

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ДВУХОСНОМ НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ**

При эксплуатации ряд элементов авиационных конструкций подвержен воздействию переменных по величине, времени и направлению действия нагрузок [1]. Изменение направления действия главных напряжений характерно, например, для обшивки крыла самолета возле мест крепления стоек шасси или механизации. В полете обшивка подвержена циклическому нагружению вдоль размаха крыла, а при пробеге самолета по взлетно-посадочной полосе – еще и вдоль хорды крыла реакциями от нагрузок, приходящихся на шасси. В таких случаях прогнозирование усталостной долговечности элементов конструкций необходимо проводить с учетом взаимного влияния нагрузок.

### **1. Метод расчета долговечности элементов конструкций при двухосном непропорциональном нагружении**

В статье предложен метод расчета усталостной долговечности элементов конструкций с концентраторами напряжений при двухосном непропорциональном нагружении. Разработанный метод является дальнейшим развитием подходов к расчету долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию с использованием энергетического критерия усталостного разрушения [2]. Применение данного метода позволяет на основе циклических деформационных и усталостных характеристик материала без экспериментальных исследований долговечности конструктивно подобных образцов выполнять расчеты долговечности конструкций. Это особенно актуально для случаев многоосного нагружения агрегатов или конструкций, поскольку проведение испытаний в таких условиях сопряжено со значительными временными и материальными затратами.

В рамках расчета долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию выполняют поцикловый расчет нагружения конструкции с целью определения локальных напряжений и деформаций в наиболее нагруженных зонах. Поскольку при двухосном непропорциональном действии нагрузки наиболее нагруженная точка может мигрировать по контуру концентратора напряжений [3], вычисления необходимо проводить вдоль всего контура отверстия или выреза.

Метод отработан на примере пластины с круговым отверстием, как наиболее распространенного неустранимого концентратора напряжений

в авиационных конструкциях. Рассмотренная пластина попеременно нагружена номинальными напряжениями в разных направлениях. В общем случае изменение локальных окружных напряжений по контуру концентратора зависит от циклограмм номинальных напряжений, угла между номинальными напряжениями  $\varphi$  и от дуговой координаты  $\theta$  (рис. 1). На основе циклограмм номинальных напряжений можно получить соответствующие изменения локальных окружных напряжений. На рис. 2 показан пример циклограмм локальных напряжений для четырех точек на контуре отверстия при поочередном действии номинальных напряжений с углом  $\varphi = 30^\circ$ .

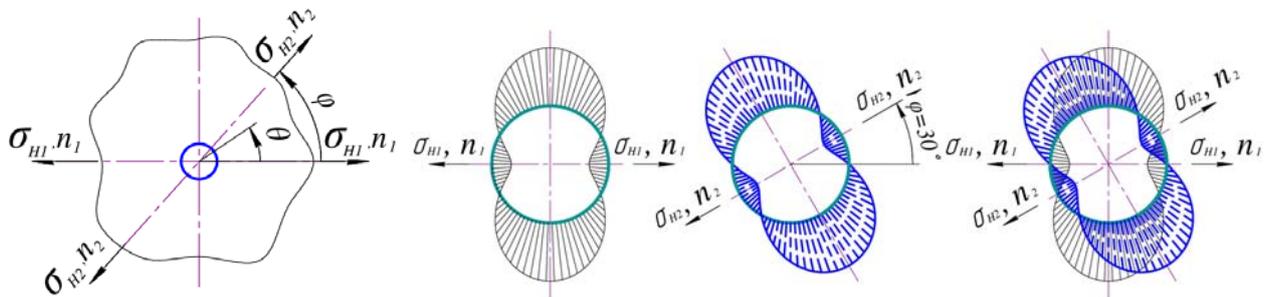


Рисунок 1 – Распределение окружных напряжений  $\sigma_\theta$  по контуру отверстия

