

4. Комаров В.А., Соловов А.В. Об опыте автоматизации проектирования силовых схем крыльев. В сб.: "Материалы Всероссийской школы 1975 года по автоматизации проектирования", МФТИ, 1976.
5. Комаров В.А., Соловов А.В. Конечный элемент для проектирования рациональных силовых схем конструкций типа крыла. Депонированная рукопись. ВИНТИ, № 768-75 Деп.
6. Современные самолеты США и стран Западной Европы. Итоги науки и техники. Серия "Авиастроение". М., ВИНТИ, т. 2, 1976.

УДК 629.735.33.01

Д.М. Козлов, В.Т. Мишук

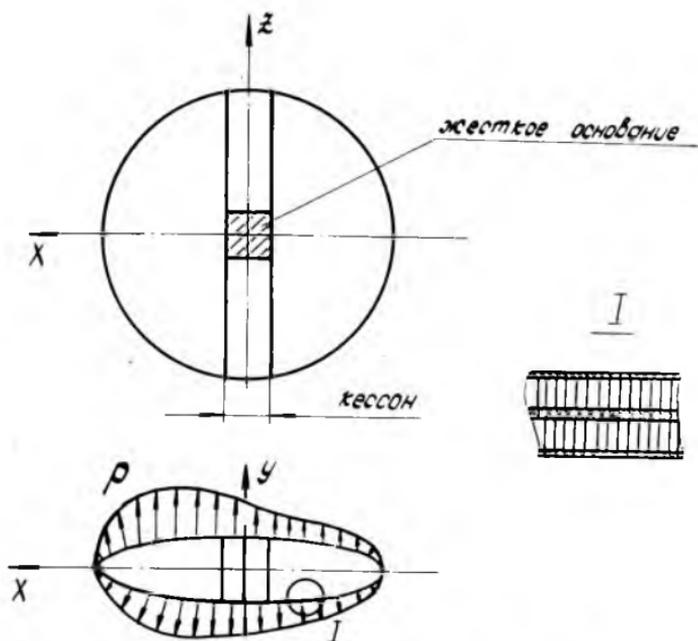
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ МНОГОСЛОЙНОЙ МОМЕНТНОЙ ОБОЛОЧКИ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ КЕССОНОМ

Развитие теории метода конечных элементов и разработка эффективных программ его реализации на ЭВМ обеспечивают широкое использование метода в модулях "прочность-вес" систем автоматизации проектных работ (САПР). Сложность и многообразие конструкций требуют обширного набора типов конечных элементов в библиотеке модуля.

Ограниченные наборы типов конечных элементов в имеющихся модулях обуславливают необходимость использования в расчетных моделях очень большого числа элементов, часто превышающего возможности модуля. Применение рациональной методики проектирования и расчета конструкции может существенно расширить возможности имеющихся САПР.

Постановка задачи. В настоящей статье обсуждаются некоторые вопросы проектирования и расчета сложной неоднородной конструкции - многослойной стеклопластиковой оболочки, имеющей форму параболоида вращения и сочлененной в центральной части с металлической конструкцией типа кессона, расположенного вдоль диаметра (рис. 1).

Оболочка составлена из трех несущих слоев и двух слоев рас-



Р и с. I. Схема конструкции

положенного между ними заполнителя. Кессон образован двумя лонжеронами, набором ферменных нервюр, верхней и нижней панелями обшивки.

Оболочка нагружена по верхней и нижней поверхностям распределенной нагрузкой, изменяющейся по сложному закону, и опирается в центре на жесткое основание (см. рис. I).

При проектировании этой конструкции были проведены предварительные исследования, в которых оболочка рассматривалась либо как безмоментная, либо как моментная трехслойная.* Этими исследованиями было установлено следующее:

I. Сдвиговая жесткость заполнителя слабо влияет на распределение усилий в несущих слоях оболочки. Так, при изменении жесткости заполнителя на 40% максимальные напряжения в несущих слоях изменились на 4-5%.

* Указанные исследования выполнены Е.А. Ивановой, В.П. Пересыпкиным, О.Е. Данилиной под руководством В.А. Комарова.

2. Жесткость стыка оболочки с кессоном существенно влияет на напряженное состояние оболочки в зоне стыка. В случае шарнирного опирания оболочки в стыке с кессоном наибольшие нормальные напряжения в этой зоне уменьшаются на 25-30%, касательные напряжения - в два раза по сравнению с моментным креплением оболочки.

