

УДК 629.735

Ван Сяоянь¹, Ю. А. Похил², К. В. Коваль²,
Хе Ши Юй¹, Р. В. Гаврилов²

¹Харбінський політехнічний інститут, КНР

²Спеціальне конструкторсько-технологічне бюро з криогенної техніки Фізико-технічного інституту низьких температур Національної академії наук України, Харків

**Расчет напряженно-деформированного состояния
панели солнечной батареи космического аппарата
при термическом нагружении**

Надійшла до редакції 09.04.04

Виведено дві уніфіковані аналітичні методики визначення напружено-деформованого стану панелей сонячних батарей космічних апаратів при термічному навантаженні. Проведено визначення й аналіз напружено-деформованого стану тестової моделі сонячної батареї, порівняння результатів розрахунків з результатами, отриманими методом скінченних елементів. На базі проведеного параметричного дослідження дано рекомендації щодо підбору оптимальної структури панелі.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с постоянным расширением спектра задач, решаемых космическими аппаратами (КА), ужесточением требований к их массе, энергопотреблению и срокам активного существования, весьма актуальна задача совершенствования солнечных батарей (СБ), и в частности оптимизации их структуры для обеспечения минимального уровня напряжений в ней. Конструкция большинства современных СБ представляет собой многослойное клеевое соединение. Данная структура подвержена значительному кратковременному статическому и динамическому механическому нагружению во время выведения КА на орбиту и приведения батареи в рабочее состояние. Определяющим для прочности панели СБ считается механическое нагружение в процессе выведения и раскрытия СБ КА, но не менее важен длительный этап термоциклирования в широком диапазоне температуры при эксплуатации КА на орбите. В зависимости от параметров орбиты данная конструкция может подвергаться периодическому нагреву и охлаждению в интервале от +150 до -100°С, а из-за разности коэффициентов линейного температурного расширения (КЛТР)

склеиваемых слоев в конструкции возникают значительные напряжения, без учета которых невозможно спроектировать оптимальную с точки зрения прочности конструкцию СБ [1, 2]. Для решения поставленной задачи необходим оперативный инженерный анализ структуры батареи. Наиболее подходят для этого аналитические математические модели, основанные на расчетных схемах различного уровня точности.

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ПАНЕЛИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

На базе двух расчетных схем многослойного клеевого соединения были выведены две унифицированные методики определения напряженно-деформированного состояния (НДС) панели СБ КА при термомеханическом нагружении. В обоих случаях панель СБ представлялась пятислойным клеевым соединением. В первом приближении сотовый наполнитель можно представить в виде приведенной клеевой прослойки. При этом в качестве меха-

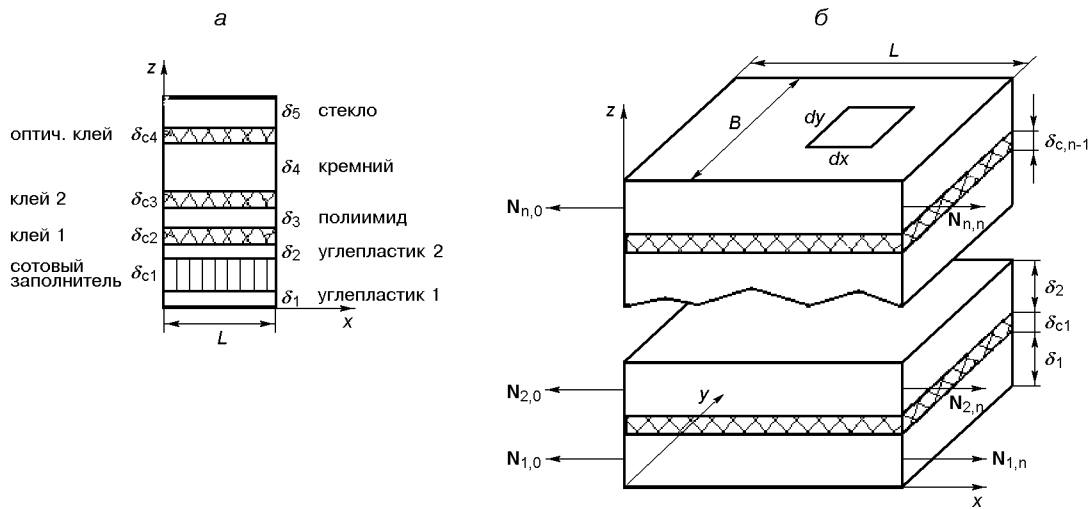


Рис. 1. Структура клеевого соединения солнечной батареи КА, а - структура, б - общий вид

нических характеристик выбираем усредненные между сотовым заполнителем и смежными клеевыми прослойками, соединяющими его с обшивками панели. На рис. 1 показана типичная структура СБ, положенная в основу дальнейших вычислений.