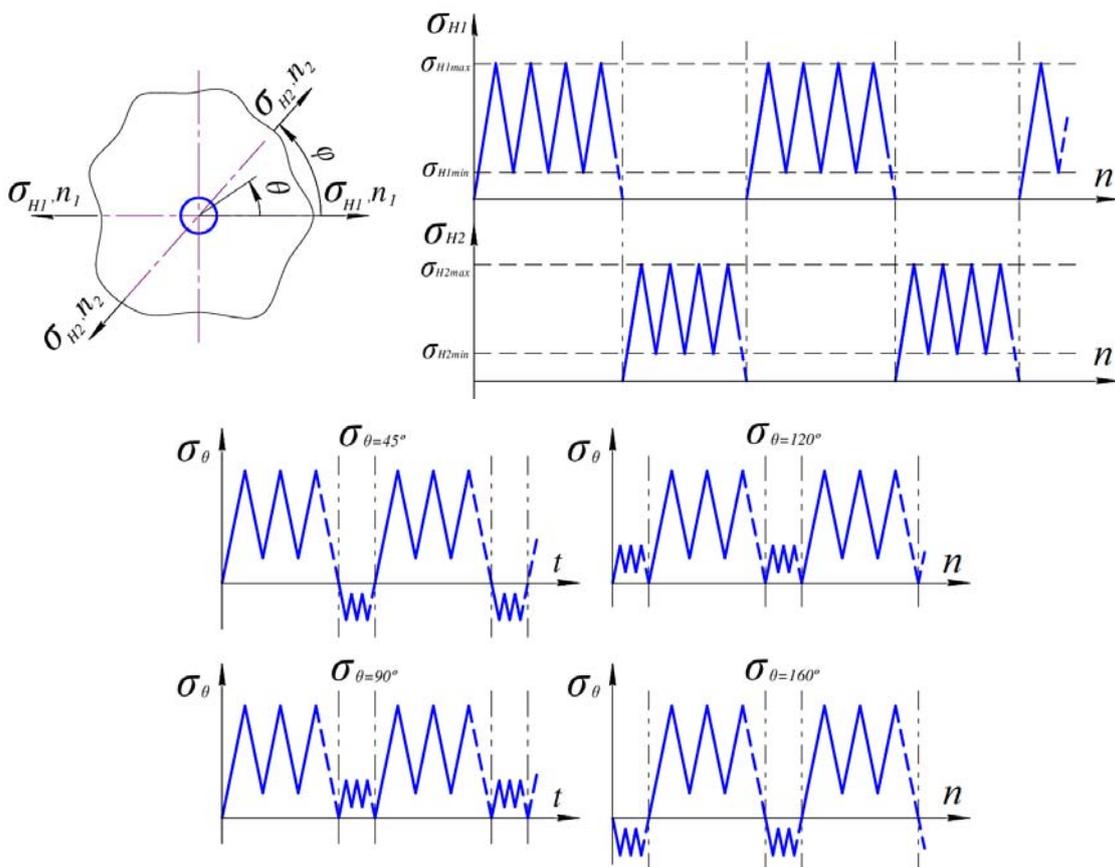


Рисунок 2 – Циклограммы номинальных и локальных окружных напряжений

Помимо явных циклов деформирования, реализуемых по каждому направлению нагружения, при смене оси нагружения в точках по контуру отверстия возникают огибающие циклы, которые имеют максимальную амплитуду напряжений [4]. Огибающий цикл встречается один раз за блок нагружения и зачастую вносит относительно небольшое повреждение, однако он оказывает влияние на значения параметров остальных циклов деформирования. Поэтому учет огибающего цикла может приводить к ошибкам при расчетах накопленного повреждения и усталостной долговечности.

Для определения локальных упругопластических напряжений и деформаций широкое применение находит уравнение Нейбера с поправочной функцией [5]

$$\sigma_{\theta} \cdot \varepsilon_{\theta} = K_T^2 \cdot \sigma_H \cdot \varepsilon_H \cdot F_M, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\theta}$ ,  $\varepsilon_{\theta}$  – локальные окружные упругопластические напряжения и деформации;

$\sigma_H$ ,  $\varepsilon_H$  – номинальные напряжения и деформации;

$K_T$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений;

$F_M$  – поправочная функция.

