

УДК 539.43

Применение метода определения долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию к расчету панельных конструкций.

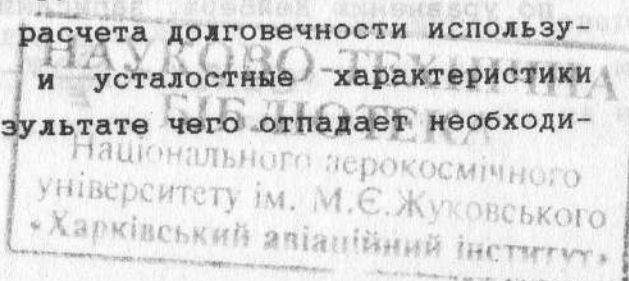
Фомичев П.А., Трубочанин И.Ю.,
Дыбский П.А., Шпак В.В.,
Пинчук Д.А., Тышецкий О.И.

823106

Обеспечение требуемой долговечности является одной из важнейших задач при проектировании авиационных конструкций. Усталостная долговечность "сверху" ограничена выносливостью регулярных зон конструкции, которая может быть обеспечена надлежащим выбором материала и допускаемых напряжений. Зоны конструктивной нерегулярности, к которым относятся различные стыки, вырезы, переходы толщин и др., ограничивают долговечность "снизу". Тщательный анализ таких зон на этапе проектирования позволяет выбрать рациональное конструктивное решение, уменьшить объем доработок конструкции в дальнейшем, а, значит, ее вес и срок запуска в эксплуатацию.

Традиционно для расчета долговечности зон конструктивной нерегулярности применяют метод номинальных напряжений [1], который основан на использовании кривой выносливости неустраняемого концентратора напряжений, формул типа Одингга для расчета эквивалентных напряжений и эффективного коэффициента концентрации напряжений, который характеризует зону конструктивной нерегулярности. К преимуществам метода относятся его простота и наглядность, к недостаткам - необходимость большого объема экспериментальных исследований, поскольку эффективный коэффициент концентрации следует находить для конкретного конструктивного исполнения по результатам испытаний элемента конструкции. Кроме этого, для составных тонкостенных конструкций с неоднородным распределением поля напряжений по элементам возникает неопределенность в выборе номинальных напряжений, которые следует применять в расчете.

Метод расчета долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию (НДС) основан на анализе полей напряжений и деформаций в области конструктивной нерегулярности, получаемых в упругой постановке. Для расчета долговечности используются циклические деформационные и усталостные характеристики конструкционного материала, в результате чего отпадает необходи-



мость в проведении большого числа испытаний и оказывается возможным принятие обоснованного конструктивного решения по данным параметрических расчетов и подтверждающих испытаний. Ранее этот метод успешно применялся для расчета долговечности элементов конструкций с геометрическими концентраторами напряжений [1]. В данной статье метод локального НДС применен и для расчета долговечности элементов конструкций с контактной передачей нагрузки, в частности, поперечных стыков нижних панелей крыла самолета. Рассмотрено регулярное нагружение.

Применительно к рассматриваемой задаче, расчет локальных напряжений проведен с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в два этапа. На первом были определены распределение усилий по крепежу с учетом его податливости и наиболее нагруженные участки элементов конструкции, а на втором - локальное напряженное состояние этих участков в результате решения контактной задачи теории упругости. Во всех рассмотренных случаях максимальные главные напряжения соответствовали точке разрыва дуги контакта.

Процедура расчета долговечности заключается в следующем.

На первом полуцикле нагружения вычисляем по формуле Нейбера [1] локальные упругопластические напряжения в точке максимальной концентрации, в качестве закона деформирования принимаем уравнение кривой монотонного (статического) деформирования материала

$$\sigma_{max} \varepsilon_t = \frac{\sigma_{max}^2}{E} \quad (1)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_{max}}{E} + \left(\frac{\sigma_{max}}{K_c} \right)^{\frac{1}{m_c}} \quad (2)$$

где

σ_{max} - максимальное упругое напряжение, полученное в расчете МКЭ
 $\sigma_{max}, \varepsilon_t$ - максимальное упругопластическое напряжение и соответствующая ему деформация, E - модуль упругости, K_c, m_c - параметры диаграммы монотонного деформирования конструкционного материала.

