

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 539.3 : 51

О РАСЧЕТЕ ПРОЕКТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ СТЕРЖНЕВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ ТРЕХСЛОЙНОЙ КОНСТРУКЦИИ

© 2019 г. С. М. Мусави Сафави^{1,*}, И. Н. Абдуллин¹, А. Джафарзаде¹¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева,
г. Казань, Россия

* e-mail: ilfir528@mail.ru

Поступила в редакцию 04.12.2017 г.

После доработки 01.02.2018 г.

Принята к публикации 24.12.2018 г.

Предлагается методика определения рациональной относительной плотности для ферменного заполнителя с пирамидальными ячейками. Приводится пример расчета относительной плотности заполнителя и угла наклона стержня к основанию.

DOI: 10.1134/S0235711919020093

Ферменный заполнитель, рациональная относительная плотность заполнителя. Современные летательные аппараты проектируются и производятся с учетом чрезвычайно жестких условий эксплуатации – превышение скорости звука, многократно повторяемые пиковые нагрузки, форсированные режимы полетов во всепогодных условиях, резкие перепады температур, силовые воздействия аэродинамических факторов. Создание новых образцов авиационной техники с постоянно растущими требованиями к повышению эффективности, ресурса и надежности заставляет аэрокосмические державы разрабатывать новые материалы и технологические процессы, искать нетрадиционные конструктивные решения и методы проектирования. Одним из важных направлений в этом поиске в конструкциях оболочечного типа является создание и все более широкое применение трехслойных конструкций. Их эффективность связана, в первую очередь, с высокой относительной жесткостью и несущей способностью.

Проектирование и производство трехслойных конструкций летательных аппаратов, имеющих повышенную жесткость на изгиб при малом весе – сложная наукоемкая задача, решение которой сопряжено с проведением численных и экспериментальных исследований, а многофункциональность трехслойных конструкций требует тщательного подхода к их проектированию. Трехслойная панель с ферменным заполнителем – это новый элемент, для использования которого в конструкции необходимо знать его механические и прочностные характеристики.

При исследовании ферменного заполнителя обычно рассматривают несколько типов элементарных структур: тетраэдральную (рис. 1а) и пирамидальную (рис. 1б).

Основным конструктивным признаком этих заполнителей является то, что они представляют собой многократно повторяющиеся комбинации из стержневых элементов, представляющих собой повторяющиеся пирамидальные и тетраэдральные элементарные ячейки.

Особенность применения ферменного заполнителя заключается в том, что из него можно создать элементы изделий с заранее заданными свойствами, наиболее полно отвечающими характеру и условиям работы деталей конструкции.

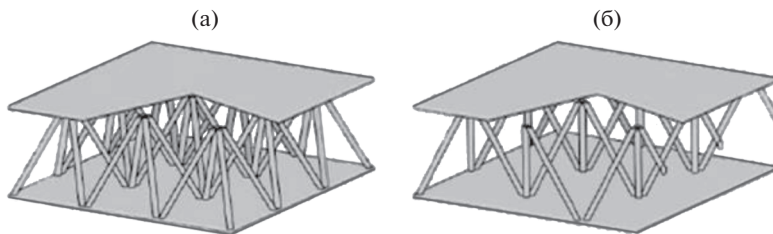


Рис.1. Трехслойная конструкция с ферменным заполнителем в виде пирамидальных (а), тетраэдральных (б) ячеек.

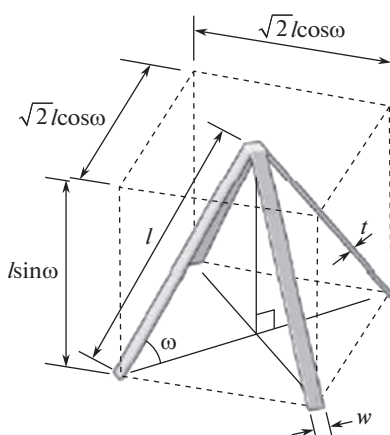


Рис. 2. Элементарная ячейка пирамидального заполнителя.

