

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДОПУСТИМЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ

© А. Н. Колоскова

Національний аерокосмічний університет ім. М. Е. Жуковського (ХАІ)

Проведено аналіз виникнення та взаємодії похибок, які з'являються при виробництві стільникового заповнювача та тришарової панелі у цілому. Приведено алгоритм визначення граничних допустимих відхилень для тришарової панелі.

Среди большого количества заполнителей трехслойных конструкций наиболее высокими удельными характеристиками прочности, жесткости и специальных свойств (звуко- и теплоизоляция, вибростойкость, теплостойкость и др.) обладает сотовый заполнитель (СЗ), обеспечивающий восприятие более высоких эксплуатационных воздействий на сотовые конструкции (СК) по сравнению с другими [9]. Широкое применение в авиационной ракетно-космической технике СК нашли в агрегатах и панелях оперенья, элеронах, закрылках, в панелях крыла, панелях пола, фюзеляжа, отсеках крыла фюзеляжа, отсеках лопастей несущих винтов вертолетов, крыльях, элевонах, оперении ракет, переборках топливных баков, переходных отсеках космических аппаратов, их герметичных кабинах, корпусах и панелях солнечных батарей спутников и других агрегатах [3].

На сегодняшний день можно констатировать, что научная база для проектирования СК летательных аппаратов трудами отечественных и зарубежных ученых в основном создана [8]. Однако есть ряд задач, без решения которых возможности широкого внедрения СК в известной мере ограничены, а создаваемые изделия располагают значительным запасом нереализованных возможностей по снижению массы и другими критериями. К числу таких задач относится учет влияния погрешностей изготовления СЗ и самой панели на прочностные характеристики трехслойной панели.

Анализ показывает, что эта задача, как и многие другие, по своей постановке и направленности находится на стыке технологии производства и проектирования СК летательных аппаратов.

В работе [5] представлена схема проектирования СК с учетом технологии их изготовления, демонстрирующая процесс появления погрешностей изго-

товления СЗ в трехслойной панели. Их можно разделить на три группы несовершенств, возникающих на разных этапах:

- при изготовлении полуфабрикатов СЗ (фольги, бумаги и т.д.) — погрешность толщины  $\Delta t$ .
- на этапе сборки и растяжки сотоблока — погрешности размеров ячейки  $\Delta a$  и  $\Delta b$  и угла растяжки  $\Delta \beta$
- в процессе конечной сборки панели — погрешность угла укладки сотоблока  $\Delta \alpha$ .

Приведенная классификация технологических несовершенств отражает характер и последовательность их возникновения. Пять диапазонов предельных значений полученных отклонений в комплексе образуют профиль технологического несовершенства (ПТН) СЗ трехслойной панели, характеризующий как степень точности изготовления заполнителя, так и влияние ее на физико-механические характеристики всей трехслойной панели. Места появления несовершенств и соответствующие им параметры СЗ показаны на рис. 1.

Задача обеспечения заданных прочностных свойств панели, таким образом, сводится к определению оптимальных значений параметров ПТН. Сложность ее решения состоит прежде всего в большом количестве параметров (пять). Однако их анализ позволяет уменьшить количество параметров за счет введения дополнительных условий, вытекающих из характера их происхождения.

Несовершенства разных групп возникают на разных стадиях производства СЗ трехслойной панели и практически не влияют на процесс возникновения друг друга. Этот факт позволяет для упрощения расчетов при определении комплекса параметров ПТН отдельно задавать значения  $\Delta t$  и  $\Delta \alpha$ , а затем вычислять значения допустимых отклонений второй группы.



