УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ЦАГИ

Том XVII 1986 № 2

УДК 629.7.015.4.023.2
539.219.2

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОДКРЕПЛЕННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГЕРМООБОЛОЧКИ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

В. Г. Лагутин

Рассматривается цилиндрическая гермооболочка большого диаметра, с днищами, подкрепленная шпангоутами и стрингерами. В оболочке допускается возможность возникновения усталостной трещины длиною до 200 мм из-за повторяющихся наддувов. Трещина может возникнуть в обшивке под разрушенным шпангоутом либо в обшивке между двумя неразрушенными шпангоутами. Показано, что при фиксированной массе гермооболочки для минимизации математического ожидания коэффициента интенсивности напряжений, как меры опасности хрупкого разрушения, необходимо увеличить толщину обшивки за счет некоторого уменьшения площади поперечного сечения шпангоутов и стрингеров.

Размер оптимального шага шпангоутов зависит от длины трещины, вероятности возникновения трещины в каждом из двух рассматриваемых мест. Полученный результат можно использовать при проектировании фюзеляжа большого диаметра с учетом требований механики разрушения.

Увеличение диаметров гермофюзеляжей пассажирских самолетов приводит к увеличению нормальных окружных напряжений в обшивке. Эти напряжения повышают коэффициент интенсивности напряжений в вершинах возможных усталостных трещин и вызывают их ускоренный рост под действием повторяющихся наддувов. Возникает задача поиска таких значений конструктивных параметров, при которых гермооболочка при неизменной массе материала наилучшим образом противодействует возникновению и развитию наиболее опасных продольных трещин. Поскольку место зарождения усталостной трещины в обшивке заранее достоверно неизвестно, то при поиске оптимальных параметров гермооболочки следует минимизировать вероятностную меру опасности хрупкого разрушения — математическое ожидание коэффициента интенсивности напряжений. Особый интерес представляет изучение небольших усталостных трещин (длиною до 200 мм), так как время развития небольших трещин составляет бóльшую часть времени безопасной эксплуатации гермофюзеляжа.

1. Постановка задачи. Рассмотрим цилиндрическую гермооболочку (рис. 1), подкрепленную N одинаковыми шпангоутами, n одинаковыми стрингерами и нагруженную внутренним давлением q. Введем обозначения: R — радиус оболочки; L — длина оболочки; δ — толщина обшивки; t — толщина стенки шпангоута; r — внутренний радиус шпангоута; f — площадь поперечного сечения стрингера; l — полудлина

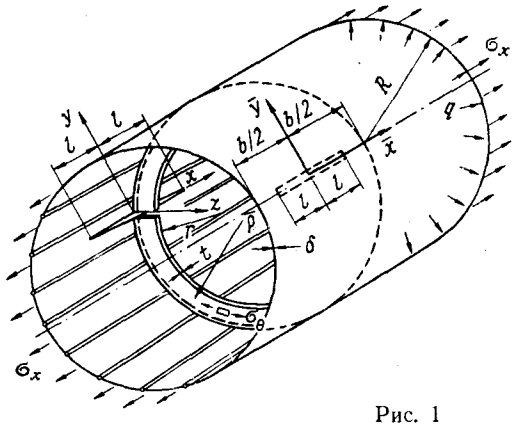


Рис. 1

трещины; b — шаг стрингеров; μ — коэффициент Пуассона; ρ, $\rho_{шп}$ — плотность материала обшивки со стрингерами и плотность материала шпангоутов.

Допустим, что трещина длиной $2l$ появляется в обшивке в направлении образующей под разрушенным шпангоутом, либо трещина появляется в обшивке симметрично относительно двух неразрушенных шпангоутов (контур такой трещины отмечен пунктирной линией на рис. 1), либо трещина появляется в обшивке во всех других «промежуточных» между двумя указанными положениями. Коэффициент интенсивности K_I для трещины, центр которой может «случайным» образом занимать любое место на отрезке, равном половине межшпангоутного расстояния, можно рассматривать как непрерывную случайную величину. Упростим вероятностную модель случайного появления усталостной трещины. Для этого будем считать коэффициент интенсивности K_I дискретной случайной величиной для трещины, которая с вероятностью p_1 может появиться под разрушенным шпангоутом, при этом $K_I = \overline{K}_I$ и с вероятностью p_2 может появиться симметрично относительно двух соседних неразрушенных шпангоутов, при этом $K_I = \overline{\overline{K}}_I$. Поставим задачу минимизации математического ожидания $M[K_I]$ коэффициента интенсивности K_I