Найденные в результате совместного решения (1) и (2) величины σ_{max} и ε_t принимаются в качестве координат точки реверса напряжений и деформаций при расчете локального цикла деформирования материала, амплитуду напряжения локального цикла находим по уравнению Нейбера, записанному в виде

$$\sigma_a \varepsilon_{at} = \frac{\sigma_a^2}{E} \quad (3)$$

где

σ_{ay} - амплитуда упругого напряжения, найденного по расчету МКЭ,
 σ_a, ϵ_{at} - амплитуды локальных напряжения и полной деформации.

Величину ϵ_{at} определяем с учетом уравнения основной диаграммы циклического деформирования материала при асимметричном нагружении [2]

$$\epsilon_{at} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K_m} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (4)$$

$$K_m = K \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \right)^{\nu} \quad (5)$$

где

σ_e - напряжение временного сопротивления материала, K, m, ν - параметры диаграммы циклического деформирования материала, получаемые по результатам испытаний гладких образцов.

Среднее напряжение локального цикла нагружения σ_m равно

$$\sigma_m = \sigma_{max} - \sigma_a \quad (6)$$

Совместное решение (3-6) позволяет установить амплитуду, среднее напряжения и амплитуду полной деформации локального цикла.

Число циклов нагружения до зарождения микротрещин в концентраторе напряжений N находим в соответствии с энергетическим критерием усталостного разрушения [3], уравнение кривой усталости имеет вид

$$R_m W_z^{\alpha} N = 1 \quad (7)$$

$$R_m = R \left(1 - \tau \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \right) \quad (8)$$

где

R, τ, α - параметры энергетического критерия разрушения материала, получаемые по результатам испытаний гладких образцов.

Величина рассеяной за цикл нагружения энергии W_z в точке максимальной концентрации напряжений равна

$$W_z = K_{\varphi} \cdot \sigma_a \cdot \epsilon_{at} \quad (9)$$

где

K_{φ} - коэффициент формы петли гистерезиса, в первом приближении можно принимать $K_{\varphi} = 3$, ϵ_{at} - амплитуда остаточной деформации в концентраторе напряжений [4]

$$\epsilon_{at} = \epsilon_{at} - \frac{\sigma_{ay}}{E} \quad (10)$$

В результате решения уравнения (7) с учетом (8-10), находим число циклов нагружения до зарождения микротрещин на поверхности концентратора напряжений. Число циклов до возникновения макротрещины определяется напряженным состоянием материала на некото-

ром, достаточно малом, расстоянии d от поверхности концентратора [5,6]

$$\sigma_{ad} = \sigma_a - G\sigma \cdot d \quad (11)$$

где

$G\sigma$ -градиент упругопластических напряжений в точке максимальной концентрации, который в соответствии с [7] можно найти так

$$G\sigma = \frac{2\pi}{\pi'} \bar{G}_y$$

$$\pi = \sigma_a \varepsilon_{at}, \quad \pi' = \frac{d\pi}{d\sigma_a}$$

где

\bar{G}_y -относительный градиент упругих напряжений, вычисляемых по результатам расчета МКЭ.

Расчет параметров локального цикла нагружения на расстоянии d от поверхности концентратора напряжений позволяет вычислить величину рассеянной энергии Wrd и по уравнению (7) найти число циклов нагружения до возникновения макротрещины

$$Nd = \frac{1}{R_m Wrd}$$

Параметры диаграммы циклического деформирования, входящие в уравнения (4-5), и критерия усталостного разрушения (6-7) следует находить по результатам обычных испытаний стандартных гладких образцов при регулярном симметричном и асимметричном нагружении. Для измерения амплитуды остаточной деформации целесообразно использовать метод динамической петли гистерезиса [8].

Применение изложенного подхода позволяет по результатам расчетов напряженного состояния конструктивной нерегулярности в упругой постановке МКЭ прогнозировать долговечность до возникновения макротрещины в различных ее элементах. Область применимости такого расчета ограничена долговечностью, при которой влияние фреттинг-усталости оказывается существенным, обычно этому соответствует число циклов нагружения, превышающее $(1-5) \cdot 10^5$ циклов.

Ниже представлены результаты расчетов долговечности и натурных испытаний элементов конструкции крыла транспортного самолета, материал - сплав В95пчТ2.