Коэффициент концентрации напряжений вдоль контура отверстия зависит от дуговой координаты  $\theta$  и угла между номинальными напряжениями  $\varphi$ . Величина упругого окружного напряжения

$$\overline{\sigma_{\theta}} = K_T(\theta, \varphi) \cdot \sigma_H.$$

В области многоциклового долговечности для полосы с отверстием пластическая составляющая номинальной деформации близка к нулю [6]. Тогда выражение (1) можно записать в виде

$$\sigma_{\theta} \cdot \varepsilon_{\theta} = \frac{\overline{\sigma_{\theta}}^2}{E} \cdot F_M. \quad (2)$$

В работе [7] предложено поправочную функцию вычислять по результатам расчета напряженно-деформированного состояния в концентраторе напряжений методом конечных элементов при заданных условиях нагружения. С учетом (2) функцию  $F_M$  можно вычислить как

$$F_M = \frac{\sigma_{\theta_{МКЭ}} \cdot \varepsilon_{\theta_{МКЭ}} \cdot E}{\overline{\sigma_{\theta}}^2},$$

где  $\sigma_{\theta_{МКЭ}}$ ,  $\varepsilon_{\theta_{МКЭ}}$  – локальные упругопластические напряжение и деформация, полученные с помощью МКЭ.

В ряде случаев поправочная функция  $F_M$  имеет достаточно сложный характер, поэтому более удобно получать непосредственные

зависимости между локальными упругими и упругопластическими напряжениями

$$\sigma_{\theta} = f(\overline{\sigma_{\theta}}). \quad (3)$$

Функцию (3) можно получить на основе расчетов по методу конечных элементов с заданием соответствующих граничных условий. Эта зависимость хорошо аппроксимируется полиномом 2 – 3-й степени по методу наименьших квадратов.

Применение (3) позволяет учесть явление перераспределения локальных упругопластических напряжений на контуре концентратора напряжений за пределом упругости. По сути такой подход является интерполяцией МКЭ расчетов и отображает связь локальных упругопластических напряжений с упругими, учитывая геометрию концентратора напряжений и свойства материала. В зависимости от решаемой задачи расчет проводят с использованием диаграмм монотонного или циклического деформирования материала. Для каждой точки на контуре концентратора будет своя функция зависимости упругопластических напряжений от упругих.

Для описания взаимосвязи напряжений и деформаций используют уравнения типа Рамберга – Осгуда [8] в виде линейного и степенного слагаемых

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\sigma_{\theta}}{E} + \left( \frac{\sigma_{\theta}}{K} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (4)$$

где  $K$ ,  $m$  – параметры уравнения.

При формировании локальных циклов деформирования материала находят применение дополнительные гипотезы, которые фиксируют определенную точку на контуре петли гистерезиса в координатах «напряжение – деформация». Этот прием позволяет использовать среднеинтегральные величины циклических деформационных и усталостных характеристик материала, что значительно упрощает процедуру расчета параметров локальных циклов. На практике наиболее широкое применение получила модель фиксирования точки, соответствующей максимальному локальному напряжению и деформации в блоке нагружения (реверс в точке А) [4, 6 - 7].

Согласно модели реверса в точке А начальное деформирование до достижения максимальных окружных напряжений происходит по монотонной диаграмме деформирования материала. Подставляя величину упругого окружного напряжения в зависимость (3) с использованием параметров монотонного деформирования материала  $K_c$ ,  $m_c$  в уравнении (4), выполняют расчет максимальных упругопластических напряжений и деформаций.

Совместно решая уравнения (2), (4) с подстановкой параметров циклической кривой деформирования материала, формируют огибающий цикл. Далее простираивают вложенные циклы, возникающие при действии номинальных напряжений с меньшей амплитудой. На рис. 3 показан пример формирования локальных циклов деформирования материала в концентраторе напряжений.