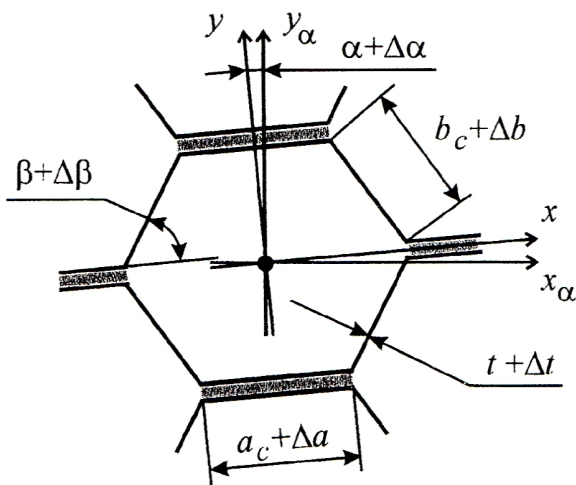


Рис. 1. Технологические несовершенства изготовления СЗ

Размеры ячейки сот во время растяжки сотопакета практически не изменяются при условии качественного изготовления СЗ. В случае неполного обезжиривания поверхности листов материала сот, неполного нанесения клеевых полос, использования некондиционного клея и пр. в процессе растяжки возможно нарушение клеевого слоя, и как следствие, значительное изменение геометрии сот. Однако при строгом соблюдении требований технологии на всех стадиях производства трехслойной панели с СЗ этого не происходит.

Размер стороны склеивания  $a_c$  ячейки в сотопакете равен ширине нанесенной клеевой полосы. Современное оборудование позволяет осуществлять соответствующие технологические операции с высокой точностью. Разные исследователи приводят разные предельные значения получаемого отклонения ширины полосы —  $\pm 0.05$  мм [1],  $\pm 0.1$  мм [6]. В дальнейшем, как уже было сказано, соблюдение технологических требований позволяет исключить изменение этого размера. Таким образом, предельное значение отклонения  $\Delta a$  можно принять равным предельной погрешности нанесения клеевых полос ( $\pm 0.1$  мм). Следует также отметить, что это значение практически не зависит от номинального размера ячейки сот. В процентном отношении для наиболее распространенного диапазона размеров ячеек от 2 до 5 мм это отклонение принимает значения от 5 % до 2 % соответственно.

Погрешность  $\Delta b$  размера свободной стороны ячейки помимо отклонения ширины нанесенной клеевой полосы определяется отклонением расстояния меж-

ду полосами, а также погрешностью сборки сотопакета. Предельные значения отклонения шага полос по разным данным также различны:  $\pm 0.05$  мм [1],  $\pm 0.2$  мм [6]. Возможные погрешности размера  $b_c$ , таким образом, увеличиваются в три раза только за счет влияния погрешности расстояния между клеевыми полосами. Погрешность сборки сотопакета еще больше увеличивает их.

На этапе конечной сборки трехслойной панели производится растяжка сотопакета на величину  $L$ , равную [7]

$$L = 2b_c \sin \beta Z, \quad (1)$$

где  $b_c$  — номинальное значение размера свободной стороны ячейки сот,  $\beta$  — номинальное значение угла растяжки сот,  $Z$  — число рядов ячеек.

С другой стороны, из тех же соображений получим с учетом технологического несовершенства СЗ

$$L = \sum_{i=1}^Z 2(b_c + \Delta b_i) \sin(\beta + \Delta \beta_i), \quad (2)$$

где  $\beta_i$  — значение угла растяжки ячейки в  $i$ -м ряду сот.

Для небольшого участка СЗ отклонения размеров ячейки можно считать постоянными. В этом случае формула (2) преобразуется к виду

$$L = 2(b_c + \Delta b) \sin(\beta + \Delta \beta) Z. \quad (3)$$

Приравняв правые части (1) и (3), получим

$$\Delta \beta = \arcsin \left( \frac{b_c \sin \beta}{b_c + \Delta b} \right) - \beta. \quad (4)$$

Таким образом, отклонение угла растяжки можно определить через известное отклонение размера свободной стороны ячейки сот. Из соображений геометрии  $0 \leq \beta \leq 90^\circ$ . С учетом этого из соотношения (4) можно получить еще одно ограничение:

$$\Delta b \geq \frac{b_c \sin \beta - b_c}{\sin 90^\circ} = b_c (\sin \beta - 1) = \Delta b_\beta.$$

При  $\Delta b < \Delta b_\beta$  возможен разрыв клея или материала сот в процессе растяжки. Как видно, величины  $\Delta b_\beta \leq 0$  и для различных конфигураций сот принимает разные значения. Например, для сот с правильной шестигранной ячейкой ( $\beta = 60^\circ$ )  $\Delta b_\beta = -0.1339b_c$ .