В качестве основы для исследования выбрана одномерная модель соединения, по которой клеевая прослойка работает только на сдвиг вдоль одного направления, геометрические и жесткостные параметры деталей и клеевых слоев постоянны по длине, нормальные напряжения распределены по толщине равномерно, а материалы ортотропны в осях xu [4].

Уравнения равновесия элементов деталей имеют вид

$$\frac{dN_{ix}}{dx} - Q_{(i-1)x} + Q_{ix} = 0, \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, n,$$

где N_{ix} и Q_{ix} — нормальные и касательные усилия в соединяемых деталях и клеевых слоях, причем $Q_{0x} = Q_{nx} = 0$. Для рассматриваемого случая $n = 5$.

Уравнения совместности деформаций и физического закона:

$$Y_j = \frac{U_j - U_{j+1}}{\delta_{cj}}, \quad Y_j = \frac{Q_{jx}}{G_{cj}}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ix} = \frac{N_{ix}}{\delta_i E_{ix}} + \alpha_{ix} \Delta T_i,$$

$$j = 1, \dots, n,$$

где α_{ix} — коэффициент линейного температурного расширения.

Деформации определяются соотношениями Коши

$$\varepsilon_{ix} = \frac{dU_i}{dx}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (3)$$

Уравнение равновесия отсеченной части:

$$\sum_{i=1}^n N_{ix} = \sum_{i=1}^n N_{i0} = \sum_{i=1}^n N_{in}. \quad (4)$$

После дифференцирования выражений (2) по x с учетом зависимостей (1) и (3) получаем основную систему дифференциальных уравнений, состоящую из $n - 1$ уравнений:

$$\Pi_{ci} \sum_{j=1}^i \frac{d^2 N_{jx}}{dx^2} + \Pi_{i+1,x} N_{i+1,x} - \Pi_{ix} N_{ix} = a_i, \quad (5)$$

где Π_{ci} и Π_{ix} — податливости клеевых прослоек и соединяемых деталей,

$$a_j = \alpha_{jx} \Delta T_j - \alpha_{j+1,x} \Delta T_{j+1},$$

$$j = 1, \dots, n - 1.$$

Методом последовательного исключения неизвестных из этой системы получаем дифференциальное уравнение относительно усилий в первой детали.

Решив данную систему, находим нормальные усилия в соединяемых деталях:

$$N_{ix} = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{p=1}^n A_p |_{n=1} \cdot k_{ix}^{2p-2} \right) P_{ix} + \left(\sum_{i=1}^{i-1} a_i \sum_{l=1}^n A_{lx} + A_{0x} \Pi_{ix} \right) / \sum_{l=1}^n A_{lx} \Pi_{lx}, \quad (6)$$

$$t = 1, \dots, n,$$

где

$$P_{ix} = C_{2j-1} \operatorname{sh}(k_{ix}x) + C_{2j} \operatorname{ch}(k_{ix}x),$$

k_{ix} — соответствующий корень характеристического уравнения;

$$A_p = (-1)^{p+1} \left(\sum_{i_s=i_{s-1}-1}^{n-(p-1)} \Pi_{ci_s} \right)_{s=1}^{p-1} \cdot \frac{\Pi_{ix}}{\Pi_{nx}} \cdot \prod_{r=0}^{p-2} \left(\sum_{i_{r+1}}^{i_{r-1}} \frac{1}{\Pi_{ix}} \right),$$

$$A_0 = \sum_{i=1}^{n-1} \left(a_j \sum_{j=i+1}^n \frac{1}{\Pi_{ix}} \right) + \sum_{i=1}^n N_{i0}, \quad (7)$$

$$p = 1, \dots, n, \quad -i_0 = 0, \quad -i_p = n.$$

Касательные напряжения в клеевых прослойках определяются из уравнений равновесия элементов деталей (1).