Эти заполнители можно использовать для поглощения удара, регулирования температуры, электромагнитного экранирования, фильтрации жидкости, и в качестве носителя катализатора [1]. На основе ферменного заполнителя можно реализовать механизм создания адаптивных интегральных поверхностей, способных изменять геометрию конструкции [2].

Традиционные подходы к изготовлению ферменного заполнителя из металла включают литье [3], электроразрядную или лазерную резку [4], перфорирование листового материала, изготовление из проволоки или трубок, плетение [5]. Литье и резка предполагают последующее соединение фермы с лицевыми поверхностями. Выяснилось, что места стыка являются слабым местом, снижающим общую прочность трехслойной конструкции, однако технологии изготовления трехслойной конструкции с применением способов интегрального пространственного плетения устраняют возможность отслоения лицевых панелей от заполнителя.

Для определения параметров, приводящих к потере устойчивости при сжатии и сдвиге пластин-обшивок относительно друг друга, рассмотрим трехслойную конструкцию с пирамидальным заполнителем (рис. 2).

Для определения данных параметров, необходимо знать значения относительной плотности заполнителя $\bar{\rho}$, которая определяется отношением плотности элементарной ячейки заполнителя к плотности материала заполнителя [6]:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_z}{\rho_m}$$

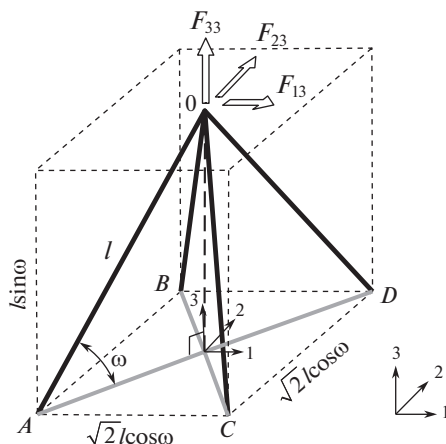


Рис. 3. Действие сил на элементарную ячейку пирамидального заполнителя.

где ρ_3 – плотность заполнителя образца трехслойной конструкции, ρ_M – плотность образца из сплошного материала.

Для пирамидального заполнителя [7, 8]:

$$\bar{\rho} = \frac{2S}{l^2 \cos^2 \omega \sin \omega},$$

l – длина стержня, S – площадь поперечного сечения стержня, V_{CT} – суммарный объем стержней ячейки.

Для определения эквивалентных механических характеристик заполнителя рассчитываются условные деформации элементарной ячейки ферменной структуры при действии сил F_{13} , F_{23} , F_{33} (рис. 3) [9–12].

Далее по величине узловых перемещений можно рассчитать деформации элементарной ячейки, соотнести их с напряжениями и получить упругие характеристики элементарной ячейки.

Для расчета упругих характеристик элементарной ячейки определим условные эквивалентные напряжения σ_{33} , σ_{13} и σ_{23} , возникающие в ячейке вследствие действия сил: F_{33} , F_{13} , F_{23} (рис. 3).

$$\begin{aligned} \sigma_{33} &= \frac{F_{33}}{A_{oc}}, & \sigma_{33} &= E_{33}\epsilon_{33}, & \epsilon_{33} &= \frac{\delta_{33}}{l \sin \omega} \Rightarrow E_{33} = \frac{\sigma_{33} l \sin \omega}{\delta_{33}} \\ \sigma_{13} &= \frac{F_{13}}{A_{oc}}, & \sigma_{13} &= E_{13}\epsilon_{13}, & \epsilon_{13} &= \frac{\delta_{13}}{l \sin \omega} \Rightarrow E_{13} = \frac{\sigma_{13} l \sin \omega}{\delta_{13}}, \\ \sigma_{23} &= \frac{F_{23}}{A_{oc}}, & \sigma_{23} &= G_{23}\epsilon_{23}, & \epsilon_{23} &= \frac{\delta_{23}}{l \sin \omega} \Rightarrow G_{23} = \frac{\sigma_{23} l \sin \omega}{\delta_{23}} \end{aligned}$$

где δ_{13} , δ_{23} и δ_{33} соответственно являются линейными перемещениями узла 3 по осям 1, 2, 3.

