

Анализ предельной несущей способности конструкций с сотовым наполнителем

Предложена и реализована модель анализа влияния физико-механических параметров элементов, образующих сотовую конструкцию, а также видов нагрузок и их интенсивностей на показатели предельной несущей способности рассматриваемых конструктивов. Показано, что при малой интенсивности сжимающих сил расчетные напряжения панелей с сотовым наполнителем выше, чем у оребренных конструкций. Кроме того, установлено, что формирование сотового наполнителя из алюминиевой фольги или углеродистой ленты приводит к заметному изменению несущей способности анализируемых конструкций. Установлено, что применение сотовых наполнителей в залонжеронной части рулей вызывает двойной эффект снижения массы этих самолетных агрегатов.

Ключевые слова: сотовая конструкция, несущая способность, панель.

Введение

Трехслойные конструкции с сотовым наполнителем получили широкое распространение в различных областях машиностроения, в особенности при создании самолетных агрегатов. Такие конструкции в виде панелей, оболочечных отсеков и профилированных агрегатов широко применяют в конструкциях летательных аппаратов различного назначения вследствие их высокой эффективности по массе и несущей способности [1].

В самолетах Ан-72, Ан-74, Ан-74-ТК-300, Ан-70, Ан-140, Ан-148 сотовые наполнители используют в интерцепторах, триммерах, сервокомпенсаторах, элеронах, створках шасси и грузолюков, носовых обтекателях, панелях хвостовой части крыла, панелях пола, панелях интерьера (багажные полки, перегородки, панели кухонной мебели и др.).

Хорошо известны разработки ООО НПП «НИКЭ» по сотовым наполнителям и сотовым конструкциям, которые нашли применение в изделиях авиационной и ракетно-космической техники Украины и России: ГП «КБ «Южное» им. М.К. Янгеля», ОАО РКК «Энергия» имени С.П. Королева и др., а также в изделиях конверсионного назначения [2].

Такое широкое использование трехслойных конструкций связано с тем, что они более эффективно работают при сжатии, уменьшают повреждения при отнулевых нагрузках. Кроме того, эти конструкции обладают другими специфическими свойствами: повышенной теплопроводностью, повышенной звукоизолирующей способностью, длительной акустической стойкостью, имеют малую массу при использовании в качестве теплоизоляции гиперзвуковых летательных аппаратов [3].

Реализация этих преимуществ во многом зависит от технологии их изготовления, о чем свидетельствует появление значительного числа исследований на эту тему [4].

Наряду с таким широким распространением трехслойных конструкций и обстоятельно разработанными технологиями их изготовления до сих пор остается недостаточно обоснованным вопрос их применимости в зонах с различной интенсивностью действующих нагрузок и наиболее эффективного использования особенностей конструкционных материалов при их проектировании [5].

Цель и задачи исследования

С учетом приведенных выше фактов целью данной работы является разработка модели анализа влияния физико-химических параметров элементов, образующих сотовую конструкцию, а также видов нагрузок и их интенсивности на показатели предельной несущей способности рассматриваемых конструктивов.

Основные элементы конструкций с сотовыми заполнителями и их физико-химические параметры

На рис. 1 показано типичное конструктивное исполнение трехслойной панели.

Она состоит из несущих слоев: 1 – наружного (δ_n) и 2 – внутреннего (δ_b), сотового заполнителя (3) и слоев клея (4), соединяющего несущие слои и заполнитель в единую конструкцию.