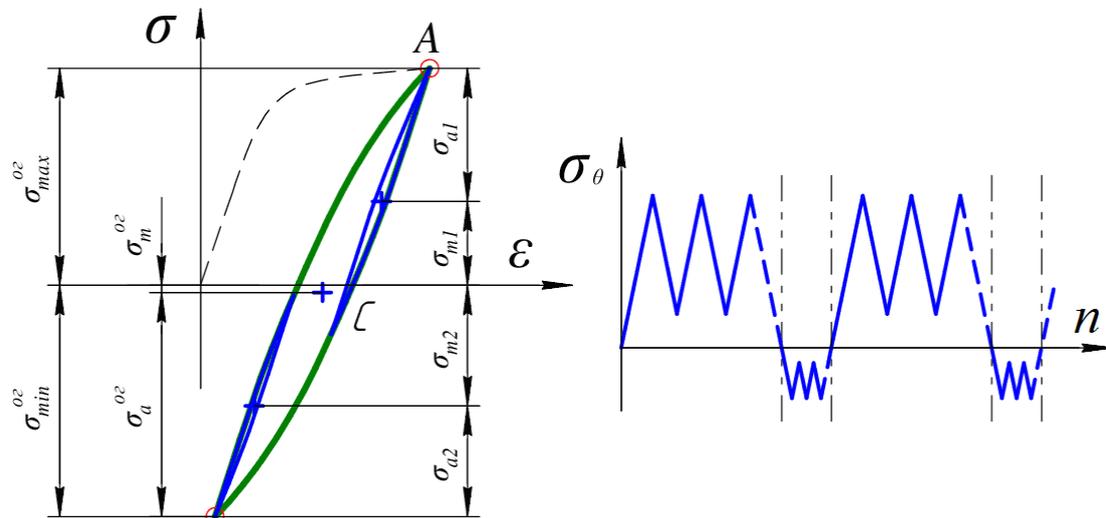


Рисунок 3 – Огибающий и вложенные циклы деформирования материала в концентраторе напряжений

Процедура расчета параметров локальных циклов подробно описана в работе [4]. В результате расчетов локального напряженно-деформированного состояния по контуру концентратора напряжений для каждого цикла в блоке нагружения определяют величины амплитудных  $\sigma_{\theta a}$  и средних напряжений  $\sigma_{\theta m}$ , амплитуды полных  $\varepsilon_{\theta at}$  и остаточных  $\varepsilon_{\theta ar}^k$  деформаций.

За один блок двухосного непропорционального нагружения накопленное усталостное повреждение в рассматриваемой точке на контуре концентратора напряжений составит

$$D_{\theta\lambda} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} R_{\theta mij} \cdot W_{\theta r ij}^{\alpha}, \quad (6)$$

где  $i$  – номер цикла нагружения на ступени;

$j$  – номер ступени в блоке нагружения;

$R_{\theta mij}$  – параметр, учитывающий асимметрию цикла нагружения;

$W_{\theta r ij}$  – величина рассеянной за цикл нагружения энергии;

$\alpha$  – параметр материала;

$n_j$  – число циклов на  $j$ -й ступени нагружения;

$k$  – количество ступеней в блоке нагружения.

Величина рассеянной за цикл нагружения энергии равна площади петли гистерезиса в координатах «напряжение – деформация»:

$$W_{\theta r} = K_f \cdot \sigma_{\theta a} \cdot \varepsilon_{\theta ar}^k, \quad (7)$$

где  $K_f$  – коэффициент формы петли гистерезиса. Для алюминиевых сплавов коэффициент формы можно принять постоянным  $K_f = 3$  [6].

В работе [9] предложено параметр  $R_m$  находить с помощью зависимости

$$R_m = R \cdot f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right), \quad (8)$$

$$f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right) = \frac{1 + r \frac{\sigma_m}{\sigma_b}}{\left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right)^v\right]^{\frac{\alpha}{m_1}}},$$

где  $R$ ,  $r$ ,  $v$ ,  $m_1$  – коэффициенты материала, определяемые при симметричном нагружении гладких образцов;

$\sigma_b$  – предел прочности материала.

Введение функции  $f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right)$  позволяет вычислять долговечность,

используя циклические деформационные и усталостные характеристики материала, полученные только при симметричном нагружении. Это позволяет существенно уменьшить объем экспериментальных исследований свойств материала.

С учетом уравнений (7) и (8) зависимость (6) примет вид

$$D_{\theta\lambda} = R \cdot K_f^\alpha \cdot \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} f\left(\frac{\sigma_{\theta m}}{\sigma_b}\right)_{ij} \cdot \left(\sigma_{\theta a ij} \cdot \varepsilon_{\theta ar ij}^k\right)^\alpha. \quad (9)$$

Таким образом, наиболее опасным местом на контуре отверстия с точки зрения возникновения трещины будет точка, в которой суммарное накопленное повреждение имеет максимальное значение. Тогда количество блоков нагружения до образования трещины составит

$$\lambda = \frac{1}{D_{\theta\lambda \max}}.$$

## 2. Численное исследование накопленного повреждения и долговечности образцов при ортогональном асинхронном нагружении

Для экспериментальной проверки предложенной методики спроектированы образцы с отверстием, позволяющие осуществлять поочередное нагружение во взаимно перпендикулярных направлениях  $X$  и  $Y$ . Образцы изготовлены из листа алюминиевого сплава Д16АТ толщиной 1,15 мм. Геометрические размеры показаны на рис. 4.

