

## **АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ, НАГРУЖЕННЫХ КОМБИНАЦИЕЙ РАСТЯЖЕНИЯ-СЖАТИЯ И ИЗГИБА**

Необходимость увеличения ресурса и надежности изделий авиационной техники, важной особенностью которой является нерегулярное нагружение, обусловленное необходимостью выполнения маневров и полетов в турбулентной атмосфере, приводит к разработке новых, более точных, методов расчета долговечности элементов конструкции.

В настоящее время разработаны методы расчета долговечности конструкций с концентраторами напряжений по локальному напряженно-деформированному состоянию (НДС) в условиях растяжения - сжатия [1,2]. Однако большое количество элементов авиационных конструкций наряду с растяжением - сжатием нагружены и изгибом. К ним можно отнести цельнофрезерованные панели, стыки внахлест фюзеляжных обшивок, стыки панелей крыла и т.д. Влияние изгибающей составляющей в методах расчета долговечности по локальному НДС не рассматривалось.

В данной работе выполнен анализ напряженно-деформированного состояния образцов, имитирующих переходы толщин монолитных фрезерованных панелей. Полученные параметры циклов нагрузок в наиболее нагруженных зонах образцов в номинальных напряжениях являются исходными данными для расчета долговечности по локальному НДС.

Большинство усталостных испытательных машин рассчитано на нагружение образцов только осевой нагрузкой. Поэтому для создания в образцах напряжений от изгиба в рабочей части образца сделана выборка. Возникающий в результате эксцентриситет при передаче осевой нагрузки приводит к возникновению в образцах изгибающего момента. Исходными геометрическими данными являлись стандартные размеры образцов, применяемых для экспериментальных исследований с использованием испытательного комплекса на базе машины УММ-01 [3].

**Образцы для испытаний.** Геометрия образцов подобрана так, чтобы разрушения происходили в зоне максимальных напряжений от изгиба. Для этого выполнен параметрический анализ напряженно-деформированного состояния образцов во всем диапазоне нагрузок, реализуемых в эксперименте. Анализ проведен с помощью метода конечных элементов (МКЭ).

Диаметр отверстия в образце с концентратором напряжений выбран из соображения возможности установки на края отверстия

перпендикулярно плоскости образца малогазного тензомера арочного типа. Тензомер использован для экспериментального определения амплитуды полной деформации в процессе усталостных испытаний.

Расчетная схема образцов выбрана так, чтобы выполнялось максимальное соответствие условиям закрепления и нагружения, реализованным в эксперименте (рис. 1,2).

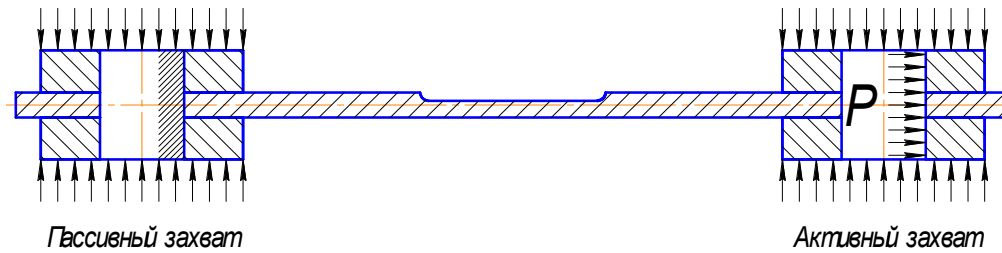


Рисунок 1 – Схема закрепления и нагружения образца в эксперименте



Рисунок 2 – Схема закрепления и нагружения модели образцов

Общий вид конечно-элементных (КЭ) моделей гладкого образца и образца с отверстием и система координат показаны на рис. 3.

