

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА Д16АТ, НАГРУЖЕННЫХ РАСТЯЖЕНИЕМ-СЖАТИЕМ И МЕСТНЫМ ИЗГИБОМ, ПРИ РЕГУЛЯРНОМ И ПРОГРАММНОМ НАГРУЖЕНИИ

Настоящая работа посвящена экспериментальному определению усталостной долговечности образцов, нагруженных комбинацией растяжения-сжатия и изгиба, и сравнению их со значениями, полученными расчетными методами.

Потребность в таком исследовании вызвана тем, что множество элементов авиационных конструкций наряду с растяжением-сжатием нагружены и изгибом. К таковым можно отнести монолитные цельнофрезерованные панели, стыки внахлест фюзеляжных обшивок, стыки панелей крыла и т.д. В общем случае изгибные напряжения нелинейно зависят от действующих усилий [1,2], что связано с изменением эксцентриситета передачи нагрузки в зависимости от ее величины.

Эксперименты по определению долговечности проведены на специально спроектированных образцах с выборками в рабочей зоне [3]. Наличие выборки приводит к эксцентриситету при передаче нагрузки и появлению наряду с напряжениями растяжения-сжатия местных напряжений от изгиба. Эксперименты выполнены на трех типоразмерах гладких образцов с выборкой и одном типоразмере образца с выборкой и отверстием (рисунок 1).

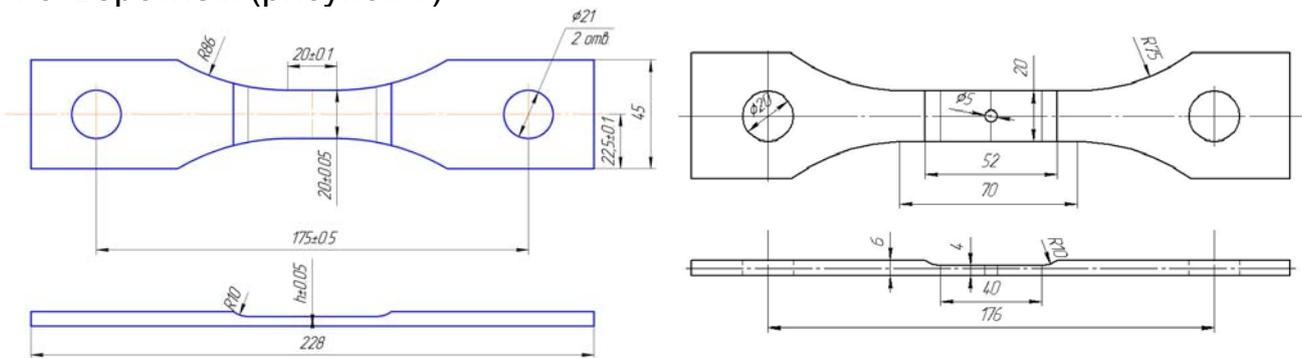


Рисунок 1 – Образцы для испытаний растяжением-сжатием и местным изгибом

Определение усталостной долговечности теоретическими методами. На сегодняшний день существуют два метода расчета долговечности: по номинальным напряжениям и по локальному напряженно-деформированному состоянию (НДС).

Метод расчета долговечности по номинальным напряжениям основан на использовании понятий эффективного коэффициента концентрации напряжений. В общем случае этот коэффициент находят

экспериментально. Метод разработан сотрудниками ЦАГИ и рядом ведущих авиационных конструкторских бюро. Вследствие своей простоты он нашел широкое применение в инженерной практике.

Быстрое развитие численных методов анализа напряженно-деформированного состояния (в первую очередь метода конечных элементов – МКЭ) в настоящее время приводит к тому, что все большее признание и распространение находит метод расчета долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию. Это вызвано, в первую очередь тем, что такой метод позволяет проводить точный анализ напряженного состояния локальных зон элементов конструкции и прогнозировать их долговечность на основе моделей циклического деформирования материала конструкции. При этом отсутствует необходимость использовать эффективные коэффициенты концентрации напряжений конкретного конструктивного элемента, получаемые экспериментально на основе длительных и дорогостоящих испытаний, без которых невозможно определение долговечности в соответствии со стандартным методом расчета по номинальным напряжениям.

Расчет долговечности по локальному НДС на основе энергетического критерия усталостного разрушения. Для расчета долговечности по локальному НДС необходимо знать параметры локальных циклов деформирования материала в концентраторе напряжений, в частности, амплитудные и средние напряжения, амплитудные полные и остаточные деформации.

