

УДК 629.735.33.015.4.025.1

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОСТЕНОЧНОГО КЕССОНА В КОНСТРУКТИВНО-СИЛОВОЙ СХЕМЕ НЕСУЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Е. К. Липин, В. Е. Теняева, В. М. Фролов

Приведены результаты исследований жесткостных и массовых характеристик многостеночного и многонервюрного вариантов силового кессона центральной части несущей поверхности ЛА при действии сосредоточенных и распределенных нагрузок. Показана эффективность применения многостеночного силового кессона в качестве рациональной конструктивно-силовой схемы для высоконагруженных несущих поверхностей.

Конструктивно-силовая схема (КСС) центральной части несущих поверхностей малого и среднего удлинений может быть выбрана как в виде многостеночного, так и многонервюрного силового кессона. Данные варианты КСС различаются конструктивным оформлением панелей. В многонервюрной конструкции панели имеют подкрепленную стрингерным набором обшивку, а в многостеночном варианте высокие критические напряжения потери устойчивости неподкрепленной обшивки обеспечиваются установкой соответствующего количества продольных стенок. Для обеспечения требований устойчивости при одинаковых внешних нагрузках в многостеночном варианте силового кессона требуется большая толщина обшивки, чем в многонервюрном варианте с подкрепленными панелями. Отсюда следует, что многостеночная конструкция силового кессона может иметь большую жесткость на кручение. Применение же данного типа силового кессона в качестве рациональной КСС зависит от толщины профиля несущей поверхности и внешних нагрузок, действующих на нее.

1. Влияние величины нагрузок. Влияние внешних нагрузок рассмотрим на примере кессона прямоугольной формы (рис. 1), нагруженного изгибающим моментом $M_{изг}$. В сжатых панелях кессона при этом возникают потоки сжимающих усилий $N_z = \frac{M_{изг}}{hb}$, которые увеличиваются с ростом внешних нагрузок и уменьшением толщины профиля h . Критические напряжения в оптимальных по критерию равной

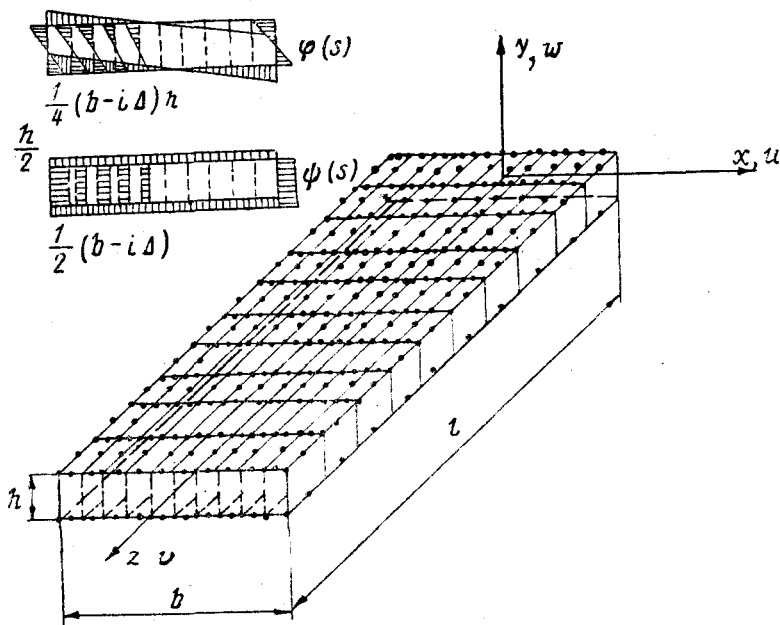


Рис. 1

устойчивости панелях многонервюрного и многостеночного вариантов силового кессона определяются по формулам [1]

$$1. \sigma_{кр}^n = \sqrt{\eta_t E} \sqrt{\frac{N_z}{l_n}} \Phi - \text{подкрепленная панель};$$

$$2. \sigma_{кр}^{ст} = \sqrt[3]{\frac{\pi^2 k \eta_t E}{12(1-\mu^2)}} \sqrt[3]{\left(\frac{N_z}{l_{ст}}\right)^2} - \text{участок обшивки между стенка-}$$