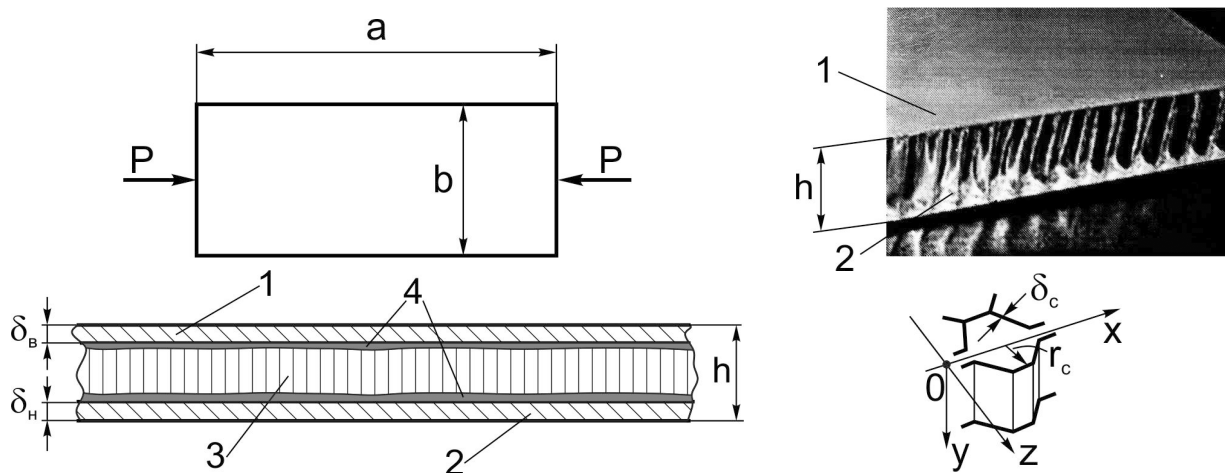


Рис. 1. Основные компоненты и геометрические параметры панели с сотовым заполнителем

Несущие слои 1, 2 для панелей, работающих преимущественно на сжатие (верхние панели крыла), изготавливают, как правило, из алюминиевого сплава В95пчТ2 ($\sigma_b = 500$ МПа, $\sigma_T = 430$ МПа, $\Delta = 8\%$). Допускается также изготовление и из сплава 1163 АТ ($\sigma_b = 435$ МПа, $\sigma_T = 280$ МПа, $\Delta = 10\%$). В обоих случаях удельная плотность этих материалов равна $\gamma = 2750$ кг/м³.

Непременным элементом такой конструкции является сотовый заполнитель 3, изготавливаемый из различных материалов, преимущественно с малой удельной плотностью γ (рис. 2).

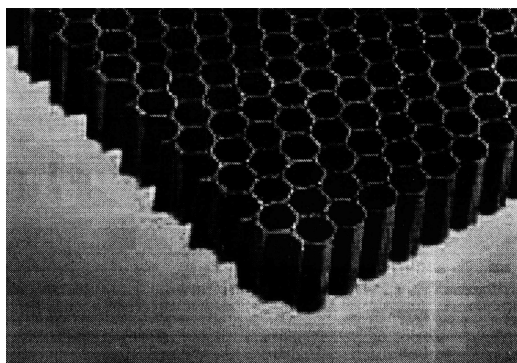


Рис. 2. Сотовый заполнитель, образованный на основе углеродистой ленты [2]

Физико-механические характеристики сотового заполнителя зависят от большого количества параметров, но определяющими являются размер ячейки сотового заполнителя и материал, из которого он изготовлен.

В данной работе рассмотрены конструкции, в которых сотовый заполнитель изготовлен из алюминиевой фольги и углеродистой ленты. Их механические характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические характеристики сотовых заполнителей на основе алюминиевой фольги и углеродистой ленты [2]

