

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2008 С. Н. Тиц

Самарский государственный аэрокосмический университет

Разработана вибрационная модель трёхслойной сотовой конструкции с частичным отслоением обшивки. Исследовано влияние величины отслоения на собственную частоту колебания и амплитудно-частотную характеристику. Проведён сравнительный анализ расчётных значений и экспериментально полученных результатов.

Конструкции сотовые, многослойные панели, отслоение, теория колебаний, контроль технического состояния.

1. Анализ проблемы

Самолёты Ту-204, Ил-96 и Ан-124 стали первыми гражданскими воздушными судами (ВС), эксплуатируемыми на регулярных пассажирских линиях с 1995 г., в конструкциях которых нашли широкое (около 30 % по площади фюзеляжа и крыла) применение сотовые конструкции (СК). Анализ статистики отказов и неисправностей данных типов ВС показал, что с увеличением наработки наблюдается рост количества дефектов СК [1].

Несмотря на наличие большого числа современных методов и средств, способных выявить основные дефекты сотовых конструкций, на эксплуатирующих предприятиях сотовые конструкции контролируются преимущественно при помощи метода свободных колебаний (простукивание изделия с регистрацией изменений характера звука на слух). Это связано с тем, что новейшие средства неразрушающего контроля требуют как значительных финансовых затрат, связанных с их приобретением, так и наряду со своей дороговизной значительно увеличивают трудоёмкость выполняемых работ. В связи с этим современные средства используются лишь для уточнения размеров дефектов при ремонте. В результате из-за несовершенства методов и методик контроля технического состояния СК происходит увеличение простоев летательных аппаратов (ЛА) на техническом обслуживании, что значительно снижает эффективность их использования [2]. Поэтому оперативная оценка состояния сотовых конструкций является актуальной задачей.

2. Постановка задачи

Проблема ресурса и надёжной эксплуатации СК неразрывно связана с оперативным выявлением возможных их неисправностей и дефектов, способных привести к разрушению узла, или с эффективными способами диагностирования их технического состояния в процессе эксплуатации.

При этом на основании совокупности информации об объекте ставится задача экстраполировать его поведение в будущем и установить оптимальный момент для проведения очередной проверки технического состояния (ТС) или прекращения эксплуатации данного объекта.

Известно, что традиционные стендовые механические испытания изделия позволяют выяснить лишь факт выхода его параметров за предельный допуск и не дают информации о предстоящем поведении объекта, особенно в условиях динамических воздействий, когда возможны его отказ и даже неожиданное лавинообразное разрушение конструкции.

Периодические обследования изделия и регламентные работы также не позволяют объективно оценить его техническое состояние и принять решение о целесообразности его дальнейшей эксплуатации.

Плановые отправки изделий на заводы-изготовители для гарантийных ремонтов экономически невыгодны, особенно в условиях их поставки на экспорт.

Суть предлагаемого метода состоит в том, что в процессе жизненного цикла объек-

та через определённые интервалы времени имитируются тестовые динамические воздействия в его контрольных точках, позволяющие по откликам конструкции на эти возбуждения судить о наступлении с течением времени предотказного состояния.

Так у СК при действии на них гармонических возбуждений в некотором частотном диапазоне из-за накопления в процессе эксплуатации повреждений (появления зон «непроклея») происходит изменение жёстких характеристик конструкции. Это приводит к изменению пиковой амплитуды отклика [3]. Кроме того, при этом наблюдается фиксируемый датчиками явный дрейф частот резонансных явлений [4], что в совокупности с применением вейвлет-преобразования для анализа полученного отклика конструкции позволяет сформировать критерий оценки предотказного состояния объекта и создать прототип комплекса для его диагностирования. В качестве базовых амплитуды и частоты резонанса для оценки технического состояния могут быть успешно использованы расчётные значения или значения, замеренные и сохраняемые для каждого устройства перед началом его эксплуатации. Расчётные значения могут быть получены как с применением модели, построенной при помощи теории колебаний, так и конечно-элементной модели.

3. Разработка динамической модели повреждённой сотовой конструкции

3.1 Определение жёсткости при изгибе

Рассматривается элемент сотовой конструкции с отслоением обшивки от сотового

заполнителя. Элемент состоит из верхней и нижней обшивки толщиной h_t и h_b , соответственно, сотового заполнителя толщиной h_c и клеевых слоёв между сотовым заполнителем и обшивками (толщина клеевого слоя в расчётах не учитывается) (рис. 1, 2).

Обшивка представляет собой углепластиковую пластину с коэффициентом жёсткости при растяжении-сжатии A_i и при изгибе D_i . Данные упругие свойства конструкции могут быть определены следующим образом:

$$A_i = \sum_{k=1}^{n_i} \bar{Q}_{11}^k (z_k - z_{k-1}),$$

$$D_i = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^{n_i} \bar{Q}_{11}^k (z_k^3 - z_{k-1}^3), i = t, b, \quad (1)$$

где z_k и z_{k-1} – координаты k -го элементарного слоя относительно нейтральной оси i -го сегмента конструкции, n_i – номер слоя конструкции. \bar{Q}_{11}^k находится как

$$\bar{Q}_{11}^k = Q_{11}^k \cos^4 q + Q_{22}^k \sin^4 q + 2(Q_{11}^k + 2Q_{66}^k) \cos^2 q \sin^2 q,$$

где q – угол ориентации k -го элементарного слоя относительно системы координат конструкции, Q_{ij}^k – коэффициент жёсткости элементарного слоя в системе координат слоя. Образец сотовой конструкции длиной L и шириной b нагружается силой W (рис. 3).