$$Q_{ix} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{dN_{ix}}{dx} =$$

$$= \sum_{i=1}^{n-1} k_{ix} \left(\sum_{j=1}^i T_{it} \right) [C_{2j-1} \operatorname{ch}(k_{ix}x) + C_{2j} \operatorname{sh}(k_{ix}x)]. \quad (8)$$

Константы интегрирования C_j находятся из граничных условий:

$$N_{ix} = N_{i0} \quad \text{при } x = x_1$$

и

$$N_{ix} = N_{in} \quad \text{при } x = x_2, \quad i = 1, \dots, n, \quad (9)$$

где $x_1 = 0$, $x_2 = L$ — это координаты начала и конца соединения.

Система (9) распадается на две и из (6) определяем константы:

$$C_{2i} = P_1 |_{x=0},$$

$$C_{2i-1} = \frac{[P_1 |_{x=L} + P_1 |_{x=0} \cdot \operatorname{ch}(k_i L)]}{\operatorname{sh}(k_i L)}. \quad (10)$$

Для оценки несущей способности необходимы максимальные значения напряжений, которые в клеевом соединении наблюдаются по его краям

$$Q_{i\max} = \sum_{i=1}^{n-1} k_i \left(\sum_{j=1}^i T_{it} \right) C_{2j+1}. \quad (11)$$

Поскольку корни характеристического уравнения результирующего дифференциального уравнения не всегда имеют аналитическое решение, проведено их исследование для всего интервала жесткостных характеристик материалов. Показано, что корни действительные [3]. Это позволило представить решение в аналитическом виде.

Одномерная расчетная схема является наиболее упрощенной, так как она не учитывает влияние ширины соединения на НДС. Лучшим приближением к истинному результату представляется квазидвумерный подход, по которому поперечные напряжения не влияют на продольные, а каждая полоска соединения шириной dx рассматривается изолированно. Тогда, в одном направлении напряжения считаются по изложенной выше одномерной постановке, а для направления y аналогичным образом получим систему уравнений:

$$\Pi_{ci} \sum_{k=1}^i \left(\frac{d^2 N_{ky}}{dy^2} \right) + \Pi_{i+1,y} N_{i+1,y} - \mu_{i+1,xy} \Pi_{i+1,x} N_{i+1,x}$$

$$- \Pi_{iy} N_{iy} - \mu_{ixy} \Pi_{ix} N_{ix} = a_{iy}. \quad (12)$$

Основные соотношения для квазидвумерной модели приведены в работе [5].

Наиболее полно учитывает параметры соединения двумерная расчетная схема. В отличие от квазидвумерной модели, здесь принимаются в расчет оба коэффициента Пуассона. Однако ее решение возможно лишь для некоторых частных случаев, не рассматриваемых в этой работе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В качестве иллюстрации применимости рассматриваемой расчетной модели для определения НДС СБ КА проведено определение и анализ НДС модельной структуры СБ производства КНР, а так же сравнение результатов данного расчета с результатами квазидвумерной модели [1] и давно используемого научно-обоснованного численного метода: метода конечных элементов (МКЭ). Структура тестовой модели СБ представлена на рис. 1. Исходные данные для исследования получены в ходе экспериментального определения физико-механических характеристик материалов СБ в эксплуатационном диапазоне температур.

Рассматривались два расчетных случая нагружения СБ: теневой и солнечный участок орбиты. В качестве температуры эксплуатации принимались: -100°C и $+100^\circ \text{C}$ соответственно. Для упрощения анализа не рассматривался случай теплового удара при переходе КА через терминатор, не учитывались процессы теплопроводности, а конструкция считалась равномерно прогретой.

Расчеты показали, что конструкция СБ максимально нагружена на теневом участке орбиты.

Вид распределения нормальных и касательных

напряжений по панели солнечной батареи иллюстрируется рис. 2.

