



УДК 691.33

Р.А. Каюмов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов и основ теории упругости

Р.А. Зиннуров – ассистент

К.П. Алексеев – кандидат технических наук

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)

И.М. Закиров – доктор технических наук, профессор

К.А. Алексеев – кандидат технических наук

Казанский научно-исследовательский институт авиационной технологии

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СКЛАДЧАТЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ПО УСЛОВИЯМ МАКСИМАЛЬНОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПАНЕЛИ ПРИ НАЛИЧИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

АННОТАЦИЯ

На основе анализа работы складчатых заполнителей предложены соотношения для расчёта предельной нагрузки, равномерно распределенной по поверхности обшивки трехслойных панелей. Найдены оптимальные параметры складчатых заполнителей по условиям максимальной несущей способности панели при наличии технологических ограничений. Разработана методика анализа чувствительности предельной нагрузки к технологическим неточностям изготовления.

R.A. Kayumov – doctor of physical-mathematical sciences, professor, head of Materials Resistance department

R.A. Zinnurov – assistant

K.P. Alexeev – candidate of the technical sciences

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUA)

I.M. Zakirov – doctor of the technical sciences, professor

K.A. Alexeev – candidate of the technical sciences

Kazan Scientifically -Research Institute of Aviation Technology

DEFINITION OF OPTIMUM PARAMETERS OF FOLDED FILLERS ON CONDITIONS OF THE MAXIMUM BEARING ABILITY OF THE PANEL IN THE PRESENCE OF TECHNOLOGICAL RESTRICTIONS

ABSTRACT

Based on analysis of folded fillers work the ratios for calculation of maximum load equally distributed on the surface of three-layer panels covering are suggested. The optimum parameters of folded fillers on conditions of maximal bearing ability of panel under technological restrictions are found. The technique of analysis of maximum load sensitivity to technological discrepancies of production is developed.

1. Объект исследования

Рассмотрим трёхслойные панели, нагруженные поперечной силой, равномерно распределенной по поверхности обшивки (рис. 1). Различные типы таких панелей исследовались [1, 2, 4-7].

Каждый образец представляет собой блок складчатого заполнителя на основе М-гофра, размещенный между обшивками. Блок заполнителя расположен симметрично между краями обшивок и приклеен к последним по всем верхним и нижним ребрам. Геометрические параметры заполнителя приведены на рис. 1.

Материал заполнителя - арамидная бумага NOMEX® T412, покрытая полимером; её плотность без покрытия – $\Gamma = 9,77 \times 10^{-7}$ кг/мм³, толщина (без

покрытия) – $t = 0,13$ мм, материал обшивок – стеклопластик, толщиной 1 мм.

Зависимость объемной плотности складчатой конструкции Γ_M от конструктивных параметров имеет вид:

$$\Gamma_M = \frac{r K_{II} t 2b_0 \sin b_0 + 2C_1 + 2C_2}{H \cos b_0 (2C_1 + 2C_2)} \quad (1.1)$$

Здесь K_{II} – технологический параметр, определяющий количество покрытия, нанесенного на поверхность материала заготовки, вычисляемый следующим образом:

$$K_{II} = \frac{100}{100 - m}, \quad (m - \text{массовая доля покрытия на образце в \%}).$$