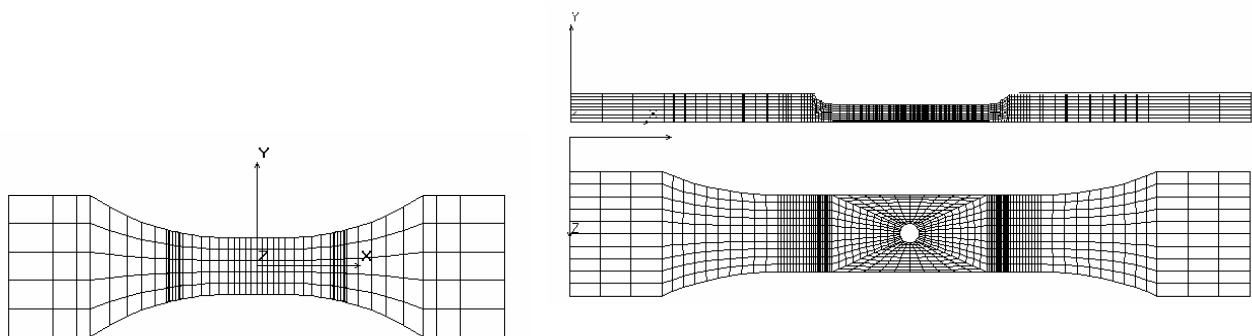


Рисунок 3 – Конечно-элементное разбиение образцов (укрупненное)

Сходимость результатов расчетов НДС оценивалась отношением напряжений на последнем и предпоследнем этапах дискретизации. Уменьшение размеров элементов производилось до момента изменений напряжений в рабочей зоне менее чем на 2%.

Расчет выполнен в упругой геометрически нелинейной постановке. Окончательно принятая геометрия образцов показана на рис. 4.

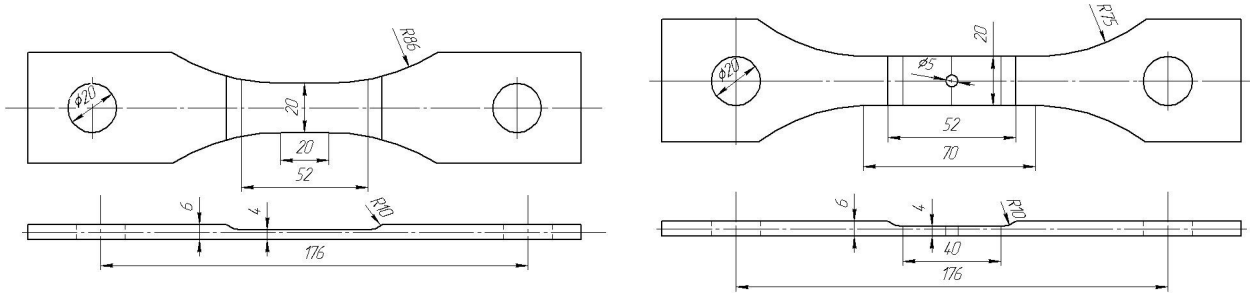


Рисунок 4 – Экспериментальные образцы

**Определение параметров НДС гладких образцов.** Расчет проведен для осевых номинальных напряжений, находящихся в диапазоне  $\pm 282$  МПа.

Максимальные напряжения во всем диапазоне прикладываемых усилий возникают посередине рабочей зоны образца со стороны выборки. Пример распределения напряжений  $\sigma_x$  по оси  $x$  показан на рис. 5.

Поверхность образца, на которой выполнена выборка, в дальнейшем будем называть верхней, гладкая сторона – нижней.