С помощью метода конечных элементов проведен анализ напряженно-деформированного состояния образцов в упругой и упругопластической постановке с использованием монотонной и циклической диаграмм деформирования материала. По результатам расчета локальных напряжений в точках по контуру отверстия определены функции зависимости упругопластических напряжений от упругих. На рис. 5 показаны зависимости  $\bar{\sigma}_\theta = f(\sigma_\theta)$  для точек при  $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  и  $90^\circ$ .

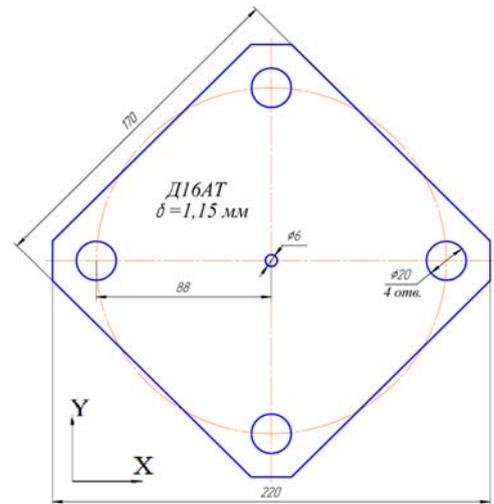


Рисунок 4 – Геометрические размеры образца

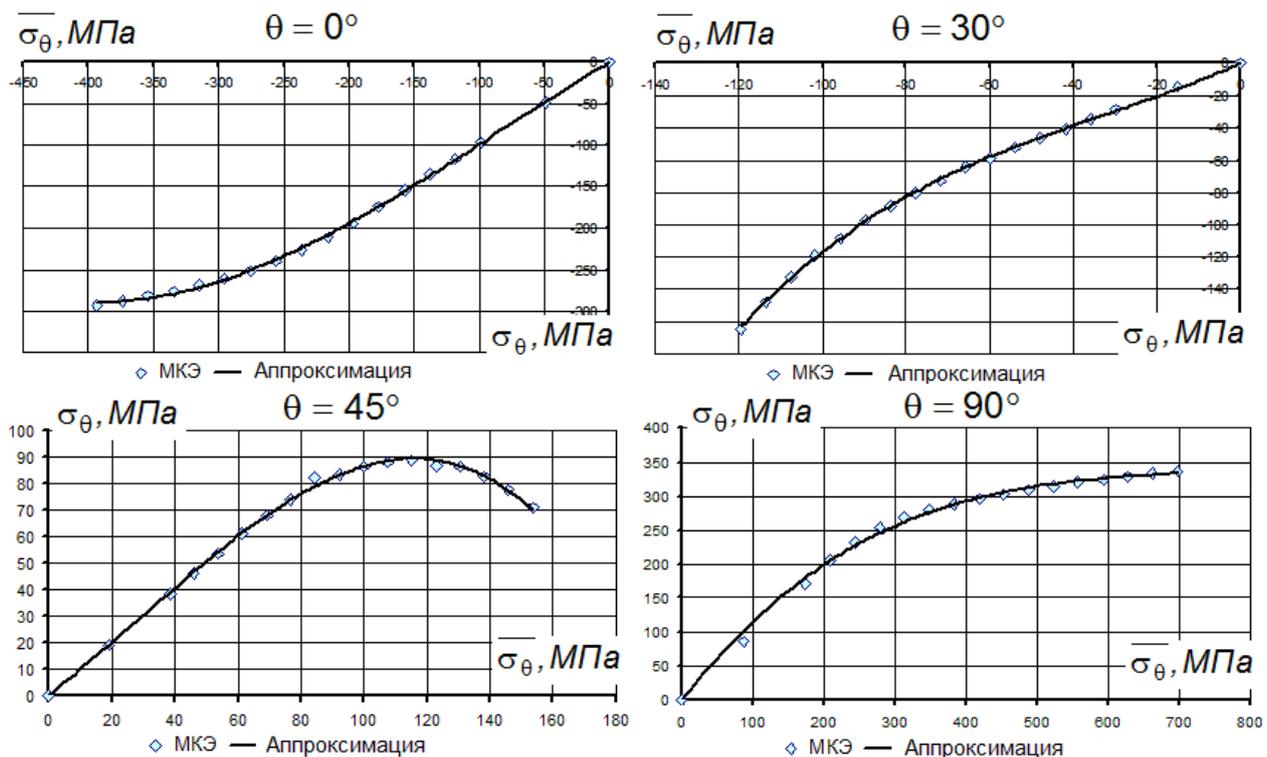


Рисунок 5 – Графики зависимости упругопластических напряжений от упругих

Рассмотрено отнулевое нагружение. Максимальная нагрузка циклов по осям  $X$  и  $Y$  принята одинаковой.

Выполнен расчет параметров локальных циклов  $\sigma_{\theta a}$ ,  $\sigma_{\theta m}$ ,  $\varepsilon_{\theta ar}^k$  и величин рассеянной энергии  $W_{\theta r}^x$ ,  $W_{\theta r}^y$ ,  $W_{\theta r}^{xy}$  за цикл нагружения. Через  $W_{\theta r}^{xy}$  обозначена рассеянная энергия огибающего цикла.