$$M[K_I] = p_1 \overline{K}_I + p_2 \overline{\overline{K}}_I = \min \tag{1.1}$$

по переменным δ, t, r, N, f при условии постоянства массы силового материала M

$$M = 2\pi R\delta L\rho + nfL\rho + \pi (R^2 - r^2)\, tN\rho_{шп} = \text{const}, \tag{1.2}$$

при ограничениях на пределы изменения переменных

$$\left.\begin{array}{c} n = \text{const}_1, \quad N_{\min} \leqslant N \leqslant N_{\max}, \quad \delta_{\min} < \delta \leqslant \delta_{\max}, \\ t_{\min} \leqslant t \leqslant t_{\max}, \quad r_{\min} \leqslant r \leqslant r_{\max}, \quad f \geqslant 0, \quad b = \text{const}_2 \end{array}\right\} \tag{1.3}$$

и при условии обязательного возникновения усталостной трещины в безопасно повреждаемой гермооболочке

$$p_1 + p_2 = 1.$$

Решим задачу при различных длинах трещины $2l = 50$ мм, 100 мм, 150 мм, 200 мм и при следующих комбинациях вероятностей: ($p_1 = 1$, $p_2 = 0$), ($p_1 = 0$, $p_2 = 1$), ($p_1 = 0{,}75$, $p_2 = 0{,}25$), ($p_1 = 0{,}25$, $p_2 = 0{,}75$), ($p_1 = 0{,}5$, $p_2 = 0{,}5$). При принятых ограничениях на нагрузку, геометрические размеры, на варьируемые комбинации вероятностей проследим изменение конструктивного облика гермооболочки.

2. Определение коэффициентов интенсивности напряжений $\bar{K}_I$ и $\bar{\bar{K}}_I$ для трещины в обшивке. Коэффициент интенсивности трещины нормального отрыва $\bar{K}_I$ для правого конца трещины, которая расположена в обшивке симметрично относительно разрушенного шпангоута в направлении образующей цилиндрической оболочки, нагруженной внутренним давлением, может быть приближенно оценен по следующей формуле [1]:

$$K_I = \frac{T}{\delta\sqrt{\pi l}} + \frac{1}{\sqrt{\pi l}} \int_{-l}^{+l} \sigma_y(x) \sqrt{\frac{l+x}{l-x}}\, dx, \qquad (2.1)$$

где T — сила, передаваемая неразрушенным шпангоутом при отсутствии трещины в обшивке, δ — толщина обшивки, l — полудлина трещины, x — координата (см. рис. 1), направленная вдоль трещины и оси симметрии оболочки.

Начало координат x, y, z расположено на шпангоуте и совпадает с центром трещины (ось z направлена внутрь оболочки), $\sigma_y(x)$ — нормальное напряжение в обшивке в направлении оси y, которая направлена по касательной к образующей оболочке.

Напряжение $\sigma_y(x)$ определяется при отсутствии трещины. При использовании формулы (2.1) предполагается замена цилиндрической оболочки в районе трещины на бесконечную пластину, находящуюся в плоском напряженном состоянии и имеющую трещину $2l$, на берегах которой, согласно принципу суперпозиции, приложены «расклинивающие» силы T и напряжения $\sigma_y(x)$. Напряжения $\sigma_y(x)$ определяются из следующей известной формулы [2]:

$$\sigma_y(x) = -\frac{E}{R} W + \mu\sigma_x,$$

где E — модуль упругости обшивки при растяжении; R — радиус срединной поверхности обшивки; μ — коэффициент Пуассона; $\sigma_x = \frac{qR}{2h}$ — нормальные напряжения в направлении оси x, обусловленные наличием в гермооболочке днищ; f — площадь стрингера. Материал стрингера имеет модуль упругости E, b — шаг стрингеров, $h = \delta + f/b$.