В результате определены значения номинальных напряжений и деформаций сверху и снизу рабочей зоны образца. Напряжения и деформации от осевой нагрузки и изгибающего момента найдены так:

$$\sigma_o = \frac{(\sigma_{вп}^{p(c)} + \sigma_{нп}^{p(c)})}{2};$$

$$\varepsilon_o = \frac{(\varepsilon_{вп}^{p(c)} + \varepsilon_{нп}^{p(c)})}{2};$$

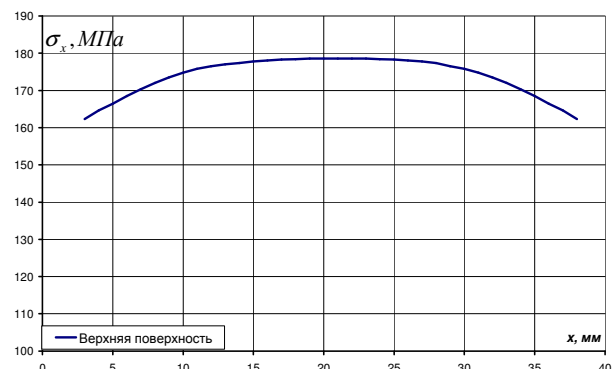


Рисунок 5 – Распределение напряжений на верхней поверхности образца по длине рабочей зоны

$$\sigma_u = \frac{(\sigma_{вп}^{p(c)} - \sigma_{нп}^{p(c)})}{2};$$

$$\varepsilon_u = \frac{(\varepsilon_{вп}^{p(c)} - \varepsilon_{нп}^{p(c)})}{2}$$

где  $\sigma_o, \varepsilon_o, \sigma_u, \varepsilon_u$  - осевые и изгибные напряжения и деформации;

$\sigma_{вп}^{p(c)}, \varepsilon_{вп}^{p(c)}$  - напряжения и деформации при растяжении (сжатии) на верхней поверхности образца;

$\sigma_{нп}^{p(c)}, \varepsilon_{нп}^{p(c)}$  - напряжения и деформации при растяжении (сжатии) на нижней поверхности образца.

Получена зависимость изгибающих напряжений от осевых.

В результате расчетов установлено, что при изменении нагрузки происходит смещение нейтральной оси рабочей зоны образца в вертикальном направлении, изменяется эксцентриситет передачи нагрузки и, соответственно, изгибающий момент. Деформирование образца при растяжении и сжатии показано на рис. 6.

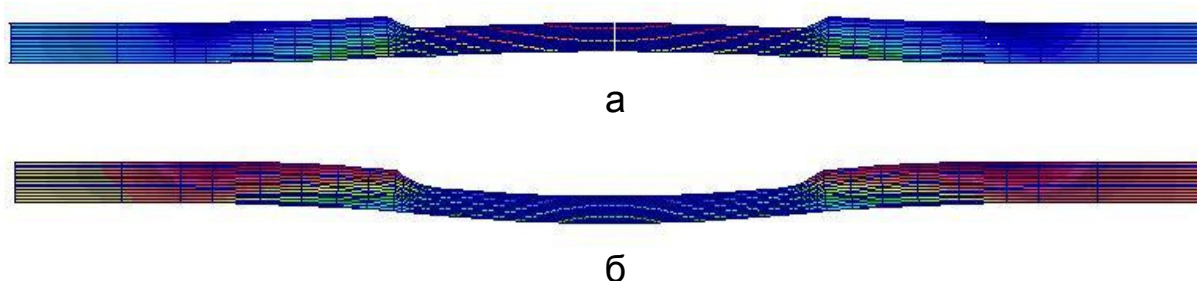


Рисунок 6 – Деформирование образца при растяжении (а) и сжатии (б)

Выполнено экспериментальное определение значений деформаций, возникающих в рабочей зоне образца.

Для этого образец, в рабочей зоне которого сверху и снизу установлены два малогазовых тензометра арочного типа, подключенных к системе регистрации показаний тензодатчиков СИИТ-3, нагружали с помощью испытательной машины УММ-01 до предела пропорциональности. Измерения повторяли для нескольких образцов.

Величины деформаций, полученных с помощью МКЭ и экспериментально, показаны на рис. 7, а. Зависимости деформаций изгиба, полученных с помощью МКЭ и экспериментально, от осевых напряжений показаны на рис. 7, б.

