

М.И. Вильчек, Б.А. Юдкевич

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОКРЕСТНОСТИ ВЫРЕЗА В ПОДКРЕПЛЕННОЙ ПАНЕЛИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ

Несимметрия подкрепления панели относительно ее срединной плоскости обуславливает возникновение в зоне выреза местного изгиба из плоскости панели.

Для исследования влияния местного изгиба на напряженно-деформированное состояние (НДС) зоны выреза была разработана специальная конечно-элементная модель (КЭМ) на базе библиотеки конечных элементов комплекса программы расчета авиационных конструкций ПРАСАК [1], широко распространенного на предприятиях отрасли.

В принятой КЭМ обшивка моделировалась плоскими изотропными элементами, обладающими изгибной жесткостью, а стрингеры — балочными элементами типа "двутавр". Связи между обшивкой и стрингерами в общих узлах предполагались идеальными, то есть в рамках данной КЭМ свойства и влияние крепежа не учитываются.

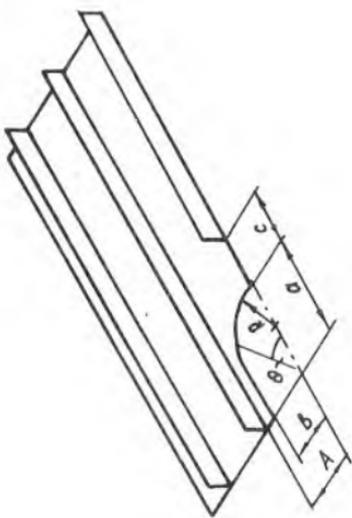
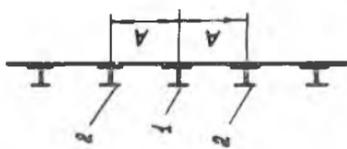
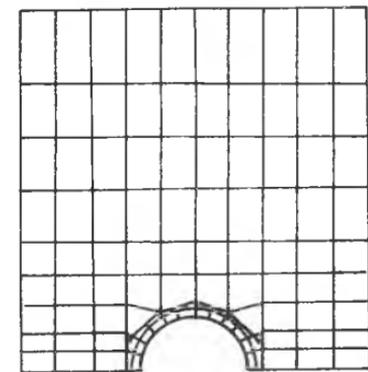
Объектом исследования являлись прямоугольные пятистрингерные панели с соотношением сторон 1:2,4, имеющие вырез круглой или эллиптической формы, перерезающий средний стрингер. Отношение диаметра (ширины) выреза к ширине панели принималось 1:3,3.

На рис.1 приведена схема типовой панели с овальным вырезом ($\frac{a}{b} = 2$) и сетка КЭМ с круговым вырезом.

Толщина обшивки и площадь сечения стрингеров принимались постоянными по длине панели. Панели нагружались равномерным потоком растягивающих усилий, параллельных осям стрингеров.

Картина НДС окрестности кругового выреза в виде векторов главных напряжений на наружной и внутренней поверхностях панели приведена на рис.2 (для наглядности векторы разнесены от центров соответствующих элементов).

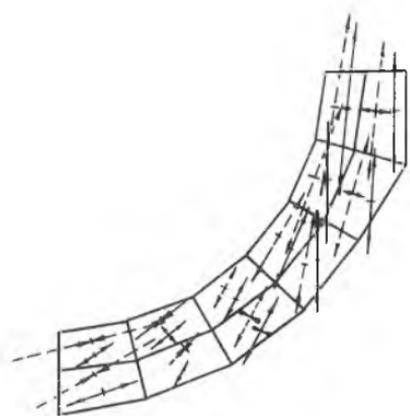
Из рассмотрения этой картины видно, что характер изменения потоков главных усилий N_1, N_2 ($N_i = \sigma_i \delta$) и соответствующих главных напряжений σ_1, σ_2 (средних по толщине обшивки) близок к картине НДС соответствующего выреза в плоской КЭМ [2], но наблюдается существенная разница



б

а

Р и с. 1. Типовые вырезы в подкрепленных панелях:
 а-расчетная сетка КЗМ и поперечное сечение панели с круговым вырезом; 1-средний стрингер; 2-окантовывающий стрингер; б-панель с овальным вырезом
 ($a=2b; b=R$)



Р и с. 2. Напряженно-деформированное состояние в окрестности выреза. Картина главных напряжений в обшивке: — внутренняя поверхность, - - - - наружная поверхность

между главными напряжениями на наружной и внутренней поверхностях панели, обусловленная местным изгибом этой зоны.