ми, где $\eta_t = \frac{E_t}{E}$ — коэффициент пластичности; Φ — фактор влияния Фаррара; k — коэффициент, характеризующий условия опирания обшивки на стенки и силовые нервюры; $l_n, l_{ст}$ — расстояния между нервюрами и стенками соответственно. В дальнейшем принимается значение $k=7$ как для удлиненной пластинки, шарнирно опертой на нервюры и заделанной на продольных стенках, а фактор Фаррара $\Phi=0,81$ для оптимальной панели, подкрепленной ребрами прямоугольной формы.

При оценке влияния величины внешних нагрузок на массу конструкции несущей поверхности будем предполагать, что массы стенок и нервюр в обоих вариантах силового кессона имеют одинаковые значения. В этом случае можно принять, что $l_n = l_{ст}$, и отличие многостеночного и многонервюрного силовых кессонов будет определяться в основном за счет разницы в массе силовых элементов, нагруженных сжимающими усилиями N_z . Для количественной оценки были проведены расчеты критических напряжений $\sigma_{кр}^n, \sigma_{кр}^{ст}$ в зависимости от сжимающих усилий N_z (рис. 2) для панелей, выполненных из высокопрочного алюминиевого сплава типа 75S-T6, физико-механические характеристики которого приведены в [1]. Из анализа полученных результатов следует, что с увеличением сжимающих усилий N_z критические напряжения в оптимальных панелях многонервюрного и многостеночного вариантов кессона имеют тенденцию к сближению (рис. 2). При-

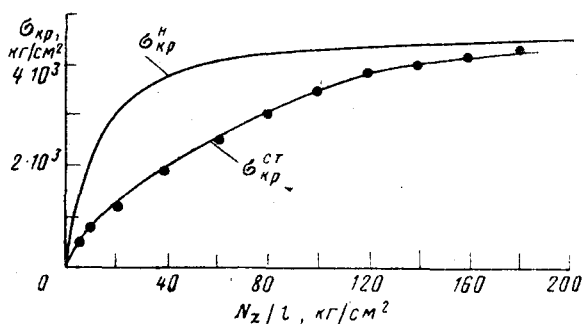


Рис. 2

чем в интервале $120 \leq \frac{N_z}{l} \leq 200 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ различие в критических напряжениях составляет соответственно $12\% \leq \frac{\sigma_{кр}^н - \sigma_{кр}^ст}{\sigma_{кр}^ст} 100\% \leq 5\%$. Этот эффект усиливается при действии комбинированной нагрузки на панели

(совместное действие усилий сжатия, сдвига и бокового растяжения-сжатия). Отсюда следует, что при высоких значениях сжимающих усилий $\left(\frac{N_z}{l} \geq 120\right)$ масса сжатых элементов многостеночного силового кессона будет незначительно отличаться от массы подкрепленных панелей многонервюрного кессона. Однако при практически равных массах силового материала кессона многостеночный вариант имеет большую жесткость на кручение за счет большей толщины обшивки.

Следствием этих результатов является то, что для высоконагруженных конструкций несущих поверхностей малого и среднего удлинений эффективным по массе и жесткостным характеристикам может оказаться многостеночный вариант силового кессона.

