

Определение параметров локальных циклов деформирования материала в концентраторе напряжений при двухосном асинхронном нагружении

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

Предложена методика расчета параметров локальных циклов деформирования материала в концентраторе напряжений при блочном двухосном асинхронном нагружении. Полученные в результате расчета напряжения и деформации необходимы для оценки усталостной долговечности элементов конструкций по локальному напряженно-деформированному состоянию. Выполнено экспериментальное исследование локального циклообразования материала в пластине с отверстием при двухосном асинхронном нагружении. Проведено сопоставление расчетных и экспериментальных локальных циклов деформирования материала. Получено удовлетворительное согласование диаграмм деформирования материала в точках на контуре концентратора напряжений.

Ключевые слова: локальное напряженно-деформированное состояние, концентратор напряжений, циклическое нагружение, диаграммы деформирования материала.

При эксплуатации некоторые элементы авиационных конструкций находятся под воздействием двухосного асинхронного нагружения. Например, при выпуске-уборке механизации крыла самолета главные напряжения обшивки могут изменять направление действия на угол до 20° и более. При таком нагружении прогнозирование усталостной долговечности элементов конструкций необходимо проводить с учетом взаимного влияния нагрузок [1].

Одним из перспективных методов расчета долговечности является подход на основе локального напряженно-деформированного состояния с использованием энергетического критерия усталостной разрушения [2]. Применение этого метода позволяет на основе циклических деформационных и усталостных характеристик материала без экспериментальных исследований выносливости конструктивно подобных образцов выполнить расчет долговечности конструкции. Особенно актуально использование данного подхода в случае многоосного нагружения, поскольку проведение испытаний в таких условиях сопряжено со значительными трудностями.

В рамках расчета долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию выполняют поцикловый расчет нагружения конструкции в целях определения локальных напряжений и деформаций в наиболее нагруженных зонах. Предложена методика формирования локальных циклов деформирования материала в концентраторе напряжений при блочном двухосном асинхронном нагружении. Наиболее распространенными концентраторами напряжений в элементах авиационных конструкций являются отверстия для крепежа, дренажа и т.п. Поэтому процедура формирования локальных циклов отработана на примере тонкостенной пластины с отверстием.

Особенностью двухосного асинхронного нагружения является миграция наиболее нагруженной точки по контуру отверстия в зависимости от направления действия внешней нагрузки [3]. Поскольку не известно, в какой точке контура будет накоплено максимальное повреждение, вычисления необходимо проводить по окружности концентратора напряжений. Пример распределения окружных

напряжений при действии нагрузки вдоль оси X и под углом $\varphi = 30^\circ$ показан на рис. 1.

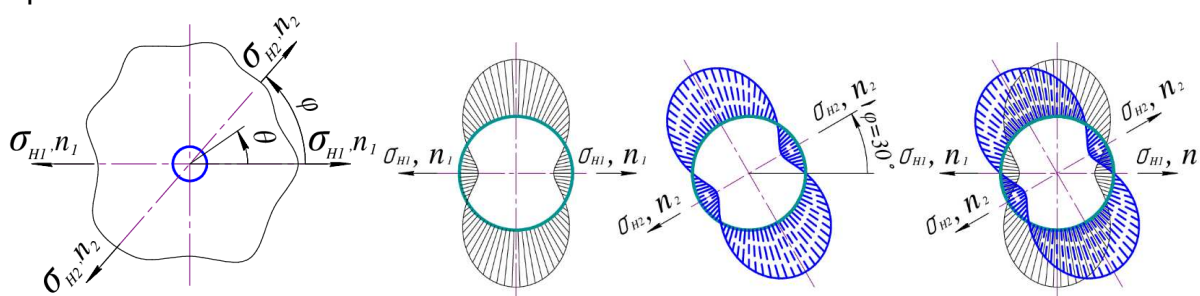


Рис. 1. Распределение окружных напряжений σ_θ по контуру отверстия

1. Формирование огибающего цикла деформирования материала в концентраторе напряжений

При блочном двухосном асинхронном нагружении пластина с отверстием поочередно нагружена асимметричными номинальными напряжениями σ_{H1} , σ_{H2} с соответствующим количеством циклов n_1 , n_2 (рис. 2, а). При такой последовательности приложения нагрузок в точках по контуру отверстия реализуется нерегулярное нагружение. Сочетание локальных напряжений по окружности концентратора при асинхронном действии нагрузок зависит от номинальных напряжений, угла φ и от дуговой координаты θ . Пример типовых комбинаций локальных окружных напряжений при $\varphi = 30^\circ$ показан на рис. 2, б.

