

## Л и т е р а т у р а

1. К о м а р о в В.А., П е р е с ы п к и н В.П. Комплекс Программ РАСчета Авиационных Конструкций ПРАСАВ См. настоящий сборник.
2. А ш к е н а з и Е.К., Г а п о в Э.В. Анизотропия конструкционных материалов. Справочник. Л., "Машиностроение", 1972.
3. К о м а р о в В.А. Равнопрочные конструкции из композиционных материалов.- В сб.: "Оптимальное проектирование авиационных конструкций" Куйбышев, 1973, вып. I.
4. А л е к с а н д р о в А.Я. Об определении приведенных упругих параметров сотовых заполнителей.- В сб.: "Расчеты элементов авиационных конструкций". М., "Машиностроение", 1965, вып. 4.

УДК 629.7.02:539.3

Б.А. Ю д к е в и ч

### К ВОПРОСУ О ПРОЕКТИРОВАНИИ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСИЛЕНИЙ МЕСТНЫХ ВЫРЕЗОВ В ПОДКРЕПЛЕННЫХ ПАНЕЛЯХ

В общем виде задача рационального проектирования усиления местных вырезов может быть сформулирована следующим образом: создание конструкции усиления минимальной массы с обеспечением уровня действующих напряжений не выше заданного.

Таким образом, целевой функцией, подлежащей минимизации, является масса усиливающих элементов конструкции в сумме с массой соединительных элементов (крепежа, клея и т.п.) или, как иногда говорят, - "привес", представляющий собой разность массы усиленной конструкции с вырезом с массой соответствующей регулярной конструкции без выреза:

$$\Phi = \Phi(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m; x_1, x_2, \dots, x_n; \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_l),$$

- где  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$  - геометрические характеристики выреза и сечений элементов усиления;  
 $x_1, x_2, \dots, x_n$  - конструктивные характеристики подкрепления данного выреза;  
 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_l$  - плотности материалов элементов конструкции.

В условиях реального проектирования на создаваемую конструкцию усиления выреза накладывается ряд ограничений компоновочного, прочностного, технологического, экономического и эксплуатационного характера. Функция ограничений  $G$  имеет вид:

$$G = G(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m; x_1, x_2, \dots, x_n; \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k; \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_t),$$

- где  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$  - предельные геометрические характеристики элементов усиления;  
 $x_1, x_2, \dots, x_n$  - конструктивные характеристики подкрепления;  
 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k$  - допустимые значения напряжений в элементах конструкции;  
 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_t$  - экономические (стоимостные) параметры.

Задачей является отыскание комплекса значений параметров  $\alpha_i, x_j, \gamma_k$ , при которых

$$\begin{cases} \Phi = \Phi_{min} \\ G \leq 0 \end{cases}$$

Вследствие обширности множества проектных решений и большого многообразия возможных конструктивных исполнений решение поставленной задачи в общем виде, даже с применением современной мощной вычислительной техники, не представляется возможным.

Поэтому решение данной задачи следует искать, сочетая методы эвристического и машинного проектирования, разрабатывая рациональную стратегию проектирования, использующую ряд "опорных" типовых частных решений.

Анализ условий задачи позволяет сформулировать два альтернативных варианта стратегии проектирования подкреплений местных вырезов:

А. Создание усиления, обеспечивающих получение конструкций равнопрочных или максимально близких к равнопрочным для того, чтобы участки панелей с вырезами не являлись бы критичными по ресурсу.

Б. Создание усиления минимальной массы при заданных ресурсных ограничениях и обеспечении требуемой ремонтнопригодности.

Указанные варианты стратегии представляют собой конкретизированные для условий данной задачи известные принципы проектирования конструкций, "гарантированных от повреждения" либо "безопасно повреждаемых".

Применимость того или иного варианта стратегии зависит от конструктивно-силовой схемы агрегата, необходимости герметизации внутренних объемов агрегата, весовых, стоимостных и эксплуатационных ограничений.

В математическом плане подход к решению задачи одинаков при любом варианте стратегии проектирования, так как доказано, что оптимальная конструкция достаточно близка к равнопрочной конструкции [1], т.е. при заданном коэффициенте концентрации напряжений у края выреза конструкция, максимально близкая к равнопрочной будет достаточно близкой к конструкции минимальной массы. Следовательно, различие в вариантах стратегии проектирования проявляется лишь в формулировке ограничений и, соответственно, в структуре функции ограничений  $G$ .