Несовершенства третьей группы возникают на стадии завершающей сборки трехслойной панели и связаны с неточностями укладки СЗ и несущих слоев панели. В практике проектирования трехслойных конструкций могут применяться панели с номинальным значением угла укладки, равным и

отличным от нуля. Из соображений геометрии предельные возможные значения угла  $\alpha = \pm 90^\circ$ .

При разработке методики расчета допустимых погрешностей необходимо прежде всего установить, каким образом на прочностные характеристики панели влияет изменение отклонений параметров в выбранных для них интервалах. В работе [5] представлен метод учета технологических несовершенств при прочностном расчете проектируемой панели. С учетом имеющихся параметров ПТН изменяются значения модулей сдвига СЗ:

$$G_{x\alpha z} = \frac{1}{\frac{\cos^2(\alpha + \Delta\alpha)}{G_{xz}} + \frac{\sin^2(\alpha + \Delta\alpha)}{G_{yz}}},$$

$$G_{y\alpha z} = \frac{1}{\frac{\cos^2(90^\circ + \alpha + \Delta\alpha)}{G_{xz}} + \frac{\sin^2(90^\circ + \alpha + \Delta\alpha)}{G_{yz}}},$$

где  $G_{xz}$  и  $G_{yz}$  — модули сдвига СЗ вдоль его главных осей, определяющиеся по формулам [2]:

$$G_{xz} = \frac{[(a_c + \Delta a) + (b_c + \Delta b)\cos(\beta + \Delta\beta)](t + \Delta t)G_{\kappa}}{[(a_c + \Delta a) + (b_c + \Delta b)]\sin(\beta + \Delta\beta)(a_c + \Delta a)},$$

$$G_{yz} = \frac{(b_c + \Delta b)\sin(\beta + \Delta\beta)}{[(a_c + \Delta a) + (b_c + \Delta b)\cos(\beta + \Delta\beta)](a_c + \Delta a)}(t + \Delta t)G_{\kappa},$$

где  $G_{\kappa}$  — модуль упругости материала сот.

Изменение значений модулей сдвига приводит к изменению пределов прочности панели на сжатие, причем если модуль сдвига увеличивается, то соответствующий предел прочности растет, и наоборот. Дополнительные исследования показывают, что в пределах произвольно выбранного интервала отклонений для любого из параметров ПТН при фиксированных значениях остальных наблюдается монотонное возрастание (убывание) значений модулей  $G_{x\alpha z}$  и  $G_{y\alpha z}$ . Исключение составляет параметр  $\Delta\alpha$ . Как можно видеть, для функций модулей сдвига

$$G_{x\alpha z}(\alpha + \Delta\alpha) = G_{x\alpha z}(-(\alpha + \Delta\alpha)),$$

$$G_{x\alpha z}|_{\alpha + \Delta\alpha=0} = \max(G_{x\alpha z}).$$

$$G_{y\alpha z}(\alpha + \Delta\alpha) = G_{y\alpha z}(-(\alpha + \Delta\alpha)),$$

$$G_{y\alpha z}|_{\alpha + \Delta\alpha=0} = \min(G_{y\alpha z}).$$

Таким образом, если в интервал допустимых значений угла укладки с учетом отклонения  $\alpha + \Delta\alpha$  входит ноль, то при прочностных расчетах в дополнение к двум расчетным точкам на концах интервала следует в качестве третьей расчетной

точки брать соответствующее значение отклонения  $\Delta\alpha = -\alpha$ .

В работе [4] показан порядок расчета предельных допустимых значений погрешностей, входящих в ПТН, для трехслойной панели с НС из углепластика и СЗ из алюминиевой фольги. В процессе расчетов фиксируется значение предельных отклонений размера ячейки склеивания сот  $\Delta a$ , представляющее собой достаточно малую стабильную величину. Далее определяется и фиксируется допустимое значение отклонения угла укладки сотоблока  $\Delta\alpha$ . Погрешность угла растяжки сот  $\Delta\beta$  определяется зависимостью (4). Значения двух оставшихся независимых параметров  $\Delta t$  и  $\Delta b$  определяются совместно и наносятся на график (рис. 2). Процесс повторяется для всех контрольных значений отклонений фиксируемых параметров  $\Delta a$  и  $\Delta\alpha$ . Область допустимых значений погрешностей  $\Delta t$  и  $\Delta b$  представляет собой часть координатной плоскости, ограниченную всеми предельными кривыми (показана на графике штриховкой). Принятое суммарное поле допусков на размеры  $t$  и  $b$  на графике представляет собой прямоугольник (показан серым цветом), который должен полностью входить в определенную область допустимых значений.