3. Напряженно-деформированное состояние кессона определяется главным образом мембранными составляющими усилий в оболочке.

В то же время, проведенные исследования показали, что при анализе окончательного варианта конструкции необходимо сосредоточить внимание на следующих вопросах:

1. Учесть многослойность оболочки (три несущих слоя и два слоя сотового заполнителя).

2. Правильно выбрать и смоделировать в расчетной модели конструкцию стыка стеклопластиковой оболочки с металлическим кессоном.

3. По возможности более точно воспроизвести в расчетной модели форму оболочки, особенно в зонах с большой кривизной.

Порядок расчета. Рассматриваемая упругая система состоит из двух подконструкций, резко различающихся по устройству, жесткостным свойствам и силовой работе - моментной пятислойной оболочки и тонкостенного центрального кессона. Поэтому с целью снижения трудоемкости расчета и с учетом результатов предварительных исследований задача анализа напряженно-деформированного состояния этой конструкции была расчленена на два этапа.

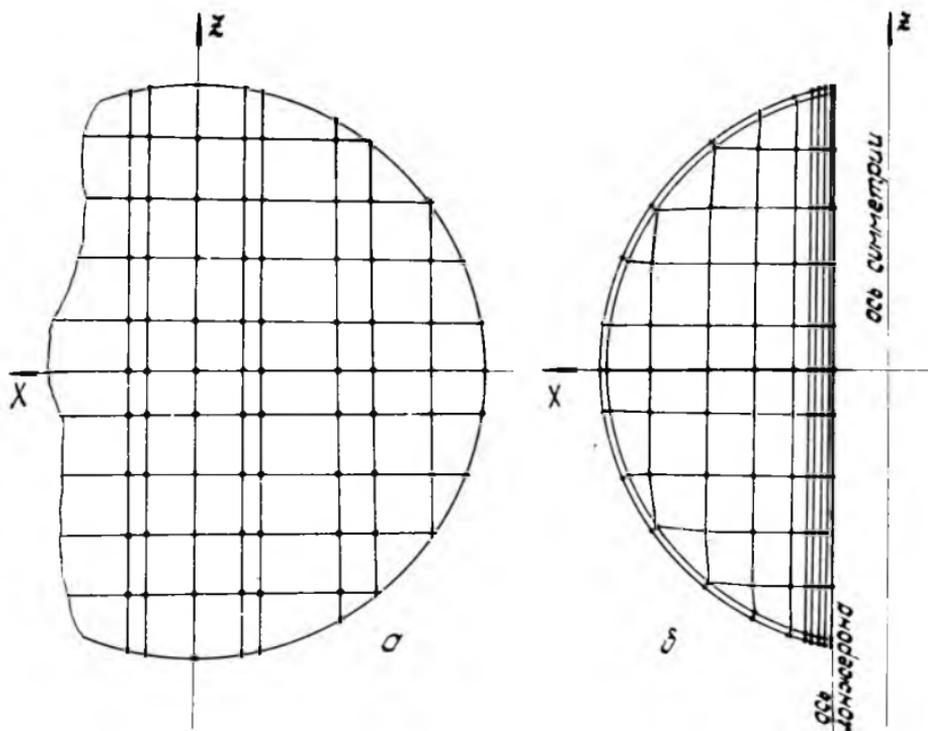
На первом этапе рассматривалась вся система в целом, однако оболочка считалась безмоментной и подробно анализировалось напряженно-деформированное состояние кессона.

На втором - рассчитывалась только пятислойная моментная оболочка, а в стыке оболочки с кессоном задавались кинематические граничные условия из предшествующего расчета.

Расчетные модели. Были построены две расчетные модели, соответствующие указанным этапам расчета конструкции.

Для анализа напряженно-деформированного состояния кессона на первом этапе расчета использовался специализированный комплекс программ для расчета крыльев. Лонжероны и нервюры кессона моделировались конечными элементами, представляющими собой совокупность работающей на сдвиг стенки и присоединенных к ней поясов, работающих на растяжение - сжатие. Обшивка моделировалась сдвиговыми

четыреугольными элементами. Безмоментная оболочка считалась однослойной и представлялась набором стержней и сдвиговых элементов, моделирующих мембранную жесткость реальной пятислойной конструкции. Сетка конечных элементов для оболочки с кессоном показана на рис. 2, а.