Помимо явных циклов деформирования, реализуемых по каждому направлению действия нагрузок (рис. 2, б), при смене оси нагружения в точках по контуру отверстия возникают огибающие циклы, которые имеют максимальную амплитуду напряжений. Локальные упругие амплитудные и средние напряжения огибающего цикла в блоке нагружения составят

$$\sigma_{\theta a}^{og} = \frac{\sigma_{\theta max} - \sigma_{\theta min}}{2},$$

$$\sigma_{\theta m}^{og} = \frac{\sigma_{\theta max} + \sigma_{\theta min}}{2},$$

где $\sigma_{\theta max}$, $\sigma_{\theta min}$ – максимальные и минимальные упругие окружные напряжения в блоке нагрузок.

Учесть все особенности локального деформирования материала в концентраторе напряжений (кинетику остаточных деформаций, упрочнение и т.п.) весьма затруднительно, поэтому находят применение дополнительные гипотезы, при которых фиксируют точку реверса на контуре петли гистерезиса в координатах «напряжение-деформация». Численные расчеты показывают, что в области многоциклового усталости различные модели деформирования дают достаточно близкие результаты по долговечности [4, 5]. Поэтому для упрощения проведения вычислений параметров локального циклообразования использована модель реверса в точке А (рис. 3).

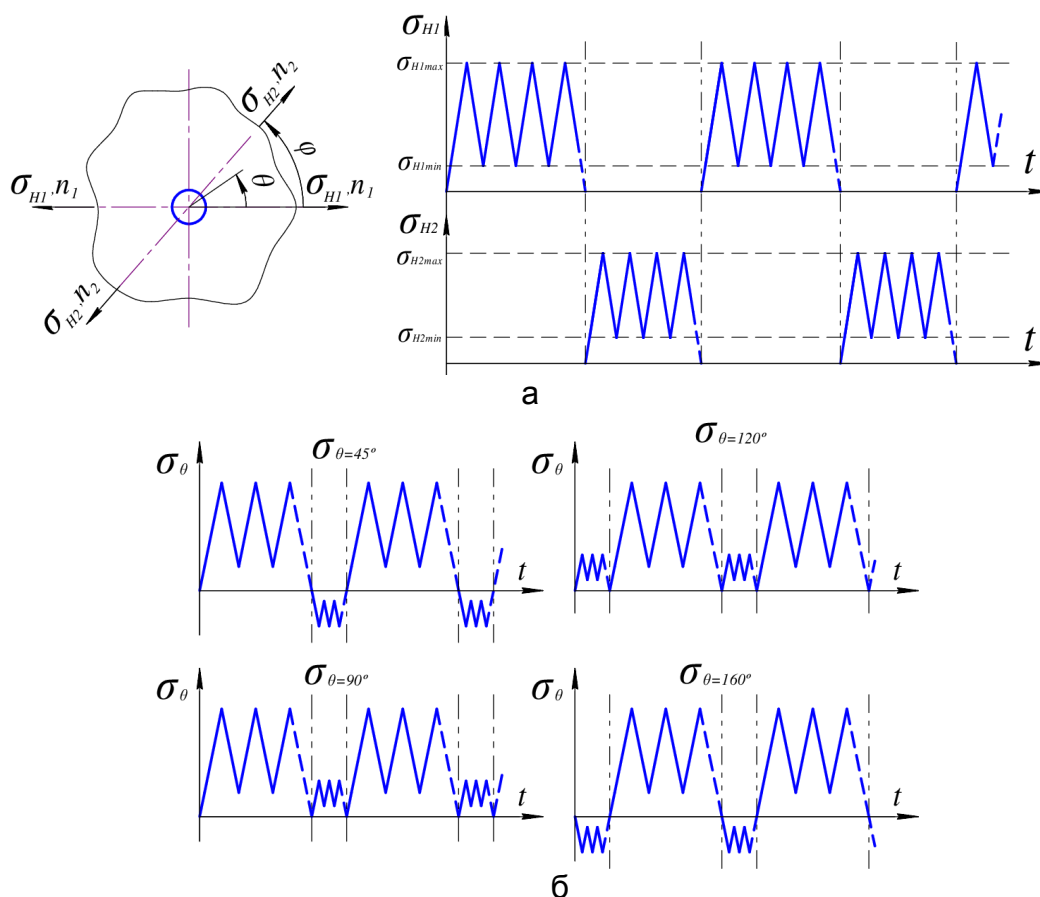


Рис. 2. Двухосное асинхронное нагружение полосы с отверстием:
 а – циклограммы номинальных напряжений;
 б – циклограммы локальных окружных напряжений

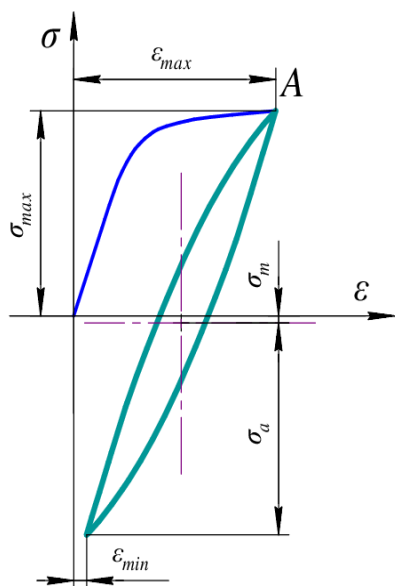


Рис. 3. Модель деформирования материала в концентраторе напряжений. В зависимости от

В общем случае локальные упругопластические напряжения и деформации определяют с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Применение МКЭ при нерегулярном нагружении, характерном для большинства элементов конструкций, усложняется в связи с неопределенностью последовательности действия нагрузок и кинетикой деформационных свойств материалов. Поэтому на практике широкое применение находят приближенные зависимости типа уравнения Нейбера с поправочной функцией [6].