Максимум нормальных напряжений наблюдается в средней части панели. Что касается распределения касательных напряжений, то максимум, полученный по одномерной и квазидвумерной методи-

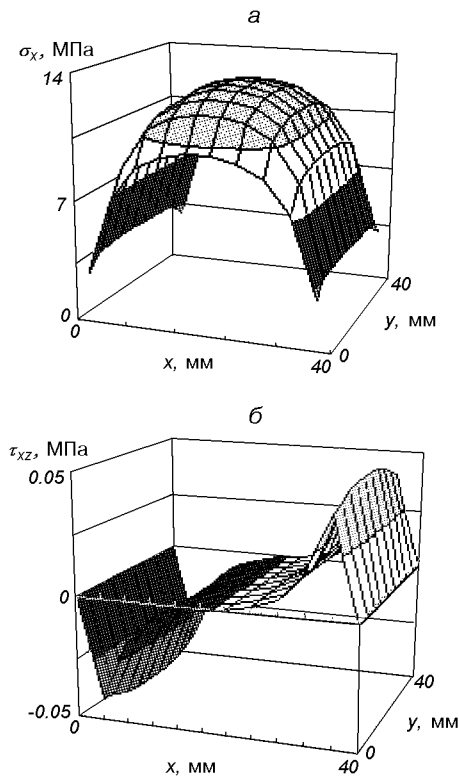


Рис 2. Распределение нормальных (а) и касательных (б) напряжений по панели СБ

кам наблюдается на краю соединения. МКЭ, в отличие от приведенных выше методик, позволяет удовлетворить граничным условиям на краю соединения. Соответственно и максимум находится на расстоянии порядка нескольких толщин слоя от края соединения, однако также в крайней области панели.

Результаты определения экстремальных нормальных напряжений в соединяемых слоях и касательных напряжений в клеевых прослойках проиллюстрированы на рис. 3.

Следует отметить, что нормальные напряжения не определяют прочность клеевого соединения. Связано это с существенно более низкой прочностью клеевых прослоек на сдвиг по сравнению с прочностью соединяемых деталей, и тем не менее они важны для полноты анализа НДС. Видим, что как для одного, так и для другого направления, максимальные напряжения наблюдаются в полиимидном слое и они намного меньше его предела прочности. А значит, разрушение панели СБ от нормальных напряжений если и возможно, то от факторов, не учитываемых в исследуемых методиках. Например от потери устойчивости слоя в момент действия импульсного или динамического механического нагружения при выведении КА на орбиту или в момент раскрытия створок СБ.

Максимальные касательные напряжения наблюдаются в клеевых прослойках, смежных с полиимидным слоем, однако они также намного меньше предела прочности клея на сдвиг. Разрушение конструкции если и возможно, то от сдвига при многоцикловом нагружении. Испытание данной СБ как на термоциклическое нагружение, эквивалентное году нахождения КА на геостационарной орби-

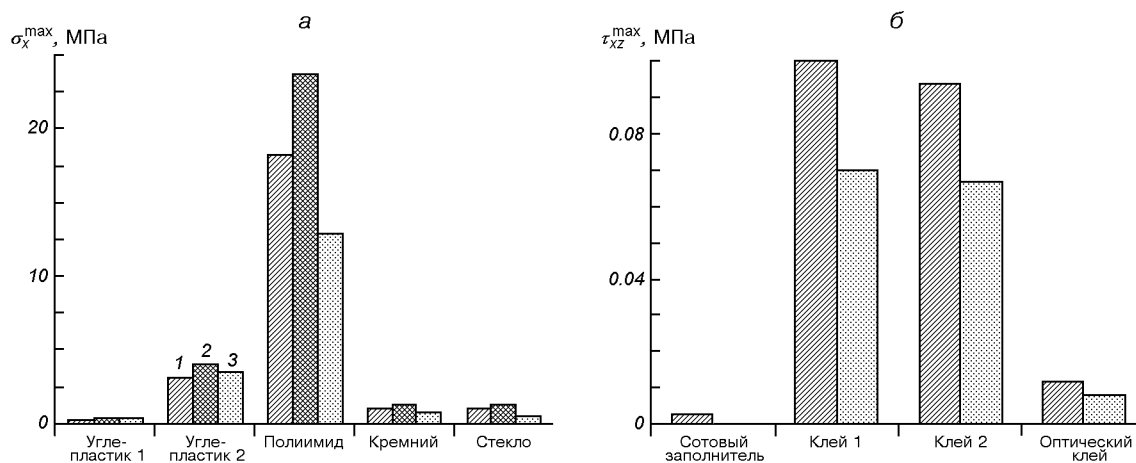


Рис 3. Максимальные значения нормальных σ_x (а) и касательных τ_{xz} (б) напряжений в соединяемых деталях и клеевых прослойках соответственно, полученные по трем рассматриваемым методикам: 1 — одномерная, 2 — двумерная, 3 — МКЭ