Марка сотового заполнителя, тип фольги – размер ячейки, мм, – толщина фольги, мк	Удельная масса, кг/м ³	Предел прочности, не менее, МПа			Модуль упругости при сдвиге, не менее, ГПа	
		При сжатии	При сдвиге		параллельно клеевым полосам	перпендикулярно клеевым полосам
			параллельно клеевым полосам	перпендикулярно клеевым полосам		
Алюминиевая фольга АМг-2Н, 5052						
АМг2-Н-2,5-20	32-37	0,99	0,69	0,45	0,1541	0,0866
АМг2-Н-3,0-20	29-31	0,71	0,52	0,36	0,1208	0,0788
АМг2-Н-3,5-20	24-27	0,62	0,44	0,3	0,101	0,0569
(5052)-3,5-30	35-40	1,07	0,79	0,51	0,1548	0,0927
(5052)-5,0-30	24-27	0,88	0,45	0,28	0,0883	0,051
АМг2-Н-5,0-40	31-36	0,95	0,7	0,45	0,146	0,0877
АМг2-Н-6,0-50	32-34	1,07	0,76	0,51	0,1525	0,0806
Алюминиевая фольга 5056						
5056-2,5-23	35-40	1,4	1,06	0,65	0,1663	0,0894
5056-3,0-23	32-37	1,11	0,8	0,54	0,14	0,0902
5056-3,5-23	27-31	0,91	0,68	0,46	0,1276	0,0842
5056-5,0-23	20-21	0,45	0,37	0,28	0,0914	0,0421
5056-6,0-23	16-17	0,3	0,27	0,2	0,0583	0,0293
Алюминиевая фольга А5Т, 3003						
А5Т-5,0-40П	33	0,822	0,447	0,313	0,127	0,0835
Углеродистая лента						
УСП-5-117 ЭЛУР + ЭНФБ 2x0,13 +45°, -45°	11,7· 10 ⁻⁵	10,1	6,586	4,076	0,6504	0,3662
УСП-5-40 IMS-65 +ЭНФБ 4x0,02 +45°, -45°, -45°, +45°	4,0· 10 ⁻⁵	2,3	2,4	1,34	0,2704	0,1736

Приведенные в табл. 1 данные свидетельствуют о том, что эти заполнители можно применять в наиболее нагруженных самолетных агрегатах.

Совокупность несущих слоев и заполнителя единым конструктивом делает клей, который наносится на сопредельные полосы отдельных ячеек, а также в местах соединения торцов ячеек с основными несущими слоями.

В качестве клеев в рассматриваемых конструкциях чаще всего используют ВК-9, ВК-36Р, ВК-36, ВК-41, ВК-46. Эти клеи успешно выполняют роль связующего элемента, но при этом в сотовую конструкцию добавляется дополнительная

масса. Так, на соединение сот между собой затраты массы в существенной мере зависят от размера ячеек (табл. 2).

Таблица 2

Масса клея при соединении ячеек заполнителя
толщиной 23 мм из алюминиевой фольги

Наименование показателей	Клей ВК-36			Клей ВК-41			Клей ВК-46		
	ячейка			ячейка			ячейка		
	2,5	5,0	6,0	2,5	5,0	6,0	2,5	5,0	6,0
Масса клея при нанесении на одну сторону, г/м ²	100 ±10	60 ±10	50 ±10	100 ±10	60 ±10	50 ±10	100 ±10	60 ±10	50 ±10

Но в весовом балансе трехслойной конструкции основная добавка массы клея приходится на слои, соединяющие торцы сот с несущими слоями. Для этих мест масса клея становится соизмеримой с массой несущих слоев, что оказывает существенное влияние на весовое совершенство конструкции и в обязательном порядке должно учитываться при оценке весовой эффективности трехслойной панели.

Анализ эффективной несущей способности конструкций с сотовым заполнителем

Наиболее полно трехслойные конструкции проявляют себя при работе на сжатие и сдвиг.

Рассмотрим их работу в таких условиях (рис. 1). Под действием усилия P трехслойная панель может потерять устойчивость. Критические напряжения $\sigma_{кр}$ в этом случае определяются соотношением

$$\sigma_{кр} = \frac{\sigma_{э}}{1 + \alpha}, \quad (1)$$

где $\sigma_{э}$ – эйлеровы напряжения, определяемые по выражению

$$\sigma_{э} = \frac{s\pi^2 E_{н.с}}{\left(\frac{a}{i}\right)^2}, \quad (2)$$

i – радиус инерции. Для трехслойной панели (рис. 1) он примерно равен h ; s – коэффициент учитывающий условия опирания; a – длина панели; $E_{н.с}$ – модуль упругости первого рода материала несущих слоев.