В рамках данной работы выполнен расчет долговечности цельнофрезерованной панели с люком-лазом. При решении этой задачи для определения локального НДС был применен конечноэлементный комплекс COSMOS\М v.1.52. Используются конечные элементы оболочечного типа, обладающие мембранными, изгибными свойствами и учитывающие влияние сдвиговых деформаций.

Исследования долговечности цельнофрезерованных панельных конструкций показали целесообразность следующей схемы определения максимальных локальных напряжений:

1. Разрабатывали трехмерную расчетную модель, позволяющую максимально учесть геометрические особенности и распределение жесткостей. В качестве граничных условий для определения НДС использовали перемещения узловых точек в зоне крайней нервюры, вызывающие в панели продольные усилия, соответствующие нагрузкам, действующим в реальных условиях нагружения. На основании анализа НДС выделяли наиболее нагруженные участки с геометрическими концентраторами напряжений и определяли номинальные напряжения.

2. Разрабатывали плоские расчетные модели продольных сечений панели в зоне концентраторов напряжений. В качестве граничных условий использовали узловые номинальные напряжения, определенные на предыдущем этапе. На основании анализа НДС вычисляли максимальные упругие локальные напряжения, используемые для расчета долговечности.

Также проведен расчет долговечности поперечных стыков панелей нижней поверхности крыла транспортного самолета. Конструкция поперечного стыка крыла представляла собой соединение, состоящее из элемента обшивки, стрингера, Т-образного профиля и фитингов, перестыковывающих обшивку на профиль.

Расчет проведен с использованием программного конечно-элементного комплекса PAFST. Моделирование НДС проведено для заданных силовых и кинематических граничных условий. Пространственную подконструкцию поперечного стыка представили плоско-пространственной упругой конечно-элементной моделью.

На основе анализа результатов расчетов было проведено исследование влияния величин жесткостей болтовых и заклепочных соединений на распределение и величины усилий, передаваемых крепежными элементами. Рассматривались два варианта задания жесткостей:

- для 1-го варианта предполагалось, что болтовые и заклепочные соединения абсолютно жесткие;
- для 2-го варианта жесткость определялась по полуэмпирической зависимости для упругой податливости крепежных элементов, полученной Свифтом [8].

В качестве расчетного был принят второй вариант, учитывающий параметры реального соединения, поскольку иначе, для наиболее нагруженных крепежных элементов величины передаваемых усилий оказываются завышенными до 25 %.

При решении задачи контакта болта и отверстия к соответствующим узлам МКЭ модели обшивки и болтов прикладывали сосредоточенные усилия, полученные из расчета НДС панелей. Для оценки погрешности МКЭ решения расчеты проводили на двух моделях с разной степенью дискретизации области окрестности "опасного" отверстия. Для первой модели размер элемента выходящего на границу контакта определялся дугой в 15, а для второй - 3 градуса. Рассчитанные в обоих случаях значения максимальных главных напряжений вблизи наиболее нагруженного отверстия отличались не более, чем на 2.0 %.

Полученные значения максимальных главных напряжений были использовались для расчета долговечности.

На рис.1 проиллюстрировано согласование результатов расчетов и данных, полученных при испытаниях натуральных конструкций.