На рис. 6 приведен характер распределения накопленного повреждения по контуру отверстия за блок нагружения, включающего в себя 100 циклов вдоль оси  $X$  и 100 циклов вдоль оси  $Y$ . Суммарное накопленное повреждение за блок нагружения составит

$$D_{\theta\lambda} = D_{\theta}^x + D_{\theta}^y + D_{\theta}^{xy},$$

где  $D_{\theta}^x$  – повреждение, вносимое нагружением вдоль оси  $X$ ;

$D_{\theta}^y$  – повреждение, вносимое нагружением вдоль оси  $Y$ ;

$D_{\theta}^{xy}$  – повреждение от огибающего цикла, возникающего при смене оси нагружения.

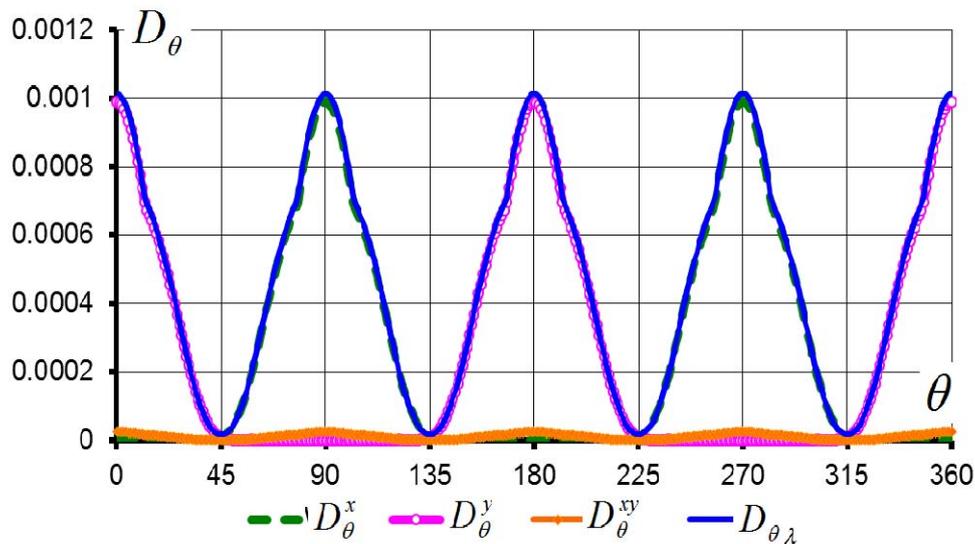


Рисунок 6 – Распределение накопленного усталостного повреждения по контуру отверстия при ортогональном асинхронном нагружении

В результате численного анализа установлены места на контуре отверстия с наибольшим накопленным повреждением. При двухосном ортогональном асинхронном нагружении максимальное накопленное повреждение будет в точках на контуре отверстия перпендикулярно к действию нагрузок, т.е. при  $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  и  $270^\circ$ .

