

## Исследование напряженного состояния панельных конструкций.

Дыбский П.А., Шпак В.В.,

Рассмотрены некоторые особенности моделирования методом конечных элементов (МКЭ) напряженно-деформированного состояния (НДС) болтового соединения в панельной конструкции крыла самолета. В качестве объекта исследований был взят типовой образец поперечного стыка панелей нижней поверхности крыла транспортного самолета (рис.1). Выбор объекта определен необходимостью анализа

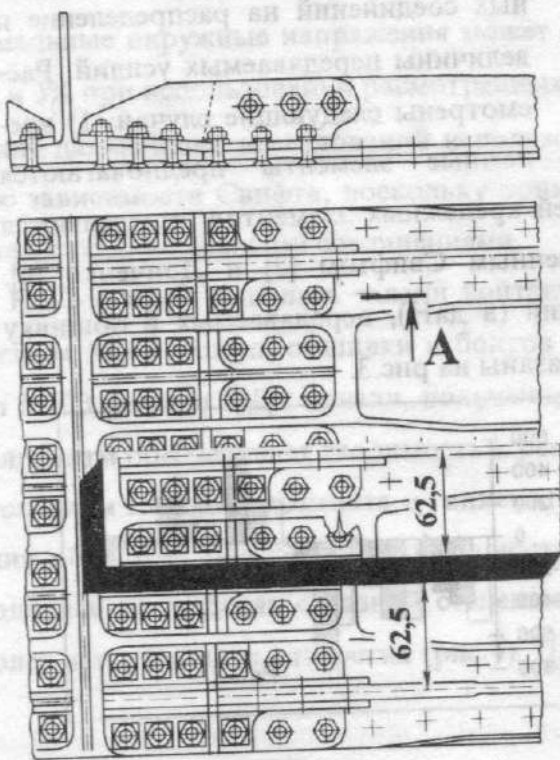


Рис.1

результатов усталостных испытаний данного типа образцов, выполненных в авиационном КБ. Испытания показали, что опасным местом являются отверстия в обшивке по крайнему ряду болтовых соединений промежуточных фитингов. Исследования НДС проведены в двухмерной, статической упругой постановке, с использованием программного конечно-элементного комплекса PAKST [1]. Определенные для компоненты тензора напряжений и их относительные градиенты в точках максимальной концентрации использованы для оценки долговечности поперечного стыка крыла методом локального НДС [2].

Моделирование МКЭ НДС выполнено в два этапа. На 1-ом этапе внимание уделялось особенностям распределения жесткостей и передачи усилий в элементах конструкции панели. Конечноэлементная

модель поперечного стыка состоит из нескольких областей, представляющих один период, выделенный из конструктивно периодической панели крыла. МКЭ модель

ограничена осями стрингера и промежуточного фитинга (выделенная область на рис.1). Модель включает области Т-образного профиля переменной толщины (1), стрингера (2), части обшивки (3) и фитингов (4,5) (рис.2). Стенки моделируются толщиной конечных элементов. Силовые статические условия, использованные при

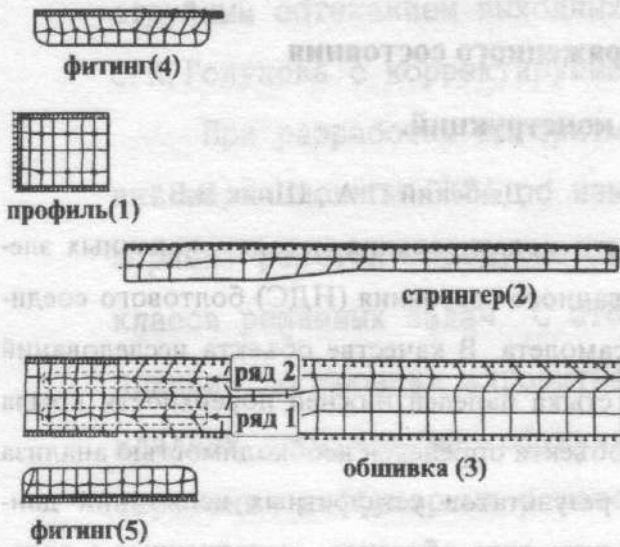
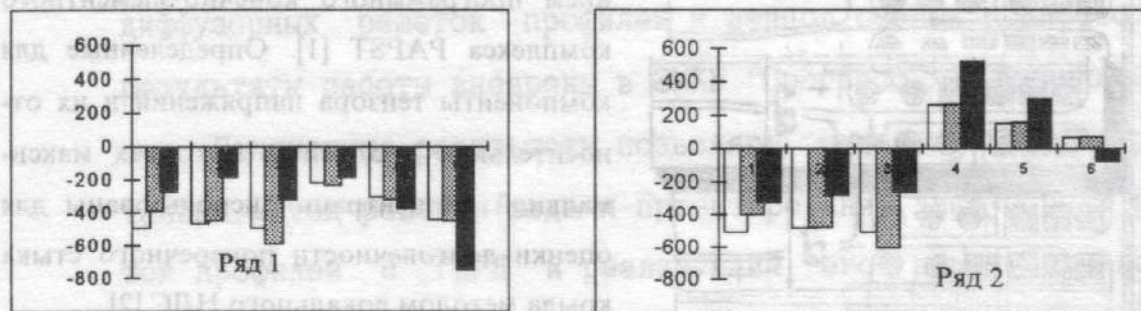


