

УДК 629.7.064.5

А.П. Щудро, М.Г. Добрушина, А.С. Кулик

## СВЕРХЛЕГКИЕ ПАНЕЛИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

*Разработана сверхлегкая панель солнечной батареи удельной массой 0,6-0,8 кг/м<sup>2</sup> и унифицирована по большинству параметров для всех космических аппаратов разработки ГП "КБ "Южное".*

*Розроблено надлегку панель сонячної батареї питомою вагою 0,6-0,8 кг/м<sup>2</sup> і уніфіковано за більшістю параметрів для всіх космічних апаратів розробки ДП "КБ "Південне".*

*Ultralight solar array panel (specific mass of 0,6-0,8 kg/m<sup>2</sup>) was designed and made unified in most of parameters for all spacecraft developed by Yuzhnoye SDO.*

Ранее на космических аппаратах (КА) серии "Тайфун", "Целина-2", АУОС-3, "Океан" применялись рамочные конструкции солнечных батарей (СБ) с металлическим и впоследствии с углепластиковым силовым набором, поверх которого натягивалось сетеполотно для крепления фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) СБ. Такие конструкции имели большую толщину (~ 30 мм), отличались низкой жесткостью (максимальный прогиб под действием эксплуатационных нагрузок составлял до 20 мм) и, как следствие, пакет из нескольких панелей занимал большой объем под обтекателем ракеты-носителя (РН) в транспортном положении КА.

### Проектирование сотовых конструкций на ГП "КБ "Южное"

Разработка сотовых конструкций КА на предприятии началась в 1993 году с конструкции панели солнечной батареи микроспутника МС-1-ТК ("Мікрон").

Лицевая обшивка панели выполнена из стеклопластика, тыльная – из металлизированного стеклопластика. Сотовый наполнитель – из алюминиевого сплава АМг2-Н со стороной ячейки 6 мм и толщиной стенки ~ 30 мкм. Обшивка соединена с сотовым наполнителем пле-

ночным клеем ВК-36. Закладные изготовлены из алюминиевого сплава АМг6.

В 1996 – 1997 годах на предприятии проведены проектно-поисковые работы по снижению массы трехслойных панелей СБ. Основными направлениями поиска конструктивно-технологических решений по снижению массы трехслойных сотовых конструкций панелей СБ были:

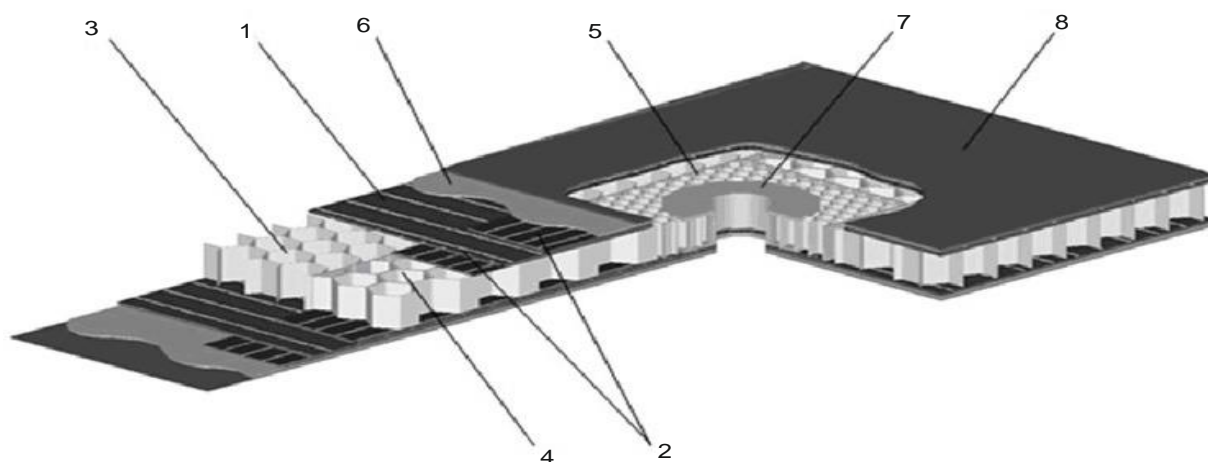
- выполнение обшивки из углепластика;
- уменьшение толщины обшивки за счет изменения ее конструктивно-силовой схемы;
- замена пленочного клея на наносимый только на торцы сотов;
- более тщательное выполнение закладных элементов.