В этих условиях коэффициент α , входящий в выражение (1), принимает вид

$$\alpha = \frac{\sigma_{э}}{G_{xy}} \cdot \frac{\delta_{н} + \delta_{в}}{h}. \quad (3)$$

В выражении (3) G_{xy} – это модуль заполнителя в плоскости $хоу$ (рис. 1). Его величина приведена в табл. 1 и соответствует соотношению

$$G_{xy} = A \frac{\delta_{сот}}{r_{сот}} m_{сот}, \quad (4)$$

где A – статистический коэффициент, зависящий от технологических условий склеивания; $m_{сот}$ – масса сот.

При наличии заполнителя величину $\sigma_{кр}$ следует определять с учетом дополнительной массы, привносимой заполнителем в конструкцию. Выразим величину таких приведенных напряжений в виде

$$\sigma_{прив} = \sigma_{кр} \frac{m_{н.с}}{m_{н.с} + m_{зап}}, \quad (5)$$

где $m_{н.с}$ и $m_{зап}$ – массы несущих слоев и заполнителя.

При работе трехслойной панели на сдвиг ее критические напряжения оцениваются выражением

$$\tau_{кр} = \frac{k_1 k_2 k_3}{(b/h)^2} E_{н.с}, \quad (6)$$

где k_1, k_2, k_3 – коэффициенты, зависящие от условий нагружения составляющих трехслойной панели:

$$k_1 - f(a, b) = 5 \dots 9; k_{1min} = 5;$$

$$k_2 - f(\delta_H, \delta_B) = 2 \dots 3; k_{2min} = 2;$$

$$k_3 - f(G_{yz}) = 1 \dots 6; k_{3min} = 1;$$

$$\text{произведение } (k_1 \cdot k_2 \cdot k_3) = 10;$$

$E_{н.с}$ – модуль первого рода несущих слоев.

Для аналогичной обшивки с простым оребрением (см. рис. 1)

$$\tau_{кр} = \frac{k \cdot E_{н.с}}{(b/\delta)^2}, \quad (7)$$

при этом $k_{min} = 5$.

На основе выражений (1) – (5) на рис. 3 показаны величины расчетных напряжений для трехслойных панелей различного конструктивного исполнения.

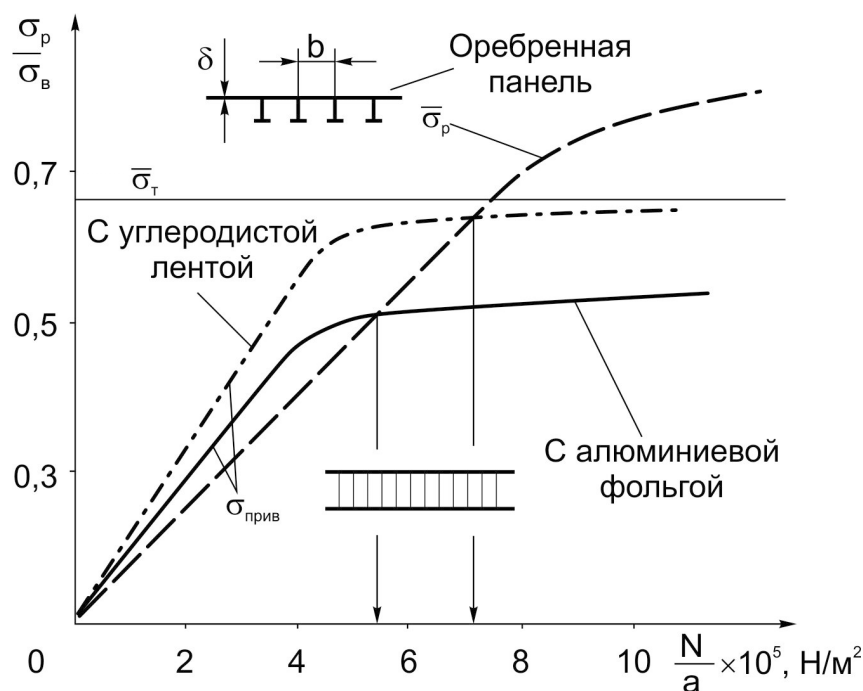


Рис. 3. Сравнительная оценка расчетных напряжений в трехслойных панелях различного конструктивного исполнения. Здесь $N = P/b$

Из показанных на рис. 3 данных вытекают следующие выводы:

– при малых интенсивностях нагрузок предельные расчетные напряжения у трехслойных конструкций на 12...17% выше, чем у простой панели со стрингерным набором;

– в конструкции сотовый наполнитель, которой образован из углеродистой ленты, предельные расчетные напряжения выше, чем в трехслойной конструкции с сотовым наполнителем, образованным из алюминиевой фольги, во всем диапазоне интенсивностей нормальных сил.

А из сравнения данных по критическим напряжениям сдвига, полученных на основе выражений (6) и (7) следует, что трехслойные стенки, работающие на сдвиг, по своей несущей способности в 1,5 – 2 раза превосходят обычные стенки, подкрепленные стойками.

Особая роль в повышении эффективности принадлежит конструкциям с сотовым наполнителем в рулевых поверхностях самолета: в элеронах, рулях высоты и направления.

Как правило, в таких агрегатах применяют сотовые наполнители в залонжеронной части рулей (рис. 4).

В этом случае конструкцию, состоящую из стенок и стоек (2), заменяют на трехслойную конструкцию со сплошным сотовым наполнителем (1).

Залонжеронная часть руля (при наличии лонжерона (3)) в основном работает на кручение. А как показано в выражениях (6) и (7), у трехслойной конструкции в этом случае расчетные напряжения $\tau_{кр}$ в 1,5 – 2 раза выше, что и позволяет уменьшить массу отсека руля, расположенного за его осью вращения.

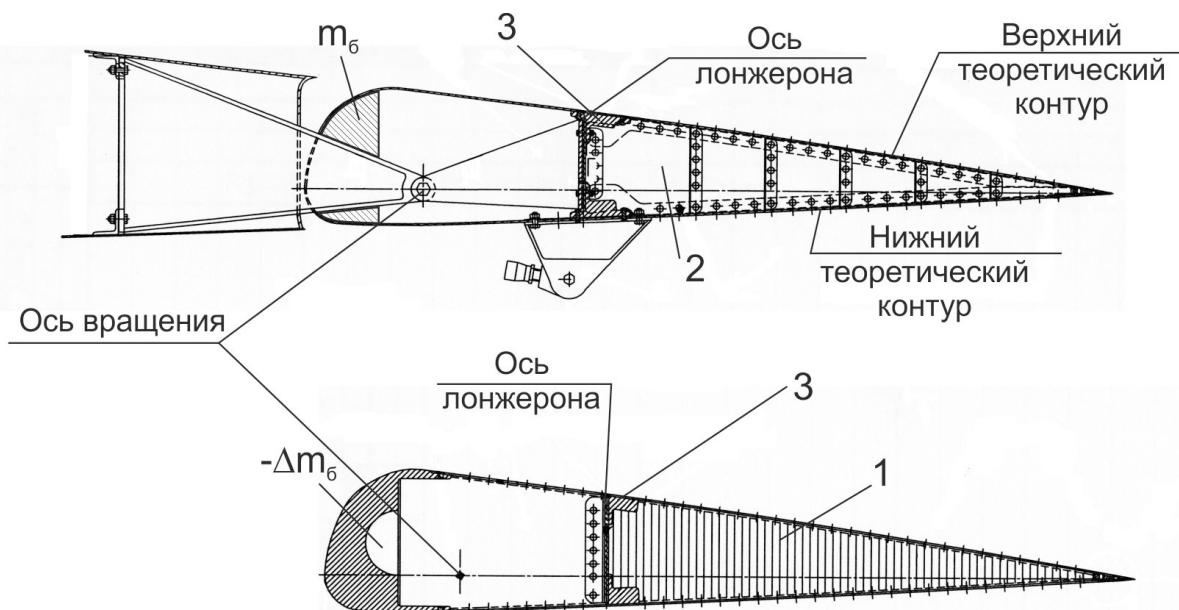


Рис. 4. Варианты конструктивного исполнения руля высоты

Поскольку все рулевые поверхности должны быть сбалансированы по массе относительно оси вращения, то представляется возможным уменьшить массу балансира ($-\Delta m_b$), расположенного в носовой части руля. Таким путем достигается двойной эффект по снижению массы руля ($-\Delta m_b$, $-\Delta m_{3,ч}$) от применения сотовых наполнителей в залонжеронных частях элеронов, рулей высоты и направления.