2. Повышение эффективной жесткости на кручение. При анализе жесткости на кручение многостеночного и многонервюрного вариантов силового кессона несущей поверхности будем предполагать выполнимость гипотезы о недеформируемости поперечных сечений. В этом случае жесткость на кручение будет определяться величиной относительного угла закручивания поперечных сечений θ' , равного

$$\theta' = \frac{M_{кр}}{GJ_{кр}^{\Phi}}, \quad (1)$$

где $M_{кр}$ — крутящий момент; $GJ_{кр}^{\Phi}$ — эффективная жесткость на кручение поперечного сечения. В рамках данной гипотезы значения $GJ_{кр}^{\Phi}$ можно получить из решения задачи о кручении кессона с прямоугольным поперечным сечением, моделируемым упругой оболочкой [2]. Правомочность же использования гипотезы о недеформируемости сечений для определения $GJ_{кр}^{\Phi}$ в работе устанавливается по результатам расчета силового кессона методом конечных элементов с подробной расчетной схемой [3].

Продольные и поперечные перемещения любой точки срединной поверхности кессона по теории В. З. Власова [2] представляются в виде

$$u(z, s) = U(z)\varphi(s), \quad v(z, s) = \theta(z)\psi(s), \quad (2)$$

где $\varphi(s)$, $\psi(s)$ — заданные функции, отражающие характер деформирования сечений при кручении (см. рис. 1); $U(z)$, $\theta(z)$ — искомые обобщенная деформация при кручении и угол закручивания. В общем случае для многозамкнутого (многостеночного) кессона с толщиной стенок равной толщине обшивки из решения для оболочки в форме (2) эффективная жесткость на кручение по соотношению (1) имеет выражение

$$GJ_{\text{кр}}^{\Phi} = GJ_B \frac{(b+h)A}{b(bh+A)} \left[1 - \frac{(bh-A)^2}{(bh+A)^2} \frac{(e^{kz} + e^{2kl} e^{-kz})}{(1 + e^{2kl})} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где $GJ_B = \frac{E}{2(1+\mu)} \frac{2h^2 b \delta}{(1+h/b)}$ — жесткость при свободном кручении однозамкнутого контура;

$$k^2 = \frac{24}{(1+\mu)} \frac{bA}{(bh+A)(b^3+hA)}; \quad A = \sum_{i=0}^m (b-i\Delta)^2, \quad \Delta = \frac{2b}{n-1};$$

$m = \frac{n-2}{2}$, n — четное; $m = \frac{n-3}{2}$, n — нечетное; n — число стенок.

При $n=2$ получим эффективную жесткость на кручение многонервюрного силового кессона

$$GJ_{\text{кр}}^{\Phi} = GJ_B \left[1 - \frac{(h-b)^2}{(h+b)^2} \frac{(e^{kz} + e^{2kl} e^{-kz})}{(1 + e^{2kl})} \right]^{-1}, \quad k^2 = \frac{24}{(1+\mu)} \frac{1}{b^2(1+h/b)^2}. \quad (4)$$

Из сравнения формул (3) и (4) следует, что $GJ_{\text{кр}}^{\Phi}$ многостеночного кессона выше, чем у многонервюрного кессона.

Детальное сопоставление жесткостных характеристик многостеночного и многонервюрного вариантов производилось по результатам расчета напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов силового кессона с параметрами центральной части несущих поверхностей малого и среднего удлинений ($2\delta/h=0,05$, $h/b=0,2$, $l/b=2$). Расчетная схема метода конечных элементов (рис. 1) содержала 682 узла и 1920 неизвестных перемещений u , v , w . В качестве конечных элементов для обшивки ($\delta=0,5$ см) и стенок ($\delta_{\text{ст}} \geq \delta$) использовались прямоугольные комплекс-элементы. Недеформируемость поперечных сечений кессона обеспечивалась установкой нервюр с небольшим шагом ($\frac{\Delta l}{l}=0,1$) и толщиной, исключающей искажение поперечных сечений за счет сдвига в нервюрах ($\delta_n = \delta$), а крутящий момент $M_{\text{кр}} = 6 \cdot 10^6$ кг·см в виде пары сил прикладывался к усиленной концевой нервюре ($\delta_n^k = 2\delta_n$). Между передней и задней стенками силового многонервюрного кессона в расчетной схеме МКЭ вводилось девять фиктивных стенок ($\delta_{\text{ст}}^k = 0,01\delta$), которые в многостеночном варианте становились силовыми стенками ($\delta_{\text{ст}} = \delta_n$).