те, так и на термоудар, не привело не только к разрушению конструкции панели, но и к заметной деградации ее свойств. Эти факты, а также результаты математического моделирования говорят о высоком эксплуатационном ресурсе конструкции.

Хотелось бы отметить, что разница в значениях напряжений, полученных по исследуемым методикам и МКЭ достаточно велика. Однако, в данном случае, это не существенно, поскольку сравниваются достаточно малые значения напряжений, намного меньше предела прочности, а качественно характер распределения напряжений в конструкции остается тем же, что позволяет проводить оперативный анализ НДС конструкции. Кроме того, подобный факт может также быть связан с погрешностью конечно-элементной модели. В целом можно сделать вывод о применимости рассматриваемых моделей для определения и анализа НДС солнечной батареи.

Результаты расчетов по квазиплоской и одномерной моделям, несмотря на разницу в подходах, дают различные результаты лишь по нормальным напряжениям. Таким образом, для определения и анализа НДС слабонагруженной конструкции СБ КА рационально применять простую одномерную модель.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ БАТАРЕИ НА ЕЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

Одной из основных задач для конструктора сложной техники являются вопросы оптимизации разрабатываемой конструкции, определения ее рациональных параметров. Задача многопараметрической оптимизации является достаточно сложной для существующего на данный момент уровня математического обеспечения, а в некоторых случаях эта проблема не решается математическими методами. Солнечная батарея в полной мере относится к такому классу конструкций, ввиду наличия большого количества физико-механических характеристик входящих в нее материалов и разнообразия геометрических параметров этого соединения. Для проведения процесса оптимального проектирования СБ необходимо предварительно определить степень влияния этих параметров на НДС и выработать ряд рекомендаций по подбору оптимальных параметров и характеристик СБ.

Проведено параметрическое исследование влияния геометрических и жесткостных характеристик материалов, входящих в СБ на ее НДС. В качестве основных геометрических параметров СБ принимаются: линейные размеры панели (ее длина и ширина) и толщины соединяемых слоев и клеевых