Прогиб обшивки W между шпангоутами можно определить из дифференциального уравнения

$$\frac{d^4 W}{d\bar{x}^4} + 4\beta^4 W = \frac{-q\left(1 - \frac{\mu}{2}\right)}{D}, \qquad (2.2)$$

где $\beta^4 = \frac{E\delta}{4R^2 D} = \frac{3(1-\mu^2)}{R^2\delta^2}$, $D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)}$ — жесткость оболочки при изгибе, $\bar{x}$ — новая координата (см. рис. 1), которое является уравнением прогиба продольной полоски обшивки, работающей как

балка на упругом основании. При этом влиянием изгибной жесткости стрингеров на прогиб обшивки W пренебрегаем.

Общее решение уравнения (2.2) имеет вид:

$$W = \frac{-q\left(1-\frac{\mu}{2}\right)R^2}{E\delta} + c_1 \sin\beta\bar{x}\,\mathrm{Sh}\,\beta\bar{x} + c_2 \sin\beta\bar{x}\,\mathrm{Ch}\,\beta\bar{x} + \\ + c_3 \cos\beta\bar{x}\,\mathrm{Sh}\,\beta\bar{x} + c_4 \cos\beta\bar{x}\,\mathrm{Ch}\,\beta\bar{x}, \qquad (2.3)$$

где $c_i\,(i=1\div 4)$ — постоянные.

Поместим начало отсчета для вспомогательной координаты $\bar{x}$ (рис. 1) в середину одного из отсеков длиной B, на которые можно разбить оболочку. Так как имеется упругая симметрия и нагрузка на оболочку симметрична, то функция перемещений W (2.3) должна быть четной относительно $\bar{x}$, т. е. имеем $c_2=c_3=0$. Для определения постоянных c_1, c_4 используем условие (2.4) равенства нулю угла касательной прогиба обшивки в месте соединения ее со шпангоутом и условие (2.5) равенства радиального перемещения оболочки и шпангоута в месте их соединения:

$$\frac{dW\left(\bar{x}=\pm\frac{B}{2}\right)}{d\bar{x}} = 0, \qquad (2.4)$$

$$W = W_{\text{шп}}\left(\bar{x}=\pm\frac{B}{2}\right). \qquad (2.5)$$

Считаем, что шпангоут находится в плоском напряженном состоянии под действием радиальных растягивающих его погонных сил P (на единицу длины окружности радиуса R). Действием остальных сил пренебрегаем. Решение Ламе для перемещений кольца дает:

$$W_{\text{шп}} = -\frac{P\bar{R}^2}{(R-r)\,tE_{\text{шп}}}, \qquad (2.6)$$

где $\bar{R}^2 = \dfrac{(1-\mu)R^2+(1+\mu)r^2}{\left(1+\dfrac{r}{R}\right)}$, r — внутренний радиус шпангоута, t — толщина стенки шпангоута, $E_{\text{шп}}$ — модуль упругости материала шпангоута.

Знак радиального перемещения шпангоута в выражении (2.6) обусловлен принятым направлением оси z (см. рис. 1) внутрь оболочки. Перерезывающая сила Q [2] в обшивке равна

$$Q = -D\frac{d^3W}{d\bar{x}^3}; \qquad (2.7)$$

$$2Q = P. \qquad (2.8)$$

Подставляя выражение (2.7) в (2.8) и учитывая (2.3) при $c_2=c_3=0$, получим:

$$P = -2D\frac{d^3W}{d\bar{x}^3} = \\ = \begin{cases} -2D\,[2c_1\beta^3(-\sin\beta\bar{x}\,\mathrm{Ch}\,\beta\bar{x}+\cos\beta\bar{x}\,\mathrm{Sh}\,\beta\bar{x}) - \\ \quad -2c_4\beta^3(\cos\beta\bar{x}\,\mathrm{Sh}\,\beta\bar{x}+\sin\beta\bar{x}\,\mathrm{Ch}\,\beta\bar{x})] & \text{при} \quad \bar{x}=+\dfrac{B}{2}, \\ +2D\,[2c_1\beta^3(-\sin\beta\bar{x}\,\mathrm{Ch}\,\beta\bar{x}+\cos\beta\bar{x}\,\mathrm{Sh}\,\beta\bar{x}) + \\ \quad +2c_4\beta^3(\cos\beta\bar{x}\,\mathrm{Sh}\,\beta\bar{x}+\sin\beta\bar{x}\,\mathrm{Ch}\,\beta\bar{x})] & \text{при} \quad \bar{x}=-\dfrac{B}{2}. \end{cases} \qquad (2.9)$$