Обращает на себя внимание разница тангенциальных напряжений вблизи точки Б, где напряжения на наружной и внутренней поверхностях панели противоположного знака, причем абсолютная величина сжимающих напряжений в 2,5-3 раза больше по сравнению с напряжениями в соответствующей точке плоской пластины с круговым вырезом. Аналогичная картина наблюдалась при испытаниях натуральных образцов.

В конструкциях панелей летательных аппаратов изгибная жесткость обшивки ($EJ_{х обш}$) существенно меньше изгибной жесткости стрингеров ($EJ_{х стр}$), вследствие чего деформации обшивки из плоскости панели будут, в основном, определяться прогибами стрингеров (окантовывающего стрингера в окрестности точки А и среднего стрингера - в окрестности точки Б). Именно перерезанием среднего стрингера и объясняется большая степень влияния местного изгиба вблизи точки Б.

Для оценки влияния местного изгиба на изменение напряжений по высоте сечения панели использовались безразмерные критерии:

$$\text{относительное среднее напряжение } \bar{\sigma} = \frac{\sigma_{ср}}{\sigma_{\infty}} = \frac{\sigma_2^H + \sigma_2^B}{2\sigma_{\infty}};$$

$$\text{осредненное эквивалентное напряжение } \bar{\sigma}_{экв} = \frac{\sigma_{эср}}{\sigma_{\infty}} = \frac{\sigma_2^H + \sigma_2^B}{2\sigma_{\infty}};$$

$$\text{коэффициент моментности I-го рода } m' = \frac{\Delta \sigma_{II}}{\sigma_{ср}} = \frac{\sigma_2^H - \sigma_2^B}{\sigma_2^H + \sigma_2^B};$$

$$\text{коэффициент моментности II-го рода } m'' = \frac{\Delta \sigma_{III}}{\sigma_{эср}} = \frac{\sigma_3^H - \sigma_3^B}{\sigma_3^H + \sigma_3^B};$$

где σ^H, σ^B - компоненты напряженного состояния соответственно на наружной и внутренней поверхностях панели;

$\sigma_{ср}$ - среднее по толщине значение той же компоненты напряженного состояния;

σ_2^H, σ_2^B - эквивалентные напряжения соответственно на наружной и внутренней поверхностях панели;

$\sigma_{эср}$ - среднее по толщине значение эквивалентного напряжения;

σ_{∞} - напряжение в регулярной области панели;

$\Delta \sigma_{II}$ - приращение напряжения на наружной поверхности, обусловленное местным изгибом;

$\Delta \bar{\sigma}_{\Sigma}$ — приращение эквивалентного напряжения на наружной поверхности, обусловленное местным изгибом.

Первые два критерия, по смыслу, представляют собой осредненные по толщине панели значения коэффициентов концентрации напряжений.

Значения коэффициентов концентрации напряжений в соответствующих точках наружной и внутренней поверхностей панели могут быть определены из зависимостей:

$$\bar{\sigma}^H = \bar{\sigma}(1+m'); \quad \bar{\sigma}^B = \bar{\sigma}(1-m'); \quad \bar{\sigma}_2^H = \bar{\sigma}_{экв}(1+m''); \quad \bar{\sigma}_2^B = \bar{\sigma}_{экв}(1-m'').$$

Очевидно, что при $m > 0$ местный изгиб приводит к увеличению (по модулю) коэффициента концентрации напряжений на наружной поверхности, а при $m < 0$ — на внутренней поверхности панели.

