

В кн.: Всесоюзная конференция "Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов". Тезисы докладов. - М.: Московский авиационный институт, 1983, с. 34.

11. Снигирев В.Ф. К задаче аналитического построения поверхностей летательных аппаратов. - Известия Вузов, Авиационная техника, 1983, № 4, с.100-102.

12. Бреббия К., Уокер С. Применение метода граничных элементов в технике. - М.: Мир, 1982. - 248 с.

13. Бенерджи П., Баттерфилд Р. Методы граничных элементов в прикладных науках. - М.: Мир, 1984. - 496 с.

14. Снигирев В.Ф. К задаче построения рабочей поверхности муансона гибочной оснастки. - В кн.: Пластическое формообразование деталей авиационной техники. - Казань: Казанский авиационный институт, 1983, с. 80-85.

УДК 629.7.015.4:539.3

В.Б.Карякин, Х.С.Хазанов

#### ОСЕВОЕ РАСТЯЖЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С ЭЛЛИПТИЧЕСКИМ ПОДКРЕПЛЕНИЕМ КРУГЛОГО ВЫРЕЗА

В /1,2/ рассмотрена задача о подкреплении выреза в цилиндрической оболочке кольцом переменного сечения. Необходимость ее решения возникает в следующих случаях - при стремлении либо снизить массу подкрепления при заданном максимальном уровне напряжений в конструкции, либо уменьшить уровень концентрации напряжений при заданной массе кольца путем перераспределения его материала.

Наиболее технологичным является подкрепление постоянной толщины. Переменности сечения можно достигнуть путем изменения формы внешней границы кольца, а также формы выреза, если это допустимо с точки зрения требований, предъявляемых к конструкции. В /1/ приведены результаты расчетов для случая эллиптического выреза и круговой формы внешней границы кольца. В настоящей статье представлен анализ исследований влияния на напряженно-деформированное состояние оболочки изменения формы внешней границы подкрепления круглого выреза.

Подкрепляющее кольцо может быть по-разному расположено относительно срединной поверхности оболочки. Рассмотрены три случая - когда общими являются срединные, наружные или внутренние поверх-

ности кольца и оболочки. Далее будем называть их симметричным, внутренним и наружным подкреплением соответственно.

Для решения поставленной задачи была применена методика расчета, основанная на методе конечных элементов. Ее особенностью является использование аналитического решения в тригонометрических рядах для построения матрицы жесткости части конструкции - оболочки с круглым вырезом, радиус которого несколько превышает максимальный радиус внешней границы подкрепления (рис. I). Данная область рассматривается как один конечный элемент, узлы которого располагаются по контуру круглого выреза.

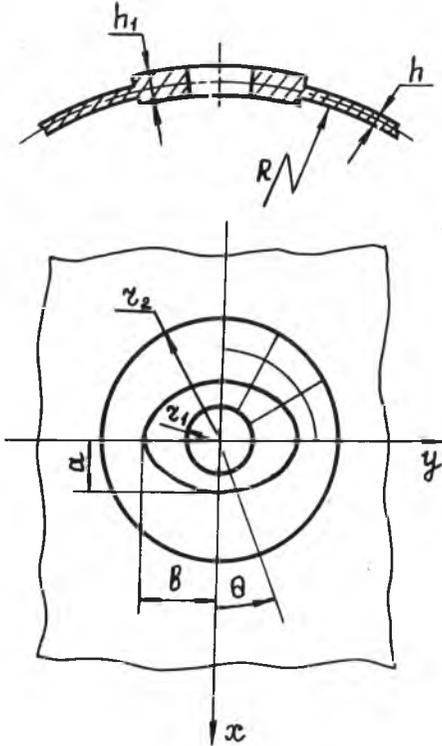


Рис. I

Область, ограниченная контуром выреза и окружностью радиуса  $r_2$ , рассматривается как подконструкция, состоящая из изопараметрических конечных элементов оболочки. Часть из них имеют толщину оболочки, а остальные - толщину подкрепления. Общими с „аналитическим” элементом являются узлы, расположенные на граничной окружности. Увеличение размеров подконструкции до окружности радиуса  $r_2$ , несколько большего максимального радиуса внешней границы

кольца, позволяет избежать использования треугольных конечных элементов и ограничиться применением элементов одного типа - более эффективных четырехугольных конечных элементов.