### 3 Экспериментальное исследование долговечности образцов при ортогональном асинхронном нагружении

Экспериментальное исследование усталостной долговечности образцов с отверстием проведены на универсальной машине серии УММ, входящей в комплекс испытательного оборудования. В эксперименте реализовано попеременное отнулевое нагружение по взаимно перпендикулярным направлениям  $X$  и  $Y$ . Количество циклов нагружения и величины нагрузок по осям  $X$  и  $Y$  приняты одинаковыми. В испытаниях реализованы нагрузки, соответствующие долговечности  $10^4 - 2 \cdot 10^5$  циклов до разрушения, что равно 5 – 15 блокам нагружения. Экспериментальное исследование проведено в стандартных лабораторных условиях: температура окружающего воздуха –  $22 \pm 2^\circ\text{C}$ , относительная влажность –  $50 \pm 5\%$ , частота нагружения – 11,7 Гц.

На рис. 7 показан образец, установленный в захватах испытательной машины УММ.

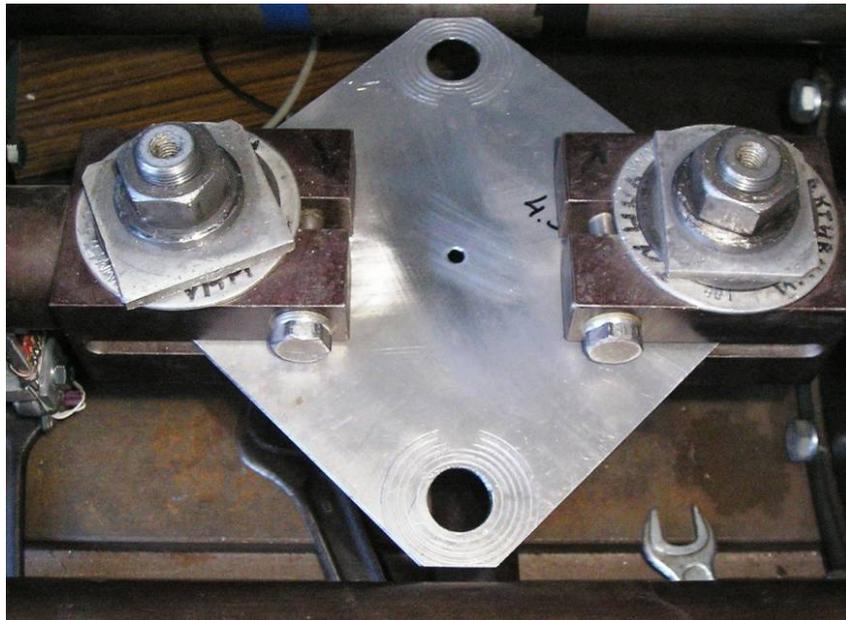


Рисунок 7 – Образец, установленный в захватах испытательной машины

В процессе испытаний фиксировали количество циклов до появления усталостных трещин длиной 0,5...1,5 мм. Обнаружение трещин проводилось визуально-оптическим способом. Во всех случаях трещины зарождались на контуре концентратора напряжений перпендикулярно к действующим нагрузкам.

На рис. 8 приведено сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета усталостной долговечности по предложенному методу при ортогональном асинхронном нагружении в координатах «максимальное упругое окружное напряжение – усталостная долговечность». Там же круглыми маркерами показаны испытания аналогичных образцов при одноосном нагружении.