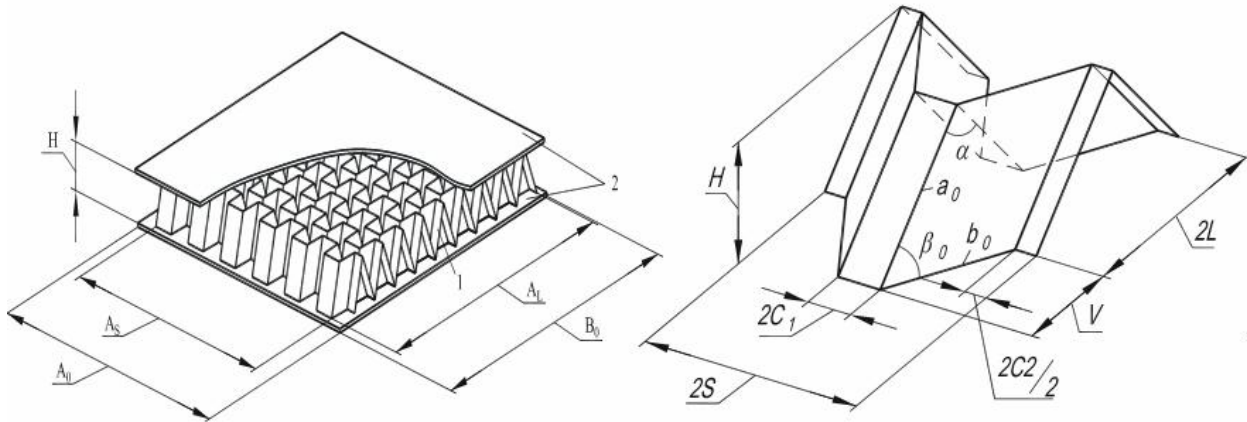


Рис. 1. Испытываемый образец: 1 – наполнитель, 2 – обшивки

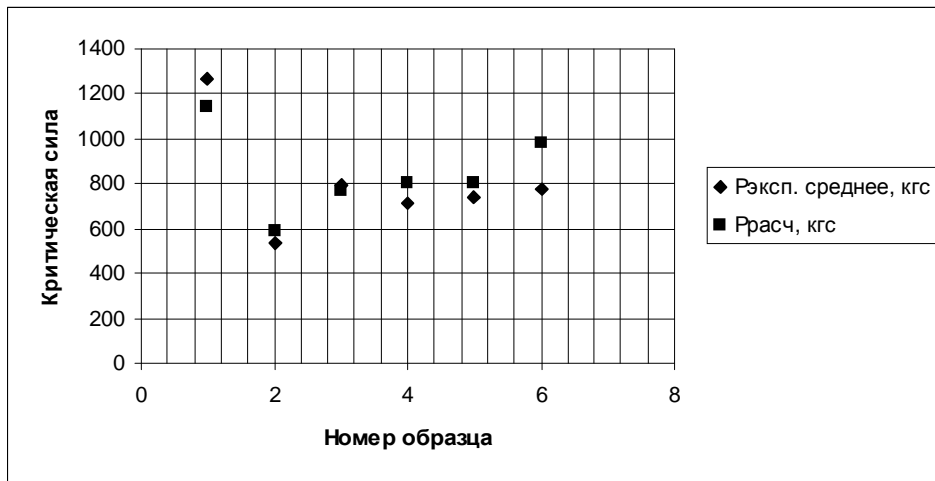


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и численных исследований

Для 6 серий образцов, отличающихся геометрическими параметрами, были проведены экспериментальные исследования. Их результаты приведены на рис. 2.

2. Определение предельной сжимающей нагрузки

Эксперименты показывают, что потеря несущей способности наполнителей происходит в области упругих деформаций в результате потери устойчивости ребер наполнителя. При этом ребро представляет собой тонкостенный стержень с достаточно сложным сечением.

Приведем основные положения, которые были использованы при определении

$$P_{пред} = P_{пред1} + P_{пред2}$$

Здесь $P_{пред1}$ – нагрузка, воспринимаемая ребрами-стержнями, у которой одна ширина полки имеет величину C_1 , а другая V_1 (см. рис. 3). Аналогично

$P_{пред2}$ – нагрузка, воспринимаемая ребрами-стержнями, у которой одна ширина полки имеет величину C_2 , а другая V_1 , $P_{пред1}$, $P_{пред2}$ – нагрузки, перпендикулярные обшивке.

В связи с наклоном ребер наполнителя $P_{пред1}$ выражается через предельные продольные нагрузки $N_{прод}^1 = S_{кр1} \cdot A_1$ следующим образом (A_1 – площадь поперечного сечения, m_1 – число ребер):

$$P_{пред1} = S_{кр1} \cdot A_1 \cdot m_1 \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right).$$

На основе анализа результатов экспериментов нормальные напряжения предлагается аппроксимировать функцией:

$$\sigma_{кр1} = (a_N - b_N \cdot \lambda_1) \cdot \left(1 + c_1 \cdot (\sqrt{K_{II} - 1})^{c_2}\right) \quad (2.1)$$

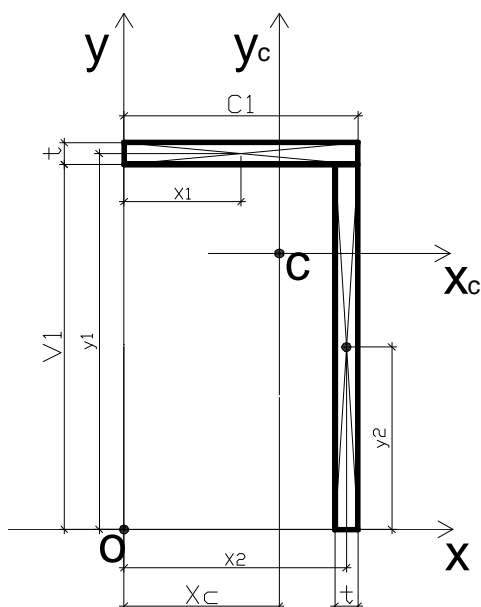


Рис. 3. Расчётная схема сечения ячейки М-гофра

Необходимость введения соотношения (2.1) с коэффициентами $c1$, $c2$ обуславливалась резким возрастанием несущей способности заполнителя даже при малом коэффициенте покрытия K_{II} . Выражение для гибкости стержня модифицируем следующим образом:

$$I_1 = \frac{m \cdot a_0 \cdot \sqrt{A_1}}{\sqrt{J_{\min 1}}} \cdot \left(\frac{V_1}{a_0} + k_1 \right)^2, \mu=2 \quad (2.2)$$

Как видно, гибкость выражается через геометрические параметры сечения, высоту ребра a_0 и эмпирический коэффициент k_1 , учитывающий конструктивную зависимость гибкости от C_1 и V_1 . Гибкость нельзя рассчитать по обычным формулам вследствие того, что основная часть нагрузки воспринимается малой областью стенки, примыкающей к ребру.

Механические характеристики $a_N = 9,58 \text{ Н / мм}^2$, $b_N = 0,097 \text{ Н / мм}^2$ материала NOMEX® T412, коэффициенты $c1 = 2,45$, $c2 = 0,33$, $k_1 = 0,8$ были получены методами идентификации [3] на основе анализа экспериментальных данных при $K_{II} = 1$; $K_{II} = 1,25$; $K_{II} = 2$; $K_{II} = 3,5$. Контрольными являлись образцы с коэффициентами покрытия $K_{II} = 1,5$; $K_{II} = 2,5$.

Нагрузка $P_{пред2}$ определяется аналогично, но с заменой C_1 на C_2 . Сравнительный анализ прогнозируемых и экспериментальных результатов, приведенных на рис. 1, показывает, что предложенные соотношения (2.1), (2.2) удовлетворительно коррелируют с экспериментальными данными.

3. Зависимость удельного давления от геометрических параметров заполнителя

Удельное давление P_{ud} определим по формуле:

$$P_{ud} = \frac{P}{r_M}, \text{ где } P - \text{давление, приложенное к}$$

обшивке, r_M – объемная плотность складчатого заполнителя, определяемая по (1.1).

Оптимальные значения геометрических параметров определялись по максимальному значению удельного давления P_{ud} .

Варьируемыми параметрами являются угол a , ширина стенки b_0 , размеры стенки ячейки C_1 , C_2 (рис. 2). Для каждого варьируемого параметра задаются ограничения (границы изменения). Например, для приведенных ниже результатов использовались следующие ограничения: $a_{\min} = 10^\circ$, $a_{\max} = 150^\circ$, $b_{0\min} = 1 \text{ мм}$, $b_{0\max} = 20 \text{ мм}$, $C_{1\min} = 1 \text{ мм}$, $C_{1\max} = 10 \text{ мм}$, $C_{2\min} = 1 \text{ мм}$, $C_{2\max} = 10 \text{ мм}$.

Некоторые результаты приведены ниже в графическом виде.

Анализ численных результатов показал, что при заданных в данной работе ограничениях для варьируемых геометрических параметров удельное давление сильно меняется при малых C_1 , C_2 и мало изменяется при $C_1 > 3 \text{ мм}$, $C_2 > 3 \text{ мм}$.

Для решения задачи оптимизации ввиду небольшого количества искомых параметров использовался метод сжимающихся сеток по a , b_0 , C_1 , C_2 , в узлах которых вычислялся P_{ud} . Оказалось, что оптимальными значениями геометрических параметров при заданных ограничениях являются следующие величины: $C_1 = 8,1 \text{ мм}$; $C_2 = 3,4 \text{ мм}$; $b_0 = 10,6 \text{ мм}$; $a = 10^\circ$. Интересно отметить, что при этом P_{ud} мало зависит от изменения угла a . Снижение значения P_{ud} в зависимости от увеличения угла a представлено на рис. 6.