В результате расчетов многонервюрного и многостеночного силовых кессонов по МКЭ получено, что прогиб в поперечных сечениях имеет линейный характер распределения, т. е. справедлива гипотеза о недеформируемости поперечных сечений. Причем это имеет место в многонервюрном кессоне, как при умеренных боковых стенках с толщиной, равной толщине обшивки, так и в случае мощных стенок, толщина которых равна половине суммарной толщины стенок в многостеночном

варианте. Согласно распределений углов закручивания $\theta \frac{GJ_B}{IM_{кр}}$, приведенных на рис. 3 для расчетных моделей оболочки и МКЭ, жесткостные характеристики на кручение многонервюрного кессона с умеренными стенками хорошо описываются расчетной моделью призматической оболочки. Жесткостные характеристики многостеночного кессона в расчетной модели многозамкнутой призматической оболочки отличаются от результатов МКЭ в сторону ужесточения и ослабления корневых сечений кессона (рис. 3).

Жесткость на кручение у многостеночного кессона практически совпадает ($\max \Delta\theta < 6\%$) с нервюрным кессоном, имеющих одинаковые суммарные толщины стенок. Однако нервюрный вариант силового кессона за счет нервюр при этом имеет большую массу материала. Эффект стесненного кручения, оцениваемый по нормальным напряжениям в обшивке $\Delta\sigma_z$, в многостеночном варианте выше ($\Delta\sigma_z^{ст} > \Delta\sigma_z^n$) и распространяется на большую длину кессона. Кроме того, расчетами установлено, что в многонервюрном варианте этот эффект усиливается с увеличением толщины боковых стенок.

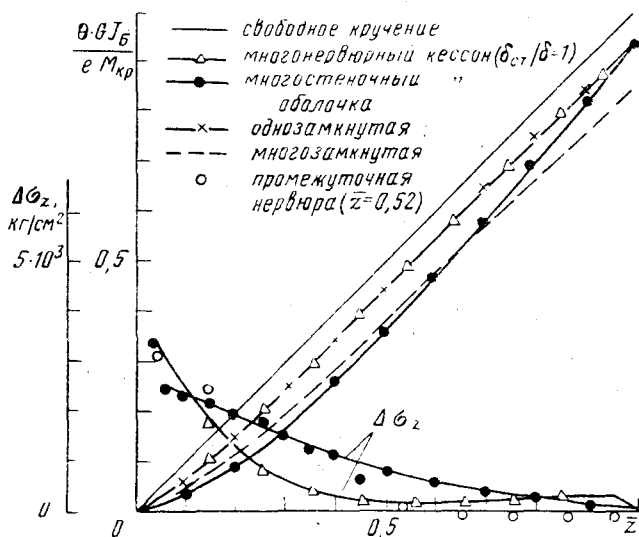


Рис. 3

В многостеночном варианте при установке промежуточной нервюры на $\bar{z} \approx 0,5$ эффект стесненного кручения увеличивается лишь в корневой зоне ($\bar{z} \leq 0,3$). Однако при этом максимальный угол закручивания возрастает незначительно и при установке двух и более промежуточных нервюр $\max \theta$ многостеночного кессона практически не изменяется. Поэтому жесткость на кручение в основном зависит от продольных стенок, создающих эффект стесненного кручения, за счет которого уменьшаются потоки касательных напряжений в обшивке.