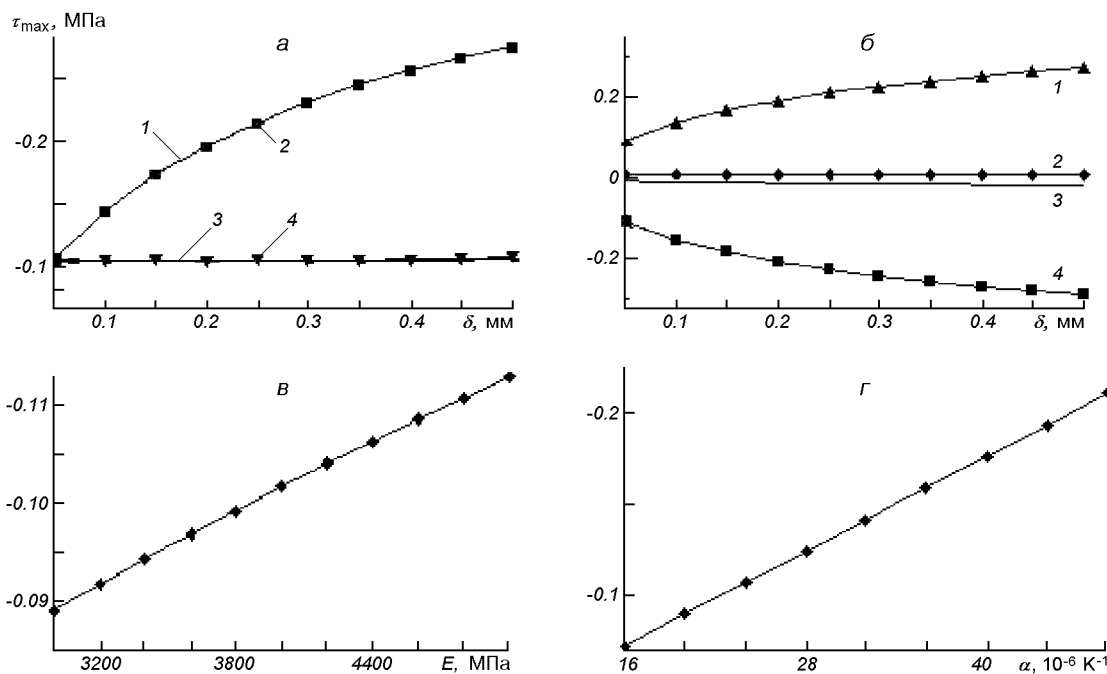


Рис. 4. Зависимости максимальных касательных напряжений τ_{max} СБ: а — от толщины δ углепластика (1), полиимида (2), кремния (3) и стекла (4); б — в каждом слое от толщины δ полиимида (1 — клей 2, 2 — оптический клей, 3 — сотовый наполнитель, 4 — клей 1); в, г — в нижнем клее от модуля упругости E и от коэффициента α термического расширения полиимида

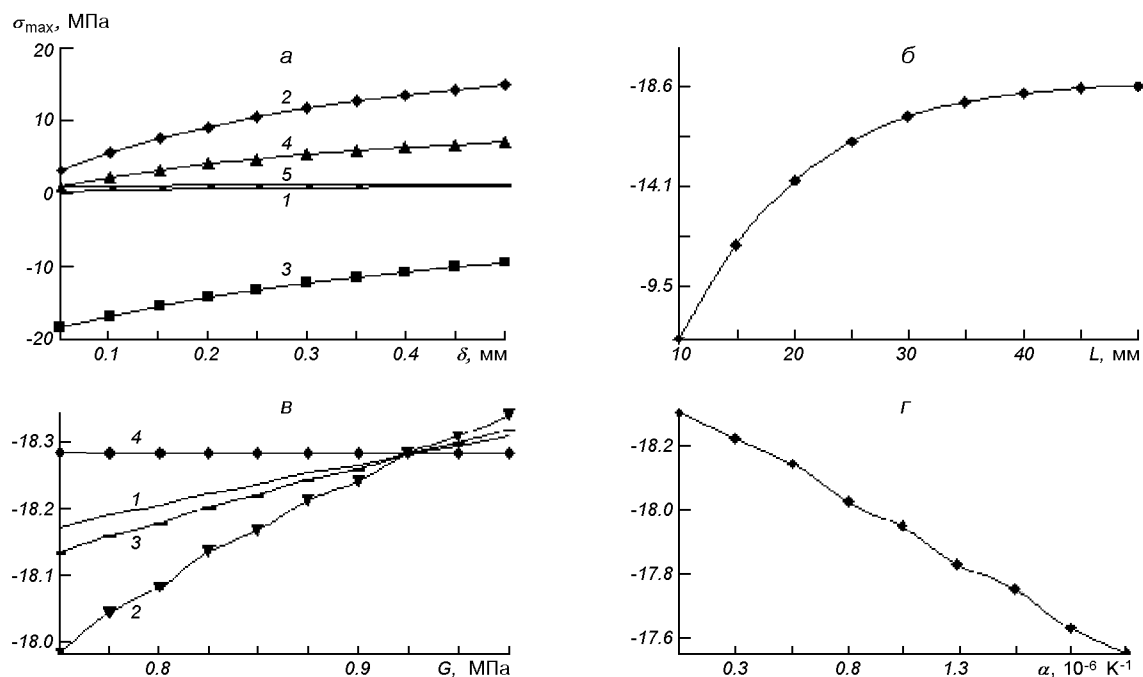


Рис. 5. Зависимости максимальных нормальных напряжений σ_{\max} : а — в каждом слое от толщины δ полиимида (1 — углепластик, 2 — углепластик, 3 — полиимид, 4 — кремний, 5 — стекло); б — от длины L соединения; в — в полиимиде от модуля сдвига G клеев (1 — нижний клей, 2 — нижний и верхний клей, 3 — верхний клей, 4 — оптический клей); г — в полиимиде от коэффициента термического расширения α углепластика

прослойк, а в качестве упругих характеристик: модуль упругости соединяемых деталей E , модуль сдвига клеевых прослойк G , КЛТР α и коэффициент Пуассона μ .

Результаты параметрического исследования показали, что максимальное влияние на сдвиговую прочность СБ оказывают геометрические и жесткостные характеристики полиимидного слоя и двух прилегающих к нему клеевых прослойк (рис. 4). При увеличении толщины полиимида наблюдается существенный рост уровня касательных напряжений. Такая же зависимость наблюдается и для углепластиковой обшивки сотовой панели, составляющей силовую основу батареи. Влияние же толщины кремния и особенно защитного стекла пренебрежимо мало, поэтому параметры этих слоев выбираются из технологических или других соображений (радиационной стойкости, например). Увеличение толщины клеевых прослойк приводит к уменьшению уровня действующих в них касательных напряжений, причем, в какой-то момент (в данном случае при 0.2 мм) максимум касательных напряжений переходит из одной клеевой прослойки в другую (из нижней в верхнюю). То же происхо-

дит и при одновременном изменении толщин соседних клеевых прослойк.

Повлиять на уровень нормальных напряжений в конструкции можно за счет некоторого увеличения толщины полиимидного слоя (до 0.3 мм) (рис. 5, а). Это приведет к некоторому уменьшению нормальных напряжений в нем. Однако это же ведет к увеличению касательных напряжений. Аналогичное влияние оказывает также толщина слоя углепластика, ближайшего к полиимидному слою. При $\delta = 0.3$ мм, происходит переход максимума напряжений из полиимидного слоя в слой углепластика.

При увеличении длины и ширины фотоэлемента, уровень напряжений в конструкции увеличивается асимптотически и после определенной длины практически не меняется (рис. 5, б). Это значение длины определяет область стабилизации напряжений. Для исследуемой батареи данное значение $L_{\text{кр}} = 40$ мм. Именно оно и бралось в качестве базового для исследования прочности батареи.

При увеличении толщины сотового заполнителя напряжения в конструкции уменьшаются, хотя и незначительно. Зависимость нормальных напряжений от толщины клеевых прослойк незначительна.

Существенное влияние на НДС СБ оказывают также упругие характеристики входящих в нее материалов соединяемых деталей клеевых прослоек.

В итоге были даны некоторые рекомендации конструкторам по созданию оптимальных с точки зрения прочности панелей СБ. Так, минимизировать уровень сдвиговых напряжений в клеевых прослойках СБ можно за счет постановки углепластиковых обшивок и полиимидной пленки минимальной толщины и минимально возможной жесткости (рис. 4, в). Уровень нагруженности конструкции от сдвиговых напряжений снижается также при подборе материалов с близкими КЛТР. Для всех деталей наблюдается повышение уровня касательных напряжений в клеевых прослойках с увеличением соответствующего параметра (рис. 4, г), причем наибольшее влияние оказывает КЛТР полиимидного слоя и кремния. Увеличение податливости клеевого слоя приводит к уменьшению уровня его нагруженности. Подобные зависимости наблюдаются и для нормальных напряжений.

Повлиять на геометрические характеристики клеевых прослоек сложно, да и их воздействие на НДС невелико. В то же время, увеличение модуля сдвига и предела прочности на сдвиг клеевых прослоек очень желательно, поскольку это позволит, с одной стороны, снизить уровень напряжений в СБ, а с другой стороны позволит создавать конструкции с большим сроком эксплуатации (рис. 5, в, г).

ВЫВОДЫ

1. На базе модели адгезионного соединения разработаны две унифицированные аналитические методики определения НДС СБ КА при термическом нагружении, основанные на расчетных схемах различного уровня точности.