4. Локальный анализ чувствительности

Для выяснения влияния неточности изготовления заполнителя на величину удельного давления P_{ud} при оптимальных управляющих параметрах был проведен анализ чувствительности решения к разбросу этих параметров. Он состоял из следующих 3 этапов:

1. Выбираются оптимальные параметры.
2. Вычисляются первые 2 производные функции цели по управляющим параметрам.

3. Записывается зависимость P_{ud} от изменений параметров в виде:

$$P_{ud} = P_{opt} + P'_a \Delta a + P''_{aa} \Delta a^2 + P'_{b_0} \Delta b_0 + P''_{b_0 b_0} \Delta b_0^2 \dots \quad (4.1)$$

Для отыскания P'_a , P''_{aa} обычно используется процедура приближенного численного

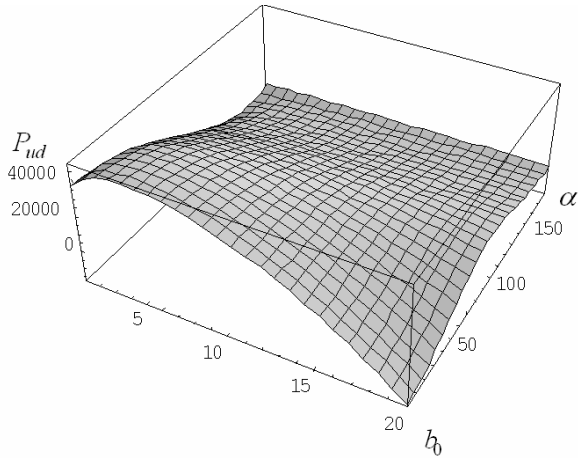


Рис. 4. График зависимости P_{ud} (a, b_0) при ($C_1=2; C_2=2$)

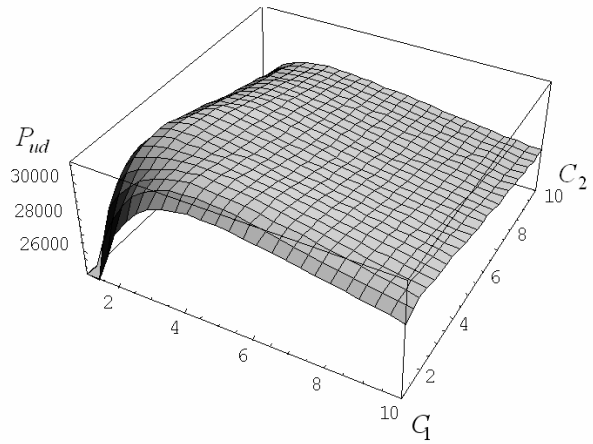


Рис. 5. График зависимости P_{ud} (C_1, C_2) при ($a=73$)

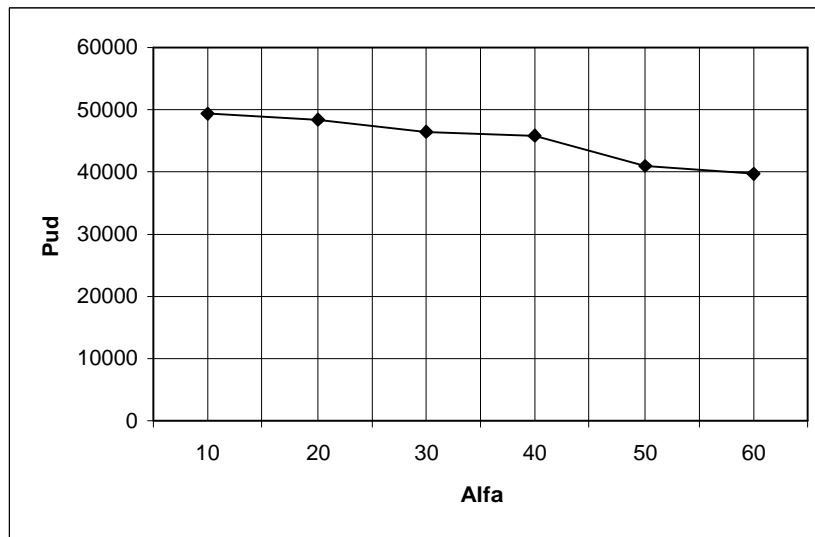


Рис. 6. Зависимость P_{ud} от a

дифференцирования. Например,

$$P'_a = \frac{P(a_{onm} + \Delta a) - P(a_{onm} - \Delta a)}{2\Delta a},$$

$$P''_a = \frac{P(a_{onm} + \Delta a) - 2P_{onm} + P(a_{onm} - \Delta a)}{2\Delta a^2}$$