Р и с. 2. Сетки расчетных моделей: а - оболочка с кессоном; б - пятислойная оболочка

Расчет моментной пятислойной оболочки выполнялся с помощью универсального комплекса Программ РАСчета Авиационных Конструкций (ПРАСАК) [1]. При построении расчетной модели оболочки учитывались следующие особенности ее конструкции.

Несущие слои образованы из нескольких слоев стеклоткани ТС-8/3-250 сатинового переплетения, пропитанных связующим.

Наружный и внутренний слои составлены каждый из восьми слоев стеклоткани с ориентацией основы под углом 0° , 45° , 90° , 135° к оси Z (по два слоя ткани в каждом направлении).

Средний слой образован из 12 слоев ткани с такой же ориентацией основы (по три слоя в каждом направлении).

Сотовый наполнитель изготовлен из той же стеклоткани, что и несущие слои.

Известно [2], что слоистый композиционный материал из четырех слоев СВМ 1:1 (или из восьми однонаправленных слоев) практически изотропен. Поэтому в расчетной модели оболочки несущие слои представлялись набором четырехугольных и треугольных изотропных элементов. Упругие постоянные слоев определялись специальным расчетом.

Работа сотового наполнителя моделировалась сдвиговыми элементами (стенками) и стержнями (стойками), работающими на растяжение - сжатие по нормали к среднему несущему слою.

Сетка конечных элементов расчетной модели оболочки показана на рис. 2,б.

Упругие постоянные. Для волокнистых композиционных материалов с переплетенными волокнами обычно считается, что все усилия воспринимаются только волокнами, а связующее обеспечивает монолитность материала [2]. Этот подход был использован при определении упругих постоянных несущих слоев оболочки. Стеклоткань представлялась как пакет из двух слоев однонаправленного композиционного шпона с взаимно перпендикулярной ориентацией волокон. Соотношение модулей упругости слоев в направлении утка и основы принималось равным отношению пределов прочности ткани по соответствующим направлениям. Для рассматриваемой стеклоткани это отношение равно 0,6. Далее каждый несущий слой оболочки представлялся как суммарный пакет из заданного числа (8 для наружного и внутреннего, 12 - для среднего) таких пар слоев композиционного шпона с соответствующей ориентацией.

Модули упругости несущих слоев определялись расчетом следующим образом:

1. Из каждого слоя мысленно вырезалась пластинка единичных размеров.

2. Пластинка нагружалась по краям постоянными потоками нормальных сил Z или X , для определения модулей упругости E_z или E_x , или потоком касательных сил T для определения модуля сдвига G .

3. Определялись деформации пластинки по [3].

4. Вычислялись модули упругости по формулам

$$E_z = \frac{Z}{\sigma \varepsilon_z} ; \quad E_x = \frac{x}{\sigma \varepsilon_x} ; \quad G = \frac{T}{\sigma \gamma} ,$$

где ε_z , ε_x , γ - деформация пластинки при нагружении ее соответственно потоками Z , x , T ;

σ - толщина слоя.

Модули сдвига G_{xz} и G_{yz} сотового заполнителя определялись по методике, изложенной в [4].

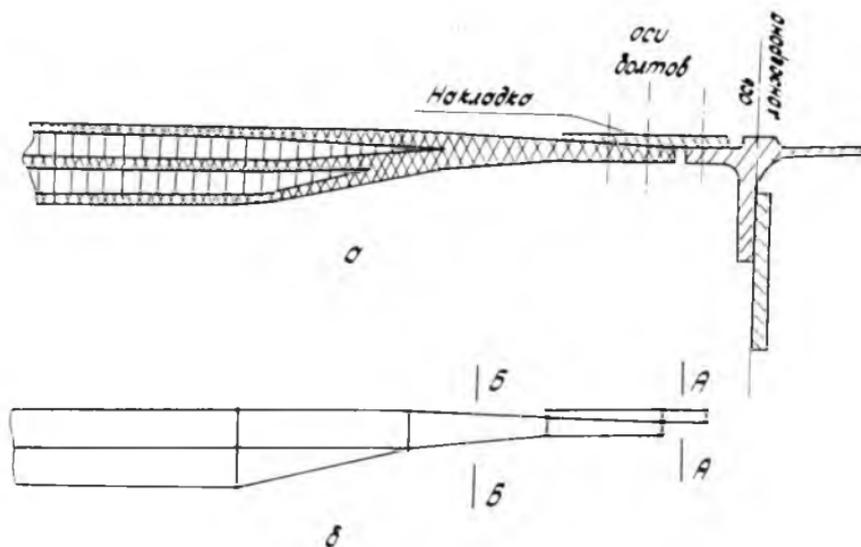
Моделирование стыка. Как уже отмечалось, предварительные исследования с использованием двух крайних оценок жесткости стыка оболочки с кессоном (моментная заделка и шарнирное опирание) выявили существенное влияние способа опирания оболочки на ее силовую работу.