Связь напряжений в стержнях с напряжениями σ_{13} , σ_{23} , σ_{33} определяется следующими соотношениями:

$$\sigma_{OA} = \left(\frac{\sigma_{33}}{\sin^2 \omega} + \frac{2\sqrt{2}\sigma_{13}}{\sin 2\omega} + \frac{2\sqrt{2}\sigma_{23}}{\sin 2\omega} \right) / \bar{\rho},$$

$$\begin{aligned}\sigma_{OB} &= \left(\frac{\sigma_{33}}{\sin^2 \omega} + \frac{2\sqrt{2}\sigma_{13}}{\sin 2\omega} - \frac{2\sqrt{2}\sigma_{23}}{\sin 2\omega} \right) / \bar{\rho}, \\ \sigma_{OC} &= \left(\frac{\sigma_{33}}{\sin^2 \omega} - \frac{2\sqrt{2}\sigma_{13}}{\sin 2\omega} + \frac{2\sqrt{2}\sigma_{23}}{\sin 2\omega} \right) / \bar{\rho}, \\ \sigma_{OD} &= \left(\frac{\sigma_{33}}{\sin^2 \omega} - \frac{2\sqrt{2}\sigma_{13}}{\sin 2\omega} - \frac{2\sqrt{2}\sigma_{23}}{\sin 2\omega} \right) / \bar{\rho}.\end{aligned}$$

Для пирамидальной конструкции модуль упругости на сжатие

$$E_{33} = E_s \bar{\rho} \sin^4 \omega,$$

где E_s – модуль упругости материала заполнителя.

Жесткость на сдвиг

$$G_{31} = G_{23} = E_s \frac{\bar{\rho}}{8} \sin^2(2\omega)$$

Заметим, что разрушение ячейки при растяжении стержней происходит при условии

$$\sigma_{ст} = \sigma_y$$

при сжатии стержней

$$\sigma_{ст} = \min(\sigma_y, \sigma_{кр}), \quad (1)$$

где σ_y – предел упругости материала, из которого создан стержень, $\sigma_{кр}$ – критическое напряжение потери устойчивости стержней

$$\sigma_{кр} = \frac{k\pi^2 E_s I}{S l^2}.$$

Здесь k – коэффициент, зависящий от типа соединения стержней друг с другом и с обшивкой, $k = 1$ для шарнирного соединения; $k = 2$ для жесткого соединения, I – минимальный момент инерции сечения стержней.

Для предельного напряжения при растяжении, при котором потеря несущей способности трехслойной конструкции будет происходить из-за разрушения структуры заполнителя при условии нормальной нагрузки ($\sigma_{13}, \sigma_{23} = 0, \sigma_{33} > 0$) с учетом (1) получим

$$\sigma_{33кр}^- = \sigma_y \bar{\rho} \sin^2 \omega,$$

где $\sigma_{33кр}^-$ – критическое напряжение при растяжении;

$$\sigma_{33кр}^+ = \min(\sigma_y, \sigma_{кр}) \bar{\rho} \sin^2 \omega, \quad (2)$$

где $\sigma_{33кр}^+$ – критическое напряжение при сжатии.

Покажем зависимость относительной плотности для каждой из обобщенных характеристик ($E_{33}, G_{13}, G_{23}, \sigma_{33кр}, \sigma_{13кр}$)

$$\bar{\rho} = \frac{2\pi}{\sin \omega \cos^2 \omega} \left(\frac{r}{l} \right)^2 - \text{относительная плотность пирамидального заполнителя}$$

$$\sigma_{кр} = \frac{\bar{\rho} k \pi E \sin \omega \cos^2 \omega}{8},$$

$$\sigma_{33кр}^+ = \sigma_y \bar{\rho} \sin^2 \omega \Rightarrow \bar{\rho}_1 = \frac{1}{\sin^2 \omega} \left(\frac{\sigma_{33кр}^+}{\sigma_y} \right);$$

$$\sigma_{33кр}^- = \frac{\bar{\rho}^2 k \pi E \sin^3 \omega \cos^2 \omega}{8} \Rightarrow \bar{\rho}_2 = \sqrt{\frac{8}{k \pi \sin^3 \omega \cos^2 \omega} \left(\frac{\sigma_{33кр}^-}{E} \right)}.$$