Определение потребного минимального количества "опорных" частных решений, необходимых для проектирования рациональных усиления местных вырезов требует тщательного исследования напряженно-деформированного состояния окрестности выреза.

Вопросам концентрации напряжений вблизи вырезов различной конфигурации в деталях из листового материала постоянной толщины при различных случаях нагружения посвящено большое количество теоретических и экспериментальных исследований [2], [3], [4] и др. В случае же обшивки переменной толщины, да еще при наличии подкрепления переменной жесткости, определение концентрации напряжений классическими методами теории упругости не представляется возможным, а имеющиеся экспериментальные данные (в том числе и в вышеуказанных работах) в силу большой условности исследованных схем и самой методики проведения эксперимента, к сожалению, могут иметь лишь крайне ограниченное значение в решении рассматриваемой задачи.

Здесь следует особо подчеркнуть, что характерным обстоятельством для конструкции подкрепления местного выреза в наружной обшивке самолета является вынужденная из соображений аэродинамики

о д н о с т о р о н н о с т ь усиления, приводящая к появлению местного изгиба и, вследствие этого, к существенному перераспределению нормальных напряжений по толщине панели.

Другим фактором, оказывающим существенное влияние на распределение потока напряжений в окрестности выреза является непрямолинейность оси жесткости усиливающих продольных элементов. Указанная непрямолинейность возникает, в основном, по двум причинам:

а) вследствие излома продольной оси окантовывающих продольных элементов, вызванного компоновочными требованиями (например, габариты фланца прибора, крепящегося к окантовке выреза больше, чем расстояние между окантовываемыми вырез стрингерами);

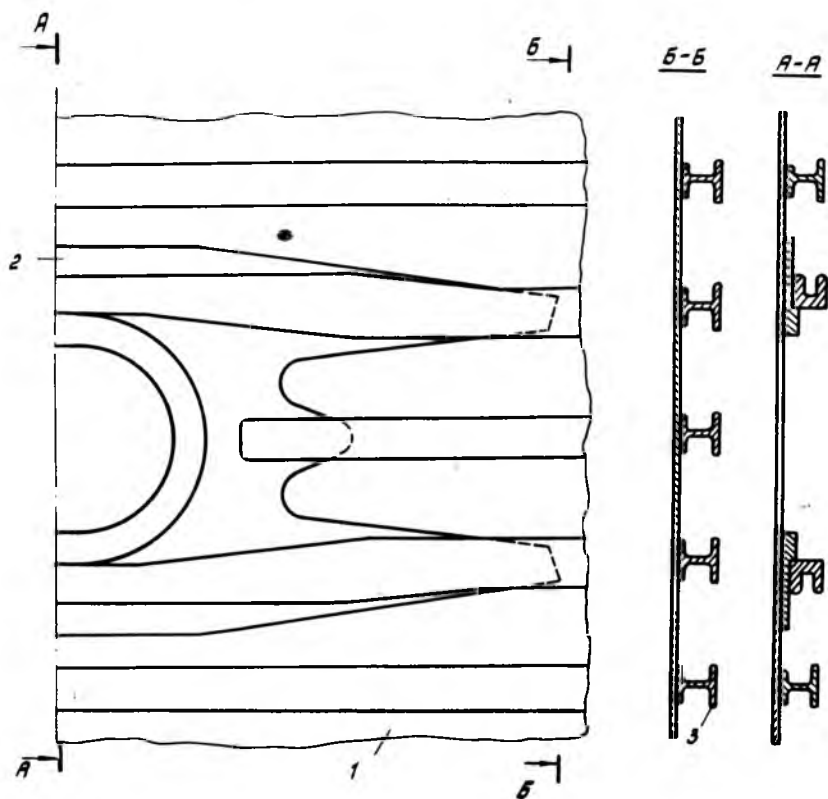
б) вследствие увеличения площади поперечного сечения окантовывающих продольных элементов для компенсации ослабления сечения панели из-за перерезания одного или нескольких продольных элементов, попадающих в зону выреза.

На практике обе причины имеют место и отклонение оси жесткости окантовывающих элементов от прямой линии бывает довольно значительным. На величину концентрации напряжений у края выреза оказывают более или менее существенное влияние и такие факторы:

- соотношение нормальной и изгибающей жесткостей элементов продольного набора с жесткостью обшивки и усиливающей накладки;
- расстояние от края выреза до оси жесткости окантовывающих элементов продольного набора;
- дискретность крепления обшивки с подкрепляющими элементами конструкции;
- наличие дополнительных поперечных связей между основными усиливающими элементами продольного набора;
- наличие предварительных напряжений в конструкции.

Столь большое число факторов и разнохарактерность их влияния приводят к тому, что практически единственным средством исследования напряженно-деформированного состояния окрестности выреза в подкрепленных панелях является метод конечных элементов (МКЭ), успешно применяемый в последние годы для решения различных сложных задач строительной механики. Следует, однако, подчеркнуть, что для каждого класса задач обоснование и выбор типа и сетки конечных элементов или, иначе говоря, выбор математической модели, в максимальной степени соответствующей физической картине рассматриваемого явления, представляет собой весьма сложную проблему.

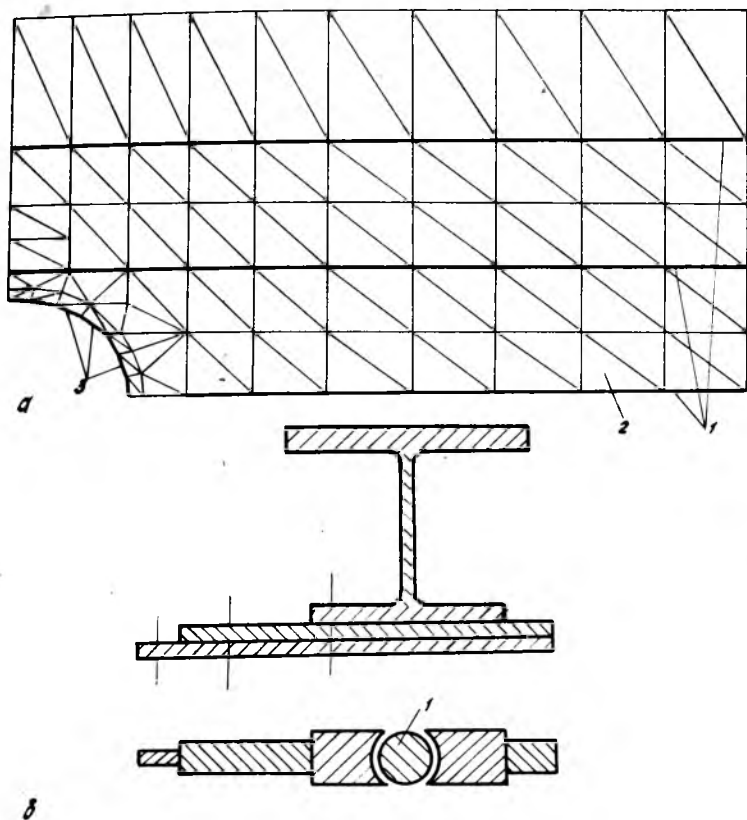
На основе вышеприведенных соображений было проведено исследование напряженно-деформированного состояния окрестности выреза в нижней панели кессонного крыла пассажирского самолета под установку топливного насоса. Внешний вид участка панели с вырезом приведен на рис. I. Вырез в панели усилен путем постепенного уве-



Р и с. I. Схема зоны выреза: 1 - обшивка панели; 2 - усиливающая окантовка; 3 - стрингеры

личения толщины обшивки в направлении к оси симметрии выреза, постановки усиливающей накладки-окантовки переменной толщины и постепенного увеличения сечения окантовывающих стрингеров.

На первом этапе исследования в качестве начального приближения была принята простейшая плоская расчетная модель, приведенная



Р и с. 2. Исходная расчетная модель: а) расчетная сетка; б) схема идеализации сечения. 1 - стержневые элементы; 2 - треугольные плоские изотропные элементы; 3 - стержневые индикаторные элементы по краю выреза

на рис. 2. В этой схеме обшивка вместе с усиливающей накладкой и нижними полками стрингеров, крепящимися к обшивке, имитировалась плоскими треугольными изотропными элементами, а остальная часть сечения стрингеров имитировалась стержневыми элементами, расположенными в той же плоскости, что и плоские треугольные элементы, т.е. в срединной плоскости обшивки. Материал обшивки и стрингеров предполагался изотропным, линейно-упругим. Связь между

обшивкой, усиливающей накладкой и стрингерами предполагалась идеальной. Изгибная жесткость стенки и верхних полок стрингеров в плоскости панели не учитывалась, так как ввиду малости толщины стенок принималось, что последние не в состоянии эффективно включить верхние полки в работу на изгиб в плоскости  $XOZ$ .

Внешние нагрузки в виде результирующих сил от потоков нормальных растягивающих ( $z$ ) усилий прикладывались в узлах по контуру рассматриваемого участка панели. Ввиду малости сдвиговых усилий по сравнению с растягивающими, на этом этапе влияние потока от касательных сил не учитывалось.

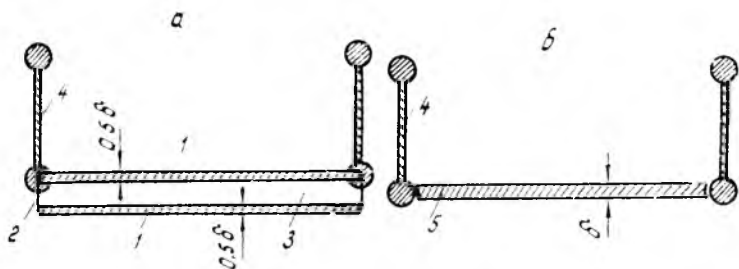
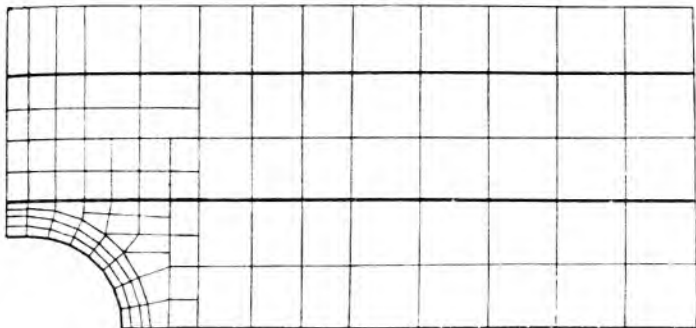
Такая модель позволяла приближенно оценить напряженно-деформированное состояние в зоне выреза и влияние расположения стрингеров в плане и их жесткости на распределение нормальных и касательных напряжений. Полученные в результате расчета средние значения напряжений в окрестности выреза показали удовлетворительное совпадение со средними по толщине панели величинами напряжений, полученными в результате тензометрии соответствующих образцов, но не могли объяснить разницы между значениями напряжений на внешней и внутренней поверхностях обшивки, полученными в результате измерений.

Для учета влияния местного изгиба вследствие односторонности усиления расчетная модель была изменена, как показано на рис. 3. В этом варианте обшивка имитировалась изотропными четырехугольными плоскими элементами в два слоя (по 0,5 реальной толщины), между которыми располагались фиктивные балочные элементы малой жесткости для имитации изгибной и, частично, сдвиговой жесткостей обшивки.

Стрингеры имитировались продольными балочными элементами эквивалентной жесткости.

Полученное в результате расчета распределение напряжений на внешней и внутренней поверхностях панелей качественно совпадало с результатами эксперимента, но значения напряжений существенно отличались от данных тензометрии, да и сама расчетная модель оказалась весьма громоздкой.

Для дальнейшего совершенствования расчетной модели при сохранении той же сетки имитация обшивки с усиливающей накладкой выполнялась с помощью изгибных плоских четырехугольных элементов ("пластинка"), предложенных Е.Г. Макеевым. Это позволило сократить



Р и с. 3. Уточненная расчетная модель: а) расчетная сетка; б) схема идеализации сечения с двухслойной имитацией обшивки; в) схема идеализации сечения с использованием элемента "пластинка"; 1 - четырехугольный плоский мембранный элемент, 2 - балочный продольный фиктивный элемент, 3 - балочный поперечный фиктивный элемент, 4 - балочный стрингерный элемент, 5 - четырехугольный плоский изгибный элемент ("пластинка")

число элементов почти в два раза, соответственно уменьшить время на подготовку и решение задачи. Одновременно улучшилась (примерно на порядок) сходимость решения. Заметно улучшилось совпадение результатов расчета с экспериментальными данными.

На этой же расчетной модели был решен ряд задач, позволивших оценить влияние излома оси жесткости окантовывающих стрингеров на распределение напряжений в обшивке и усиливающей окантовке (эффект оказался чисто локальным); влияние соотношения жесткости стрингеров с жесткостью обшивки и усиливающей окантовки на "мс-



ментность", т.е. на разницу напряжений во внешних и внутренних слоях обшивки; влияние расстояния от оси жесткости окантовывающего стрингера до края выреза на величину концентрации напряжений у края выреза (оно оказалось весьма существенным).

Достоверность использованной расчетной модели подтверждена не только путем решения нескольких тестовых задач и удовлетворительным совпадением с результатами эксперимента, но и "устойчивостью" решения к введению в расчетную модель дополнительных элементов, влияние которых носит заведомо локальный характер.

Полученные таким образом "опорные" частные решения, позволившие оценить влияние различных факторов на распределение напряжений в окрестности выреза, позволили перейти к следующему этапу решения задачи о разработке конструкции рационального подкрепления выреза.

Приняв за критерий отношение  $K = \frac{\sigma_i}{\sigma_\infty}$ , где  $\sigma_i$  - максимальное напряжение в элементе, а  $\sigma_\infty$  - среднее напряжение в регулярном сечении панели были выявлены перегруженные и недогруженные элементы конструкции. Затем, из условия  $0,8 \ll K \ll 1,15$  было произведено перераспределение материала между элементами конструкции на основе значений напряжений в элементах, полученных на предыдущем этапе расчета  $F' = KF$ , где  $F$  - первоначальная площадь сечения элемента а  $F'$  - вновь принятая площадь сечения элемента.

Решение задачи для первого же приближения дало резкое снижение величины концентрации напряжений у края выреза при одновременном уменьшении "привеса" усиления до 10%.

Таким образом, представляется целесообразным следующий порядок проектирования усилений местных вырезов в подкрепленных панелях:

1. Выбор конструктивной схемы усиления и назначение жесткостей элементов на основе простейших прикидочных расчетов.
2. Разработка расчетной модели и оценка ее достоверности на тестовых задачах и путем проверки "устойчивости" решения к воздействию локальных конструктивных факторов.
3. Отыскание "опорных" частных решений для оценки влияния существенных конструктивных факторов.
4. Анализ напряженно-деформированного состояния, полученного из решения исходной задачи на принятой расчетной модели и назначение новых жесткостей элементов с исключением вырождающихся элементов.

5. Расчет напряженно-деформированного состояния для вновь принятого распределения жесткостей.

6. Окончательный выбор конструкции рационального усиления. Этапы 4 и 5 следует повторять до получения решения, достаточно близкого к стационарному.

Такой подход существенно сократит потребность в экспериментальных исследованиях и позволит разработать конкретные рекомендации для использования результатов исследования в конструкторской практике.

#### Л и т е р а т у р а

1. К о м а р о в В.А. Рациональное проектирование силовых авиационных конструкций. Докторская диссертация, МАИ, 1974.
2. М у с х е л и ш в и л и Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М., "Наука", 1966.
3. С а в и н Г.Н. Концентрация напряжений около отверстий М.-Л., 1951.
4. К у н П. Расчет на прочность оболочек в самолетостроении М., "Оборонгиз", 1961.

УДК 624.043:539.4.019

Н.В. Б л а с о в

#### О ПРОЕКТИРОВАНИИ ДИСКРЕТНО-РАВНОПРОЧНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНО НАГРУЖЕННЫХ ГЛАДКИХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ

Принцип дискретной равнопрочности (равнонапряженности) используется при оптимальном проектировании тонкостенных конструкций в работах [1 - 3]. Этот принцип состоит в том, что конструкция разбивается на подконструкции, проектные параметры которых определяются из условия достижения приведенными напряжениями допустимых значений только в некоторых точках. Использование тако-