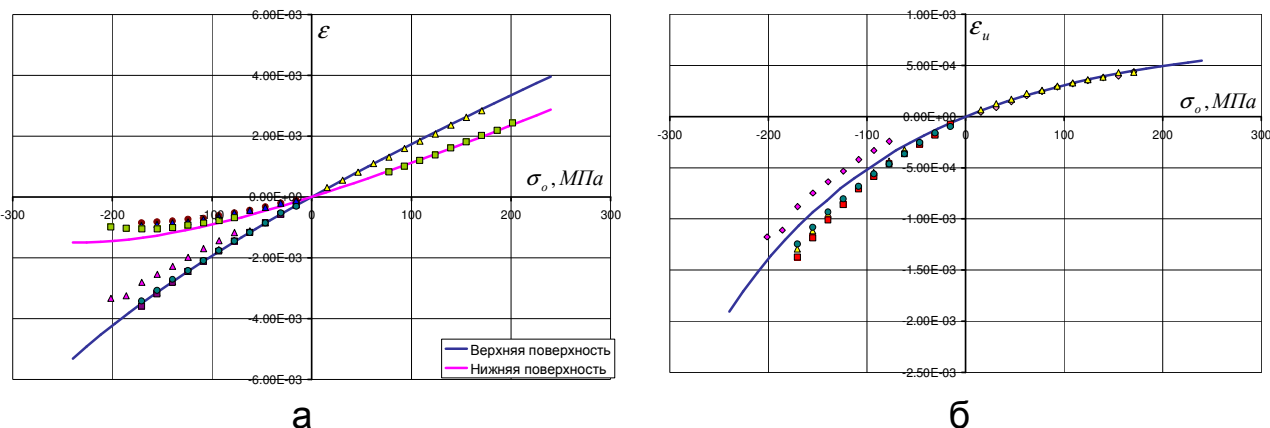
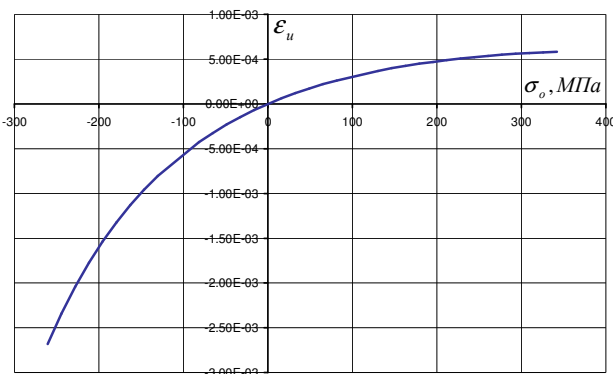


Рисунок 7 – Зависимости расчетных и экспериментально измеренных деформаций в рабочей зоне образца с выборкой 2 мм

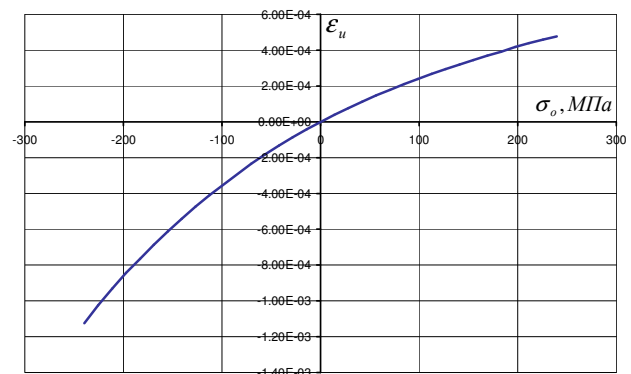
Линиями показаны рассчитанные значения, точками – полученные экспериментально.

Аналогично выполнен расчет деформаций от изгиба для гладкого образца с выборками глубиной 1.17 и 2.54 мм. Результаты расчетов

образца с выборкой глубиной 1.17 мм показаны на рис. 8, а, с выборкой 2.54 мм – на рис. 8, б.