В реальной конструкции оболочка крепится к кессону по верхней и нижней поверхностям двумя рядами болтов через дуралюминовые накладки (рис. 3,а). С целью более правильного представления в расчетной модели жесткости стыка сетка в этой зоне была существенно измельчена (рис. 3,б), а жесткостные характеристики конечных элементов назначались по результатам специальных натуральных испытаний образца стыка следующим образом.

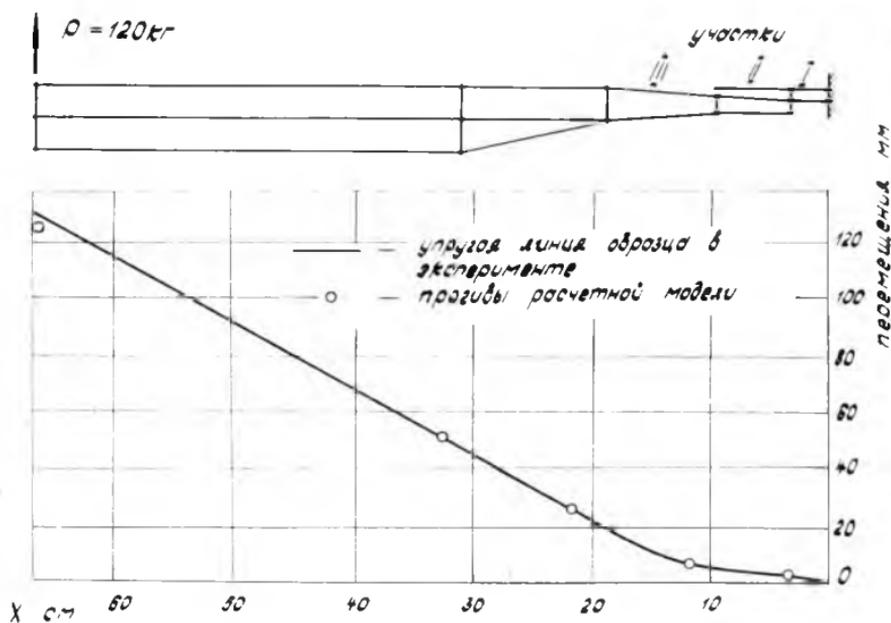
Образец - полоса, вырезанная из оболочки в зоне стыка, - нагружался приложенной на конце силой $P = 120$ кгс и определялись его прогибы. Тот же образец рассчитывался методом конечных элементов. При этом сетка конечных элементов на образце полностью повторяла сетку расчетной модели оболочки. Жесткостные характеристики конечных элементов образца подбирались таким образом, чтобы упругие линии образца, полученные в расчете и эксперименте совпадали (рис. 4). Для выполнения этого условия жесткостные характеристики участков I, II, III пришлось уменьшить в 3-6 раз по сравнению с теми, что были вычислены в предположении идеальной связи элементов конструкции в стыке. Последнее обстоятельство подтверждает необходимость учета реальной жесткости болтовых соединений.

Граничные условия. Учитывая характер действующих нагрузок, рассчитывалась только наиболее нагруженная половина оболочки.