В работе [7] предложено поправочную функцию вычислять по результатам расчета напряженно-деформированного состояния в концентраторе напряжений методом конечных элементов при заданных условиях решаемой задачи расчет проводят с

использованием диаграмм монотонного или циклического деформирования материала. Такой подход является аппроксимацией МКЭ расчетов и отображает связь локальных напряжений и деформаций с номинальными с учетом концентратора напряжений и свойств материала.

Запишем уравнение Нейбера с поправочной функцией в виде

$$\sigma \cdot \varepsilon = K_T^2 \cdot \sigma_H \cdot \varepsilon_H \cdot F_M, \quad (1)$$

где σ , ε – локальные упругопластические напряжения и деформации;

σ_H , ε_H – номинальные напряжения и деформации;

K_T – теоретический коэффициент концентрации напряжений;

F_M – поправочная функция.

В области многоциклового усталости для полосы с отверстием пластическая составляющая номинальной деформации близка к нулю [8], а произведение K_T на номинальное напряжение равно величине упругого локального напряжения. Выражение (1) примет вид

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

Связь напряжений и деформаций задана уравнением в виде линейного и степенного слагаемых

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (3)$$

где E , K , m – характеристики материала.

Согласно принятой модели деформирования начальное деформирование до достижения максимальных окружных напряжений происходит по монотонной диаграмме деформирования материала. Решая уравнение (2) с учетом (3) и используя параметры монотонного деформирования материала K_c , m_c , выполняют расчет максимальных упругопластических напряжений и деформаций, соответствующих точке А:

$$\sigma_{max} \cdot \varepsilon_{max} = \frac{\sigma_{\theta max}^2}{E} \cdot F_M^c,$$

$$\varepsilon_{max} = \frac{\sigma_{max}}{E} + \left(\frac{\sigma_{max}}{K_c} \right)^{\frac{1}{m_c}}.$$

После достижения максимальных окружных напряжений формируют огибающий цикл с использованием параметров циклической диаграммы деформирования материала. Амплитудные напряжения σ_a^{oz} и амплитудные полные деформации ε_{at}^{oz} огибающего цикла определяют из уравнения Нейбера, записанного в виде

$$\sigma_a^{oz} \cdot \varepsilon_{at}^{oz} = \frac{(\sigma_{\theta a}^{oz})^2}{E} \cdot F_M^y,$$

$$\varepsilon_{at}^{o2} = \frac{\sigma_a^{o2}}{E} + (1+t) \cdot \left(\frac{\sigma_a^{o2}}{K_m} \right)^{\frac{1}{m}},$$

где

$$t = \frac{1}{2^{\gamma-1} - 1};$$

$$\gamma = 2 + \frac{h}{\varepsilon_{at}^{o2}} \cdot \left(\frac{\sigma_a^{o2}}{K_m} \right)^{\frac{1}{m}};$$

$$K_m = K \cdot \left[1 - \left(\frac{\sigma_m^{o2}}{\sigma_B} \right)^{\nu} \right];$$

h – параметр контура петли гистерезиса [9];

σ_B – предел прочности материала;

ν – параметр материала.

Средние напряжения огибающего цикла находят путем вычитания величины амплитудных напряжений от напряжений, соответствующих точке реверса (точка А)

$$\sigma_m^{o2} = \sigma_{max} - \sigma_a^{o2}.$$

2. Определение параметров вложенных циклов деформирования материала

После формирования огибающего цикла определяют вложенные циклы, возникающие при действии амплитуд номинальных напряжений в первом $\sigma_{на1}$ и втором $\sigma_{на2}$ направлениях. Обычно при блочном двухосном асинхронном нагружении в точках по контуру отверстия формируется три петли: первая соответствует нагружению напряжениями $\sigma_{н1}$, вторая – $\sigma_{н2}$, третья является огибающим циклом и возникает вследствие смены направления действия нагрузки (рис. 4). В некоторых случаях количество петель может быть меньше. Например, если при одном из нагружений окружное напряжение в рассматриваемой точке равно нулю – образуется две петли: первая соответствует нагружению ненулевыми напряжениями, а вторая является огибающим циклом и возникает при смене оси нагружения.

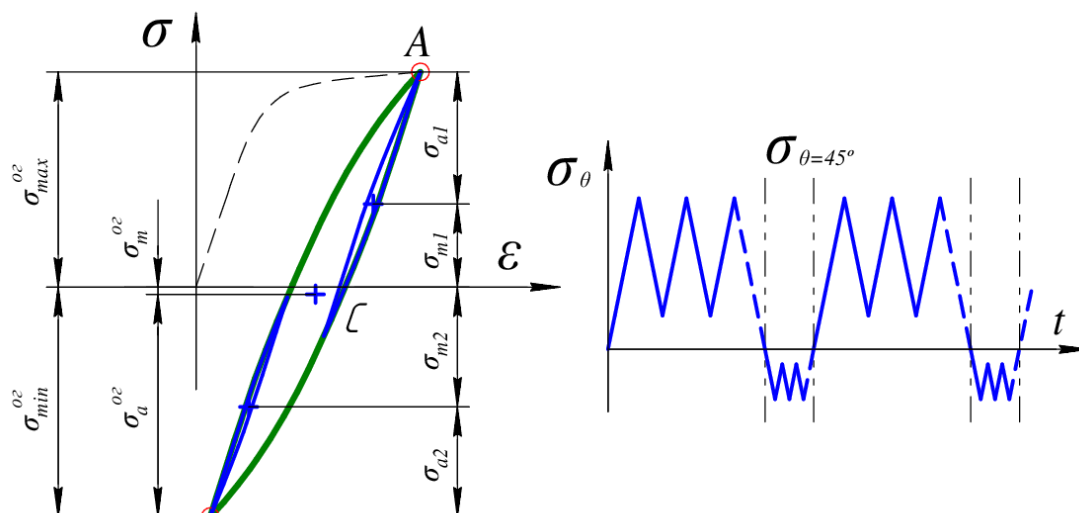


Рис. 4. Огибающий и вложенные циклы деформирования материала в концентраторе напряжений при $\varphi = 30^\circ$, $\theta = 45^\circ$

При двухосном асинхронном действии нагрузок точки реверса вложенных циклов лежат на контуре огибающего цикла. Их координаты могут быть найдены из выражения (2) с учетом деформирования по контуру петли огибающего цикла [9]

$$e_i = \frac{S_i}{E} + 2 \cdot \varepsilon_{ar}^{oz} \cdot (1+t) \cdot \left(\frac{S_i}{2 \cdot \sigma_a^{oz}} \right)^{\gamma_i}.$$

Напряжение, соответствующее точке реверса в i -м направлении нагружения:

$$\sigma_{Pi} = \sigma_{max(min)}^{oz} \mp S_i.$$

При нерегулярном нагружении необходимо использовать модель расчета кинетики амплитуды остаточной деформации при программном нагружении [10, 11]. Амплитудные напряжения σ_{ai} и амплитудные полные деформации ε_{ati} вложенных циклов определяют с учетом влияния огибающего цикла на амплитуду остаточной деформации

$$\sigma_{ai} \cdot \varepsilon_{ati} = \frac{(\sigma_{\theta ai})^2}{E} \cdot F_M^u,$$

$$\varepsilon_{ati} = \frac{\sigma_{ai}}{E} + (1+t_i) \cdot \left(\frac{\sigma_a^{oz}}{K_m} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \left(\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_a^{oz}} \right)^{\frac{1}{c}},$$

где $\sigma_{\theta ai} = \frac{\sigma_{\theta max i} - \sigma_{\theta min i}}{2}$ – упругая амплитуда окружных напряжений в i -м направлении,
 c – параметр материала.

В зависимости от положения вложенного цикла относительно его точки реверса среднее напряжение получают путем вычитания или прибавления амплитуды напряжений

$$\sigma_{m_i} = \sigma_{P_i} \pm \sigma_{a_i}.$$

3. Расчет амплитуд остаточных деформаций огибающего и вложенных локальных циклов деформирования

Амплитуду остаточной деформации локального цикла в концентраторе можно определить из условия равенства упругих окружных напряжений своему среднему значению $\sigma_{\theta_{m_i}}$ [8]. Запишем выражение (2) с учетом $\sigma = S_{r_i}$, $\varepsilon = e_{r_i}$, $\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta_{a_i}}$:

$$S_{r_i} \cdot e_{r_i} = \frac{\sigma_{\theta_{a_i}}^2}{E} \cdot F_M^y, \quad (4)$$

$$e_{r_i} = \frac{S_{r_i}}{E} + 2 \cdot \left(\varepsilon_{a_{t_i}} - \frac{\sigma_{a_i}}{E} \right) \cdot \left(\frac{S_{r_i}}{2 \cdot \sigma_{a_i}} \right)^\gamma,$$

где

$$t_i = \frac{1}{2^{\gamma_i - 1} - 1},$$

$$\gamma_i = 2 + h \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{a_i}}{E \cdot \varepsilon_{a_{t_i}}} \right).$$

Амплитуда остаточной деформации в концентраторе напряжений составит [12]

$$\varepsilon_{ar_i}^{(k)} = \varepsilon_{a_{t_i}} - e_{r_i}. \quad (5)$$

Подставляя в зависимости (4) – (5) параметры огибающего и вложенных циклов, находим величины амплитудных остаточных деформаций $\varepsilon_{ar_{o_2}}^{(k)}$, $\varepsilon_{ar_1}^{(k)}$, $\varepsilon_{ar_2}^{(k)}$ по окружности концентратора напряжений.

4. Экспериментальное исследование формирования локальных циклов в концентраторе напряжений при блочном двухосном нагружении

Для экспериментальной проверки предложенной методики спроектированы образцы с отверстием, позволяющие осуществлять двухосное асинхронное нагружение (рис. 5). Образцы изготовлены из алюминиевого сплава Д16АТ толщиной 1,15 мм. Для измерения локальных деформаций спроектированы и изготовлены тензометры с базой 1,7...2,0 мм. На рис. 6 – 7 показан общий вид тензометра и образец с размещенными по окружности тензометрами.

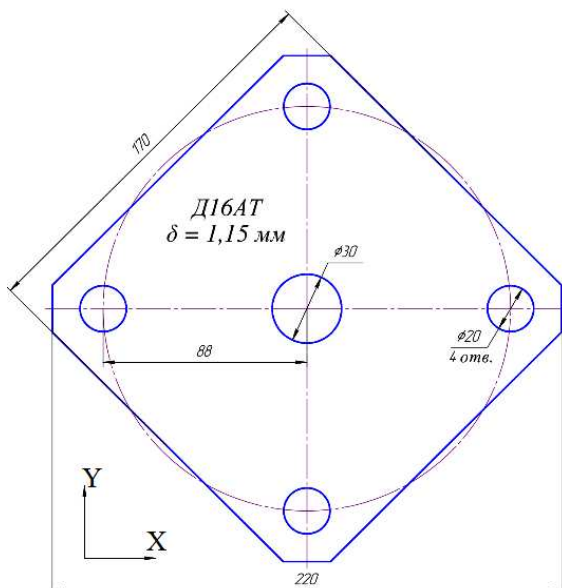


Рис. 5. Геометрические размеры образца



Рис. 6. Общий вид тензометра

Исследование локального циклообразования проведено с использованием испытательного стенда на базе машины УММ-1. На рис. 8 показан образец с тензометрами, установленный в захватах испытательной машины.

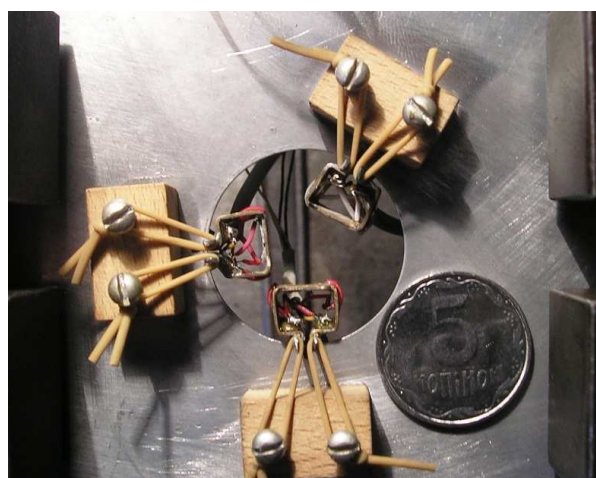


Рис. 7. Тензометры, установленные по контуру отверстия

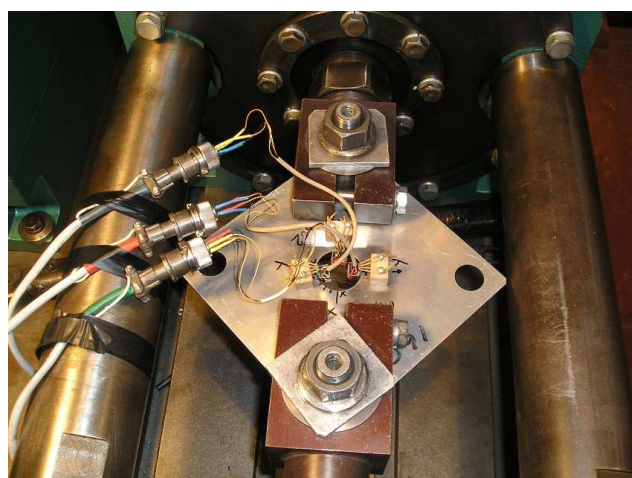


Рис. 8. Образец в захватах испытательной машины

В эксперименте реализовано блочное двухосное асинхронное нагружение. Блок нагружения включает в себя 10 циклов деформирования вдоль оси X , затем 10 – циклов по оси Y . Параллельно измерению нагрузки фиксировалась деформация в местах установки тензометров. Пересчет действующих нагрузок в локальные упругие напряжения выполнен с помощью метода конечных элементов. На рис. 9 показаны экспериментальные локальные циклы деформирования материала в концентраторе напряжений. Поскольку сплав Д16АТ циклически нестабильный, кривые деформирования материала изменяются в процессе наработки.