С учетом (2.9) и (2.6) условие (2.5) перепишем в виде

$$W = +2D\frac{\bar{R}^2}{(R-r)\,tE_{\text{шп}}}\frac{d^3W}{d\bar{x}^3} \quad \text{при} \quad \bar{x} = \pm\frac{B}{2}. \tag{2.10}$$

Подставляя (2.3) в условие (2.4), (2.10) и разрешая их относительно неизвестных c_1 и c_4, получим

$$c_1 = A_5\frac{A_2}{A_2A_3 - A_4A_1}; \tag{2.11}$$

$$c_4 = A_5\frac{A_1}{A_4A_1 - A_2A_3}, \tag{2.12}$$

где

$$m = \frac{4D\bar{R}^2\beta^3}{(R-r)\,tE_{\text{шп}}},$$

$$A_1 = \cos\alpha\,\mathrm{Sh}\,\alpha + \sin\alpha\,\mathrm{Ch}\,\alpha, \quad A_3 = \frac{-\sin\alpha\,\mathrm{Sh}\,\alpha}{m} - A_2, \quad A_5 = \frac{q\left(1-\frac{\mu}{2}\right)R^2}{E\delta m},$$

$$A_2 = -\sin\alpha\,\mathrm{Ch}\,\alpha + \cos\alpha\,\mathrm{Sh}\alpha, \quad A_4 = \frac{\cos\alpha\,\mathrm{Ch}\,\alpha}{m} + A_1, \qquad \alpha = \beta\frac{B}{2}.$$

Выражение для $\sigma_y(x)$ с учетом (2.3) при $c_2 = c_3 = 0$, найденных в (2.11), (2.12) констант, перепишем в виде:

$$\sigma_y(\bar{x}) = -\frac{E}{R}\left[\frac{-q\left(1-\frac{\mu}{2}\right)}{E\delta}R^2 + c_1\sin\beta\bar{x}\,\mathrm{Sh}\,\beta\bar{x} + c_4\cos\beta\bar{x}\,\mathrm{Ch}\,\beta\bar{x}\right] + \frac{\mu qR}{2h}. \tag{2.13}$$

Отметим, что (см. рис. 1)

$$\left.\begin{aligned} \bar{x} &= x - \frac{B}{2} \quad \text{при} \quad 0 \leqslant x \leqslant l, \\ \bar{x} &= x + \frac{B}{2} \quad \text{при} \quad 0 \geqslant x \geqslant -l. \end{aligned}\right\} \tag{2.14}$$

Величину осевой силы T в (2.1), передаваемой неразрушенным шпангоутом, определим интегрированием в направлении радиуса $r \leqslant \bar{\rho} \leqslant R$ (см. рис. 1) окружных напряжений σ_θ (рис. 1), которые возникали в неразрушенном шпангоуте от действия на его поверхности погонных усилий P, определяемых из (2.9)

$$T = t\int_r^R \sigma_\theta\, d\bar{\rho}. \tag{2.15}$$

Решение Ламе для напряжений в кольце при плоском напряженном состоянии дает:

$$\sigma_\theta = \frac{PR^2}{t(R^2 - r^2)}\left(1 + \frac{r^2}{\bar{\rho}^2}\right). \tag{2.16}$$