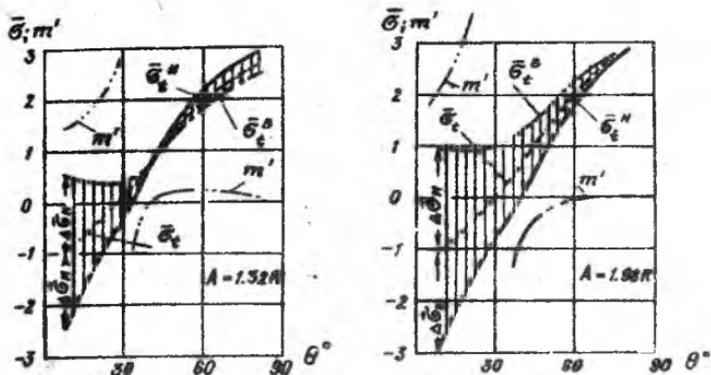
Степень влияния местного изгиба на НДС окрестности выреза в подкрепленной панели зависит от следующих факторов:

1. Расположения окантовывающих стрингеров относительно края выреза;
2. Расположения торца среднего стрингера относительно края выреза;
3. Соотношения жесткостей обшивки и подкрепляющего продольного набора;
4. Наличия и расположения связей продольного и поперечного набора;
5. Наличия местного подкрепления кромки выреза от деформаций из плоскости панели.

При исследовании влияния расположения окантовывающих стрингеров относительно края выреза рассматривалась панель с круговым вырезом (см. рис. 1а), имеющая следующие параметры: длина $L = 14R$, ширина $B = 6.6R$, соотношение нормальных жесткостей обшивки и продольного набора $K_F = \frac{F_{обш}}{F_E} = 0.57$, расстояние от оси симметрии выреза до оси окантовывающего стрингера $A = (1.32 + 1.98)R$.

На рис. 3 приведены кривые зависимости относительных напряжений (местных коэффициентов концентрации напряжений) и коэффициентов моментности m' для двух вариантов расположения окантовывающих стрингеров относительно края выреза.

Из рассмотрения приведенных зависимостей следует, что по мере удаления окантовывающего стрингера с $A = 1.32R$ до $A = 1.98R$ (при одинаковом расположении торца среднего стрингера на расстоянии $0.32R$ от края выреза):



Р и с.3. Зависимость параметров НДС (в точках, отстоящих над-008R от контура выреза) от положения окантовывающих стрингеров

- а) средние по толщине напряжения на контуре $\bar{\sigma}_t$ меняются незначительно - лишь в точке А отмечается рост $\bar{\sigma}_t$ до 7,5%. Характер кривой $\bar{\sigma}_t(\theta)$ и положение точки $\bar{\sigma}_t=0$ практически не изменяются;
- б) с удалением окантовывающего стрингера от края выреза изменяется характер его изгиба и соответственно изменяется характер влияния местного изгиба на величину концентрации напряжений на наружной и внутренней поверхностях панели. Так при $A=1.32R$ наибольшие растягивающие напряжения имеют место на наружной поверхности, а при $A=1.98R$ - на внутренней поверхности обшивки, мало доступной для обнаружения усталостных трещин при периодических осмотрах;
- в) по мере удаления скантовывающего стрингера от края выреза увеличивается зона влияния среднего перерезаемого стрингера и соответственно существенно возрастают коэффициенты концентрации напряжений в окрестности точки Б, где они достигают того же порядка, что и максимальные коэффициенты концентрации растягивающих напряжений в точке А^ж;
- г) в зоне максимальной концентрации растягивающих напряжений (точка А) влияние местного изгиба сказывается незначительно.

^ж В окрестности точки Б также заметно возрастают коэффициенты концентрации эквивалентных напряжений $\bar{\sigma}_2^*$. По мере развития механики разрушения и совершенствования критериев разрушения в сжатой зоне эти результаты, возможно, окажутся полезными.

Влияние формы выреза оценивалось на основе проведения сравнительных расчетов НДС для панелей с овальным и круговым вырезами, показанных соответственно на рис. 1а и 1б и имеющих одинаковые жесткостные параметры.

Рассмотрение результатов расчета показывает, что при переходе от кругового к овальному вырезу существенно увеличивается зона влияния окантовывающего стрингера, а зона влияния среднего стрингера соответственно сокращается. Это, очевидно, объясняется тем, что в случае овального выреза его кромка на большей части периметра выреза примыкает к окантовывающему стрингеру.

В случае овального выреза наблюдается снижение концентрации растягивающих напряжений в зоне точки А (которое можно было предвидеть, исходя из решения аналогичной плоской задачи), а также малое влияние местного изгиба в зоне $\theta = 20^\circ + 90^\circ$, что объясняется преобладающим влиянием окантовывающего стрингера в этой зоне.

Напротив, в зоне точки В наблюдается существенное увеличение влияния местного изгиба и рост концентрации напряжений, особенно на наружной поверхности, где по модулю максимальный коэффициент концентрации напряжений даже превосходит коэффициент концентрации в растянутой зоне.

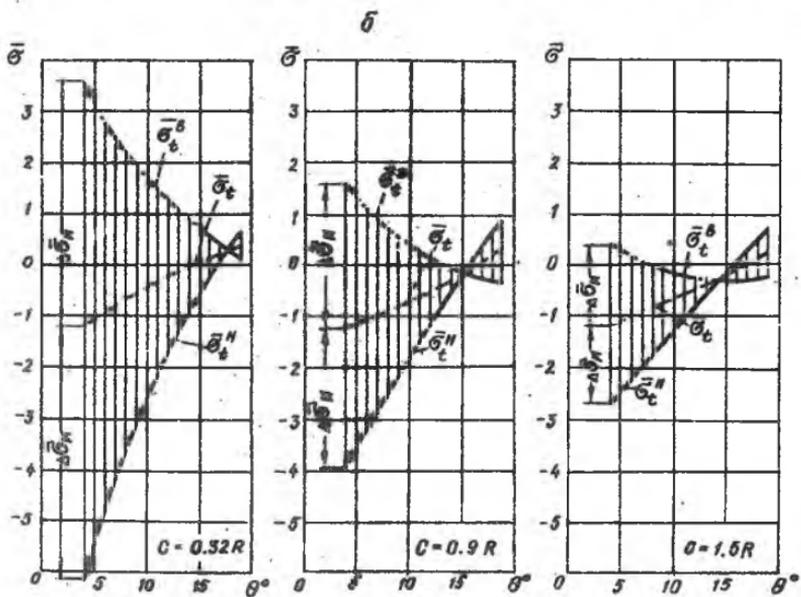
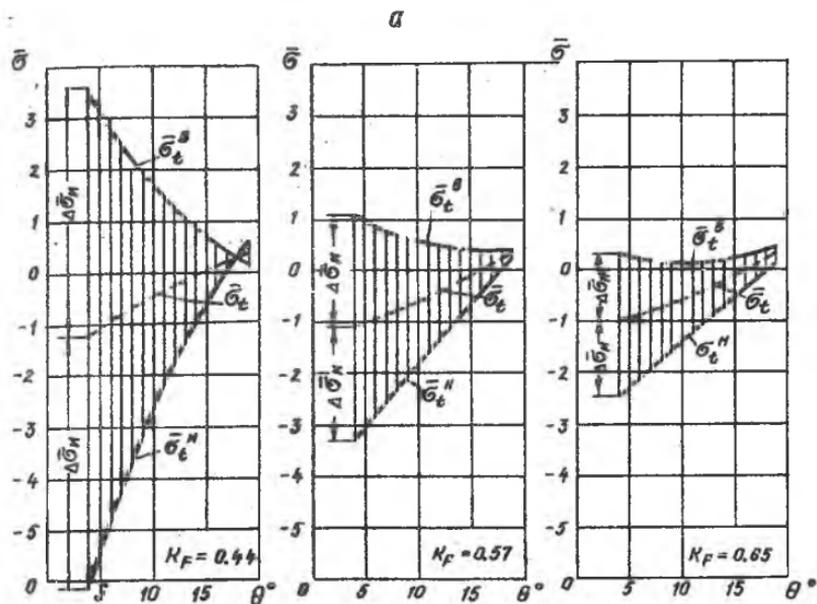
Эти особенности НДС панелей с овальными вырезами делают желательным проведение дальнейших исследований влияния местного изгиба именно на подобных панелях.

Исследование влияния расположения торца среднего (перерезаемого) стрингера относительно края выреза проводилось для семейства стрингерных панелей с овальным вырезом. Размеры панели характеризовались величинами: длина $L = 16R$, ширина $B = 6,6R$, отношение полуосей овала $a/b = 2$ (ширина выреза $b = R$), отношение нормальных жесткостей обшивки и продольного набора $K_F = 0,44$, расстояние от оси симметрии выреза до оси окантовывающего стрингера $A = 1,32R$.

Рассматривались три варианта расположения торца среднего стрингера $c/R = 0,32; 0,90; 1,50$, где c — расстояние от торца стрингера до края выреза.

Результаты исследования представлены в виде семейства кривых на рис. 4а. Анализ приведенных зависимостей показывает, что:

а) в растянутой зоне ($\theta = 30^\circ + 90^\circ$) влияние местного изгиба на величину $\sigma_c^{H,B}$ сравнительно невелико и быстро уменьшается с ростом расстояния c (так в точке контура, соответствующей $\theta = 35^\circ$ величина



Р и с. 4. Зависимость параметров НДС от относительной жесткости обшивки a и от удаления торца перерезаемого стрингера от края выреза b

коэффициента моментности m' падает с 0,43 при $c = 0,32 R$ до 0,2 при $c = 1,5 R$). То есть за счет удаления торца перерезаемого стрингера от края выреза можно обеспечить практически безмоментное НДС в этой зоне;

б) в зоне $\theta = 0+25^\circ$ моментность резко падает с ростом величины C (уменьшаются как величины коэффициентов моментности m' , так и эквивалентные напряжения $\bar{\sigma}_{экл}$ *)). Коэффициенты концентрации контурных напряжений вблизи точки Б уменьшаются в 2,3 раза на наружной поверхности и почти в 9 раз - на внутренней;

в) поскольку снижение моментности по мере роста величины C объясняется более плавным перераспределением усилий на большем расстоянии от выреза, то того же эффекта можно, видимо, добиться путем обеспечения достаточно плавного включения (изменения сечения) среднего стрингера.

Исследование влияния соотношения нормальных жесткостей и продольного набора производилось на примере той же стрингерной панели с овальным вырезом. За счет изменения толщины обшивки при неизменном сечении стрингеров обеспечивались значения $K_F = 0,44, 0,57$ и $0,65$. Следует подчеркнуть, что за счет соответствующего изменения положения центра тяжести сечения панели в регулярной области, соотношение изгибных жесткостей EJ_x обшивки и подкрепляющего продольного набора ($K_F = \frac{J_x обш}{J_x \Sigma}$) оставалось практически неизменным. Расчеты производились при положении торца среднего стрингера $C = 0,32 R$.

Результаты исследования представлены в виде семейства кривых на рис. 46. Анализ приведенных зависимостей показывает, что с ростом относительной нормальной жесткости обшивки (K_F растет):

а) моментность в растянутой зоне $\theta = 30^\circ + 90^\circ$ будучи небольшой, быстро падает и $m' \rightarrow 0$, подобно тому, как это имело место при удалении торца среднего стрингера от края выреза;

б) в зоне $\theta = 0+15^\circ$, где влияние местного изгиба наиболее существенно, отмечается также резкое снижение моментности - падают значения коэффициентов m' и осредненных эквивалентных напряжений $\bar{\sigma}_{экл}$;

в) характер влияния параметров C и K_F на изгибные компоненты НДС в зоне выреза очень похож, а величина влияния определяется, в основном, величиной усилия, заводимого в окрестность точки Б средним

*) Небольшой рост m'' в зоне $\theta = 0+30^\circ$ на фоне значительного снижения $\bar{\sigma}_{экл}$ не меняет данной оценки.

стрингером (а это усилие возрастает с уменьшением C и уменьшением K_F).

Очевидно, что увеличение изгибной жесткости элементов продольного набора (как, впрочем, и увеличение изгибной жесткости обшивки) ведет к стеснению деформаций из плоскости панели, и, соответственно, к снижению влияния местного изгиба на НДС зоны выреза. Существенное увеличение соотношения изгибных жесткостей K_{γ} , как показывают простейшие расчеты, может быть достигнуто лишь путем значительного увеличения площади сечения верхних поясов стрингеров (не связанных с обшивкой), что является нерациональным с точки зрения обеспечения минимального привеса усиления, либо путем увеличения высоты стрингеров (ребер), что в реальных конструкциях трудноосуществимо. Следует также отметить, что в случае увеличения толщины вертикальных ребер стрингеров возрастает их жесткость, что, по-видимому, является более существенным, чем изменение относительной изгибной жесткости за счет такого утолщения.

Для стрингерной панели с круговым вырезом, показанной на рис. 1а, был проведен сравнительный расчет ее аналога, в котором стрингера были заменены ребрами той же высоты и того же поперечного сечения. При этом относительная изгибная жесткость продольного набора уменьшилась в полтора раза (K_{γ} увеличился с 0,2 до 0,3), а жесткость (толщина) вертикального ребра увеличилась примерно в 4 раза.

Хотя одновременное изменение двух параметров подкрепления: относительной изгибной жесткости и жесткости вертикального ребра — не позволяет провести анализ влияния **каждого** из них, результаты расчета позволяют все же сделать заключение о том, что степень влияния этих параметров (реальная область изменения которых, как было отмечено выше, невелика) существенно меньше по сравнению с влиянием соотношения **нормальных жесткостей** обшивки и продольного набора.

Анализ картины НДС в выше рассмотренных задачах показал, что рост коэффициентов моментности m' определяется ростом перемещений (прогибов) в точках контура, который, в свою очередь, обуславливается изгибом окантовывающего и среднего стрингеров в результате их одностороннего нагружения потоками касательных сил T_{xz} со стороны обшивки.

Это обстоятельство подсказывает еще одну возможность снижения влияния местного изгиба — стеснения прогибов точек контура выреза путем введения связей элементов продольного и поперечного набора (с использованием жесткости последних в плоскости, перпендикулярной

к плоскости панели).

Такие связи могут быть реализованы постановкой нервюр, штангоутов, диафрагм или специальных стоек, связывающих элементы продольного набора панели с вырезом с противоположащей панелью.

В принятой КЭМ постановка подобных связей моделировалась путем введения закреплений $U=0$ в различных сечениях по длине панели.

На рис.5 представлены результаты расчета прогибов панели с овальным вырезом при введении закреплений $U=0$ в сечениях $z \approx 3,5R$, $z = 2,32R$ и , для сравнения, аналогичная картина для незакрепленной панели. Для наглядности величина прогибов увеличена в 10 раз.

Приведенные рисунки показывают, что по мере приближения связей продольного и поперечного набора к краю выреза величина прогибов уменьшается и соответственно снижается влияние местного изгиба на НДС панели в зоне выреза. При размещении закрепления на расстоянии не более $1,5R$ от края выреза моментность сказывается только в окрестности точки контура с $\bar{\sigma}_t = 0$.

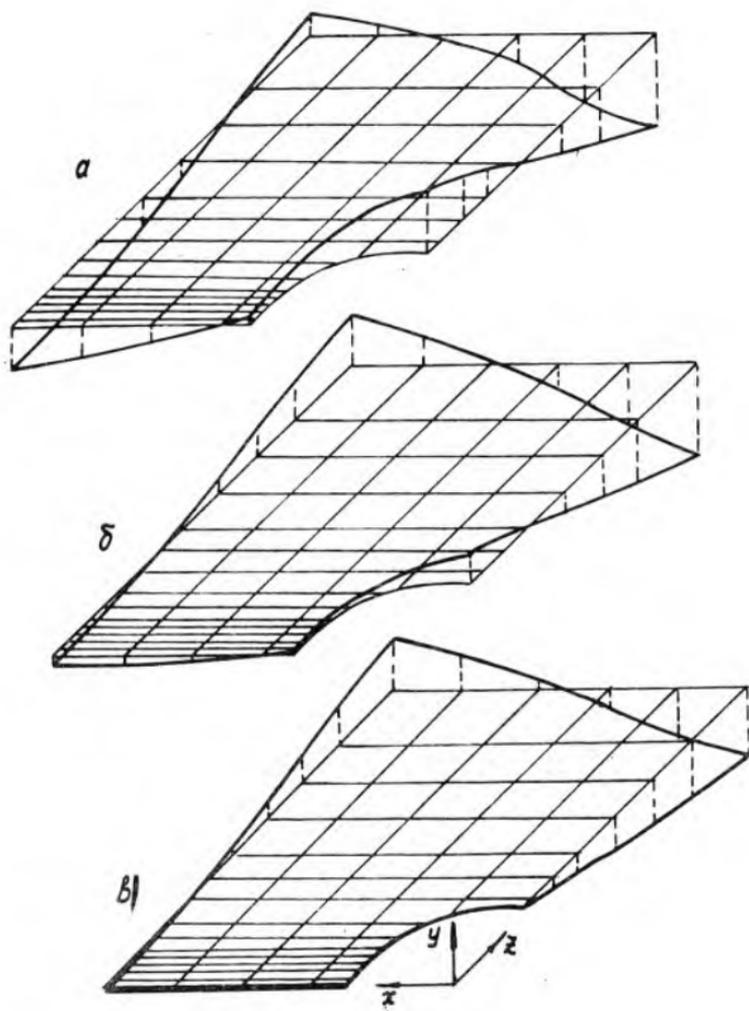
В практически важном случае: постановка ряда нервюр, первая из которых стоит на расстоянии не более $1,5R$ от края выреза — моментность становится пренебрежимо малой.

Представляет интерес величина усилий (реакций) в поперечных связях, обусловленных местным изгибом зоны выреза в подкрепленной панели. Для их оценки вместо введения связей $U=0$ в соответствующих сечениях устанавливались стенки, соединенные с верхними (внутренними) поясами стрингеров. Величины погонных касательных усилий в этих стенках оказались весьма незначительными, что дает основание использовать постановку стоек малого сечения вблизи точек А и Б контура вместо установки дополнительных нервюр с целью снижения влияния местного изгиба в зоне выреза.

Возможны ситуации, когда использование рассмотренных выше путей снижения моментности у контура выреза оказывается почему-либо неприемлемым.

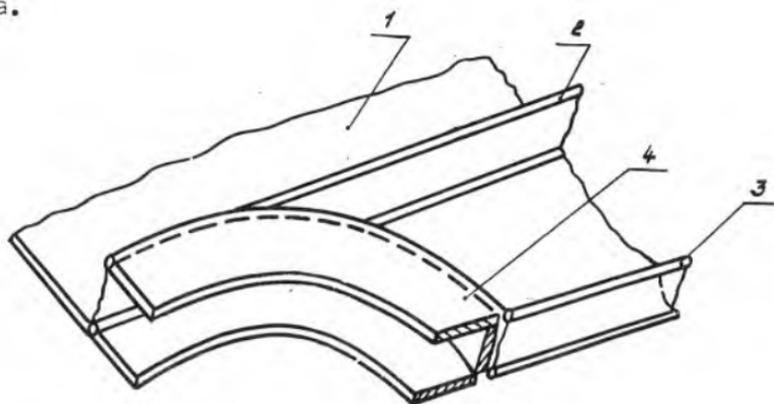
Еще одной возможностью снижения влияния местного изгиба за счет стеснения деформаций из плоскости панели является местное подкрепление кромки выреза, которое может выполняться путем постановки вдоль контура выреза криволинейного вертикального ребра или [—образного профиля.

Проведенные расчеты показали примерно одинаковую эффективность обоих способов подкрепления кромки выреза. При этом как ребро, так и [—образный профиль моделировались изгибными пластинчатыми элементами.



Р и с.5. Изменение формы деформированной поверхности панели в зависимости от крепления к поперечному набору: а-незакрепленная панель; б-крепления $v=0$ в сечении $z=3,5R$; в-крепления $v=0$ в сечении $z=2,32R$; R -радиус закругления выреза

На рис.6 представлена схема "коробчатого" подкрепления кромки выреза путем постановки Γ -образного профиля эквидистантно контуру выреза.



Р и с.6. Схема подкрепления кромки Γ -образным профилем:
1-обшивка; 2-окантовывающий стрингер; 3-средний стрингер;
4- Γ -образный профиль

Повышение изгибной жесткости панели у края выреза определяется жесткостью вертикального ребра Γ -образного профиля. Наличие связи между верхним поясом перерезаемого стрингера и верхним поясом окантовывающего стрингера через верхнюю полку Γ -образного профиля существенно изменяет картину распределения усилий у торца среднего стрингера. При наличии такой связи средний стрингер почти не выключается из силовой работы панели, а усилия с него через криволинейный профиль передаются непосредственно на окантовывающий стрингер, не нагружая обшивку дополнительным потоком касательных усилий.

Расчеты показали, что эффект постановки местного подкрепления кромки выреза, с точки зрения уменьшения влияния местного изгиба, эквивалентен сведению связи между продольным и поперечным набором в непосредственной близости от края выреза.

В в о д ы

1. Растяжение (сжатие) изолированной односторонне подкрепленной панели с вырезом приводит к возникновению местного изгиба зоны выреза из плоскости панели.

2. Влияние местного изгиба наиболее сильно проявляется в зоне сжатия контура выреза (в окрестности торца перерезаемого стрингера).

При неблагоприятном соотношении конструктивных факторов здесь могут достигаться значения коэффициентов моментности $m' \geq 2,0$ (то есть сжимающие напряжения на наружной поверхности могут в 3 и более раз превышать средние по толщине напряжения σ_{tcp} , а на внутренней поверхности появляется растяжение с $\sigma_t^N \geq |\sigma_{tcp}|$).

3. Существенное уменьшение влияния местного изгиба на НДС окрестности выреза (вплоть до сведения этого влияния к нулю) может быть достигнуто за счет:

введения связей продольного и поперечного набора путем постановки нервюр (шпангоутов, диафрагм) или стоек в непосредственной близости от края выреза;

введения местного подкрепления кромки выреза путем постановки криволинейного ребра или профиля [-образного сечения (в последнем случае целесообразно предусмотреть связь перерезаемого и окантовывающего стрингеров через этот профиль);

обеспечения рационального соотношения нормальных жесткостей обшивки и продольного набора (рекомендуется $K_C \approx 0,6$);

удаления торца перерезаемого стрингера от края выреза на расстояние $C \geq 1,5 R$, где R - радиус выреза;

максимального приближения окантовывающих стрингеров к краю выреза.

Л и т е р а т у р а

1. Комаров В.А., Переснякин В.П. Комплекс программ расчета авиационных конструкций ПРАСАК.- В сб.: Автоматизация проектирования авиационных конструкций. Куйбышев, КуАИ, 1979, с.3-18.

2. Вильчек М.И., Пинаев А.Г., Юдкевич Б.А. Некоторые результаты исследования напряженно-деформированного состояния стрингерной панели в зоне выреза.-Авиационная промышленность, 1979, №5, с.6-9.