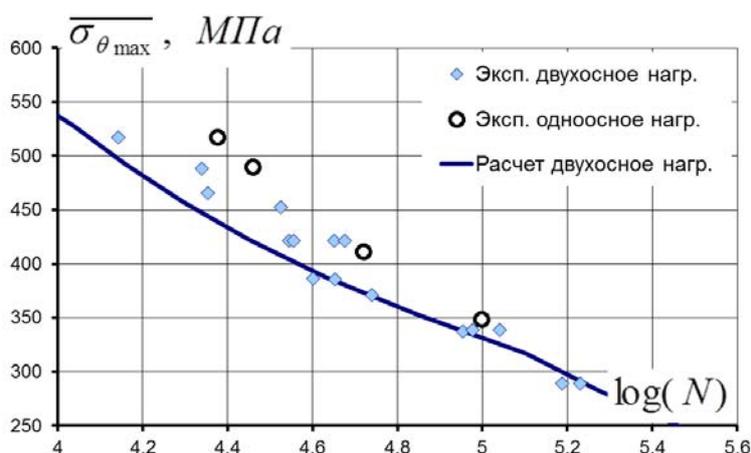


Рисунок 8 – Сопоставление экспериментальных и расчетных данных

По результатам экспериментальных исследований и численных расчетов можно сделать вывод о том, что при  $N > 10^5$  циклов долговечность при ортогональном асинхронном действии нагрузки совпадает с одноосным. В области меньшей долговечности огибающий цикл изменяет параметры вложенных циклов и увеличивает накопленное ими повреждение при ортогональном асинхронном нагружении. Вследствие этого усталостные кривые расходятся.

### Выводы

Предложен метод расчета усталостной долговечности элементов авиационных конструкций при двухосном непропорциональном нагружении. Описанный подход является дальнейшим развитием метода расчета долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию с использованием энергетического критерия разрушения. Особенностью расчета является необходимость определения накопленного усталостного повреждения для каждой точки по контуру концентратора напряжений. Следует отметить, что при изменении оси нагружения в точках по окружности возникают огибающие циклы, которые имеют максимальную амплитуду напряжений в блоке нагружения. От их параметров зависят локальные средние напряжения и амплитудные остаточные деформации вложенных циклов с меньшими амплитудными напряжениями.

Выполнено численное и экспериментальное исследование долговечности образцов при ортогональном асинхронном нагружении. Проведен анализ накопления усталостного повреждения по окружности концентратора напряжений. Установлено, что при ортогональном асинхронном нагружении в области многоциклового долговечности максимальное повреждение накапливается в точках перпендикулярно к действию нагрузок. Получено удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных.

## Список использованных источников

1. Сопротивление усталости элементов конструкций [Текст] / А. З. Воробьев, Б. И. Олькин, В. Н. Стебнев, Т. С. Родченко. – М. : Машиностроение, 1990. – 240 с.
2. Трощенко, В.Т. Энергетический критерий усталостного разрушения [Текст] / В. Т. Трощенко, П. А. Фомичев // Пробл. прочности. – 1993. – №1. – С. 3 – 10.
3. Пономарев, А. Т. Долговечность пластины с концентратором произвольной формы при малоцикловом плоском нагружении [Текст] / А. Т. Пономарев, В. Г. Стопкевич, Е. В. Коробейников // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2010. – № 1. – С. 13–18.
4. Мандзюк, С. Ф. Определение параметров локальных циклов деформирования материала в концентраторе напряжений при двухосном асинхронном нагружении [Текст] / С. Ф. Мандзюк // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 67. – Х., 2015. – С. 45 – 53.
5. Фомичев, П. А. Долговечность элементов конструкций при регулярном и программном нагружениях после предварительной перегрузки [Текст] / П. А. Фомичев, А. А. Черных // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – 2011. – № 51. – С. 5 – 16.
6. Фомичев, П. А. Обоснование расчетной кривой усталости элементов конструкций из алюминиевых сплавов [Текст] / П. А. Фомичев // Пробл. прочности. – 2011. – № 4. – С. 5 – 18.
7. Гребенюк, Я. В. Прогнозирование долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию элементов конструкций с геометрическими нерегулярностями: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.03; защищена 2004 / Гребенюк Ярослав Владимирович. – Х., 2004. – 204 с.
8. Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters [Text] : Technical Note №902 / W. Ramberg, W. R. Osgood. – National Advisory Committee For Aeronautics, Washington, D.C. – 1943. – 29 p.
9. Фомичев, П. А. Учет средних напряжений в методе расчета долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию [Текст] / П. А. Фомичев // Механика разрушения материалов и прочность конструкций: матер V Междунар. науч. конф., Львов, 24 – 27 июня 2014 г. – С. 731 – 736.

*Поступила в редакцию 31.03.2015.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. П.А. Фомичев,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*