Несущие конструкции панелей СБ и тепловых экранов, выполненные в виде трехслойных сотовых конструкций с углепластиковыми обшивками, применены в спутнике Egyptsat-1 и в КА "Січ-2" (МС-2-8).

Сравнительные характеристики несущих конструкций солнечных батарей приведены в табл. 1. Фрагмент конструкции трехслойной сотовой панели с удельной массой ~ 0,8 кг/м<sup>2</sup> приведен на рис. 1.

Сравнительные характеристики несущих конструкций СБ

Характеристики	Тип конструкции СБ			
	рамочная с металлическим силовым набором и сетеполотном	рамочная с углепластиковым силовым набором и сетеполотном	трехслойная с сотовым наполнителем	трехслойная с сотовым наполнителем облегченная
Размеры (длина×ширина×толщина), мм	1635×1140×30	2400×600×30	660×380×12	695×576×12
Удельная масса, кг/м <sup>2</sup>	3,0	2,5	2,2	0,8
Обшивка	–	–	Многослойный стеклопластик	Однослойный углепластик с усиливающими накладками
Сотовый наполнитель	–	–	Сторона ячейки – 6 мм. Толщина стенки – 30 мкм	Сторона ячейки – 6 мм. Толщина стенки – 23 мкм
Клей	ВКВ-9 (сетеполотно)	ВКВ-9 (сетеполотно) К-300 (фитинги)	Пленочный ВК-36	ВК-36 с адресным нанесением на торцы сотов
Максимальный прогиб при действии эксплуатационных нагрузок, мм	20	20	2	3

Рис. 1. Фрагмент конструкции трехслойной панели СБ с удельной массой ~ 0,8 кг/м<sup>2</sup>:

1 – монослойная углепластиковая обшивка (2 слоя); 2 – усиливающие углепластиковые накладки (4 шт.); 3 – сотовый наполнитель из алюминиевого сплава 5051 с нанесенным на торцы сухим клеем,  $a=6$  мм,  $\delta=0,01$  мм; 4 – сотовый наполнитель из алюминиевого сплава 5051 с нанесенным на торцы сухим клеем,  $a=6$  мм,  $\delta=0,02$  мм; 5 – сотовый наполнитель из алюминиевого сплава 5051 с нанесенным на торцы сухим клеем,  $a=2,5$  мм,  $\delta=0,02$  мм; 6 – клей КЛ-П (2 слоя); 7 – втулка для крепления СБ к корпусу КА; 8 – полиимидная пленка

В сравнении с зарубежными панелями СБ наиболее близким аналогом можно считать панели СБ КА "Ямал" (РКК "Энергия"). Но, при идентичности конструктивно-компоновочной схемы, решения, принимаемые ГП "КБ "Южное" и РКК "Энергия" по снижению массы

панелей СБ, были различны. Учитывая, что оба предприятия самостоятельно осваивали новую для себя конструкцию трехслойной панели СБ с углепластиковыми обшивками, ниже в табл. 2 приведены направления, в которых велась работа.

Таблица 2

Направления работ по совершенствованию панелей

Приемы	Метод реализации	
	РКК "Энергия"	ГП "КБ "Южное"
Снижение массы обшивки	Использование двух слоев угольной ленты со схемой армирования $1/0^{\circ}+1/90^{\circ}$ (удельная масса обшивки составляет $602 \text{ г/м}^2$ )	Использование одного слоя угольной ленты с подкрепляющими накладками в местах крепления панели к корпусу КА. Направления волокон ленты и накладок отличаются на $90^{\circ}$ (удельная масса обшивки составляет $352 \text{ г/м}^2$ )
Снижение массы клеевой композиции для приклейки одной обшивки к сотам	Модернизация стандартного пленочного клея (уменьшение его толщины и соответственно массы с доведением до значения $110 \text{ г/м}^2$ вместо $250-300 \text{ г/м}^2$ )	Отказ от пленочного клея и разработка технологии "адресного" нанесения клея на торцы сотов. Отработана технология, обеспечивающая расход клея $\sim 40 \text{ г/м}^2$
Разработка технологии приклейки полиимидной пленки к обшивке (полиимидная пленка практически не клеилась существовавшими клеями)	Отработка технологии специальной обработки поверхности пленки для обеспечения ее адгезии к традиционному клею (расход клея $\sim 110 \text{ г/м}^2$ )	Разработка принципиально новой клеевой композиции КЛ-П, обладающей адгезией к полиимидной пленке (расход клея $\sim 30 \text{ г/м}^2$ )

Как видно из таблицы, направления, принятые ГП "КБ "Южное" со сложившейся кооперацией (ОАО "УкрНИИТМ", НТУУ "КПИ", КиГАЗ и ИВХМ), дают более высокий результат в части снижения массы, чем приемы, примененные РКК "Энергия" со своей кооперацией.

#### Пути совершенствования силовой схемы панелей СБ

Определяющий случай нагружения панелей – изгиб из плоскости. Прочность и жесткость конструкции при этом зависят от момента инерции сечения на изгиб, кото-

рый определяется интегралом по площади F сечения

$$J = \int_F r^2 dF,$$

где  $dF$  – элементарная площадка сечения;

$r$  – ее расстояние от нейтральной оси.

Отсюда следует, что силовые элементы, работающие на изгиб, выгодно располагать на максимальном удалении от нейтральной оси, т.е. самое лучшее – сама обшивка. В иностранных панелях в местах сосредоточения нагрузок наряду с обшивками встречаются профили, тогда как у нас только

накладки, как бы полки без стенки. Вместо стенок профиля соты, которые все равно там есть, воспринимают сдвиг.

Используемые в КА двух- или трехслойные обшивки получаются тяжелыми из-за отсутствия тонкого сортамента материалов и еще из-за большой концентрации напряжений в местах опирания и приложения нагрузок. Поэтому была применена силовая схема, позволяющая избежать существенной концентрации напряжений путем разграничения работы элементов конструкции вдоль и поперек панелей. Основная обшивка выполнена из одного тонкого слоя углеродной ленты и лишь в отдельных местах она усилена в перпендикулярном к волокнам обшивки направлении накладками, проходящими через места опирания и приложения нагрузок. Однослойная обшивка воспринимает усилия от всех элементов панели и параллельно своим волокнам по своей ширине передает на полосы усиления, а не на точки крепления, поэтому практически без концентрации напряжений. С этим справляется однослойная обшивка, конечно при определенных параметрах панели.

Накладки образуют собой полосы усиления, которые собирают всю нагрузку от волокон обшивки и передают на точки опирания. Несмотря на то, что накладки на порядок уже и гораздо легче обшивки, они справляются со всей нагрузкой, потому что расположены в два слоя – под и над обшивкой и в сумме с ней в три раза толще, а эта толщина повышает в кубе (в 27 раз) момент инерции, тогда как здесь разрушение происходит от потери устойчивости. Конечно, утолщение обшивок в местах накладок вызывает некоторые неудобства, но они преодолимы.

Места опирания и передачи нагрузки от панели к панели (замки зачековки, поворотные механизмы, шарниры) располагаются на полосах усиления, чтобы не вводить дополнительных силовых элементов.

Панельные СБ лучше каркасных еще и тем, что в них точки опирания и приложения нагрузок располагаются на опреде-

ленном расстоянии от краев, что уменьшает напряжение и существенно уменьшает прогибы за счет взаимного сокращения прогибов от "срединных" и периферийных нагрузок. Конечно, места расположения этих точек выбираются с учетом возможностей конструкции КА. Это обязательное условие для обеспечения минимальной массы панелей. Поэтому проектирование панелей должно выполняться совместно с проектированием КА.

Большой выигрыш в массе (0,4-0,5 кг/м<sup>2</sup>) дало применение адресного нанесения клея на торцы сотов вместо ранее применявшегося пленочного клея.

Были спроектированы панели СБ для всех КА, разработанных на ГП "КБ "Южное", унифицированные по толщине обшивки и толщине сотового блока, несмотря на их различные размеры – от 0,25 до 5 м<sup>2</sup>. Это стало возможным из-за применения разного количества (от 1 до 2) полос усиления и точек зачековки (от 1 до 4), регулирования различных поперечных нагрузок ориентацией панелей по отношению к нагрузкам.

### Описание полученных конструкций

Конструктивно панель низкой удельной массы состоит из следующих элементов:

- двух углепластиковых обшивок [1];
- сотового заполнителя из алюминиевой фольги с клеем, нанесенным на торцы сотов [1];
- электроизоляционного слоя из полиимидной пленки;
- закладных элементов.

Основная, сплошная, часть обшивки выполнена из одного слоя углеродной ленты со смолой. В перпендикулярном волокнам обшивки направлении имеются полосы усиления, которые проходят через точки приложения нагрузок (узлы зачековки, поворотные механизмы, шарниры). Полосы усиления выполнены из такой же углеродной ленты, только в два слоя: один под, а второй над однослойной обшивкой.

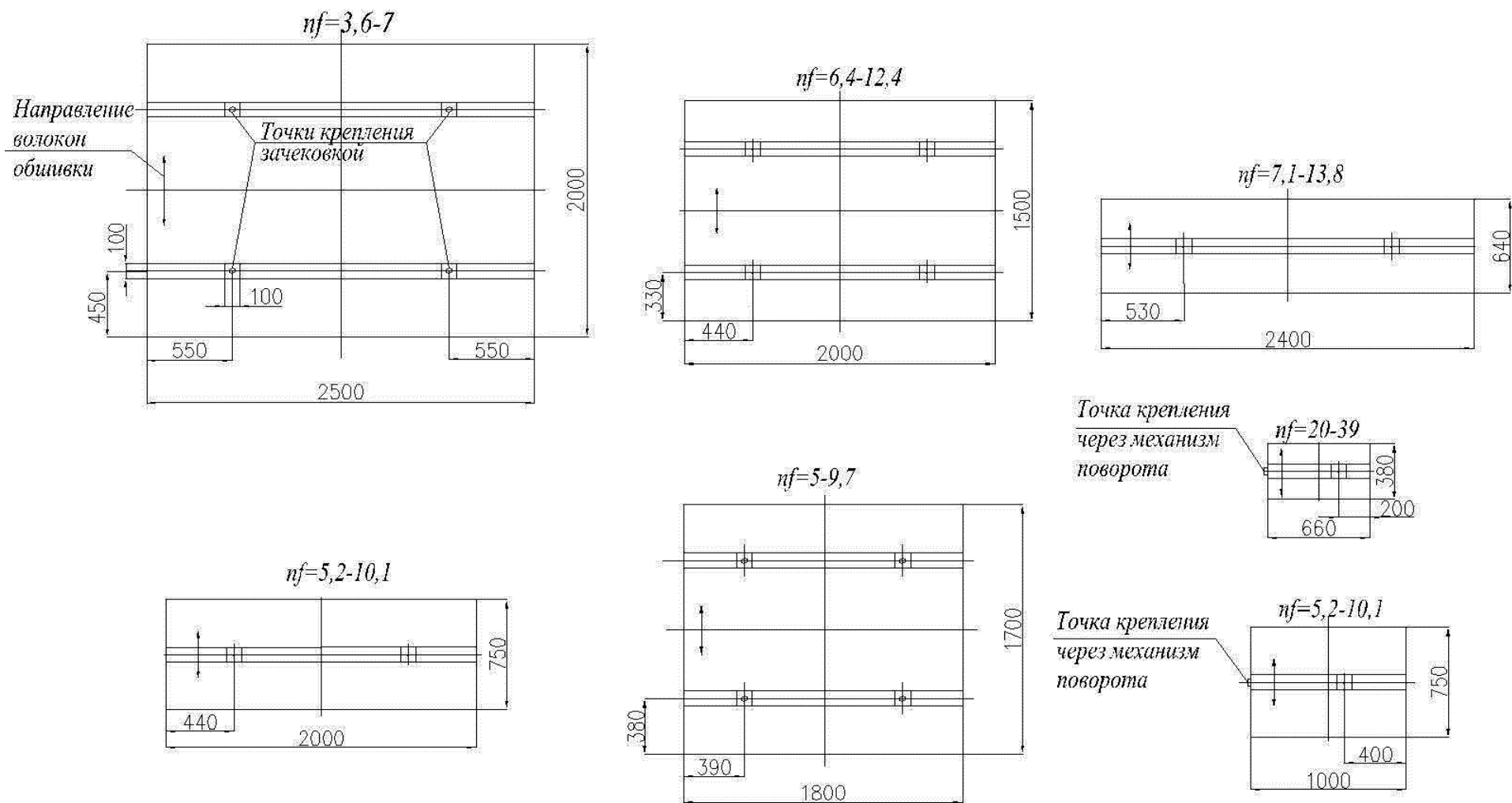


Рис. 2. Панели СБ с оптимальным расположением точек зачековки

Оптимальное расположение и количество точек крепления выбирается на определенных расстояниях от краев панелей, по длине и ширине, при которых прогибы от нагружения краев, с учетом веса поворотных механизмов, максимально компенсируют прогибы от нагружения середины панели.

В 1997–1999 гг. на ГП "КБ "Южное" был разработан ряд панелей удельной массой 0,8 кг/м<sup>2</sup> для СБ разных КА, их геометрические размеры приведены на рис. 2. При двух точках опирания (зачековки) как по длине, так и по ширине панели расстояния между ними выбраны ~ 55% от размера панели и по ~ 22,5% до краев. Если это условие выполнить не удастся, то масса панели может получиться намного больше. Толщина всех панелей 12 мм, количество точек крепления к КА, не считая поворотных механизмов, от четырех до одной, в зависимости от размеров панелей. Все панели располагались на КА так, чтобы фактическое значение этих нагрузок, действующих по нормальям к их поверхности, не превышало допустимых. В результате самые большие панели (2000×2500 мм) располагались вертикально по бокам корпуса при его горизонтальном транспортировании. А самую малую панель (660×380 мм) можно было располагать произвольно, даже поперек ракеты.

#### Расчет на прочность

Конструкция панелей рассчитывается на прочность при действии максимальных перегрузок, перпендикулярных их плоскости, и оценивается на действие внутреннего избыточного давления, возникающего за счет запаздывания выхода воздуха из сотов при выведении КА на орбиту.

Первоначально основные геометрические параметры выбираются исходя из требований ТЗ, опыта предыдущих разработок и наличного сортамента материалов. Дальнейший расчет ведется методом последовательных приближений. Методика расчета следующая [2].

1. Определяется максимальная расчетная удельная нагрузка на панель перпендикулярно ее плоскости

$$q^p = G^{//} \cdot n^p,$$

где  $G^{//}$  – удельный вес панели – вес конструкции с ФЭП, коммуникациями и крепежом, деленный на площадь;

$n^p = nf$  – расчетное значение перегрузки, где  $n$  – максимальная перегрузка, действующая перпендикулярно плоскости панели при выведении или при транспортировании, в зависимости от расположения панелей на КА (рис. 3).

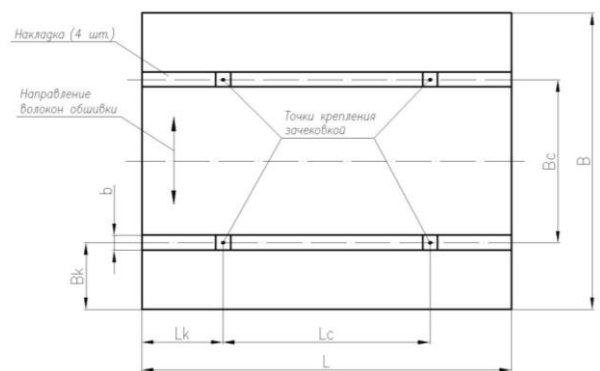


Рис. 3. Геометрические параметры панели СБ

2. Для расчета на прочность обшивки панель рассматривается как консоль на участке от полос усиления к краям панели и как балка с жестко закрепленными концами между полосами усиления, т.е. как бы жестко защемленная в районе опор. Этому способствует не столько защемление зачековкой и полосами усиления, сколько само расположение опор. Исходя из этого, определяется изгибающий погонный момент консольной части

$$M_k^i = q^p \cdot B_k^2 / 2,$$

где  $q^p$  – расчетная удельная нагрузка на панель;

$B_k$  – длина консольной части обшивки вдоль волокон.

Изгибающий погонный момент между полосами усиления

$$M_c^i = q^p \cdot B_c^2 / 8,$$

где  $q^p$  – расчетная удельная нагрузка на панель;

$B_c$  – длина участка обшивки между полосами усиления.

Расчетная погонная сжимающая сила в обшивке определяется по формуле

$$N' = \frac{M'_k}{h - \delta} \approx \frac{M'_k}{h},$$

где  $h$  – высота панели;  
 $\delta$  – толщина обшивки.

3. Выполняется расчет на потерю устойчивости в пределах ячейки сотового заполнителя.

Ячейка сотового заполнителя должна быть достаточно мала для предотвращения проседания, выпучивания обшивки в ее пределах и сохранения устойчивости под воздействием расчетных нагрузок. По формуле Эйлера определяется критическая сжимающая погонная сила обшивки при потере устойчивости в пределах одной ячейки [3]

$$N'_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J'_0}{(c \cdot a)^2},$$

где  $J'_0$  – погонный момент инерции обшивки (без учета полиимидной пленки)

$$J'_0 = \delta^3 / 12;$$

$E$  – минимальное значение модуля упругости однонаправленного углепластика;  
 $\delta$  – толщина обшивки;  
 $c$  – примерное значение коэффициента заделки, определенное экспериментально;  
 $a$  – сторона ячейки сотового заполнителя.

После вычисления расчетной погонной сжимающей силы и критической сжимающей погонной силы определяется коэффициент запаса устойчивости обшивки

$$\eta = N'_{кр} / N'.$$

4. Обшивка рассчитывается на изгиб в месте подгибки накладок. Напряжения от осевой силы

$$\sigma = \frac{N' \cdot \delta}{W'} + \frac{N'}{\delta},$$

где  $\delta$  – толщина обшивки;  $N'$  – расчетная погонная сжимающая сила в обшивке;  
 $W' = \delta^2 / 6$  – погонный момент сопротивления сечения.

Запас прочности вычисляется отношением предела прочности углепластика при сжатии к расчетному напряжению

$$\eta = \frac{\sigma_{сж}}{\sigma}.$$

5. Обшивка проверяется также на местный изгиб в пределах ячейки от внутреннего избыточного давления, возникающего при выведении КА на орбиту. Ячейка сотового заполнителя принимается как защемленная по краям балка, длина которой – усредненное значение размера стороны ячейки и расстояния между ее вершинами. Перепад давления  $\Delta P$  для конкретного случая нагружения берется из расчетов на аэродинамику. Тогда изгибающий момент в ней

$$M' = \Delta P l^2 / 12,$$

а погонный момент сопротивления, напряжения и запас прочности:

$$W' = \delta^2 / 6,$$

$$\sigma = M' / W',$$

$$\eta = \sigma_{сж} / \sigma,$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности углепластика при сжатии.

Эксплуатационные прогибы обшивок панели относительно полос усиления:

– для консольной части:

$$y_{1k} = \frac{q^p \cdot B_k^4}{f 8 E J'_n},$$

– а также для средней части (между полосами усиления):

$$y_{1k} = \frac{q^p \cdot B_c^4}{f 384 E J'_n},$$

где  $q^p$  – удельная эксплуатационная нагрузка на панель;  $B_k$  – длина консольной части обшивки (вдоль волокон);  $B_c$  – длина средней части обшивки;  $E$  – модуль упругости материала обшивок;  $J'_n = \delta \frac{h^2}{2}$  – погонный момент инерции панели с однослойными обшивками;  $h$  – высота панели.

6. Полосы усиления рассчитываются аналогично обшивкам. Изгибающий момент в одной полосе в основании консоли и на средней части

$$M_k = q^p B_n \frac{L_k^2}{2} + \frac{G_{nm}}{2} n^p (L_k + 3),$$

$$M_c = q^p B_n \frac{L_c^2}{12},$$

где  $q^p$  – расчетная удельная нагрузка на панель;

$L_k$  – длина консольной части;

$L_c$  – длина средней части полосы;

$B_n$  – ширина части панели, относящаяся к одной полосе усиления, т.е. половина ширины панели  $B$  при двух полосах усиления;

$n^p$  – расчетное значение перегрузки.

Расчетная сжимающая сила в двух накладках, принадлежащих одной обшивке,

$$N = M_k / h - 3\delta$$

или

$$N = M_c / h - 3\delta.$$

Их критическая сжимающая сила

$$N_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{(c \cdot a)^2},$$

где  $J = \frac{b\delta^3}{12} 3^3$  – их момент инерции;

$E$  – минимальное значение модуля упругости однонаправленного углепластика;  $\delta$  – толщина накладки;  $a$  – сторона ячейки сотового заполнителя;  $b$  – ширина накладки;

$c$  – примерное значение коэффициента заделки, определенное экспериментально.

Запас устойчивости

$$\eta = N_{кр} / N.$$

Эксплуатационные прогибы полосы усиления на концах и в середине

$$y_{нк} = \frac{q^p B_n L_k^4}{f 8 E J} + \frac{G_{nm} n^p (L_k + 3)^2}{f 2 \cdot 3 \cdot E J},$$

$$y_{нс} = \frac{q^p B_n L_c^4}{f 384 E J},$$

где  $q^p$  – расчетная удельная нагрузка;  $L_k$  – длина консольной части полосы усиления;  $L_c$  – длина среднего пролета полосы усиления;  $E$  – модуль упругости материала накладок;  $G_{пм}$  – вес поворотного механизма;

$J \approx b\delta 4 \left( \frac{h}{2} \right)^2$  – момент инерции четырех

накладок относительно середины толщины панели, где  $\delta$  – толщина накладки;  $h$  – высота панели.

Максимальный прогиб панелей вычисляется как сумма максимального прогиба обшивочной части относительно полос усиления и полос усиления относительно точек их закрепления.

7. Соты рассчитываются на сдвиг под обшивкой и под полосами усиления.

Когда обшивка "собирает" нагрузку на внутренней части площадью  $F_1 = LB_c$  и работает при этом на растяжение-сжатие (а панель в целом на изгиб), тогда соты передают эту нагрузку на полосы усиления, работая на сдвиг по двум площадям  $F_2 = L(h - 2\delta)$  (рис. 4).

Нагрузка на участке между полосами усиления

$$P_c = q^p F_1 = q^p LB_c.$$



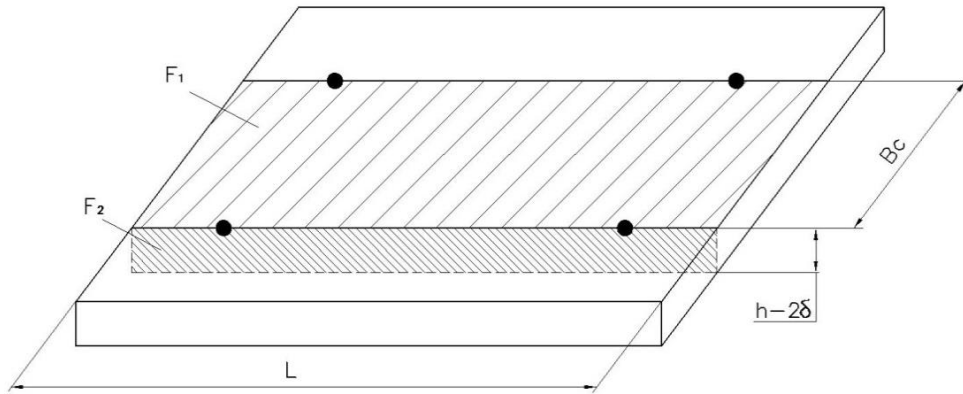


Рис. 4. Площади действия и восприятия нагрузки

Две площади сотов, передающие эту нагрузку

$$2F_2 = 2L(h - 2\delta).$$

Напряжение сдвига в сотах  $\tau = P_c / 2F_2$ .

При этих условиях запас прочности сотов под обшивкой  $\eta = \tau_b / \tau$ ,

где  $\tau_b$  – предел прочности сотов при сдвиге согласно ТУ на соты.

Когда полосы усиления нагрузку от обшивок по внутренней, относительно узлов зачековки, площади  $F_3 = BL_c$  (рис. 5) передают на опорные точки (узлы зачековки), работая при этом на изгиб, тогда соты передают эту нагрузку на опорные точки по четырем площадкам  $F_4$ , работая на сдвиг.