Положения и закономерности метода расчета по локальному НДС с использованием энергетического подхода к накоплению усталостного повреждения подробно изложены в работах [4–8]. В соответствии с ними для материалов, не имеющих предела выносливости, долговечность при регулярном и программном нагружении определяется следующими зависимостями:

$$N = \frac{1}{R_m \cdot W_r^\alpha}, \quad \lambda = \frac{1}{\sum_{i=1}^K R_{m_i} \cdot W_{r_i}^\alpha \cdot n_i},$$

где W_r – энергия, рассеиваемая за цикл нагружения при действующих напряжениях;

R_m – коэффициент, учитывающий асимметрию цикла нагружения:

$$R_m = R \cdot \left(1 + r \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \right),$$

R , r и α – параметры уравнения, экспериментально устанавливаемые для конкретного материала по результатам испытаний на растяжение-сжатие;

n_i – число циклов нагружения;

i – номер ступени;

K – число ступеней в блоке нагрузок.

Величина рассеянной за цикл нагружения энергии численно равна площади петли гистерезиса в координатах «деформация - упругопластическое напряжение в концентраторе напряжений»:

$$W_r = K_{\phi} \cdot \sigma_a \cdot \varepsilon_{ar}^K,$$

где K_{ϕ} – коэффициент формы петли гистерезиса;

σ_a – амплитуда упругопластических напряжений в вершине концентратора напряжений;

ε_{ar}^K – амплитуда остаточной деформации в вершине концентратора напряжений.

Амплитуда остаточной деформации ε_{ar}^K – это деформация в момент равенства локального упругого напряжения своему среднему значению [9].

Методика определения напряжений, полных и остаточных деформаций локального цикла деформирования материала в концентраторе напряжений для элементов конструкции, нагруженных совместным растяжением-сжатием и изгибом, изложена в работах [9,10].

Циклические деформационные и усталостные характеристики сплава Д16АТ и сформированные на их основе модели деформирования материала приведены в [11-13].

Расчеты параметров локального цикла нагружения как при регулярном, так и программном нагружении, проведены для двух моделей деформирования материала в концентраторе напряжений: с фиксированием верхней точки реверса напряжений (реверс в точке А) и нижней (реверс в точке В) [14].

Для образцов с выборкой и отверстием расчет параметров локального цикла проведен с учетом градиента упругих напряжений [14]

$$\overline{G}_y = \frac{2.3}{r} = \frac{2.3}{2.5} = 0.92.$$

Влияние градиента напряжений учтено при определении коэффициента концентрации напряжений

$$K_T^d = K_T \cdot \left(1 - \overline{G}_y \cdot d\right),$$

где d – длина пороговой макротрещины. Для алюминиевых сплавов $d=0,1$ [14].

Для гладких образцов градиенты не учтены в силу их малой величины.

В работе [12] отмечено, что при проведении усталостных испытаний по программному нагружению образцов на испытательных машинах серии УММ при переходе с одной ступени на другую возникают переходные участки. Эта особенность требует расчета накопленного повреждения не только на ступенях нагружения, но и на участках перехода с одной ступени на другую. Повреждение, накопленное за один блок нагрузок на ступенях, найдено по зависимости

$$D_{б.э.к.} = \sum_{i=1}^K R_{mi} \cdot W_{ri}^{\alpha} \cdot n_i,$$

а повреждение, накопленное при переходах с одной амплитуды нагрузки на другую за один блок, – по зависимости

$$D_{п.э.к.} = \sum_{i=1}^K \int_0^{\Delta n} R_{mi} \cdot W_{ri}^{\alpha} \cdot dn,$$

где i – номер ступени;

K – число ступеней в блоке;

Δn – число циклов, требующееся для перехода с одной ступени на другую.

Интегрирование выполнено численно.

Расчет по номинальным напряжениям. Долговечность гладких образцов вычислена с помощью приведения асимметричных напряжений к эквивалентным напряжениям симметричного цикла по формуле Одингга [16]

$$\sigma_a^{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{aH}^{\Sigma} \cdot (\sigma_{aH}^{\Sigma} + \sigma_{mH}^{\Sigma})}, \quad (1)$$

где σ_{aH}^{Σ} , σ_{mH}^{Σ} – амплитудные и средние значения суммарных номинальных напряжений (от растяжения-сжатия и изгиба).

Необходимо отметить, что напряжения от изгиба возникающие при растяжении и при 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.

Поэтому для случая отрицательных средних напряжений использована специальная зависимость для определения эквивалентных напряжений отнулевого цикла [17] (с. 41)

$$\sigma_{a0}^{\Sigma} = 0.7 \cdot (\sigma_{aH}^{\Sigma} + \alpha_m \cdot \sigma_{mH}^{\Sigma}), \quad (2)$$

где α_m – эмпирический коэффициент, принято $\alpha_m = 0.5$.