Два слоя обшивки толщиной h_t разделены слоем сотового заполнителя толщиной h_c . Коэффициент жёсткости при изгибе трёх-

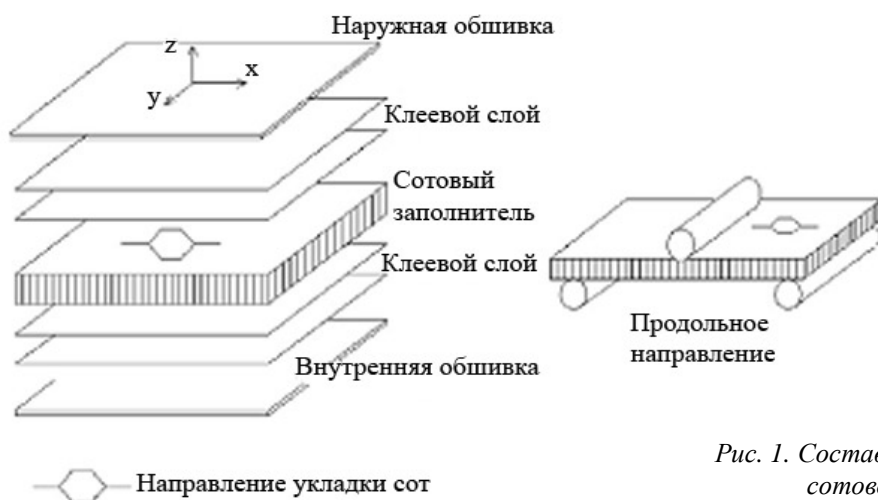
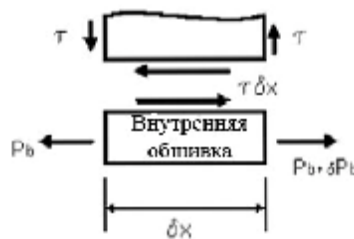
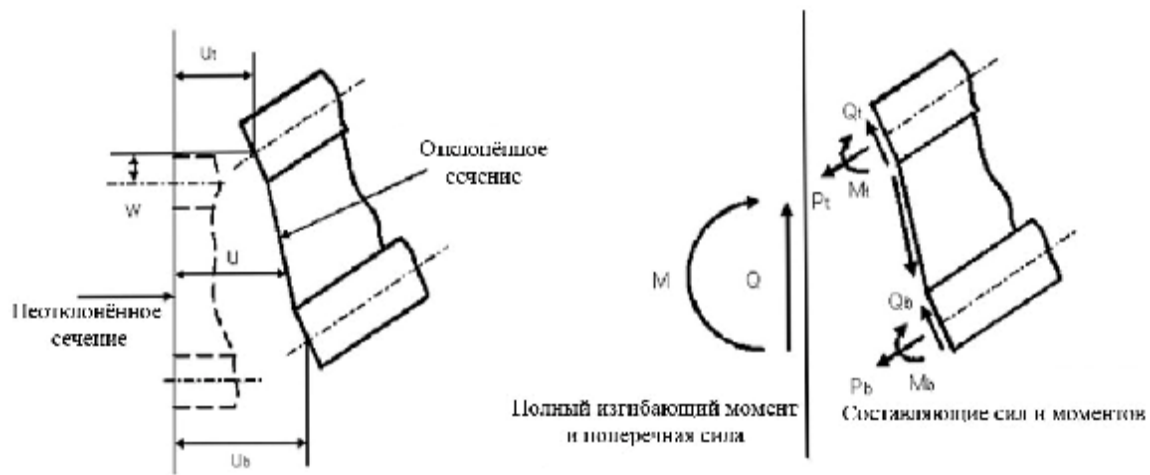
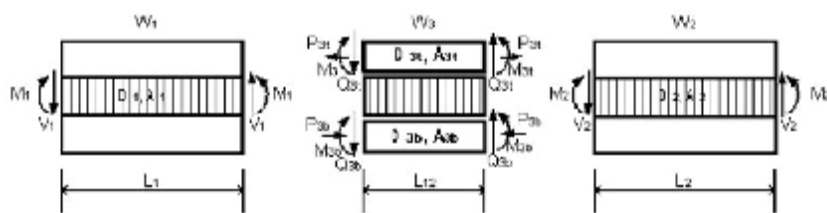
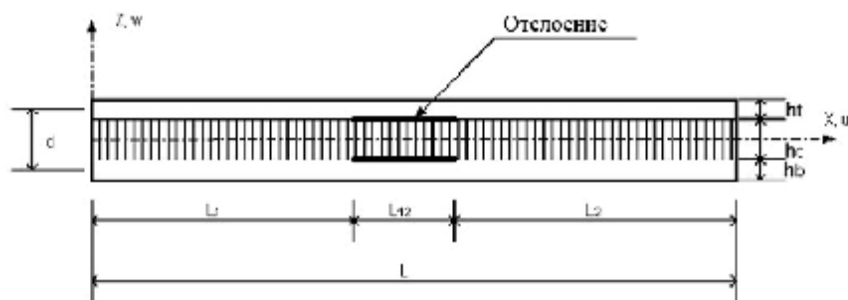