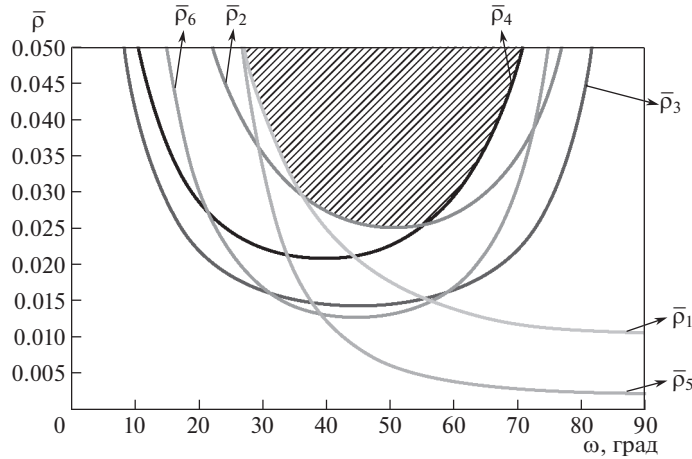


Рис. 4. График зависимости относительной плотности от угла наклона стержней к основанию.

Критические напряжения в направлении 1–3, 2–3 находятся в зависимости от условия разрушения, пластического деформирования σ_y или потеря устойчивости $\sigma_{кр}$ стержней.

Следовательно, критические напряжения при сжатии в направлении 1–3, 2–3

$$\sigma_{13кр} = \sigma_{23кр} = \frac{\sigma_y \bar{\rho} \sin 2\omega}{2\sqrt{2}} \Rightarrow \bar{\rho}_3 = \frac{2\sqrt{2}}{\sin 2\omega} \left(\frac{\sigma_{13кр}}{\sigma_y} \right).$$

Критическое напряжение при растяжении в направлении 1–3, 2–3

$$\begin{aligned} \sigma_{13кр} = \sigma_{23кр} &= \left(\frac{\bar{\rho} k \pi E \sin \omega \cos^2 \omega}{8} \right) \frac{\bar{\rho} \sin 2\omega}{2\sqrt{2}} \Rightarrow \\ \Rightarrow \bar{\rho}_4 &= \sqrt{\frac{8\sqrt{2}}{k \pi \sin^2 \omega \cos^3 \omega} \left(\frac{\sigma_{13кр}}{E} \right)}, \end{aligned}$$

где $\sigma_{13кр}$, $\sigma_{23кр}$ — касательные напряжения возникающие в направлении 1–3, 2–3

$$E_{33} = E \bar{\rho} \sin^4 \omega \Rightarrow \bar{\rho}_5 = \frac{1}{\sin^4 \omega} \left(\frac{E_{33}}{E} \right),$$

$$G_{13} = G_{23} = \frac{1}{8} E \bar{\rho} \sin^2 2\omega \Rightarrow \bar{\rho}_6 = \frac{8}{\sin^2 2\omega} \left(\frac{G_{13}}{E} \right).$$

Рассмотрим пример нахождения рационального значения относительной плотности заполнителя. Зададим значение обобщенных характеристик для стержневого заполнителя из алюминиевого сплава $E_s \approx 70$ ГПа, $\sigma_y \approx 310$ МПа, $\rho \approx 2800$ кг/м³, где для приведенных проектных данных, зададим требуемые проектные ограничения по прочности и жесткости: $\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = 0.01$; $\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} \left(\frac{\sigma_y}{E_s} \right) = 0.0044$; $\frac{\tau_{cr}}{\sigma_y} = 0.005$; $\frac{\tau_{cr}}{\sigma_y} \left(\frac{\sigma_y}{E_s} \right) = 0.0022$;

$$\frac{E_{33}}{E_s} = 0.002; \quad \frac{G}{E_s} = 0.0016.$$

При сжатии в качестве критического напряжения выбирается минимальное значение из $\sigma_{кр}$, σ_y (2).