Подставляя (2.16) в (2.15), получим после интегрирования

$$T = P\cdot R. \tag{2.17}$$

Подставляя значение P из (2.9) в (2.17), получим выражение для T:

$$T = -2RD(2c_1\beta^3A_2 - 2c_4\beta^3A_1). \tag{2.18}$$

Выражение (2.1), предназначенное для численного определения коэффициента интенсивности K_I с учетом (2.13), (2.14), (2.18), примет окончательный вид:

$$\overline{K_I}=\frac{T}{\delta\sqrt{\pi l}}+$$

$$+\frac{1}{\sqrt{\pi l}}\int_{-l}^{0}\left\{-\frac{E}{R}\left[\frac{-q\left(1-\frac{\mu}{2}\right)}{E\delta}R^2+c_1\sin\beta\left(x+\frac{B}{2}\right)\mathrm{Sh}\,\beta\left(x+\frac{B}{2}\right)+\right.\right.$$

$$\left.\left.+c_4\cos\beta\left(x+\frac{B}{2}\right)\mathrm{Ch}\,\beta\left(x+\frac{B}{2}\right)\right]+\frac{\mu qR}{2h}\right\}\sqrt{\frac{l+x}{l-x}}+$$

$$+\frac{1}{\sqrt{\pi l}}\int_{0}^{+l}\left\{-\frac{E}{R}\left[\frac{-q\left(1-\frac{\mu}{2}\right)}{E\delta}R^2+c_1\sin\beta\left(x-\frac{B}{2}\right)\mathrm{Sh}\,\beta\left(x-\frac{B}{2}\right)+\right.\right.$$

$$\left.\left.+c_4\cos\beta\left(x-\frac{B}{2}\right)\mathrm{Ch}\,\beta\left(x-\frac{B}{2}\right)\right]+\frac{\mu qR}{2h}\right\}\sqrt{\frac{l+x}{l-x}}\,dx. \qquad (2.19)$$

Несобственный интеграл в (2.19) имеет конечное значение, так как порядок обращения в бесконечность подынтегральной функции при $x=+l$ менее единицы [знаменатель подынтегральной функции $(l-x)^{1/2}$ имеет степень $\frac{1}{2}<1$].

При выводе выражения (2.19) для K_I не учитывались следующие факторы:

1) Уменьшение K_I за счет влияния неразрушенных шпангоутов, это идет в запас по прочности.

2) Уменьшение K_I за счет передачи силы T с разрушенного шпангоута на обшивку вблизи берегов трещины, по некоторому «пятну» контакта. Это идет в запас по прочности.

3) Уменьшение K_I за счет влияния изгибной жесткости стрингера. Это идет в запас по прочности.

Выражение для коэффициента интенсивности напряжений $\overline{\overline{K}}_I$ в случае продольной трещины, расположенной симметрично относительно двух соседних неразрушенных шпангоутов, получим на основе тех же допущений и той же последовательности рассуждений, как и при выводе выражения (2.19) для K_I:

$$\overline{\overline{K}}_I=\frac{1}{\sqrt{\pi l}}\int_{-l}^{+l}\sigma_y(\bar{x})\sqrt{\frac{l+\bar{x}}{l-\bar{x}}}\,d\bar{x}=$$

$$=\frac{1}{\sqrt{\pi l}}\int_{-l}^{+l}\left\{-\frac{E}{R}\left[\frac{-q\left(1-\frac{\mu}{2}\right)}{E\delta}R^2+c_1\sin\beta\bar{x}\,\mathrm{Sh}\,\beta\bar{x}+c_4\cos\beta\bar{x}\,\mathrm{Ch}\,\beta\bar{x}\right]+\right.$$

$$\left.+\frac{\mu qR}{2h}\right\}\sqrt{\frac{l+\bar{x}}{l-\bar{x}}}\,d\bar{x}. \qquad (2.20)$$

3. Численный пример. Для численного примера примем следующие значения нагрузок и конструктивных параметров: $M = 1903$ кг, $L = 10^4$ мм, $b = 165{,}26$ мм, $n = 114$, $R = 3000$ мм, $\rho = \rho_{шп} = 2{,}83 \cdot 10^{-6}$ кг/мм^3, $\mu = 0{,}3$, $t_{min} = 2$ мм, $t_{max} = 4$ мм, $N_{min} = 20$, $N_{max} = 25$, $\delta_{min} = 1{,}8$ мм, $\delta_{max} = 2{,}8$ мм, $r_{min} = 2880$ мм, $r_{max} = 2920$ мм, $E = E_{шп} = 0{,}687 \cdot 10^4 \frac{дан}{мм^2}$, $q = 0{,}6 \cdot 10^{-3} \frac{дан}{мм^2}$.