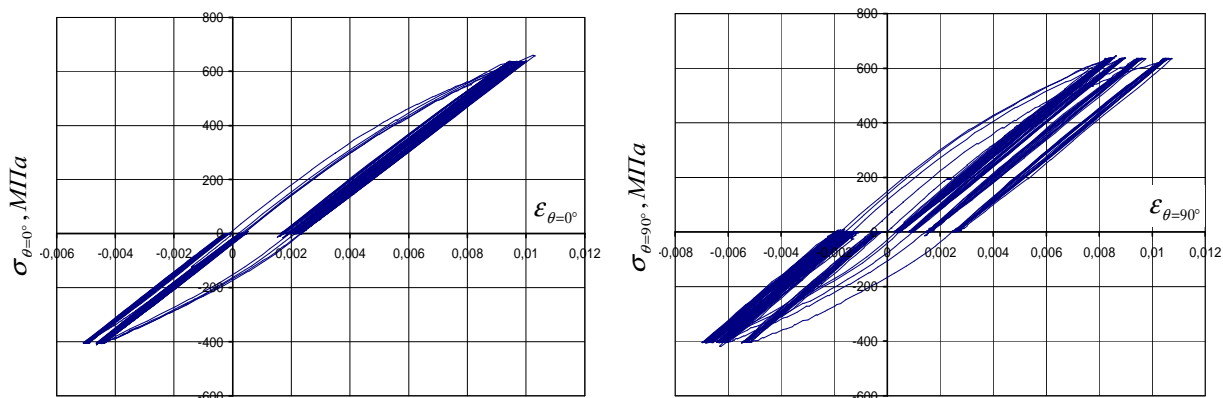


Рис. 9. Экспериментальные диаграммы деформирования материала в точках на контуре отверстия при $\theta = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$

Выполнено расчетное построение петель локальных циклов при напряжениях, соответствующих экспериментальным. На рис. 10 показаны экспериментальные и расчетные диаграммы деформирования материала в концентраторе напряжений за первый блок двухосного асинхронного нагружения. Согласование расчетных и экспериментальных данных удовлетворительное.

Для лучшего согласования экспериментальных и расчетных диаграмм деформирования материала последующих блоков нагружения необходимо учитывать кинетику амплитуд остаточных деформаций.

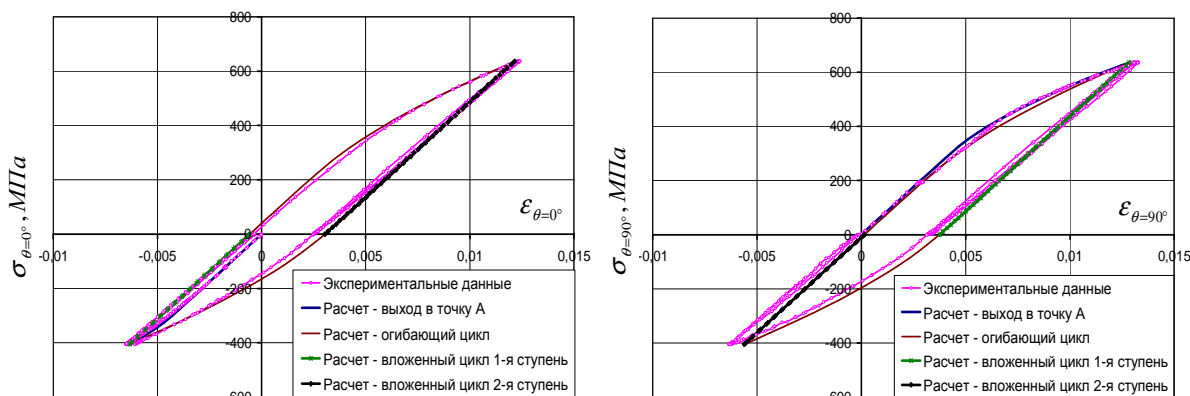


Рис. 10. Экспериментальные и расчетные диаграммы деформирования материала в концентраторе напряжений за первый блок двухосного асинхронного нагружения

Выводы

Приведена методика формирования локальных циклов деформирования материала в концентраторе напряжений при блочном двухосном асинхронном нагружении. Полученные в результате построения локальных циклов напряжения и деформации необходимы для расчетов долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию.