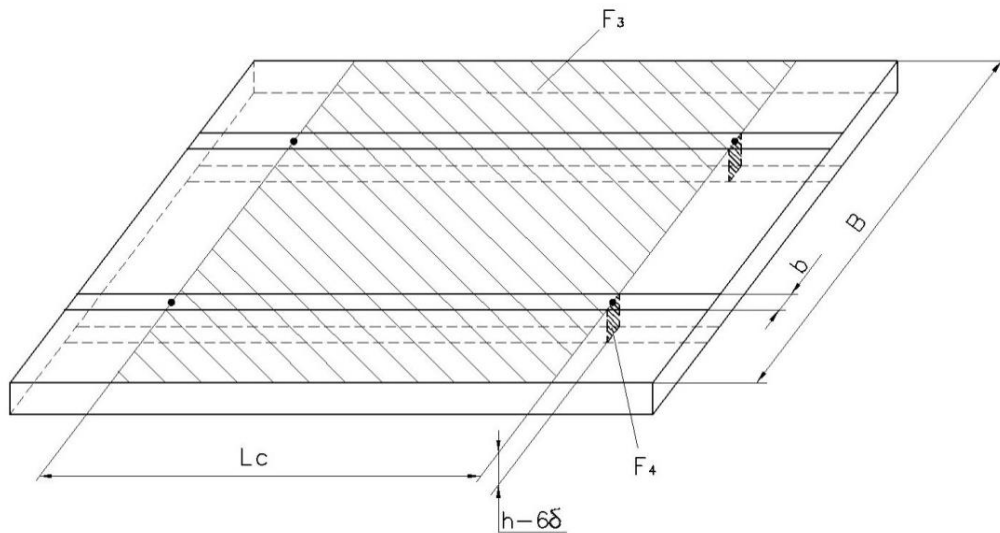


Рис. 5. Площади действия и восприятия нагрузки

Передаваемая нагрузка

$$P_{b2} = q^p BL_c.$$

Четыре площади, воспринимающие ее

$$4F_4 = 4b(h - 6\delta).$$

Напряжения сдвига в сотах под полосами

$$\tau = P_{b2} / 4F_4.$$

Запас прочности сотов на сдвиг

$$\eta = \tau_{кр} / \tau,$$

где  $\tau_{кр}$  – предел прочности сотов под полосами усиления согласно ТУ на соты, с учетом ориентации двойных стенок.

Аналогично можно проверить соты на сдвиг под полосами усиления и с внешней от узлов зачекочки стороны, но при оптимальном расположении опор они меньше.

8. Клей между обшивкой и сотами рассчитывается на растяжение от внутреннего избыточного давления в панели и на сдвиг от инерционных нагрузок.

При растяжении на шестигранную ячейку обшивки панели площадью  $F_{я} = 1,5\sqrt{3}a^2$  действует аэродинамическая сила  $P = \Delta P f F_{я}$ , которая воспринимается клеем на разрыв площадью

$$F_{кл} = 8a \frac{\delta}{2},$$

где  $a$  – сторона шестигранной ячейки сотов;

Тогда растягивающие напряжения в клее и запас прочности:

$$\eta = \sigma_g / \sigma.$$

На сдвиг клей проверяется между накладками и сотами (где напряжение больше). Напряжения сдвига  $q^p$  берутся из расчета сотов.

На шестигранную ячейку площадью  $F$  это дает силу сдвига

$$Q^p = \tau^p F.$$

Тогда расчетные напряжения сдвига в клее и запас прочности

$$\tau^p = Q^p / F_{кл} k,$$

где  $k=0,75$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения напряжений по стенкам шестигранника;

$\tau_b$  – предел прочности

клея Эпофлекс-4Т при сдвиге.

## Выводы

1. Разработана методика проектирования панелей СБ КА, обеспечивающая их облегчение в  $\sim 3$  раза по сравнению с ранее достигнутым уровнем.

2. Спроектированы в основных чертах сверхлегкие панели СБ КА предыдущих разработок ГП "КБ "Южное".

3. На вновь разрабатываемых КА такой уровень тоже возможен, но только при оптимальном расположении точек опирания панелей СБ на КА, что возможно только при их совместном проектировании.

4. При применении однослойных обшивок, изготавливаемых ранее из углеродных лент, необходимо несколько увеличивать высоту  $\Omega$ -образных соединительных шин, соединяющих фотоэлементы, ориентированных поперек волокон обшивки.

5. При современном уровне технологии, если изготавливать обшивки столь же тонкими, но трехслойными из углеродных ровингов, возможно достижение такой же легкости без изменения  $\Omega$ -образных соединительных шин, но необходимо заново провести прочностную отработку.

6. Разработанную методику можно и целесообразно использовать в перспективных разработках ГП "КБ "Южное".

## Список использованной литературы

1. Микроспутник. Проектирование и расчет минимальной по массе панели БФ: техн. отчет "Микроспутник" 311/39-99; Руководитель А.П. Щудро. – ГП "КБ "Южное". – Днепропетровск, 1999. – С. 17.

2. Пат. 2283798 РФ, МКП В64G 1/22, В32В 3/12; Заявл. 28.06.2004; Оpubл. 20.09.2006.

3. Прочность. Устойчивость. Колебания: Справочник/И.А. Биргер, Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – 1861 с.

Статья поступила 18.07.2015