Физический смысл решаемой задачи сводится как бы к «игре с природой», при которой параметры гермооболочки подбираются так, чтобы она наилучшим образом противодействовала трещине, место

		l	δ_{min}	δ, мм	δ_{max}	t_{min}	t, мм	t_{max}	$r_{min} \cdot 10^{-1}$	$r \cdot 10^{-1}$, мм	$r_{max} \cdot 10^{-1}$	N_{min}	N	N_{max}	f, мм^3	$M[K_I]$, даН/мм$^{3/2}$
$p_1=1; p_2=0$	Исх	100	1,8	2	2,8	2	3	4	286	288	292	20	22	25	131	134,3
	Опт			2,8			2,5			288,5			20		33,92	105
	Исх	75	–	2	–	–	3	–	–	288	–	–	22	–	131	116
	Опт			2,8			2,2			289,5			20		52,11	91,82
	Исх	50	–	2	–	–	3	–	–	288	–	–	22	–	131	100,7
	Опт			2,8			2,1			292			20		72,33	78,6
	Исх	25	–	2	–	–	3	–	–	288	–	–	22	–	131	95,24
	Опт			2,8			2,1			292			20		72,33	67,22
$p_1=0; p_2=1$	Исх	100	1,8	2	2,8	2	3	4	286	288	292	20	22	25	131	143,4
	Опт			2,8			2,1			292			25		58,64	106,5
	Исх	50	–	2	–	–	3	–	–	288	–	–	22	–	131	103,5
	Опт			2,8			2,1			292			20		72,33	78,16
	Исх	25	–	2	–	–	3	–	–	288	–	–	22	–	131	73,41
	Опт			2,8			2,1			292			20		72,33	55,37
$p_1=0,25; p_2=0,75$	Исх	100	1,8	2	2,8	2	3	4	286	288	292	20	22	25	131	141,1
	Опт			2,8			2,2			292			25		55,37	106,4
	Исх	50	–	2	–	–	3	–	–	288	–	–	22	–	131	102,8
	Опт			2,8			2,1			292			20		72,33	78,27
	Исх	25	–	2	–	–	3	–	–	288	–	–	22	–	131	78,87
	Опт			2,8			2,1			292			20		72,33	58,34
$p_1=0,75; p_2=0,25$	Исх	100	1,8	2	2,8	2	3	4	288	286	292	20	22	25	131	136,6
	Опт			2,8			2,2			291			25		46,54	106,4
	Исх	50	–	2	–	–	3	–	–	286	–	–	22	–	131	101,4
	Опт			2,8			2,1			292			20		72,33	78,27
	Исх	25	–	2	–	–	3	–	–	286	–	–	22	–	131	89,78
	Опт			2,8			2,1			292			20		72,33	64,26
$p_1=0,5; p_2=0,5$	Исх	100	1,8	2	2,8	2	3	4	286	288	292	20	22	25	131	138,9
	Опт			2,8			2,2			291,5			25		50,96	106.3
	Исх	75	–	2	–	–	3	–	–	288	–	–	22	–	131	121
	Опт			2,8			2,1			292			20		72,33	93,62
	Исх	50	–	2	–	–	3	–	–	288	–	–	22	–	131	102,1
	Опт			2,8			2,1			292			20		72,33	78,38
	Исх	25	–	2	–	–	3	–	–	288	–	–	22	–	131	84,33
	Опт			2,8			2,1			292			20		72,33	61,3

появления которой заранее неизвестно. Вычисление интегралов в (2.1), (2.19), (2.20) выполнялось численным интегрированием при разбиении всего интервала на 100 участков. Решение оптимизационной задачи проводилось методом локальных вариаций, который был близок в рассматриваемой задаче методу координатного спуска. Площадь стрингеров была зависимой переменной и выражалась из условия (1.2), поэтому перед решением проверялось условие, чтобы принятые значения N_{max}, δ_{max}, t_{max}, r_{min} автоматически обеспечивали в (1.3) положительность величины площади стрингера. Итерационный процесс минимизации целевой функции завершался, если локальные приращения независимых переменных $\delta(\pm 0{,}1$ мм), $t(\pm 0{,}1$ мм), $N(\pm 1$ мм), $r(\pm 5$ мм) не уменьшали целевую функцию (1.1) без нарушения ограничений (1.3).