Рис.2

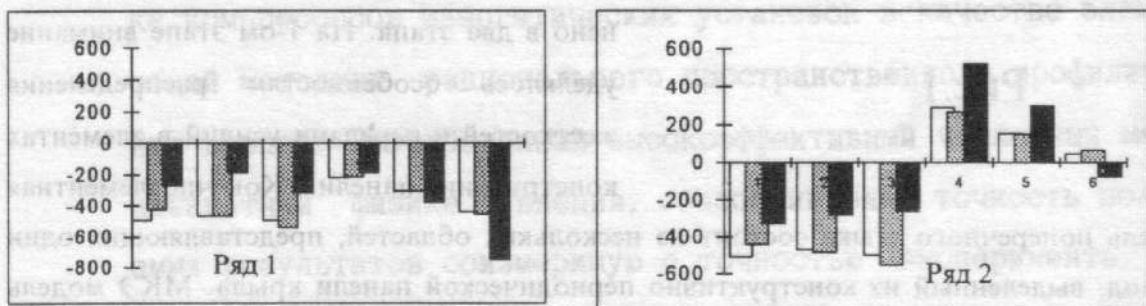
абсолютно жесткими; 2) величины жесткостей крепежных элементов определяются по полуэмпирическим зависимостям, полученным Свифтом [3] и Донченко [4]. Диаграммы распределения продольных усилий (в даН), передаваемых в обшивку через болтовые соединения по рядам 1 и 2 показаны на рис.3.

моделировании, определены амплитудой нагружения образцов в ходе натуральных испытаний. При задании граничных условий использовано предположение об одноплоскостном деформировании регулярной зоны кессона крыла.

Было проведено исследование влияния величин жесткостей крепежных элементов болтовых и заклепочных соединений на распределение и величины передаваемых усилий. Рассмотрены следующие случаи: 1) крепежные элементы предполагаются



а) Титановый крепеж



б) Стальной крепеж

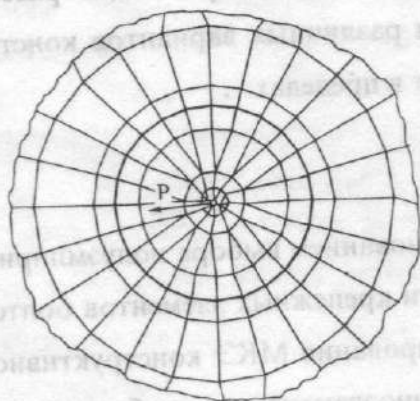
жесткость по Свифту;  
 жесткость по Донченко;  
 жесткость  $10^{10}$  кг/мм<sup>2</sup>.

Рис.3

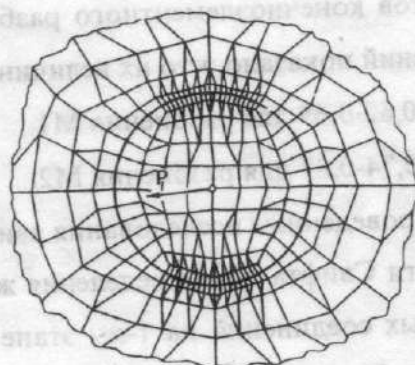
Сравнение результатов расчетов показало, что:

- в случае использования полуэмпирических зависимостей, предложенных Свифтом и Донченко, максимальное различие между моделируемыми сосредоточенными силами, передаваемыми через крепежные элементы на обшивку не превышает 15%;
- при упрощенном моделировании крепежных элементов абсолютно жесткими связями различие достигает 50%;
- в соответствии с приближенной формулой, максимальные окружные напряжения на контуре нагруженного отверстия пропорциональны номинальным напряжениям в листе и напряжениям смятия с коэффициентами приближенно равными 3 и 0.5, соответственно. Поэтому для отношения напряжений, действующих в зоне нагруженных отверстий, погрешность, вносимая неточностью определения сил в максимальные окружные напряжения может достигать 10% для абсолютно жестких связей и 3% при использовании рассмотренных полуэмпирических зависимостей;
- для дальнейших исследований использовано моделирование соединений с помощью зависимости Свифта, поскольку применение зависимости Донченко ограничено классом двухсрезными соединениями.