Поскольку конструкция симметрична относительно плоскости xOz , то с целью уменьшения исходной информации нагрузка, приложенная к верхней и нижней поверхностям оболочки, раскладывалась на симмет-



Р и с. 3. Стык оболочки с кессоном: а - конструкция стыка; б - схема идеализации стыка в расчетной модели



Р и с. 4. Расчетная модель и перемещения опытного образца

ричную и обратносимметричную составляющие, и рассчитывалась только одна поверхность отдельно на действие обеих составляющих нагрузки при соответствующих граничных условиях. Напряженно-деформированное состояние верхней и нижней поверхностей оболочки определялось по этим составляющим суперпозицией.

Кинематические граничные условия в плоскости симметрии xOz и в стыке оболочки с кессоном задавались так.

Симметричная нагрузка: перемещения узлов, лежащих в плоскости xOz , в направлении оси y отсутствуют по условиям симметрии ($V = 0$).

Симметричные составляющие перемещений узлов в стыке оболочки с кессоном малы и в расчете принимались равными нулю ($u = 0$, $V = W = 0$).

Обратносимметричная нагрузка: узлы, лежащие в плоскости симметрии свободны по оси y , а перемещения по осям x и z отсутствуют ($u = W = 0$); перемещения узлов в стыке оболочки с кессоном определяются изгибом и кручением кессона и задавались по результатам расчета оболочки с кессоном.

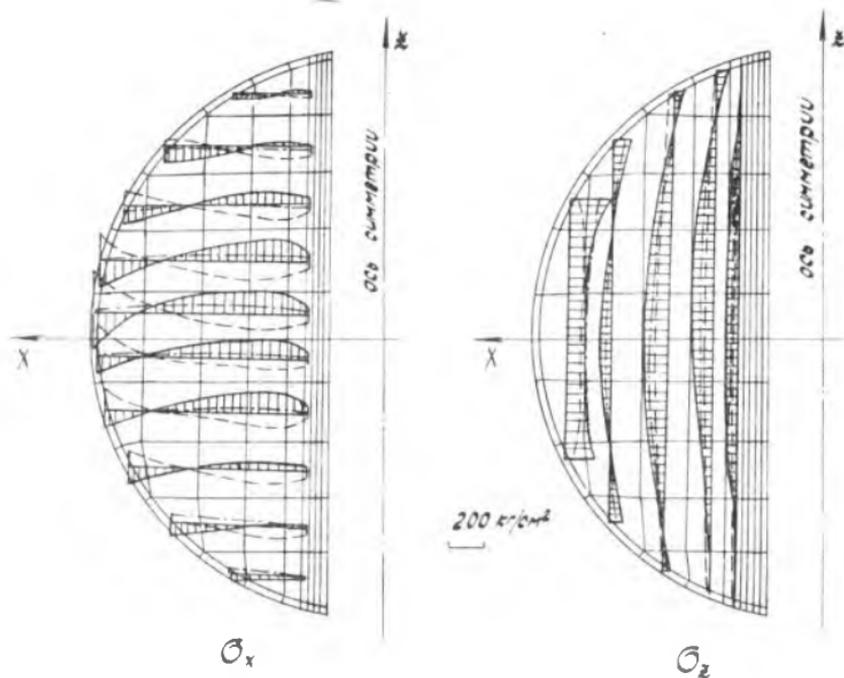
Результаты расчета. Из обширных результатов расчета на рис. 5-7 приводится лишь малая часть, иллюстрирующая характер напряженно-деформированного состояния оболочки и зоны стыка ее с кессоном.

На рис. 5 показаны нормальные напряжения σ_z и σ_x в несущих слоях верхней поверхности оболочки. По этим результатам видно, что напряженное состояние оболочки является существенно-моментным.

На рис. 6 приведены значения касательных напряжений в слоях заполнителя. Наибольшие напряжения в заполнителе возникают в зоне изменения толщины оболочки около стыка ее с кессоном и в периферийных зонах с большой кривизной.

Рис. 7 иллюстрирует силовую работу оболочки в зоне стыка (см. рис. 3, б, сечения А-А и Б-Б). Из рисунка видно, что погонный изгибающий момент m_z очень быстро убывает на участке между сечениями А-А и Б-Б, а погонная нормальная и перерезывающая силы изменяются мало, причем наибольшее уменьшение погонной перерезывающей силы q_y наблюдается на краях оболочки.