3. Выравнивание распределения нормальных напряжений при изгибе. Эффективность работы силового кессона на изгиб в многонервюрном и многостеночном вариантах исполнения может быть оценена по соотношению максимальных прогибов ω и характеру распределения нормальных напряжений σ_z в поперечных сечениях кессона при действии изгибающей нагрузки от перерезывающих сил Q , приложенных в узловых точках конечного сечения расчетной схемы (рис. 1). В расчетах по

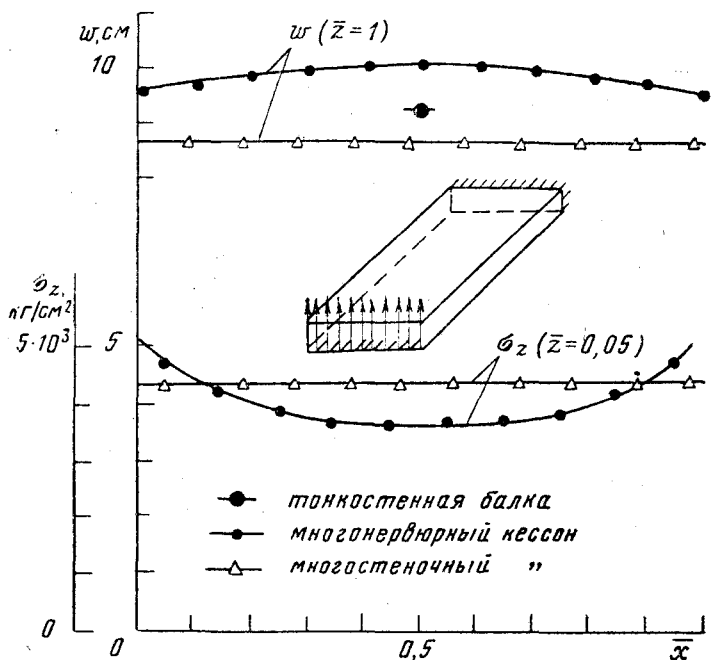


Рис. 4

МКЭ принималось $Q^z = NQ = 11 \cdot 3 \cdot 10^3$ кг. Из графика на рис. 4 следует, что многостеночный кессон при изгибе имеет практически постоянные по хорде поперечные перемещения w . При этом максимальный прогиб отличается от прогиба кессона как тонкостенной балки примерно на 4,5%. Согласно рис. 4 многостеночный кессон имеет максимальный прогиб на конце и нормальное напряжение в корне меньше соответственно на $\sim 10\%$ и $\sim 15\%$, чем многонервный кессон, равной изгибной жесткости $E \left(\frac{\delta h^2 b}{2} + N \frac{\delta h^3}{12} \right) = E \left(\frac{\delta h^2 b}{2} + 2 \frac{\delta^z h^3}{12} \right)$, $\delta^z = \frac{N}{2} \delta$ и большей массы за счет нервюр. Накопленная энергия деформации у многостеночного кессона при этом оказывается меньше на $\sim 2,2\%$, а жесткость соответственно больше чем у многонервного кессона. Уменьшение жесткости у многонервного кессона связано с неравномерным распределением нормальных напряжений σ_z в обшивке (см. рис. 4), обусловленным изгибом на боковых стенках. Так, например, и это видно из приведенной ниже таблицы, поперечные нормальные напряжения σ_x в обшивке, прилегающей к концевой нервюре, у многостеночного кессона значительно меньше, чем у многонервного кессона.

Энергия деформации, накопленная обшивкой, у многонервного кессона за счет данных факторов оказывается на $\sim 9\%$ больше, чем у многостеночного кессона. При этом изгибающий момент в сечении $\bar{z}=0,05$ воспринимается стенками и обшивкой у многостеночного и многонервного кессонов в следующем соотношении:

$$bh\delta\sigma_z^c + N \frac{h^2}{6} \delta\sigma_z^c = 4.3 \cdot 10^6 + 1.57 \cdot 10^6 = 5.87 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{см};$$

$$h\delta \int \sigma_z^u dx + \frac{h^2}{2} \cdot 2 \delta_{\max}^z \cdot \sigma_z^u = 4.10^6 + 1.83 \cdot 10^6 = 5.83 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{см}.$$

При учете конструктивно-технологических требований на постоянную толщину обшивки в поперечных сечениях неравномерность распре-

Вид кессона	\bar{x}	0,05	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95
	$\sigma_x, \text{кг/мм}^2$										
многостеночный	$\sigma_x \left(\bar{x}, +\frac{h}{2}, \bar{z}=1 \right)$	0,11	0,43	0,63	0,72	0,77	0,77	0,72	0,63	0,43	0,11
	$\sigma_x \left(\bar{x}, -\frac{h}{2}, \bar{z}=1 \right)$	-0,11	-0,43	-0,63	-0,72	-0,77	-0,77	-0,72	-0,63	-0,43	-0,11
многоперфорный	$\sigma_x \left(\bar{x}, +\frac{h}{2}, \bar{z}=1 \right)$	2,46	7,16	11,1	13,7	14,9	14,9	13,7	11,1	7,16	2,46
	$\sigma_x \left(\bar{x}, -\frac{h}{2}, \bar{z}=1 \right)$	-2,46	-7,16	-11,1	-13,7	-14,9	-14,9	-13,7	-11,1	-7,16	-2,46

деления нормальных напряжений может привести к дополнительным затратам массы материала для многонервюрного кессона.

Для оценки влияния эффекта неравномерности распределения нормальных напряжений σ_z на массу кессона рассмотрим поперечное сечение многостеночного кессона с моментом инерции

$$J = \frac{\delta b h^3}{2} + N \frac{\delta h^3}{12},$$

нагруженное изгибающим моментом $M_{изг}$. Обозначим через σ_{z0} нормальное напряжение, которое, начиная с некоторого числа стенок N_0 , будет иметь постоянное значение в поперечном сечении кессона. Тогда максимальное напряжение $\max \sigma_z$ при неравномерном распределении нормальных напряжений по сечению приближенно представим в виде

$$\max \sigma_z = \frac{\sigma_{z0}}{\left(1 - \frac{1}{N\alpha}\right)}, \quad N \geq 2,$$

где α — коэффициент, уменьшающий при $\alpha \geq 1$ эффект неравномерности напряжений σ_z .

Толщина обшивки и стенок, а также количество стенок в поперечном сечении многостеночного кессона минимальной массы определяется из решения оптимизационной задачи: $\min \rho(2\delta b + N\delta h)$ при ограничении по прочности $\max \sigma_z \leq [\sigma]$ или

$$\frac{M_{изг} h}{2J} \leq [\sigma] \left(1 - \frac{1}{N\alpha}\right), \quad (5)$$

где $[\sigma]$ — допускаемое по прочности напряжение. Выразив из (5) в форме равенства толщину обшивки δ , получим выражения погонной массы для многостеночного кессона и для многонервюрного кессона с толщиной боковых стенок $\delta^v = \frac{N\delta}{2}$:

$$M^c = 2 \frac{\rho M_{изг} \alpha N \left(1 + N \frac{h}{2b}\right)}{h [\sigma] (\alpha N - 1) \left(1 + N \frac{h}{6b}\right)}, \quad M^n = M^c \cdot \frac{\left(1 - \frac{1}{N\alpha}\right)}{\left(1 - \frac{1}{2\alpha}\right)}. \quad (6)$$

Из выражений (6) следует, что при значительной неравномерности напряжений ($0,5 < \alpha \leq 1$) в многонервюрном кессоне его погонная масса будет существенно больше, чем у многостеночного кессона.

В рассмотренном примере корневое сечение многостеночного кессона имело $\alpha \approx 3$ и уменьшение погонной массы по сравнению с многонервюрным вариантом составит примерно 14%. Следовательно, продольные стенки при изгибе позволяют равномерно нагрузить обшивку силового кессона в многостеночном варианте и тем самым уменьшить его массу по сравнению с многонервюрным кессоном.