На 2-м этапе решалась задачи контакта болта и отверстия. К соответствующим узлам МКЭ модели обшивки и болтов прикладываются сосредоточенные усилия из МКЭ расчета НДС панели, полученные на 1-ом этапе. Принятый итерационный алгоритм обеспечивает сходимость к решению, которое удовлетворяет статическим условиям гладкого контакта и кинематическим условиям взаимного непроникновения областей. Для оценки погрешности МКЭ аппроксимации моделирование проводилось на моделях с разной степенью дискретизации области в окрестности наиболее нагруженного отверстия (рис.4). Для модели М1 размер элемента, выходя-



а) разбиение М1



б) разбиение М2

Рис. 4

шего на границу контакта определяется дугой 15 град, для модели М2 - 3 град.

На графике (рис.5) показано распределение максимальных главных напряжений на контуре нагруженного отверстия для двух вариантов (М1, М2) конечноэлементного разбиения и двух типов крепежных элементов: титановых и стальных. Рассчитанные в обоих случаях значения максимальных главных напряжений вблизи наиболее нагруженного отверстия отличались не более, чем на 2.0 %.

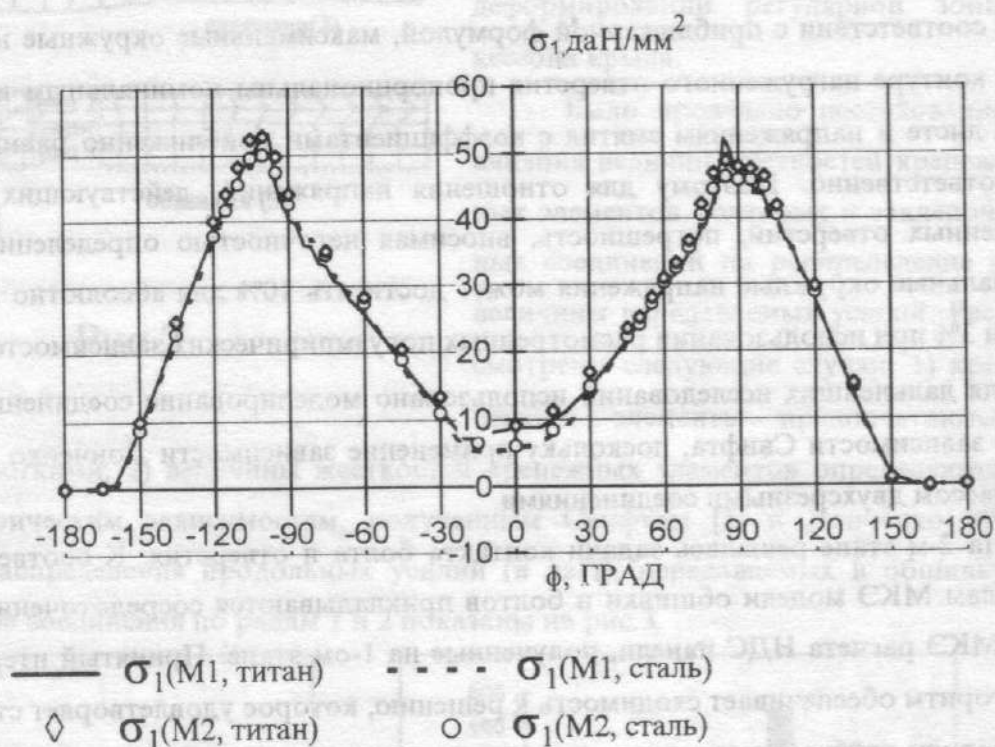


Рис 5

Сравнение относительных градиентов распределения  $\sigma_1$  на глубину 0,1 мм в окрестности точек максимальной концентрации напряжений для рассмотренных вариантов конечноэлементного разбиения и различных вариантов конструктивных исполнений показало, что их величины лежат в пределах:

- 0,62-0,69 для разбиения М1.
- 0,74-0,87 для разбиения М2;

Проведенные исследования явились основанием выбора полуэмпирической зависимости Свифта для определения жесткости крепежных элементов болтовых и заклепочных соединений на 1-ом этапе моделирования МКЭ конструктивной нерегулярности. Использование варианта М1 конечноэлементного разбиения окрестности отверстия при решении контактной задачи позволяет без ущерба для точности результата существенно сократить время МКЭ моделирования, что особенно важно

на этапе проектирования. При расчете долговечности принималось теоретическое значение относительного градиента, полученное для свободного отверстия [5] и равное 0,72.

### Литература

1. Дыбский П.А., Сергеев Б.А., Шкараев С.В. Создание вычислительной системы для комплексной автоматизации расчетно-конструкторских работ при проектировании соединений из керамики. - Техн. отчет, депонирован в ВИНТИ, январь 1992г.
2. Фомичев П.А., Трубочанин И.Ю. и др. Применение метода определения долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию к расчету панельных конструкций. // Труды ХАИ (готовится к печати 1997г).
3. Swift T. The effects of rivet yielding on residual strength of stiffened structure containing cracks// Application of fracture mechanics to built-up structures. - Amsterdam, 1979. - pp.3.38-3.42.
4. Донченко В.Ю., Барышников В.И. Расчетно-экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния сложных узлов конструкции самолета. Техн. отчет ЦАГИ НИО-3, №3459, 1979 г.
5. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975. - 560 с.