Аналогично для b_0, C_1, C_2 :

В качестве $\Delta a, \Delta b_0, \Delta C_1, \Delta C_2$ при вычислении

P', P'' можно брать величины порядка неточностей изготовления заполнителя. В данной работе было принято, что погрешности составляют следующие величины:

$$\Delta a = \pm 1^\circ, \quad \Delta b_0 = \pm 1 \text{ мм}, \quad \Delta C_1 = \pm 1 \text{ мм}, \\ \Delta C_2 = \pm 1 \text{ мм}.$$

Таким образом, получим первую часть формулы (4.1)

$$P_{ud} = P_{onm} + P'_a \Delta a + P''_{aa} \Delta a^2 = \\ = 1178,6 \text{ кН} \cdot \text{мм} / \text{кг} + 180 \cdot \Delta a \text{ Н} \cdot \text{мм} / (\text{кг} \cdot \text{град}) - \\ - 90 \cdot \Delta a^2 \text{ Н} \cdot \text{мм} / (\text{кг} \cdot \text{град}^2).$$

Аналогично получим другие части формулы (4.1). В частности, вторая часть формулы имеет вид:

$$P'_{b_0} \Delta b_0 + P''_{b_0 b_0} \Delta b_0^2 = 265 \cdot \Delta b_0 \frac{\text{Н} \cdot \text{мм}}{\text{кг} \cdot \text{мм}} - 2145 \cdot \Delta b_0^2 \frac{\text{Н} \cdot \text{мм}}{\text{кг} \cdot \text{мм}^2}.$$

Отметим здесь, что аналитически ввиду наличия экстремума по b_0 должно было быть $P'_{b_0} = 0$ (см. рис.

б). Здесь $P'_{b_0} \neq 0$ ввиду численного дифференцирования.

Кроме того, несмотря на то, что коэффициент при Δb_0^2 достаточно велик, изменение P_{ud} все же составляет



малую величину, например, при $\Delta b_0 = 1 \text{ мм}$ отклонение P_{ud} составляет 0,2%.

Аналогичные выражения были получены относительно неточностей изготовления ΔC_1 , ΔC_2 . Анализ результатов показал, что, в рассмотренном выше примере неточности изготовления геометрических параметров М-гофра оказывают незначительное влияние на оптимальное значение удельного давления P_{ud} .

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 08-01-00628, № 06-08-01170.

Литература

1. Каюмов Р.А., Закиров И.М., Алексеев К.П., Алексеев К.А., Зиннуров Р.А., Талаков М.А. Методика расчета панелей с шевронным наполнителем // «Математические методы и модели в науке, технике, естествознании и экономике: синтез, анализ, диагностика»: Труды международной «Конференции по логике, информатике, науковедению – КЛИН – 2007». – Ульяновск, 2007. – С. 118-120.
2. Каюмов Р.А., Закиров И.М., Алексеев К.П., Алексеев К.А., Зиннуров Р.А. Определение несущей способности панелей с шевронным наполнителем. // Изв. вузов. Авиационная техника, 2007, № 4.
3. Каюмов Р.А., Нежданов Р.О., Тазюков Б.Ф. Определение характеристик волокнистых композитных материалов методами идентификации. – Казань: Изд-во КГУ, 2005. – 258 с.
4. Закиров И.М., Алексеев К.А. Исследование параметров формообразования складчатого наполнителя одинарной кривизны. // Известия вузов. Авиационная техника, 2004, №4. – С.63-67.
5. Закиров И.М., Алексеев К.А. Формообразование складчатого наполнителя одинарной кривизны // Авиакосмические технологии и оборудование: Материалы Всерос. науч.-практич. конф. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. университета, 2004. – С. 5-9.
6. Зигзагообразная складчатая структура с сопряженными рифтами. // Сборник материалов XVII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. Часть 2, 17-19 мая 2005 г. – Казань: КВАКУ (военный институт) им. М.Н. Чистякова. – С. 175-176.
7. Халиулин В.И., Батраков В.В. и др. Звукопоглощающие конструкции и элементы фильтров складчатой структуры. // Авиакосмические технологии и оборудование: Материалы Всерос. науч.-практич. конф. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. университета, 2004. – С. 115-117.