2. Проведено определение и анализ НДС модельной конструкции СБ. Конструкция СБ максимально нагружена на теновом участке орбиты. Максимальные напряжения наблюдаются в клеевых прослойках, совместных с полиимидным слоем, однако они намного меньше предела прочности клея на сдвиг, что говорит о работоспособности рассматриваемой конструкции. Натурные испытания, проводившиеся в СКТБ ФТИНТ НАНУ подтвердили это. Сравнение с результатами тестового моделирования, проводимого по МКЭ и квазиплоской модели, даст основание сделать вывод о применимости рассматриваемой модели для определения и анализа НДС тонкопленочных структур СБ КА.

3. Максимальное влияние на сдвиговую прочность СБ оказывают геометрические и жесткостные

характеристики полиимидного слоя и двух прилегающих к нему клеевых прослоек. При увеличении толщины полиимида наблюдается существенный рост уровня касательных напряжений. Увеличение же толщины клеевых прослоек приводит к уменьшению уровня действующих в них касательных напряжений. Повлиять на уровень нормальных напряжений в конструкции можно за счет некоторого увеличения толщины полиимидного слоя (до 0,3 мм). Это приведет к некоторому уменьшению нормальных напряжений в нем. Однако это же ведет к увеличению касательных напряжений. Аналогичное влияние оказывает также толщина слоя углепластика, ближайшего к полиимидному слою. При увеличении длины соединения напряжения в СБ асимптотически увеличиваются, стремясь к определенному значению.

4. Минимизировать уровень сдвиговых напряжений в клеевых прослойках СБ можно за счет постановки углепластиковых обшивок и полиимидной пленки минимальной толщины и минимально возможной жесткости. Уровень нагруженности конструкции от сдвиговых напряжений снижается также при подборе материалов с близкими КЛТР.

Повлиять на геометрические характеристики клеевых прослоек тяжело, да и их воздействие на НДС невелико. В то же время, увеличение модуля сдвига и предела прочности клеевых прослоек на сдвиг очень желательно, поскольку это позволит, с одной стороны, снизить уровень напряжений в СБ, а с другой стороны, позволит создавать конструкции с большим сроком эксплуатации.

Надо заметить, что представляет интерес не только оптимизация рассматриваемой конструкции по критерию снижения температурных напряжений, но и по способности конструкции панели выдерживать механическое нагружение, возникающее в процессе эксплуатации КА. Механическое нагружение, как было сказано ранее, возникает при выведении КА на орбиту и при раскрытии панелей СБ. Несмотря на кратковременность данного воздействия, оно во многом определяет дальнейшую работоспособность конструкции. Однако в данной работе механическое нагружение не рассматривается. Подобное исследование представляет интерес в отдельности и может быть проведено при дальнейшем совершенствовании представленных моделей.

1. Безручко К. В., Гайдуков В. Ф., Губин С. В. и др. Солнечные батареи автоматических космических аппаратов. — Харьков: Харьков. авиац. ин-т, 2001.—С. 165—171.
2. Белан Н. В., Безручко К. В., Елисеев В. Б. и др. Бортовые энергосистемы космических аппаратов на основе солнечных и химических батарей. Учеб. пособие. — Харьков: Харь-

ков. авиац. ин-т, 1998.—Ч. 1.—192 с.

3. Карпов Я. С., Коваль К. В. Методика определения напряженно-деформированного состояния многослойных адгезионных соединений // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов.—1999.—Вып. 16 (3).—С. 85—91.
4. Карпов Я. С., Кривенда С. П., Рябков В. И. Проектирование и конструирование соединений деталей из композиционных материалов. — Харьков: ХАИ, 1997.—200 с.
5. Коваль К. В. Учет ширины при определении напряженно-деформированного состояния многослойных адгезионных соединений. // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов.—2001.—Вып. 27 (4).—С. 106—112.

CALCULATIONS FOR STRESS-STRAINED STATE OF A PANEL OF A SOLAR ARRAY UNDER THERMAL LOADING CONDITIONS

Wang Xiaoyan, Yu. A. Pokhyl, K. V. Koval',
He Shiyu, R. V. Gavrylov

We developed two unified analytical methods for stress-strained state (SSS) determination of panels of solar arrays of spacecrafts at thermal loading. A determination and an analysis of SSS for solar array testing model are made and the results of the analysis are compared with ones from the finite element method. Some recommendations for panel optimal structure determination are developed on the basis of our parametrical investigation.