Размеры оболочки, выреза и подкрепления описываются следующими параметрами:

$$\omega = 0,25 \sqrt[3]{(1-\mu^2)} r_1 / \sqrt{Rh}, \quad \bar{c} = (a+b) / (2r_1), \quad \bar{h}_1 = h_1 / h,$$

где  $R$ ,  $h$  - радиус и толщина оболочки;  $r_1$  - радиус выреза;  $h_1$ ,  $a$ ,  $b$  - толщина подкрепления и размеры его внешней границы вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно;  $\mu$  - коэффициент Пуассона.

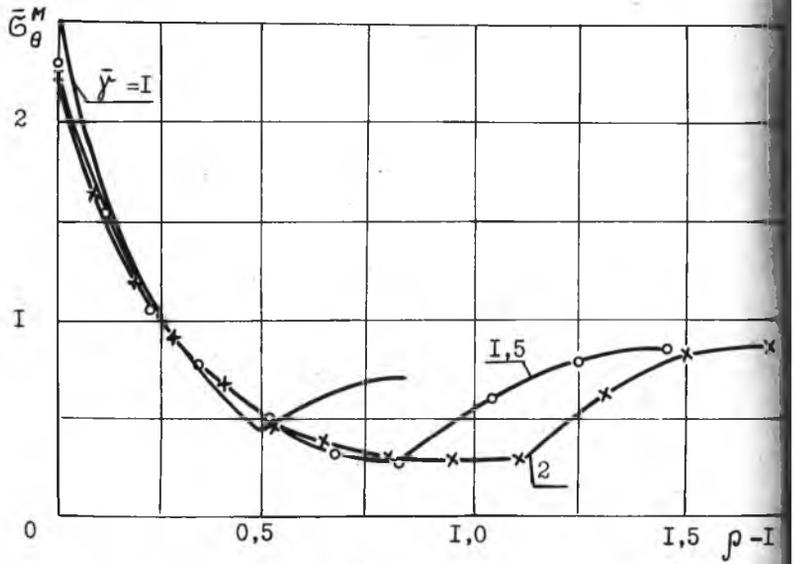
При исследовании влияния эллиптичности внешней границы подкрепления в качестве базового варианта была принята оболочка с круглым вырезом, подкрепленным кольцом постоянной ширины с параметрами  $\omega = 2$ ,  $\bar{r} = 1,5$ ,  $h_1 = 3$ ,  $\mu = 0,3$ . Круговая форма границы заменялась на эллиптическую при неизменном объеме подкрепления. Большая ось эллипса располагалась в опасном сечении  $\theta = 90^\circ$ . Получаемые значения напряжения представлялись в виде суммы мембранной и изгибной составляющих и относились к значению напряжения, возникающему в оболочке без выреза.

Для симметричного типа подкрепления при различных значениях  $\gamma = b/a$  на рис.2 представлены графики изменения по лучу  $\theta = 90^\circ$  мембранных и изгибных напряжений. Вдоль оси абсцисс отложена величина  $\rho - 1 = (r - r_1)/r_1$ . Из графиков следует, что с увеличением ширины кольца как мембранные, так и изгибные напряжения заметно изменяются лишь вблизи контура выреза. Мембранные напряжения уменьшаются, а изгибные несколько возрастают. По мере удаления от выреза напряжения близки к распределению базового варианта, т.е. когда  $\gamma = 1$ , и кольцо имеет постоянное сечение.

По лучу  $\theta = 0$  с ростом  $\gamma$  и уменьшением ширины кольца распределение мембранных напряжений по ширине изменяется незначительно. Изгибные напряжения увеличиваются по всей ширине кольца. В частности, при  $\gamma = 2$  на контуре выреза они превышают в 2,5 раза напряжения базового варианта.