Выводы

1. Предложена и реализована модель анализа влияния физико-механических параметров элементов, образующих сотовую конструкцию, а также видов нагрузок и их интенсивности на показатели предельной несущей способности, рассматриваемых конструктивов.

2. Показано, что при малых интенсивностях поперечных сил предельные расчетные напряжения у трехслойных конструкций с сотовыми заполнителями на 12...17% выше, чем у простой оребренной панели со стрингерным набором.

3. В конструкциях, заполнитель которых образован из углеродистой ленты, предельные расчетные напряжения выше, чем у конструкций с сотовым заполнителем из алюминиевой фольги, на 8...12% во всем диапазоне интенсивностей сжимающих усилий.

4. Для конструкций, работающих в основном в условиях сдвига, преимущество трехслойных конструкций с сотовым заполнителем по приведенным напряжениям сдвига имеет место во всем диапазоне интенсивности перерезывающих сил.

5. К существенному снижению массы приводит применение сотовых конструкций в залонжеронных частях рулевых поверхностей (элеронов, рулей высоты и направления) как за счет замены стеночной конструкции на более легкий сотовый заполнитель, так и вследствие уменьшения балансирующей массы впереди оси вращения руля.

Список литературы

1. Панин, В. Ф. Конструкции с сотовым заполнителем [Текст] / В. Ф. Панин. – М.: Машиностроение, 1982. – 152 с.
2. Альбом по сотовым заполнителям и сотовым конструкциям: каталог / Разработки предприятия «НИКЭ», Днепропетровск, 2012. – 102 с.
3. Берсудский, В.Е. Технология изготовления сотовых авиационных конструкций [Текст] / В. Е. Берсудский, В. Н. Крысин, С. М. Лесных. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.
4. Иванов, А.А. Новое поколение сотовых заполнителей для авиационно-космической техники [Текст] / А. А. Иванов, С. М. Кашин, В. И. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 436 с.
5. Гайдачук, В. Е. Концептуальные подходы к оптимизации по массе многоотсековых сотовых конструкций летательных аппаратов [Текст] / В. Е. Гайдачук, В. В. Кириченко, В. И. Сливинский // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 43(4). – Х., 2005. – С. 7-26.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. П. А. Фомичев, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков

Поступила в редакцию 21.04.14

Аналіз граничної несучої здатності конструкцій зі стільниковим заповнювачем

Запропоновано та реалізовано модель аналізу впливу фізико-механічних параметрів елементів, які утворюють стільникові конструкції, а також видів навантажень та їхніх інтенсивностей на показники граничної несучої здатності розглянутих конструктивів. Показано, що при малій інтенсивності стискних сил розрахункові напруги панелей зі стільниковим заповнювачем вищі, ніж у конструкцій з орєбренням. Окрім того, встановлено, що формування стільникового заповнювача з алюмінієвої фольги або вуглецевої стрічки також приводить до помітної зміни несучої здатності конструкцій, які було проаналізовано. Установлено, що застосування стільникових конструкцій у залонжеронній частині рулів спричиняє подвійний ефект щодо зниження маси цих агрегатів літака.

Ключові слова: стільникова конструкція, несуча здатність, панель.

Analysis of the ultimate load capacity of structures with honeycomb

Proposed and implemented is a model of analysis of the influence of physical and mechanical properties of the elements forming the honeycomb structure, as well as types of loads and their intensities on the ultimate load capacity factors of structures under consideration. It is shown that at low intensity of compressive forces the calculated stresses panels with honeycomb higher than structure with ribs have. It is also found that the formation of a honeycomb core made of aluminum foil or carbon ribbon also leads to a noticeable change in the load bearing capacity of structures analyzed. It is shown that the use of honeycomb structures in control surfaces part located behind spars leads to a dual effect on weight reduction of the aircraft units.

Keywords: honeycomb, load bearing capacity, panel.