4. Особенности нагружения сосредоточенными нагрузками многостеночного силового кессона. При применении многостеночного варианта КСС несущей поверхности возникают проблемы рациональной передачи сосредоточенных нагрузок в виде больших поперечных сил и крутящих моментов от органов управления, подвесок, шасси и т. п. Для исследования данных проблем в силовом кессоне (см. рис. 1) методом конечных элементов [3] определялось напряженно-деформированное состояние при следующих вариантах нагружения:

крутящий момент $M_{кр}$ прикладывался в сечении $\bar{z}=0,5$ парой сил $Q=5 \cdot 10^3$ кг по боковым стенкам (нагрузки от элерона);

поперечная сила $Q=10^5$ кг прикладывалась в сечении средней стенки $\bar{z}=0,5$ (нагрузки от шасси);

поперечные силы $Q=2 \cdot 10^4$ кг прикладывались в сечении $\bar{z}=0,5$ к стенкам, ближайшим к боковым (нагрузки от подвесок).

В результате расчетов получено, что передача $M_{кр}$ через силовую нервюру в зоне его приложения обеспечивается с линейным распределением по хорде поперечных перемещений w . При этом максимальные прогибы w по нервюре и нормальные напряжения в обшивке σ_z при $\bar{z}=0,05$ по сравнению с многостеночным кессоном без силовой нервюры значительно снижаются (соответственно на 30 и 40%). Кроме того, установка силовой нервюры в месте приложения крутящего момента приводит к уменьшению на $\sim 30\%$ касательных напряжений по передней и задней стенкам в корневой части и практически до нуля в концевой части кессона за счет ужесточения нервюрой упругого основания, создаваемого соседними стенками и обшивкой для сосредоточенных нагрузок.

При приложении поперечной силы в многостеночном кессоне к силовой нервюре изменения напряженно-деформированного состояния носят локальный характер.

При нагружении многостеночного кессона через силовую нервюру поперечными силами от подвесок обеспечивается уменьшение и равномерное распределение поперечных перемещений, нормальных напряжений в обшивке и касательных напряжений в продольных стенках. Следовательно, рациональным способом организации силового и кинематического взаимодействия в многостеночном варианте силового кессона при приложении сосредоточенных нагрузок является установка силовой нервюры в этой зоне.

5. Результаты оптимизации по условиям прочности силового кессона, нагруженного распределенной нагрузкой. Для оценки эффективности применения многостеночного силового кессона в несущих поверхностях ЛА решалась задача оптимизации по условиям прочности для многостеночного и многонервюрного вариантов силового кессона (рис. 1) с параметрами, указанными в п. 2 и нагруженных распределенной нагрузкой (см. рис. 5). В качестве критерия оптимальности принимался критерий равнопрочности, напряженно-деформированное состояние рассчитывалось методом конечных элементов [3], а распределение материала в итерационном процессе определялось по рекуррентным формулам алгоритма равнопрочных конструкций

$$\sigma^{(n+1)} = \begin{cases} \frac{|\sigma_{экр}^{(n)}|}{[\sigma]} \cdot \delta^{(n)}, & \delta^{(n+1)} > \delta_{\min} \\ \sigma_{\min} & , \delta^{(n+1)} \leq \delta_{\min}, \end{cases}$$

где $\sigma_{экр}^{(n)}$ — интенсивность напряжений; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение ($[\sigma]=3 \cdot 10^3$ кг/см²); δ_{\min} — конструктивное ограничение на минимальную толщину ($\delta_{\min}=0,1$ см).

Критерием окончания итерационного процесса было достижение заданной величины нарушения ограничения по прочности в максимально перегруженном элементе ($\sigma_K > [\sigma]$)

$$\varepsilon_\sigma = \left(\max_k \left| \frac{\sigma_k}{[\sigma]} \right| - 1 \right) \leq 0,05.$$

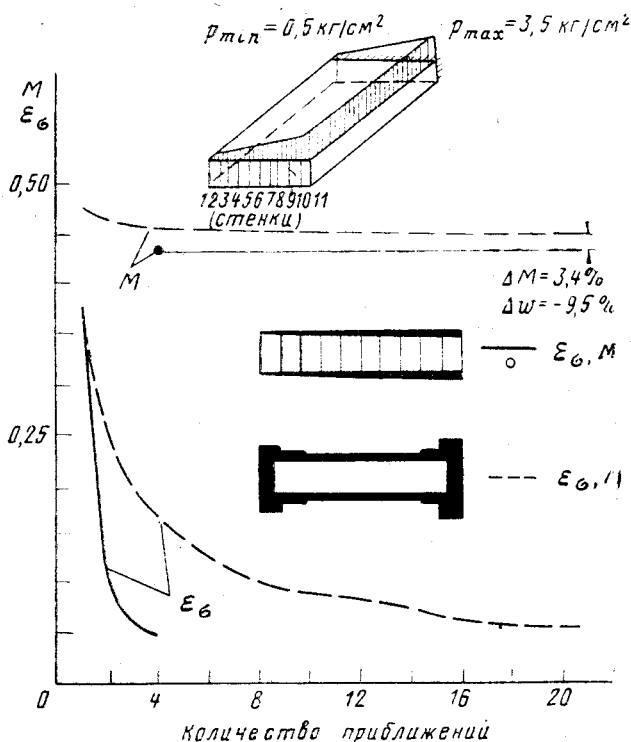


Рис. 5

Итерационный процесс получения оптимальной многостеночной конструкции сошелся на 4-й итерации, для многонервюрной конструкции при этом потребовалось более 20 итераций (см. рис. 5). Это объясняется тем, что в элементах многостеночного силового кессона с исходным равномерным распределением толщин обшивки и стенок при действии распределенной нагрузки в обшивке имеет место близкое к равномерному распределению преобладающих нормальных напряжений. В результате оптимизации многостеночный кессон имеет массу материала и максимальный прогиб соответственно меньше на $\sim 3,4\%$ и на $\sim 9,5\%$ по сравнению с многонервюрным кессоном. При этом распределение толщины обшивки в поперечных сечениях многостеночного кессона имеет равномерный характер, стенки в основном недогружены и принимают конструктивные ограничения (см. рис. 5).

В многонервюрном варианте проявляется тенденция к образованию двухлонжеронного силового кессона с мощными передней и задней стенками (см. рис. 5).

Таким образом, эффективность многостеночного силового кессона центральной части конструкции несущей поверхности по сравнению с многонервюрным вариантом определяется: увеличением жесткости на кручение за счет большей толщины обшивки при высоких значениях сжимающих усилий ($N_z > 2000 \text{ кг/см}$) и распространения эффекта стесненности деформации при кручении на большую длину кессона; увеличением жесткости на изгиб при одинаковых моментах инерции поперечных сечений кессона за счет включения стенок, обеспечивающего выравнивание при изгибе нормальных напряжений в поперечных

сечениях обшивки; равномерным распределением толщины обшивки продольных стенок, обеспечивающим при меньшей массе уменьшение максимальных прогибов от действия распределенных нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хертель Г. Тонкостенные конструкции. — М.: Машиностроение, 1965.
 2. Образцов И. Ф. Вариационные методы расчета тонкостенных авиационных конструкций. — М.: Машиностроение, 1966.
 3. Галкина Н. С., Кудряшов А. Б., Чубань В. Д. и др. Многоцелевая автоматизированная расчетная система «МАРС». — В сб.: Комплекс программ математической физики, т. 8. — Новосибирск, 1984.
-

Рукопись поступила 26/VI 1987 г.