По результатам оптимизации, приведенным в табл., можно сделать следующие выводы. Если эксплуатационный контроль обнаруживает трещины длиной до 200 мм, то при любых вероятностях $0 \leqslant p_1 \leqslant 1$, $0 \leqslant p_2 \leqslant 1$, $p_1 + p_2 = 1$ зарождения усталостной трещины (зависящих от действующих напряжений, брака сверловки заклепочных отверстий, брака самой клепки, случайных рисок на обшивке, металлургических дефектов) выгоднее, с точки зрения уменьшения вероятностной меры опасности хрупкого разрушения, усилить обшивку за счет некоторого уменьшения площади поперечного сечения стрингеров и шпангоутов. Степень этого уменьшения зависит от полудлины обнаруживаемой трещины l, т. е. l выступает как параметр задачи, определяющий облик конструкции. Качественно оптимальный шаг шпангоутов зависит от задаваемого уровня вероятностей p_1, p_2 и значения l.

На рис. 2 показано, что вероятностная мера опасности хрупкого разрушения $M[K_I]$, вычисленная при $l = 25$ мм, 50 мм, 100 мм, значительно уменьшается (на 25% при $l = 100$ мм) после оптимизации конструктивных параметров оболочки, при постоянстве ее массы, по сравнению с исходной вероятностной мерой опасности хрупкого разрушения.

На рис. 3 показано, что оптимизация параметров оболочки приводит по крайней мере к трехкратному увеличению числа наддувов $N_{опт}$, потребных для увеличения длины трещины с $2l = 50$ мм до $2l = 100$ мм, по сравнению с числом наддувов $N_{исх}$ в исходном варианте оболочки, причем эффект увеличения числа наддувов меняется в

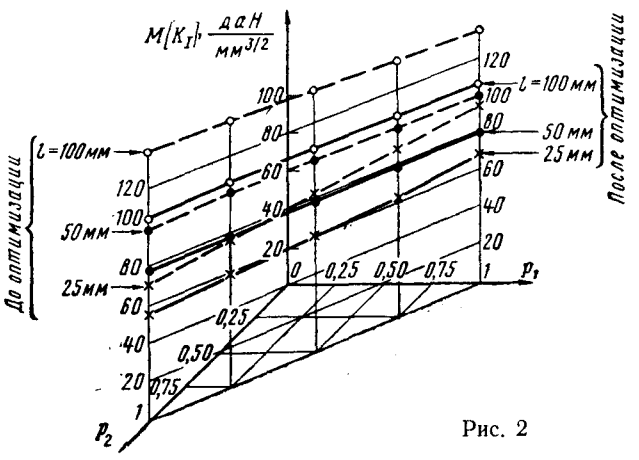


Рис. 2

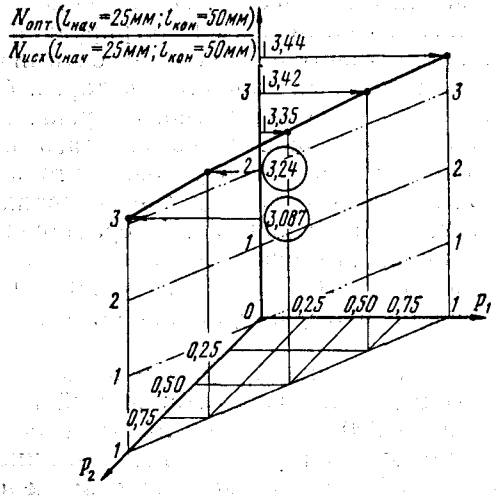


Рис. 3

узких пределах — от 3,078 раз до 3,44 раза при любых вероятностях зарождения трещин $0 \leqslant p_1 \leqslant 1$; $0 \leqslant p_2 \leqslant 1$; $p_1 + p_2 = 1$. Для расчета скоростей роста трещин в алюминиевой обшивке гермооболочки использовалась формула Пэриса.

В заключение автор выражает признательность В. М. Фролову за внимание к работе, а также Е. И. Крючкову за помощь в проведении вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. — М.: Наука, 1974.
2. Тимошенко С. П. Пластинки и оболочки. — М—Л.: 1948.

Рукопись поступила 19/X 1984 г.