Рис. 1. Состав и направление образца сотовой конструкции



а)



б)

Рис. 2. Модель сотовой конструкции с отслоением обшивки
 а) модель трёхслойной конструкции; б) модель трёхслойной конструкции с отслоением

слоистой конструкции можно определить по следующей формуле:

$$D = \frac{E_f b h_t^3}{6} + \frac{E_f b h_t d^2}{2} + \frac{E_c b h_c^3}{12}. \quad (2)$$

Свободные члены в правой части данного выражения в указанном порядке соот-

ветствуют изгибу обшивки вокруг её центральной оси, изгибу обшивки вокруг центральной оси трёхслойной конструкции и изгибу сотового заполнителя. Изгиб обшивки вокруг центральной оси трёхслойной конструкции играет доминирующую роль, т.к. первый и третий члены составляют менее 1 % от второго члена, если

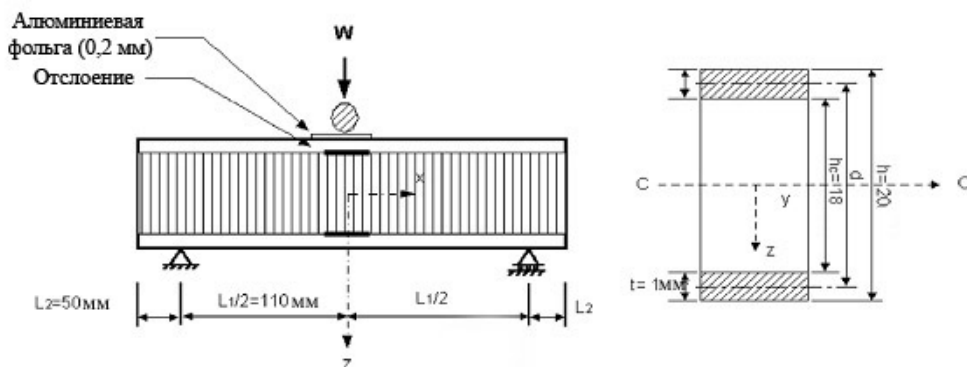


Рис. 3. Схема нагружения сотовой конструкции при определении изгибной жёсткости

$$\frac{d}{t} > 5,77 \frac{E_f}{E_c} \frac{h_t}{h_c} \left(\frac{d}{h_c} \right)^2 > 16,7. \quad (3)$$

У большинства сотовых конструкций $d/h_c = 1$ и h_t/h_c находится в интервале от 0,02 до 0,1 [5]. Если условие (3) выполняется в тех случаях, когда предельные значения отношения E_f/E_c находится между 167 и 835, то в этом случае уравнение (2) можно записать в виде

$$D = E_f \frac{bh_t d^2}{2}. \quad (4)$$

Сотовый наполнитель обладает низкой плотностью. Это обстоятельство играет важную роль при поперечных деформациях и должно быть учтено при расчёте изгибной жёсткости всей сотовой конструкции. Жёсткость трёхслойной конструкции при трёхточечном изгибе можно представить в виде [6]:

$$\frac{W}{d} = \left(1 + \frac{12E_f I}{Gb d^2 L^2} \left(\frac{3h_c d^2}{h_t^2 + 3d^2} \right) \Phi \right)^{-1} \times \frac{8E_f b h_t^3}{L^3} \left(1 + 3 \frac{d^2}{h_t^2} \right), \quad (5)$$

где

$$a^2 = \frac{2G(h_t^2 + 3d^2)}{E_f h_c h_t^3}, \quad c_1 = \frac{aL}{2}, \quad c_2 = aL_1,$$

$$b_h = \frac{\sin hc_1 - (1 - \cos hc_1) \tan hc_2}{\sin hc_1 \tan hc_2 + \cos hc_1},$$

$$\Phi = 1 - \frac{\sin hc_1 + (1 - \cos hc_1) b_h}{c}.$$

Максимальное разрушающее напряжение S_{\max} трёхслойной конструкции при трёхточечном изгибе можно записать в виде

$$S_{\max} = \frac{WL}{4h_t^2} \left(\frac{b_h}{c_1} + \frac{2h_t^2 + h_c h_t}{h_t^2 + 3d^2} \left(1 - \frac{b_h}{c_1} \right) \right). \quad (6)$$

3.2 Определение собственных частот колебания

При дифференцировании уравнения движения трёхслойной конструкции с отслоением необходимо принять во внимание, что деформация сдвига в обшивке и продольное напряжение в наполнителе не учитываются. Поперечные напряжения при изгибе наполнителя и обшивки также не учитываются, так что поперечное перемещение w , поперечных сечений конструкции одинаковы. При анализе трёхслойной конструкции рассматриваются три участка – область отслоения и две соседние области без отслоений обшивки, обозначенные $i=3$ и $i=1, 2$, соответственно.

Для области трёхслойной конструкции без отслоения продольные перемещения центральной плоскости обшивки обозначены u_i и u_b (рис. 2). С учётом геометрии распределения перемещений u_i , u_b и $\partial w / \partial x$ для обшивки выражение для $\partial u / \partial z$ можно записать в виде

$$h_c \frac{\partial u}{\partial z} = u_i + \frac{h_t}{2} \frac{\partial w}{\partial x} - u_b - \frac{h_b}{2} \frac{\partial w}{\partial x}.$$

Деформация сдвига g заполнителя определяется по формуле

$$g = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{d}{h_c} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{u_t - u_b}{h_c}, \quad (7)$$

где $d = h_c + 1/2(h_t + h_b)$. Теперь можно найти напряжение в заполнителе при сдвиге из выражения

$$t = G_s g = G_c \left(\frac{d}{h_c} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{u_t - u_b}{h_c} \right). \quad (8)$$

Причём напряжение при сдвиге можно считать постоянным по всей высоте заполнителя при выполнении условия: $\partial t / \partial z = 0$. Величина усилия сдвига Q_c одинакова и в центральной плоскости обшивки, и, таким образом, по всей высоте заполнителя. Поперечная сила Q_c может быть определена как

$$Q_c = -td. \quad (9)$$

Суммарное усилие сдвига трёхслойной конструкции складывается из поперечных сил верхней Q_t и нижней Q_b обшивок, связанных с изгибными коэффициентами жёсткости D_t и D_b , соответственно, и из поперечной силы Q_c , связанной с напряжением при сдвиге в заполнителе. Следовательно, выражение для определения суммарного усилия сдвига можно записать в следующем виде:

$$Q = D_h \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - G_c d \left(\frac{d}{h_c} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{u_t - u_b}{h_c} \right), \quad (10)$$

где $D_h = D_t + D_b$.

Продольные силы, действующие в средней плоскости обшивок (P_t и P_b), удерживают конструкцию в равновесии, т.к. $P_t = -P_b$, и вычисляются по формулам:

$$P_t = E_t h_t \frac{\partial u_t}{\partial x}, \quad P_b = E_b h_b \frac{\partial u_b}{\partial x}. \quad (11)$$

При рассмотрении продольного равновесия элемента нижней обшивки dx очевидно (рис. 2,а), что

$$dP_b = -tdx, \quad \frac{dP_b}{dx} = -t. \quad (12)$$

Для участков трёхслойной конструкции без отслоения ($i=1, 2$) продольная сила может быть определена исходя из выражений (11) и (12) при условии, что внешнее воздействие на конструкцию отсутствует, т.е. $\partial Q / \partial x = 0$:

$$P_{t1,2} = -P_{b1,2} = \frac{D_h}{D_g d} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - D_g R \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right), \quad (13)$$

$$\text{где } D_g = \frac{G_c}{h_c} \left(\frac{1}{A_t} + \frac{1}{A_b} \right), \quad R = \frac{d^2}{D_h} \left(\frac{A_t A_b}{A_t + A_b} \right).$$

Изгибающий момент в заполнителе M_c , связанный с равными по величине и противоположно-направленными силами P_t и P_b вдоль средней плоскости обшивки, находится как

$$M_c = P_b d = -\frac{D_h}{D_g} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - D_g R \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right). \quad (14)$$

Аналогично поперечному усилию суммарный изгибающий момент для участков трёхслойной конструкции без отслоения будет состоять из трёх компонентов. Он может быть определён как сумма момента, найденного по выражению (14), и момента, действующего на обшивку:

$$M_{c1,2} = -\frac{D_h}{D_g} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - D_g (1+R) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right). \quad (15)$$

С другой стороны, суммарное усилие сдвига можно найти из отношения $Q = \partial M / \partial x$:

$$Q_{1,2} = -\frac{D_h}{D_g} \left(\frac{\partial^5 w}{\partial x^5} - D_g (1+R) \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right). \quad (16)$$

Суммарный изгибающий момент M_3 и поперечное усилие Q_3 для участка трёхслойной конструкции с отслоением находятся из выражений:

$$M_3 = -D_h \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad Q_3 = -D_h \frac{\partial^3 w}{\partial x^3}. \quad (17)$$

После некоторых преобразований для поперечных перемещений w уравнение движения трёхслойной конструкции без отслоений может быть записано включением инерционной силы в статическое уравнение изгиба, как показано в [6]:

$$\frac{\partial^6 w_{1,2}}{\partial x^6} - D_g (1+R) \frac{\partial^4 w_{1,2}}{\partial x^4} + \frac{m}{D_h} \left(\frac{\partial^4 w_{1,2}}{\partial x^4 \partial t^2} - D_g \frac{\partial^2 w_{1,2}}{\partial t^2} \right) = 0. \quad (18)$$

Уравнение движения для участка сотовой конструкции с расслоением можно записать как

$$\frac{\partial^4 w_3}{\partial x^4} + \frac{m}{D_h} \frac{\partial^2 w_3}{\partial t^2} = 0. \quad (19)$$

При условии свободных гармонических колебаний: $w_i(x, t) = w_i(x) e^{j\omega t}$ и расчёта x как $x = Lx$, уравнения (18) и (19) можно записать в виде

$$\frac{\partial^6 w_i}{\partial x^6} - g_r \frac{\partial^4 w_i}{\partial x^4} - g \frac{\partial^2 w_i}{\partial x^2} + g_g w_i = 0, \quad i = 1, 2, \quad (20)$$

$$\frac{\partial^4 w_3}{\partial x^4} - g w_3 = 0, \quad (21)$$

где $g_r = D_g L^2 (1+R)$, $g = \frac{m\omega^2 L^2}{D_h}$, $g_g = g D_g L^2$.