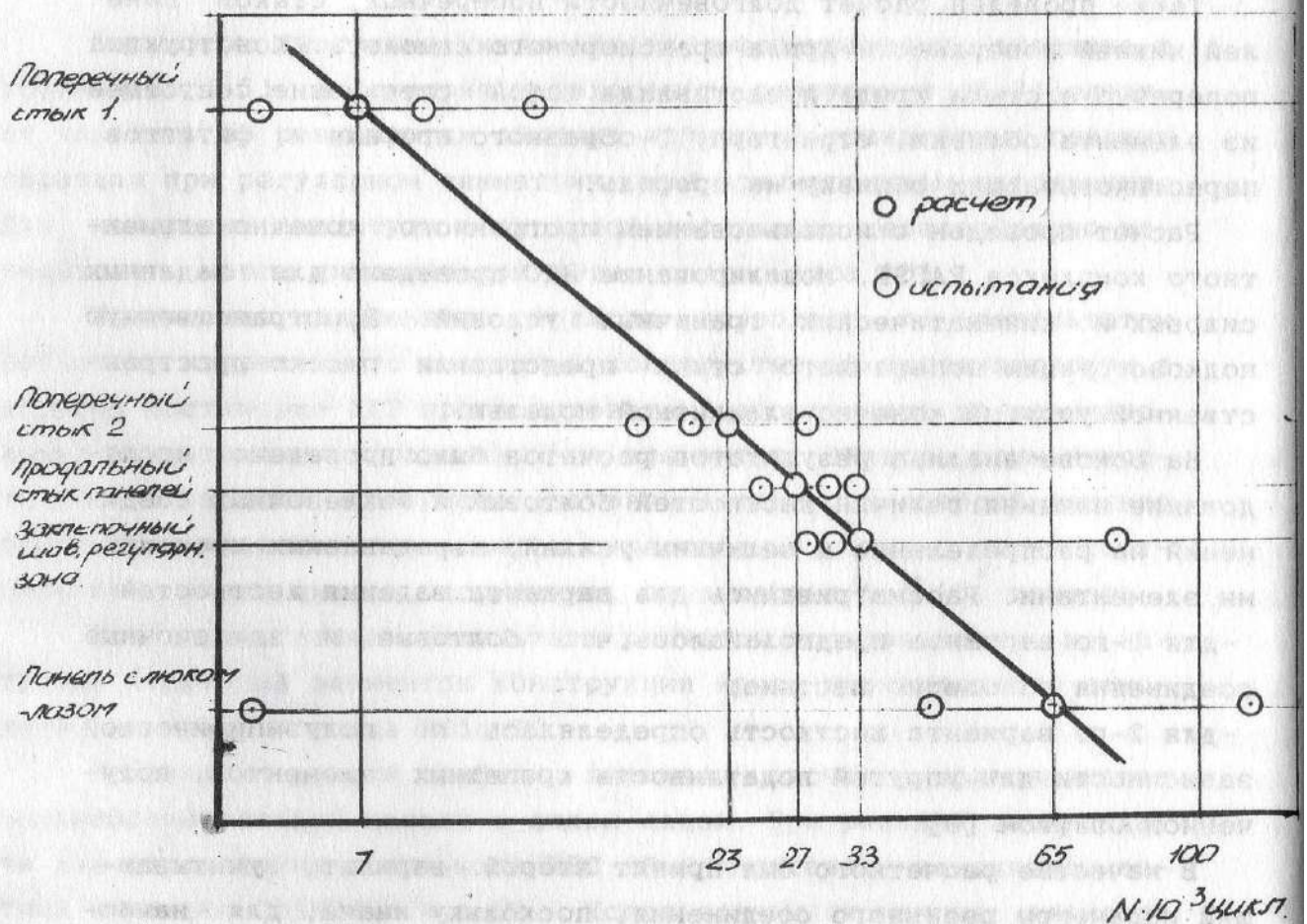


Рис. 1.

Литература

1. Соппротивление усталости элементов авиаконструкций. /А.З.Воробьев, Б.И.Олькин, В.Н.Стебенев и др.-М.:Машиностроение, 1990. -240с.

2. Фомичев П.А., Трубчанин И.Ю. Изменение амплитуды пластической деформации при регулярном и программном мягком нагружении сталей // Пробл. прочности. - 1991. - N 2. - с. 39-44.

3. Трощенко В.Т., Фомичев П.А. Энергетический критерий усталостного разрушения. //Пробл. прочности.-1993.-N 1.-С. 3-10.

4. Звягинцев В.В., Фомичев П.А. Экспериментальное исследование долговечности и циклической остаточной деформации в зоне концентрации напряжений. // Прочность конструкций летательных аппаратов. - Харьков: ХАИ, 1990, вып. 9. - с. 49-58.

5. Фомичев П.А., Полак Я. Методика расчета долговечности образцов с концентратором напряжений. Сообщение 2. // Пробл. прочности. - 1989. - N 9. - с. 100-103.

6. Фомичев П.А. Методика расчета предела выносливости образцов с концентратором напряжений // Пробл. прочности. -1989. - N 11. - с. 84-86.

7. Фомичев П.А. Расчет градиентов действительных напряжений и деформаций в зоне концентрации при упругопластическом циклическом деформировании. Сообщение 1. // Пробл. прочности. - 1989. - N 9. - с. 98-100.

8. Трощенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. /Киев: Наук. думка, 1981.-344с.

9. 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.