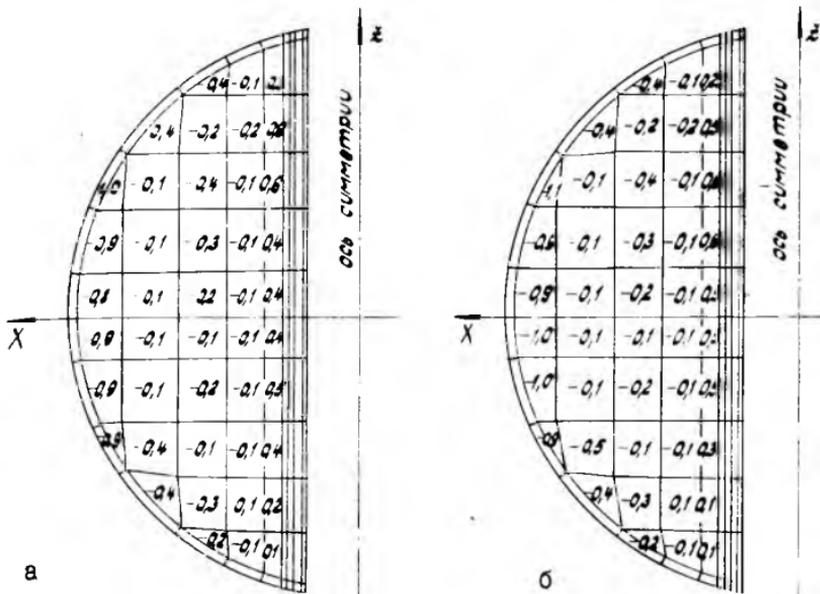
Статические испытания конструкции показали хорошее совпадение результатов расчета и эксперимента.



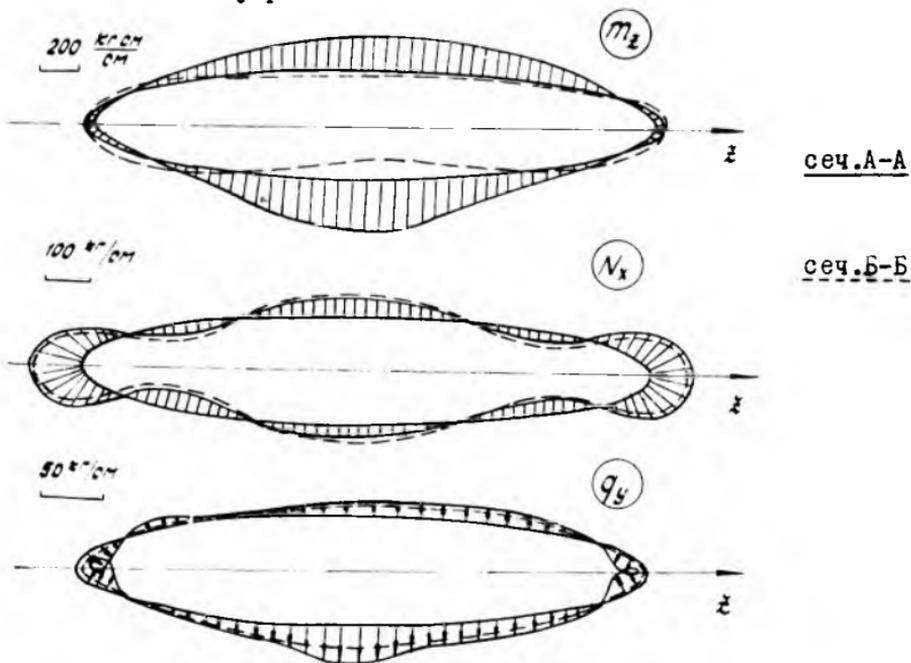
Р и с. 5. Нормальные напряжения в несущих слоях верхней поверхности оболочки: ——— наружный слой; - - - внутренний слой; - . - . - средний слой

В ы в о д ы

1. Разработанная методика позволяет рассчитывать многослойную моментную оболочку совместно с кессоном.
2. Конструкция и жесткость стыка оболочки с кессоном существенно влияет на напряженно-деформированное состояние оболочки в зоне стыка.
3. Жесткостные характеристики стыков в расчетной модели целесообразно назначать с учетом результатов испытаний натуральных образцов.



Р и с. 6. Касательные напряжения в заполнителе, кг/см²
 а - между наружным и средним слоями; б - между средним и внутренним слоями



Р и с. 7. Моменты и усилия в зоне стыка

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: