики проектирования оптимальной конструкции ССБ осуществлена программой "SSB" для IBM PC/AT, написанной на языке C в среде Microsoft® QuickC 2.51.

В качестве исходных данных для формирования монослоя материала несущих слоев использовано углеродное волокно Кулон [3], для связующего приняты характеристики [3]  $E_n=3.3 \cdot 10^9$  Па,  $G_n=1 \cdot 10^9$  Па,  $\mu_n=0.35$ .

Для формирования несущих слоев предполагается автоклавный способ, обеспечивающий  $\theta=0.7$  и  $\rho_{xmy}=1.69 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

В качестве СЗ рассматривались соты из алюминиевого сплава АМг2-Н, имеющие характеристики  $a_c=8 \cdot 10^{-3}$  м,  $\delta_c=3 \cdot 10^{-5}$  м,  $\rho_h=140$  кг/м<sup>3</sup>. Характеристики  $\tau_{bxz}=1.07 \cdot 10^5$  Па,  $\tau_{byz}=0.79 \cdot 10^5$  Па,  $G_{xz}=2.18 \cdot 10^7$  Па,  $G_{yz}=1.06 \cdot 10^7$  Па использовались



для проверки несущей способности СЗ вне оптимизационной программы. Полученные результаты свидетельствуют о том, что ограничения по несущей способности СЗ не являются критическими.

Зависимость поверхностной массы ССБ от  $K_w = |W|/h$  для различных значений массы ФЭП  $M_p$  приведены на рисунке 2.

Анализ этих зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

-в пределах существующих ( $M_p=2...3$  кг/м<sup>2</sup>) и перспективных ( $M_p=1.8$ кг/м<sup>2</sup>) конструкций ФЭП минимальная поверхностная масса ССБ растет в 1.25 раза только при весьма жестких эксплуатационных ограничениях на максимальный прогиб  $K_w=0.1$  и остается практически неизменной при  $K_w \geq 0.6$ . Таким образом рациональным ограничением на максимальный прогиб, если оно не связано с иными соображениями, представляется  $K_w \geq 2$ ;

-ступенчатый характер изменения  $M=f(K_w)$  свидетельствует о влиянии ограничений по устойчивости несущих слоев, реализующих по-видимому дискретный характер изменения либо толщин несущих слоев при постоянной толщине заполнителя, либо толщины заполнителя при постоянной толщине несущих слоев, либо одновременное дискретное увеличение обоих параметров. Однако эта ступенчатость весьма незначительна (не превышает 1...2% M);

-оптимальная поверхностная масса в области  $K_w \geq 0.8$  для устаревших ФЭПов ( $M_p=3$ ) и перспективных ( $M_p=1.8$  кг/м<sup>2</sup>) отличается в 1.13 раза, т.е. совершенствование конструкции ФЭП, связанное со снижением их поверхностной массы и сопряженное с нежелательным снижением их функциональных свойств, едва ли сможет привести к снижению минимальной поверхностной массы ССБ.

Однако абсолютные значения  $\delta$  реализуемы только при освоении новейшего технологического оборудования, обеспечивающего получение монослоев КМУ толщиной порядка диаметра углеродного волокна.

В процессе численных экспериментов анализировалось влияние вклада инерционных воздействий в плоскости XOY на оптимизируемые параметры. С этой целью был произведен расчет этих параметров для материалов несущих слоев и СЗ без учета инерционной нагрузки  $t_x$ . Как показал анализ графика, идентичного приведенному на рис.2, их характер не претерпел изменения, а по абсолютным значениям поверхностные массы в области  $K_w \geq 0.8$  без учета  $t_x$  превосходят их точные значения (рис.2) для всех значений  $M_p = 1.8; 2; 2.2; 3$  в 1.05...1.07 раза.

Таким образом учет инерционной нагрузки  $t_x$  заданного уровня практически не изменяет оптимальные проектные параметры ССБ и мог бы не производиться.



Для проверки адекватности принятой модели ССБ производилось сравнение полученных на ее основе результатов с результатами прямого счета ССБ по МКЭ, реализованному программным комплексом "COSMOS/M". Нагружение ССБ осуществлялось инерционной нагрузкой  $q$ . Ввиду симметрии нагрузки и конструкции рассматривалась 1/4 часть панели.

Проверка адекватности принятой модели проводилась по следующим показателям:

- совпадение максимальных прогибов, прогнозируемых балочной моделью с полученными по МКЭ при координатах точек закрепления, соответствующих балочной модели;

- по различию в абсолютных значениях прогибов в точках ССБ центр-края-середины сторон сравниваемых моделей;

- по уровню максимальных действующих напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  в сравниваемых моделях.

Максимальный теоретический прогиб в критических точках ССБ по балочной модели равен  $6,6 \cdot 10^{-3}$  м.

Анализ распределения прогибов по МКЭ позволяет сделать следующие выводы:

- максимальный прогиб ССБ по модели МКЭ ( $6,24 \cdot 10^{-3}$  м) меньше теоретического на 5,7%, т.е. практически совпадает (а при более жестких требованиях теоретический прогиб обеспечивает некоторый запас жесткости ССБ);

- различие максимальных прогибов в граничных критических точках по модели МКЭ относительно невелико (соответственно  $4,4 \cdot 10^{-3}$  м на свободном углу панели и  $6,24 \cdot 10^{-3}$  м в центральном сечении) и по абсолютной величине прогибы обеспечивают запас жесткости ССБ;

- в центральном сечении панели прогибы существенно разнятся между собой по величине и имеют значения значительно меньшие теоретических, т.е. для этого сечения балочная модель ведет себя менее адекватно, чем по краевому сечению: однако это отклонение также увеличивает запас жесткости ССБ и следовательно, не является критичным.

Анализ распределения нормальных напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  по ССБ позволяет сделать следующие выводы:

- абсолютные значения максимальных напряжений по модели МКЭ соответствуют точке опоры, где, исключая область конструктивного усиления ССБ, они равны  $\sigma_x = 2,14 \cdot 10^7$  Па и  $\sigma_y = 1,06 \cdot 10^7$  Па; в центре ССБ они равны  $\sigma_x = 6,6 \cdot 10^6$  Па и  $\sigma_y = 6,6 \cdot 10^6$  Па; по балочной модели напряжения в точке опоры



равны  $\sigma_x = 1.84 \cdot 10^7$  Па и  $\sigma_y = 2.65 \cdot 10^7$  Па; в центре ССБ они равны  $\sigma_x = 6.63 \cdot 10^6$  Па и  $\sigma_y = 1.18 \cdot 10^7$  Па.

Значения напряжений по абсолютной величине в сравниваемых моделях, отличаются существенно, что свидетельствует о недостаточной адекватности моделей по сравниваемым параметрам. Однако уровень напряжений в модели МКЭ показал достаточно большой запас прочности ССБ по критерию Мизеса-Хилла и, следовательно, существенные отличия напряжений в сравниваемых моделях являются незначительными для несущей способности ССБ с оптимальными параметрами.

Таким образом, можно сделать следующие общие выводы:

1. Разработана, обоснована и реализована на ПЭВМ методика проектирования оптимальных по массе ССБ при регламентированных ограничениях по жесткости и заданных условиях нагружения.

2. Адекватность модели, положенной в основу методики, исследована и доказана на базе конечно-элементной модели, реализованной программным комплексом "COSMOS/M" по ряду наиболее существенных признаков.

3. На основе предложенной методики разработана КСС ССБ, реализующая трехслойную конструкцию со сверхтонкими высокомодульными несущими слоями из углепластика с автоклавным формованием монослоев, получаемых раскаткой жгутов (ровингов) на специальном оборудовании, аналоги которого существуют за рубежом.

4. В зависимости от уровня требований по предельно допустимому максимальному прогибу ССБ и реализуемой поверхностной массой ФЭПов получены конструктивные и массовые параметры ССБ, которые при соответствующем технологическом обеспечении не уступают лучшим аналогам ближнего и дальнего зарубежья. Так поверхностная масса ССБ при неизменной массе конструктивных элементов (вставок), равной  $0.104 \text{ кг/м}^2$  при  $K_w = 1$ , использовании клеевых пленок с поверхностной массой  $0.060 \text{ кг/м}^2$  и  $M_\phi = 2 \text{ кг/м}^2$  равна  $0.564 \text{ кг/м}^2$ .

#### Список литературы.

1. Гайдачук В.Е., Карпов Я.С., Русин М.Ю. Механика волокнистых композиционных материалов. Учебное пособие. Харьков, 1991, 97с.
2. Боглаев Ю.П. Вычислительная математика и программирование. Учебное пособие. - М.: Высшая школа, 1990, 544с.
3. Гайдачук В.Е., Карпов Я.С., Кириченко В.В., Щербаков В.Т. Армирующие материалы и связующие для композитов. Учебное пособие. Харьков, Харьк. авиац. ин-т, 1991, 87с.