На рис.3 представлены графики изменения окружных напряжений по внутреннему контуру кольца. Они показывают, что придание его внешней границе эллиптической формы незначительно сказывается на распределении мембранных напряжений. Распределение изгибных напряжений претерпевает также небольшие изменения, вызванные, в основном, ростом напряжений в окрестности  $\theta = 0$ .

В таблице I для различных значений  $\gamma$  приведены значения по внутреннему контуру подкрепляющего кольца мембранных, изгибных и наибольших эквивалентных напряжений, подсчитанных по теории прочности энергии формоизменения. Подчеркнуты максимальные значения эквивалентных напряжений в конструкции. При внутреннем подкреплении они имеют место в оболочке.



a

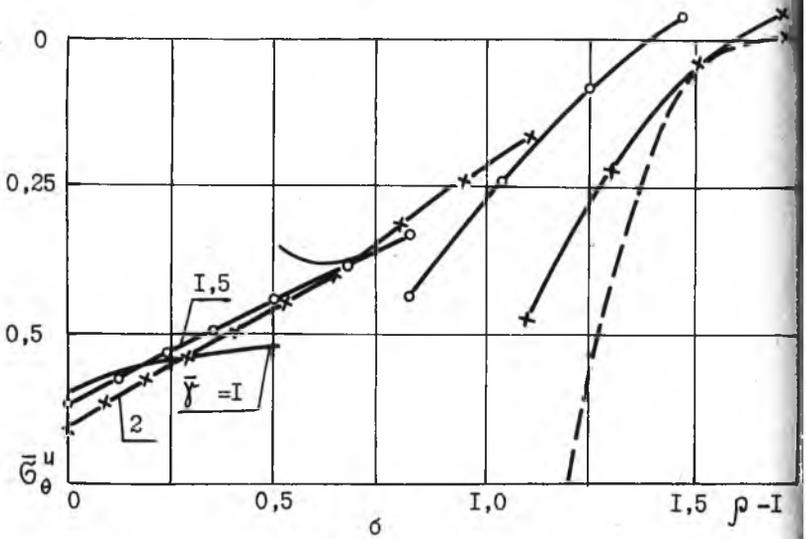
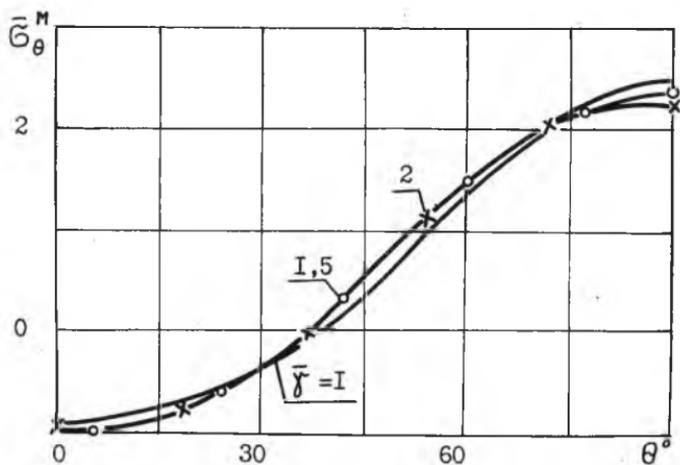
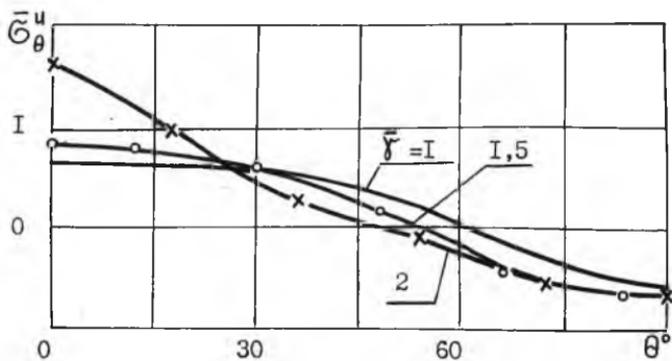