Решение уравнения (20) для участка трёхслойной конструкции $i = 1$ имеет вид:

$$w_1(x) = C_1^1 \cos a_1 x + C_2^1 \sin a_1 x + C_3^1 \cos hb_1 x + C_4^1 \sin hb_1 x + C_5^1 \cos hl_1 x + C_6^1 \sin hl_1 x, \quad (22)$$

где a_1^2 является корнем кубического уравнения $y^3 + g_r y^2 - g y - g_g = 0$, который остаётся действительным при варьировании параметров g_r, g, g_g ; b_1 и l_1 также являются действительными корнями того же кубического уравнения, однако становятся комплексносопряжёнными числами при варьировании параметров g_r, g, g_g . Решение уравнения (20) для участка конструкции $i = 2$ можно записать, как

$$w_2(x) = C_1^2 \cos a_2 x + C_2^2 \sin a_2 x + C_3^2 \cos hb_2 x + C_4^2 \sin hb_2 x + C_5^2 \cos hl_2 x + C_6^2 \sin hl_2 x, \quad (23)$$

где a_2 , b_2 и l_2 определяются так же, как a_1 , b_1 и l_1 , соответственно.

Подобным образом получаем решение для уравнения (23):

$$w_3(x) = C_1^3 \cos g_3 x + C_2^3 \sin g_3 x + C_3^3 \cos hg_3 x + C_4^3 \sin hg_3 x, \quad (24)$$

где $g_3 = g^{1/4}$.

Основные решения для трёхслойной конструкции с отслоением содержатся в выражениях (22)-(24). 16 неизвестных C_i^j ($j = 1, \dots, 6$ для $i = 1, 2$ и $j = 1, \dots, 4$ для $i = 3$) и частота колебаний ω определяются, исходя из граничных условий.

В случае $Atx = 0$ ($x = 0$):

$$w_1(0) = 0, \quad w_1'(0) = 0, \quad (25)$$

$$Q_1 - Q_{1,t} - Q_{1,b} = 0, \quad Q_{1,c}(0) = 0. \quad (26)$$

В случае, если перемещение обшивки u_r, u_b ограничено сжимающей заклёпкой, про-

ходящей через всю трёхслойную конструкцию, $Atx = 1 (x = L)$:

$$M_2(1) = 0, Q_2(0) = 0, P_{1,t} = -P_{1,b} = 0. \quad (27)$$

В случае, если перемещение обшивки u_p , u_b вблизи свободного конца не ограничено $Atx = x_1 (x = L_1)$:

$$w_1 = w_3, \dot{w}_1 = \dot{w}_3, \quad (28)$$

$$M_1 = M_3, Q_1 = Q_2, P_{1,t}d = M_3; \quad (29)$$

$Atx = x_2 (x = L_2)$:

$$w_2 = w_3, \dot{w}_2 = \dot{w}_3, \quad (30)$$

$$M_2 = M_3, Q_2 = Q_3, P_{2,t}d = M_3. \quad (31)$$

Выражения (25) – (31) представляют собой 16 однородных уравнений для определения неизвестных C_i^j из выражений (22) - (24). Характеристическое уравнение для характеристического числа получено путём приравнивания определителя матрицы коэффициентов C_i^j нулю, что является условием существования ненулевого решения. Соответствующие характеристические числа также могут быть определены при решении уравнений.

3.3 Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

Для выявления и определения местоположения повреждений в больших конструкциях необходимо применять методики, основанные на конечно-элементном анализе. Поиск неисправностей, основанный на АЧХ, использует измерения от небольшого числа датчиков и не нуждается в комплексной структурной модели. Сущность метода выявления повреждений, основанного на АЧХ, заключается в сравнении сигналов, полученных при измерении вибрации в высокочастотной области до и после повреждения. Во время поиска повреждений измеренные функции отклика испытываемых образцов должны быть занесены в базу изменений физи-

ческих параметров, соответствующих повреждениям. Существенные изменения в жёсткости и расслоение композитных конструкций влияют на АЧХ предсказуемым образом, так что частота собственных колебаний и скорость затухания повреждённой конструкции могут быть легко пересчитаны для отслоения.

В этом случае динамическую передаточную функцию для повреждённой конструкции можно представить в виде

$$G_{i,j}(f) = \frac{Y_{ij}(f)}{Y_{ii}(f)} = \frac{h_i^* h_j}{h_i^* h_i}, \quad (32)$$

где h - ряд входных данных для матрицы АЧХ приложенного возбуждения, Y_{ij} - поперечная спектральная функция. Тестовое воздействие имеет одну и ту же величину и место приложения во всех экспериментах. Передаточная функция – это отношение отклика спектральной плотности взаимно корреляционной функции между входом i и датчиком j конструкции к входной спектральной плотности автокорреляционной функции в точке i . Это безразмерная комплексная величина, которая показывает, как вибрация, являющаяся функцией частоты, передаётся между точками i и j конструкции. АЧХ не зависят ни от чувствительности, ни от степени свободы или инерционности измеренных спектральных плотностей. Поиск повреждений, основанный на АЧХ, достаточно точен, т.к. относительная вибрация отклика характерна для малых секций конструкции. Разница между АЧХ – это непрерывная функция с большим количеством минимальных и максимальных значений. И если возникает повреждение, то максимальные и минимальные значения сдвигаются относительно друг друга. Чувствительность к изменениям в АЧХ при среднем разрушении по большей части возрастает по мере того, как возбудитель и датчик приближаются к повреждению и возрастает частота возбуждения.

4. Полученные результаты

Расчётные значения всех необходимых для сравнительного анализа параметров были получены для образцов, результаты испытаний которых приведены в [3].

Снижение собственной частоты колебаний, соответствующее отслоению обшивки трёхслойной конструкции, в первую очередь, контролируется с помощью измерения изгибной жёсткости. Собственные частоты сотовой конструкции с отслоением, полученные в ходе вибрационных испытаний, сопоставляются с теоретически полученными результатами. Обшивка состоит из армированного эпоксикарбопласта толщиной 1 мм с наслоением $[0/90/0/90]_s$. Свойства и характеристики верхней и нижней обшивки идентичны. Свойства стеклоткани с предварительной пропиткой смолами и сотового заполнителя приведены в таблицах 1 и 2. На основании выражения (1) вычисляются упругие характеристики для каждого слоя обшивки: $D = 6,80 \text{ Нм}$, $A = 61,46 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$. Отношение $D = E_f b h_f^3 / 6$ позволяет определить эквивалентный модуль Юнга для листа обшивки: $E_f = 40,8 \cdot 10^9 \text{ Па}$.

4.1 Исследование изгибной жёсткости

В первую очередь исследовано поведение трёхслойной сотовой конструкции с от-

слоениями при упругом трёхточечном изгибном нагружении. Коэффициент жёсткости при изгибе для трёхслойной конструкции, рассчитанный по выражению (4), равен $D = 8,16 \cdot 10^3 \text{ Нм}$.

На рисунке 4 показана экспериментальная зависимость нагрузки от перемещения образца без отслоения при трёхточечном изгибе. С использованием выражения (5) вычислена жёсткость трёхслойной конструкции при изгибе – 622 Н/мм, в то время как среднее измеренное значение составило 664 Н/мм. Образец сотовой конструкции разрушился при нагрузке 1695 Н. При такой нагрузке максимальное напряжение, рассчитанное по выражению (6), составило $256 \cdot 10^6 \text{ Па}$. На рисунке 5 видно, что с увеличением величины отслоения коэффициент жёсткости при изгибе снижается.

4.2 Измерение собственных частот колебания

Измерения показывают снижение собственных частот колебания с увеличением площади отслоения трёхслойной конструкции (рис. 6). Пунктирной линией показаны

Таблица 1. Характеристики сотового заполнителя

Параметр, единица измерения	Значение
Плотность, кг/м^3	80,1
Предел прочности при сдвиге в продольном направлении (F_x), Па	$1,90 \times 10^6$
Модуль сдвига в продольном направлении (G_x), Па	$70,3 \times 10^6$
Предел прочности при сдвиге в поперечном направлении (F_y), Па	$1,21 \times 10^6$
Модуль сдвига в поперечном направлении (G_y), Па	$37,2 \times 10^6$

Таблица 2. Характеристики стеклоткани с предварительной пропиткой смолами

Параметр, единица измерения	Значение
Модуль Юнга в направлении волокон (E_1), Па	$120,3 \times 10^9$
Модуль Юнга в поперечном направлении (E_2), Па	$7,63 \times 10^9$
Модуль сдвига (G_{12}), Па	$3,36 \times 10^9$
Коэффициент Пуассона (μ_2)	0,32
Объёмная плотность (r), кг/м^3	1510
Предел прочности на разрыв в направлении волокон (X_T), Па	$2,2 \times 10^9$
Предел прочности на сжатие в направлении волокон (X_C), Па	$1,4 \times 10^9$
Предел прочности на разрыв в поперечном направлении (Y_T), Па	$2,1 \times 10^9$
Предел прочности на сжатие в поперечном направлении (Y_C), Па	$1,3 \times 10^9$
Напряжение сдвига слоя в направлении волокон (S), Па	$0,226 \times 10^9$

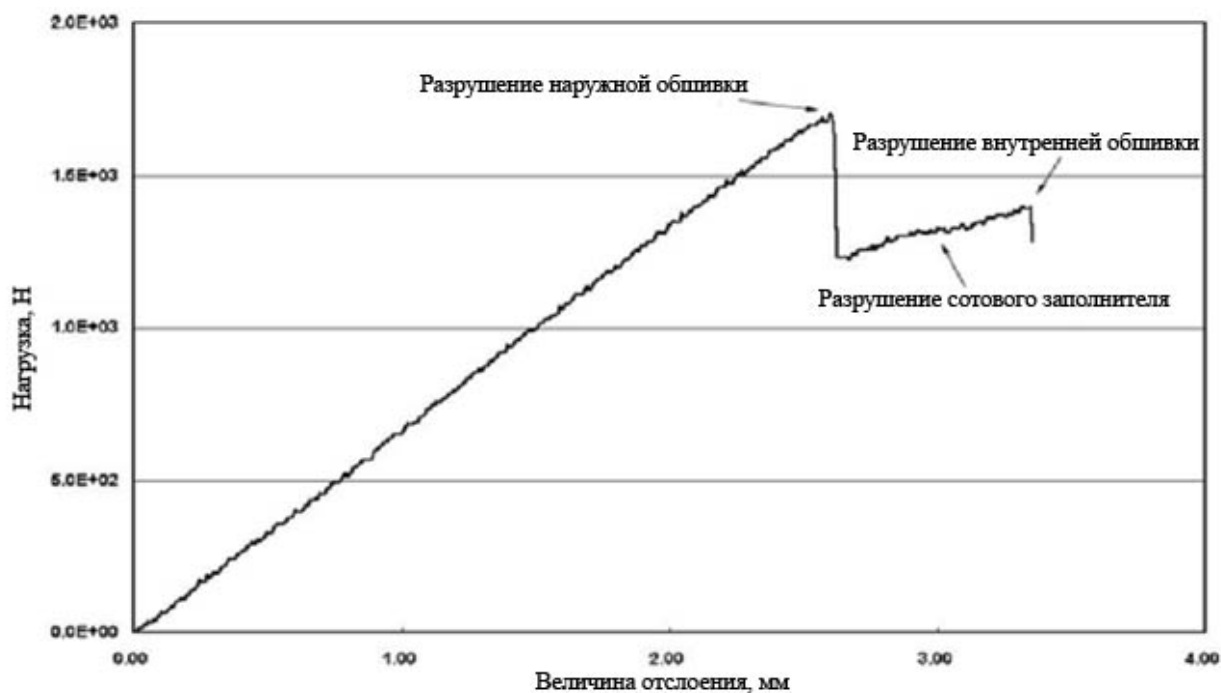


Рис. 4. Экспериментальная зависимость нагрузки от перемещения образца без отслоения при трёхточечном изгибе

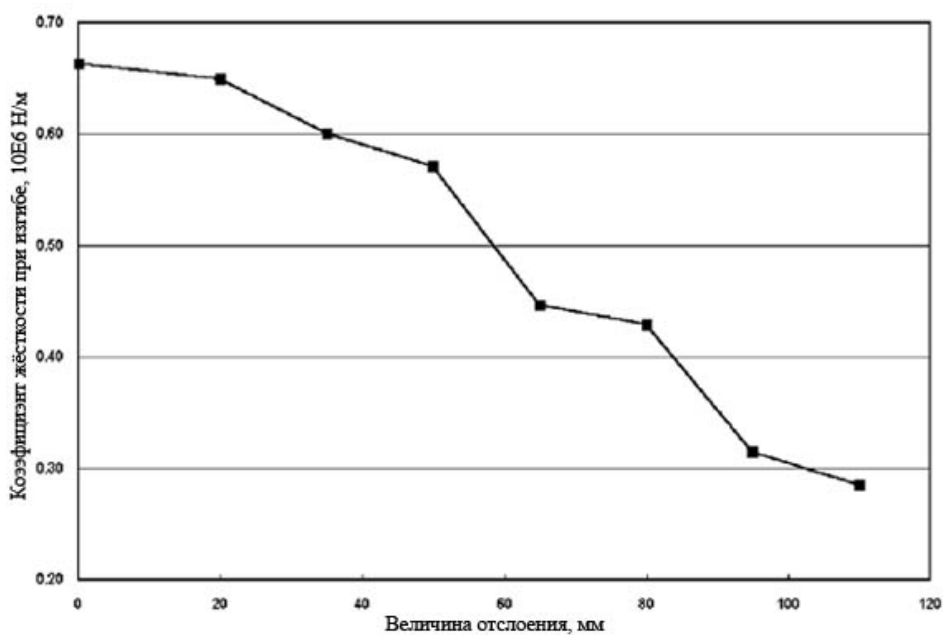


Рис. 5. Зависимость коэффициента жёсткости от величины отслоения

расчётные значения, полученные с помощью вибрационной модели, приведённой выше. Измеренная собственная частота колебания неповреждённой сотовой конструкции соста-

вила 165 Гц, в то время как расчётное значение – 178 Гц. Разница в полученных результатах связана с тем, что в расчётах не учитывалась масса клеевого слоя.

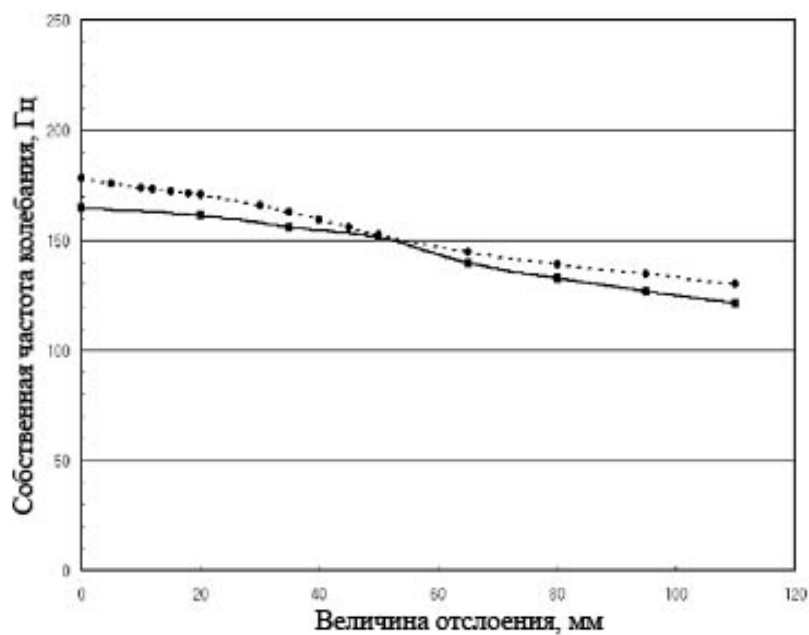


Рис. 6. Теоретическая (...) и экспериментальная (—) зависимости собственной частоты колебания от величины отслоения

4.3 Измерение АЧХ

Как видно на рисунке 7, частотный отклик СК с отслоением смещается в сторону низких частот по мере того, как величина отслоения увеличивается.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что рассчитанные по разработанной виб-

рационной модели значения параметров СК согласуются с экспериментально полученными данными. Следовательно, данная математическая модель может быть использована для решения задач оперативной диагностики элементов конструкции ЛА, выполненных в виде сотовых конструкций.

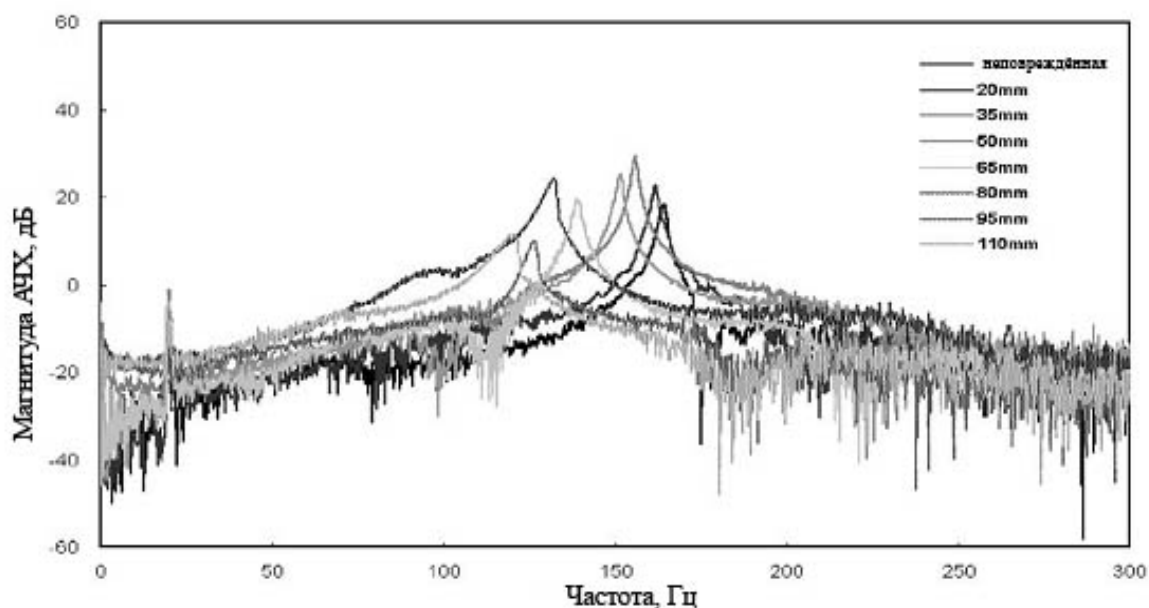


Рис. 7. Магнитуды АЧХ сотовых конструкций с различной величиной отслоения

Библиографический список

1. Тиц, С. Н. Анализ эксплуатационной надёжности планера самолёта Ан-124 «Руслан» [Текст]/С. Н. Тиц//Управление движением и навигация летательных аппаратов: сб. научных трудов XII Всероссийского научно-технического семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. - Самара, 2006. - С. 405-406.
2. Тиц, С. Н. Состояние и проблемы практического применения методов неразрушающего контроля планеров воздушных судов/С. Н. Тиц, А. Н. Коптев, Ф. Е. Ляшко// Известия Самарского научного центра Российской академии наук/Самарский научный центр Российской академии наук. - 2007. – Спец.вып. - С. 164-168.
3. Ким, Х. Ю. Исследование влияния отслоения в трёхслойной сотовой конструкции на её собственные частоты колебания и амплитудно-частотную характеристику /Х. Ю. Ким, В. Хвенг // Композитные конструкции. - 2002. – Вып. 55. - С. 51-62.
4. Ким, Х. Ю. Вибрационный метод выявления повреждений композитных конструкций / Х. Ю. Ким // Акустика и вибрация. - 2003. - Вып. 259. - С. 1131-1146.
5. Ендогур, В. В. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование[Текст]/ А. И. Ендогур, М. В. Вайнберг, К. М. Иерусалимский. – М.: Машиностроение, 1986. - 200 с.
6. Аллен, Х. Г. Анализ и расчёт трёхслойных конструкций [Текст]/ Х. Г. Аллен. - Пергамон Пресс. - Оксфорд, 1969. – 154 с.

Информация об авторе

Тиц Сергей Николаевич, ассистент кафедры эксплуатации авиационной техники Самарского государственного аэрокосмического университета. Область научных интересов: композитные материалы, неразрушающие методы контроля технического состояния авиационных конструкций.