Выполнено экспериментальное исследование локального циклообразования в концентраторе напряжений при блочном двухосном асинхронном нагружении. Получены диаграммы деформирования материала в

точках по контуру концентратора напряжений. Проведено сопоставление экспериментальных и расчетных диаграмм деформирования материала. Получено удовлетворительное согласование данных.

Список литературы

1. Сопротивление усталости элементов конструкций [Текст] / А. З. Воробьев, Б. И. Олькин, В. Н. Стебеньев, Т. С. Родченко. – М. : Машиностроение, 1990. – 240 с.
2. Троценко, В.Т. Энергетический критерий усталостного разрушения [Текст] / В. Т. Троценко, 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. Фомичев, П. А. Локальное деформирование материала при программном нагружении в условиях сложного напряженного состояния [Текст] / П. А. Фомичев, И. Ю. Трубочанин, Я. В. Гребенюк // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2 (53). – Х., 2008. – С. 35 – 40.
5. Фомичев, П. А. Методика расчета долговечности элементов конструкций, нагруженных циклическими растяжением-сжатием и изгибом при регулярном нагружении [Текст] / П. А. Фомичев, А. С. Третьяков // Повреждение материалов во время эксплуатации, методы его диагностирования и прогнозирования: труды Междунар. науч.-техн. конф., Тернополь, 21 – 24 сент. 2009 г. – С. 266 – 275.
6. 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.
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. Фомичев, П. А. Обоснование расчетной кривой усталости элементов конструкций из алюминиевых сплавов [Текст] / П. А. Фомичев // Пробл. прочности. – 2011. – № 4. – С. 5 – 18.
9. Фомичев, П. А. Уравнение контура и коэффициент формы петли гистерезиса [Текст] / П. А. Фомичев, И. Ю. Трубочанин // Пробл. прочности. – 1997. – №3. – С. 30 – 38.
10. Фомичев, П. А. Энергетический метод расчета долговечности при нерегулярном нагружении. Сообщение 1. Учет последовательности действия нагрузок [Текст] / П. А. Фомичев // Пробл. прочности. – 1995. – № 7. – С. 3 – 12.
11. Фомичев, П. А. Изменение амплитуды пластической деформации при регулярном и программном мягком нагружении сталей [Текст] / П. А. Фомичев, И. Ю. Трубочанин // Пробл. прочности. – 1991. – №2. – С. 39 – 44.
12. Фомичев, П. А. Параметр, характеризующий долговечность тел с концентраторами напряжений [Текст] / П. А. Фомичев // Повреждение материалов

во время эксплуатации, методы его диагностирования и прогнозирования: труды Междунар. науч.-техн. конф., Тернополь, 21 – 24 сент. 2009 г. – С. 82 – 89.

Поступила в редакцию 19.02.2015

Розрахунок параметрів локальних циклів деформування матеріалу в концентраторі напружень при двовісному асинхронному навантаженні

Запропоновано методику розрахунку параметрів локальних циклів деформування матеріалу в концентраторі напружень при блочному двовісному асинхронному навантаженні. Отримані в результаті обчислень напруження та деформації необхідні для оцінювання втомної довговічності елементів конструкцій за локальним напружено-деформованим станом. Виконано експериментальне дослідження локального циклоутворення матеріалу в пластині з отвором при двовісному асинхронному навантаженні. Проведено зіставлення розрахункових та експериментальних локальних циклів деформування матеріалу. Отримано задовільне узгодження діаграм деформування в точках на контурі концентратора напружень.

Ключові слова: локальний напружено-деформований стан, концентратор напружень, циклічне навантаження, діаграми деформування матеріалу.

Calculation the parameters of local cycles of the material deformation in stress concentrators under biaxial asynchronous loading

Proposed the method of calculating the parameters of the local deformation of the material cycles in stress concentrators under block asynchronous biaxial loading. The resulting calculation of stresses and strains are needed to assess the fatigue life of structural elements on the local stress-strain state. An experimental study of the local cycle formation material in a plate with a hole under biaxial asynchronous loading. A comparison of the calculated and experimental local cycles of deformation of the material. A satisfactory coordination diagrams material deformation at the points on the contour of a stress concentrator.

Keywords: local stress-strain state, stress concentrator, cyclic loading, deformation diagram of the material.