Рис. 2



a



b

Рис. 3

Таблица I

тип под-крепления	$\theta$	0			90°		
	$b/a$	$\bar{\sigma}_\theta^M$	$\bar{\sigma}_\theta^u$	$\bar{\sigma}^3$	$\bar{\sigma}_\theta^M$	$\bar{\sigma}_\theta^u$	$\bar{\sigma}^3$
симметрич-ный	1,0	-0,854	0,645	1,497	2,522	-0,595	<u>3,116</u>
	1,5	-0,994	0,856	1,851	2,315	-0,636	<u>2,949</u>
	1,7	-0,958	1,065	2,020	2,276	-0,655	<u>2,926</u>
	2,0	-0,914	1,631	2,545	2,254	-0,684	2,940
внутренний	1,0	-0,234	0,515	0,756	2,363	0,022	2,378
	1,5	-0,345	0,641	0,986	2,050	0,069	2,111
	1,7	-0,452	0,724	1,175	1,973	0,071	2,035
	2,0	-0,779	1,047	1,831	1,894	0,087	1,980
наружный	1,0	-1,331	0,871	2,209	2,509	-1,065	<u>3,560</u>
	1,5	-1,599	1,406	3,007	2,586	-1,191	<u>3,769</u>
	1,7	-1,361	1,583	2,938	2,572	-1,240	<u>3,799</u>
	2,0	-0,835	1,708	2,535	2,581	-1,317	<u>3,901</u>

Анализ результатов расчета показывает, что при всех типах подкрепления и отношениях полуосей эллипса его внешней границы максимальные напряжения в кольце возникают при  $\theta = 90^\circ$ . При симметричном и внутреннем подкреплениях они снижаются за счет уменьшения мембранных напряжений для  $\gamma = 2$ , например, на 5,7 % и 16,7 % соответственно. При наружном подкреплении напряжения растут из-за увеличения изгибной составляющей.

Графики изменения  $\bar{\sigma}^3_{\max}$  в подкрепляющем кольце и в оболочке в зависимости от  $\gamma$  приведены на рис.4. Сплошными линиями изображены напряжения в кольце, штриховыми - в оболочке. Цифрами указан тип подкрепления: 1 - симметричный, 2 - внутренний, 3 - наружный.

Напряжения в оболочке при симметричном подкреплении практически не изменяются, а при внутреннем и наружном подкреплении

несколько возрастают. При этом точка  $\bar{\sigma}_{max}^z$  имеет место по линии деформации с кольцом при  $\theta = (45 \pm 10)$ .

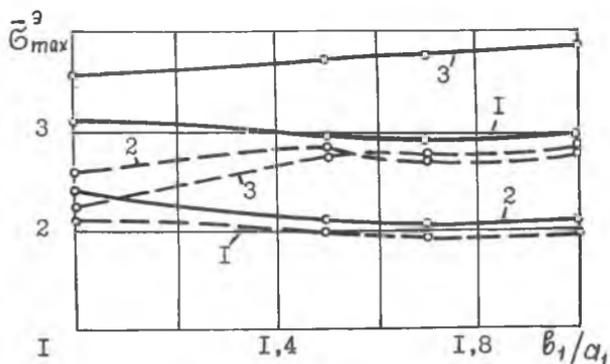


Рис. 4

Следует отметить, что выбранные для исследования параметры подкрепляющего кольца  $h_1 = 3$ ,  $\bar{r}_1 = 1,5$  являются при внутреннем типе подкрепления не совсем удачными, поскольку в этом случае максимальные напряжения в оболочке превышают на 10 % напряжения в кольце. Однако полученные результаты позволяют оценить тенденцию к изменению напряжений в кольце и в оболочке с ростом эллиптичности внешней границы подкрепления.

#### Л и т е р а т у р а

1. Карякин В.Б., Хазанов Х.С. Об эффективности подкрепления выреза в цилиндрической оболочке кольцом переменной ширины. - В кн.: Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций. Межвуз. сб. - Куйбышев: КуАИ, 1983, с. 50-57.

2. Карякин В.Б., Хазанов Х.С. Концентрация напряжений в цилиндрическом сосуде с подкрепленным эллиптическим вырезом при действии внутреннего давления. - В кн.: Прочность и долговечность элементов конструкции летательных аппаратов. Межвуз. сб. - Куйбышев: КуАИ, 1984, с. 29-36.