а



б

Рисунок 8 – Зависимость деформаций изгиба, возникающих от прикладываемых осевых напряжений

### Определение параметров НДС образцов с отверстием.

Расчеты проведены для осевых номинальных напряжений, находящихся в диапазоне  $-141 \dots 206$  МПа. Принятая величина максимальных сжимающих напряжений связана с наступлением потери устойчивости образца.

В результате получены значения максимальных локальных напряжений и деформаций на верхней и нижней образующих контура отверстия в образце. Напряжения и деформации от осевой нагрузки и изгибающего момента найдены аналогично гладкому образцу:

$$\sigma_o = \frac{(\sigma_{впК}^{p(c)} + \sigma_{нпК}^{p(c)})}{2}; \quad \sigma_u = \frac{(\sigma_{впК}^{p(c)} - \sigma_{нпК}^{p(c)})}{2};$$

$$\varepsilon_o = \frac{(\varepsilon_{впК}^{p(c)} + \varepsilon_{нпК}^{p(c)})}{2}; \quad \varepsilon_u = \frac{(\varepsilon_{впК}^{p(c)} - \varepsilon_{нпК}^{p(c)})}{2},$$

где  $\sigma_o, \varepsilon_o, \sigma_u, \varepsilon_u$  - осевые и изгибные напряжения и деформации;

$\sigma_{впК}^{p(c)}, \varepsilon_{впК}^{p(c)}$  - максимальные напряжения и деформации при растяжении (сжатии) на контуре отверстия верхней поверхности;

$\sigma_{нпК}^{p(c)}, \varepsilon_{нпК}^{p(c)}$  - максимальные напряжения и деформации при растяжении (сжатии) на контуре отверстия нижней поверхности.

Получена зависимость деформаций от изгиба в отверстии от осевых напряжений. Эта зависимость показана на рис. 9.

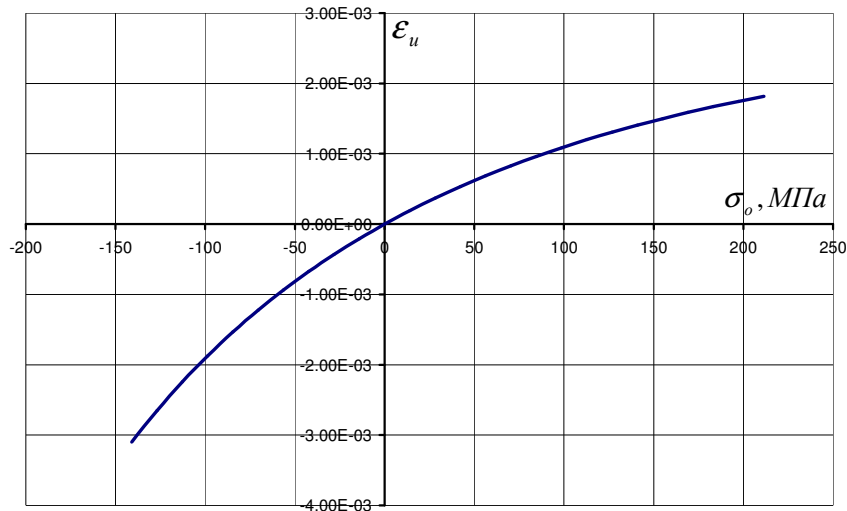


Рисунок 9 – Зависимость деформаций изгиба, возникающих от прикладываемых осевых напряжений для образца с отверстием и выборкой 2 мм

**Влияние изгиба на характер и параметры цикла нагружения в номинальных напряжениях.** Рабочая зона образца нагружена номинальным средним и амплитудным напряжениями

$$\sigma_{ан}^{\Sigma} = \frac{(\sigma_{max н}^{\Sigma} - \sigma_{min н}^{\Sigma})}{2} \quad \sigma_{m н}^{\Sigma} = \frac{(\sigma_{max н}^{\Sigma} + \sigma_{min н}^{\Sigma})}{2},$$