Приведем график зависимости относительной плотности $\bar{\rho}$ заполнителя от угла наклона стержней к основанию (рис. 4).

Из графика видно, что минимальное значение относительной плотности $\bar{\rho}_{\text{опт}}$ заполнителя для заданных требуемых проектных ограничений $\bar{\rho}_{\text{опт}} = 0.025$ и находится в диапазоне углов наклона стержней к основанию $w = 47...55^\circ$.

Приведем примеры использования трехслойных конструкций с ферменными заполнителями: ферменные конструкции в строительстве мостов и сооружений; ферменные структуры в конструкции самолета; “жертвенные” структуры для поглощения энергии удара – многослойные ферменные структуры; в трехслойных панелях переменной толщины и большой кривизны (фюзеляжи самолетов, каналов воздухозаборников); ферменные конструкции в космических аппаратах: ферменные платформы, ферменный каркас солнечной батареи, трубчатые стержневые элементы космического радиотелескопа.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. По требуемым проектным ограничениям по прочности и жесткости можно найти рациональное значение относительной плотности ферменного заполнителя.
2. По требуемым проектным ограничениям по прочности и жесткости можно найти рациональный угол наклона стержней к основанию.
3. Трехслойную конструкцию с ферменным заполнителем можно рассматривать как перспективную альтернативу традиционным сотовым или складчатым структурам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gu S., Lu T.J., Evans A.G.* On the design of two-dimensional cellular metals for combined heat dissipation and structural load capacity // *Int. J. Heat. Mass Trans.* 2001. V. 4 (11). P. 63–75.
2. *Tian J., Hodson H.P., Queheillalt D.T., Sypeck D.J.* The effects of topology upon fluid – flow and heat – transfer within cellular copper structure // *Journal Heat Mass Trans.* 2004. V. 47. P. 71–86.
3. *Wadley H.N.G.* Multifunctional periodic cellular metals // *Philosophical transactions of the royal society A.* 2006. P. 31–68.
4. *Queheillalt D.T., Murty Y., Wadley H.N.G.* Mechanical properties of an extruded pyramidal lattice truss sandwich structure // *Scripta Materialia.* 2008. V. 58. P. 76–79.
5. *Queheillalt D.T., Wadley H.N.G.* Cellular metal lattices with hollow trusses // *Acta Materialia*, 2005. V. 53. P. 303–313.
6. *Абдуллин И.Н.* Расчетные и экспериментальные исследования жесткости и прочности трехслойных конструкций с заполнителем в виде повторяющихся пирамидальных ячеек // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева.* Казань. 2015. № 1. С. 5–12.
7. *Гайнутдинов В.Г., Абдуллин И.Н., Мусави Сафави С.М.* О расчете проектных значений плотности рациональной трехслойной конструкции со стержневым заполнителем // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника.* Казань, 2016. № 1. С. 59–63.
8. *Гайнутдинов В.Г., Мусави Сафави С.М., Абдуллин И.Н.* Условия разрушения пирамидальных и тетраэдральных ячеек ферменных заполнителей // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева.* Казань. 2015. № 2. С. 11–16.
9. *Потапов В.Д.* Об устойчивости стержня при действии детерминированной и стохастической нагрузки с учетом нелокальной упругости и нелокального демпфирования материала // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* Москва. 2015. № 1. С. 9–16.
10. *Комаров В.Н., Ерофеев В.И., Лампси Б.Б.* Нелинейная стационарная крутильная волна в стержне // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* Москва. 2015. № 4. С. 35–39.
11. *Ильгамов М.А.* Устойчивость сжатого стержня с поперечным надрезом // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* Москва. 2015. № 5. С. 28–33.
12. *Дорогин В.И., Ерофеев В.И., Кажяев В.В.* Нелинейные стационарные упругопластические волны в стержне // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* Москва. 2016. № 1. С. 8–10.