Рациональное применение СК в той или иной области должно основываться на принципе достаточности их функциональных характеристик, связанном с экономическим аспектом [6]. Это в свою очередь требует комплексного анализа конструктивно технологических решений применяемых СК с учетом технологии изготовления СЗ на различ-

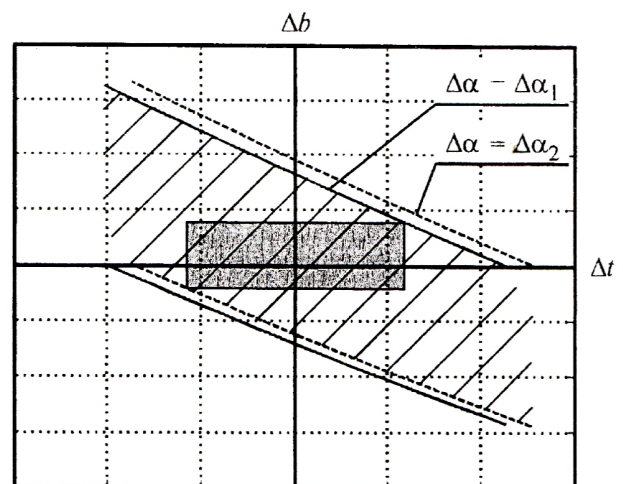


Рис. 2. Предельные допустимые значения погрешностей  $t$  и  $b$



ных стадиях подготовки производства и изготовления изделий. Предложенный подход дает возможность проверки соответствия возникающих отклонений и допусков, принятых в производстве. Однако его практическое применение сопряжено с необходимостью разработки качественно новых методов точного контроля геометрических характеристик СЗ.

1. Берсудский В. Ф., Крысин В. Н., Лесных В. Е. Технология производства сотовых конструкций. — М.: Машиностроение, 1982.—244 с.
2. Гайдачук А. В., Сливинский В. И. О концепции квалитметрии и управления качеством производства сотовых заполнителей и конструкций. // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. унта им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». — Харьков: «ХАИ», 2000.—Вып. 23 (6).—С. 59—65.
3. Иванов А. А. Кашин С. М. Семенов В. И. Новое поколение сотовых заполнителей для авиационно-космической техники. — М.: Энергоатомиздат, 2000.—436 с.
4. Колоскова А. Н. Влияние погрешности угла укладки сотовой панели на прочностные характеристики трехслойной панели. Проектирование трехслойных панелей с сотовым заполнителем с учетом погрешности их изготовления // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». — Харьков: НАКУ, 2003.—Вып. 32 (1).—С. 87—96.
5. Колоскова А. Н. Проектирование трехслойных панелей с сотовым заполнителем с учетом погрешности их изготовле-

ния // Космічна наука і технологія. Додаток.—2002.—8, № 1.—С. 20—25.

6. Панин В. Ф., Гладков Ю. А. Конструкции с заполнителем. Справочник. — М.: Машиностроение, 1991.—272 с.
7. Сидоренкова М. А., Сливинский В. И. Технология производства трехслойных сотовых конструкций. — Харьков: ХАИ, 1997.—58 с.
8. Сливинский В. И. Научно-технические предпосылки создания в Украине наукоемкой технологии и производства сотовых заполнителей и конструкций на их основе для различных отраслей промышленности // Технологические системы.—1999.—2.—С. 16—18.
9. Сливинский В. И., Ткаченко Г. В. Колоскова А. Н. Объективные предпосылки эффективного применения сотовых конструкций: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. унта им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». — Харьков: НАКУ, 2001.—Вып. 25 (2).—С. 109—115.

#### DETERMINING OF LIMIT POSSIBLE DEVIATIONS OF SANDWICH PANELS HONEYCOMB CORE MANUFACTURING

A. N. Koloskova

The analysis of occurrence and interaction of errors, which appear by manufacturing of honeycomb core and sandwich construction as a whole, is carried out. The algorithm of a determining of limit possible deviations for sandwich panel is adduced.