где  $\sigma_{max н}^{\Sigma} = \sigma_{m н}^o + (\sigma_{ан}^o + \sigma_{max н}^u)$ ;

$$\sigma_{min н}^{\Sigma} = \sigma_{m н}^o - (\sigma_{ан}^o + \sigma_{min н}^u);$$

$\sigma_{ан}^o$ ,  $\sigma_{m н}^o$  – амплитудные и средние осевые номинальные

напряжения, которые определяются как  $\sigma_{ан}^o = \frac{P_a}{F_{бр}}$ ,  $\sigma_{m н}^o = \frac{P_m}{F_{бр}}$ , где

$F_{бр}$  - брутто-площадь сечения.

$\sigma_{н max}^u$  – номинальные напряжения изгиба при номинальных осевых напряжениях, соответствующих максимуму цикла;

$\sigma_{н min}^u$  – номинальные напряжения изгиба при номинальных осевых напряжениях, соответствующих минимуму цикла.

Необходимо отметить, что напряжения от изгиба в растяжении и сжатии при одних и тех же осевых напряжениях различны вследствие изменения эксцентриситета передачи нагрузки из-за смещения нейтральной оси рабочей зоны образца в вертикальном направлении,

что приводит к отличию средних осевых напряжений цикла нагружения от средних суммарных напряжений. Так, симметричный в осевых напряжениях цикл будет иметь отрицательные средние напряжения в суммарных напряжениях. Циклограмма такого нагружения в номинальных осевых и суммарных напряжениях показана на рис. 10.

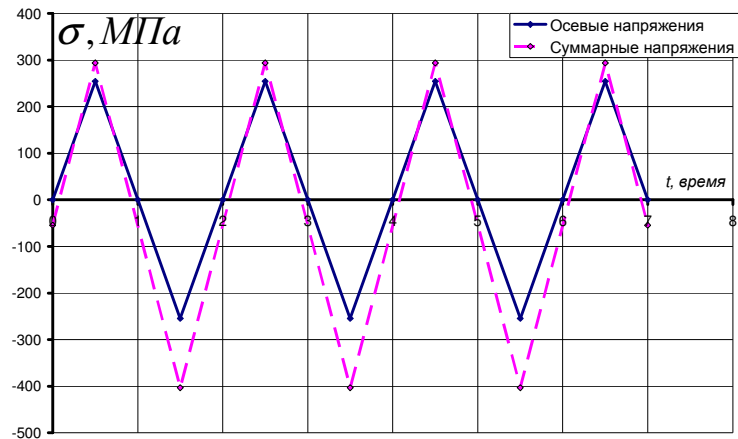


Рисунок 10 – Циклограмма в осевых и суммарных напряжениях

### Выводы

Выполнен расчет НДС гладких образцов и образцов с отверстием, нагруженных комбинацией растяжения-сжатия и изгиба с помощью МКЭ. Показано хорошее согласование величин деформаций в рабочей зоне образца, найденных из расчета МКЭ и полученных в результате эксперимента.

Установлено, что наличие изгибающего момента и геометрической нелинейности приводит к существенному отличию параметров цикла нагружения в номинальных осевых и суммарных напряжениях.

Полученные параметры цикла деформирования в рабочей зоне образцов в номинальных напряжениях необходимы для дальнейших упругопластических расчетов.

### Список использованных источников

1. Dowling N.E., Brose W.R., Wilson W.K. Notched member fatigue life predictions by the local strain approach. In: Fatigue under Complex Loading. Analyses and Experiments. Ed.R.M. Wetzel. SAE Inc. Warrendale, PA. 1977, p.p. 65-81.
2. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкции на прочность / Н.А. Махутов. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
3. Фомичев П.А. Методика экспериментальных исследований циклических деформационных и усталостных характеристик конструкционных материалов / П.А. Фомичев, А.С. Третьяков, А.А. Черных // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та Вып. 2 (53). Х., 2008. – С. 24 – 34.

*Поступила в редакцию 19.05.2009.*

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