Долговечность образцов с отверстием вычислена с использованием зависимости для определения эквивалентных напряжений, предложенной В.Н. Стебневым [18]:

$$\sigma_{a0}^{\text{э}} = (1 + 0.5 \cdot k_u) \cdot \sigma_a^o, \quad (3)$$

где $\sigma_{a0}^{\text{э}}$ – амплитуда эквивалентных напряжений отнулевого цикла нагружения базовой кривой выносливости (в данном случае – полосы со свободным отверстием);

k_u – коэффициент изгиба, $k_u = 1$ для всего диапазона нагрузок.

Также проведен расчет с использованием зависимости, в которой вместо фиксированного отношения напряжений от изгиба к осевым использован коэффициент изгиба, зависящий от величины прикладываемой нагрузки, как это предложено в работе [1]:

$$k_u = \frac{\sigma_a^u}{\sigma_a^o},$$

где σ_a^o , σ_a^u – амплитуды номинальных осевых напряжений растяжения-сжатия и номинальных напряжений от изгиба, приведенные к отнулевому циклу по формуле Одингга

$$\sigma_a^{o(u)} = \sqrt{\frac{\sigma_{aH}^{o(u)}}{2} \cdot (\sigma_{aH}^{o(u)} + \sigma_{mH}^{o(u)})}.$$

После нахождения эквивалентных напряжений определена долговечность по кривой Велера

$$N = \frac{C}{(\sigma_a^{\text{э}})^M},$$

где M , C – параметры кривой Велера.

При расчете гладких образцов с выборками в качестве базовой использована усталостная кривая для гладких образцов, испытанных при симметричном нагружении [11]. При расчете образцов с выборками и отверстиями использована усталостная кривая для стандартного образца с отверстием, нагруженного по отнулевому циклу, со следующими параметрами: $M = 3,92$, $C = 8,08 \cdot 10^{12}$. Величина C приведена для напряжений в сечении «брутто».

В расчете использована долговечность гладких образцов до разрушения и стандартных образцов до возникновения трещины длиной 0,3...0,6 мм.

Расчет долговечности образцов по номинальным напряжениям при программном нагружении выполнен с использованием гипотезы

линейного суммирования повреждений. Повреждение, накопленное за один блок нагружения, вычислено следующим образом:

$$D_{б л.с.} = \sum_{i=1}^K \frac{n_i}{N_i(\sigma_{0i}^3)},$$

где K – общее число реализованных ступеней в одном блоке нагружения;

n_i – число циклов нагружения на ступени;

$N_i(\sigma_{0i}^3)$ – долговечность, определяемая по кривой Велера при регулярном нагружении амплитудой (σ_{0i}^3) , полученной по приведенным выше зависимостям для вычисления эквивалентных напряжений.

Число блоков до разрушения, таким образом, составит

$$\lambda = \frac{1}{D_{б л.с.}}.$$

Повреждение, накопленное при переходах с одной амплитуды нагрузки на другую за один блок, вычислено аналогично таковому при расчете по локальному НДС.

Экспериментальное определение усталостной долговечности.

Испытания проведены на образцах с тремя различными глубинами выборок: 1,17, 2 и 2,54 мм. Разная глубина выборок обеспечивает широкий диапазон изменения напряжений от изгиба в образцах.

Зависимости изгибных напряжений от осевых напряжений растяжения-сжатия для ряда типоразмеров выборок в образцах, использованных в рассматриваемых испытаниях, приведены в работе [3].

Материал образцов – лист толщиной 6 мм из алюминиевого сплава Д16АТ.

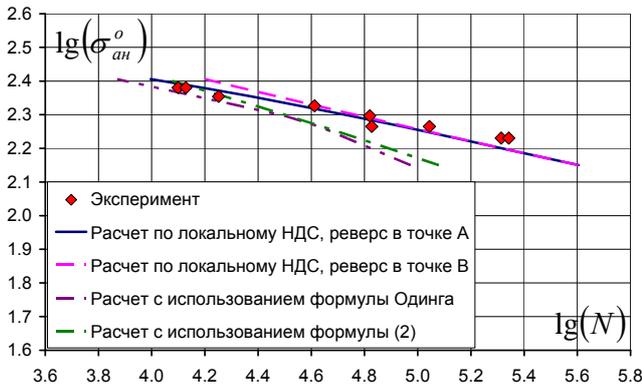
Все испытания проведены при контролируемой амплитуде нагружения. В качестве номинальных осевых напряжений приняты напряжения, полученные для сечения ослабленного выборкой (напряжения «брутто»). Для гладких образцов указана долговечность до разрушения, для образцов с отверстием – до возникновения трещины длиной 0,3...0,6 мм.

Регулярное нагружение. Испытания проведены в диапазоне долговечности $5 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^5$ циклов нагружения. Образцы с выборками глубиной 2 и 1,17 мм испытаны при симметричном цикле нагружения осевыми напряжениями растяжения-сжатия. При этом величина амплитуды номинальных напряжений от изгиба в зависимости от нагрузки, составляет 24...26% и 18...20% амплитуды номинальных осевых напряжений соответственно.

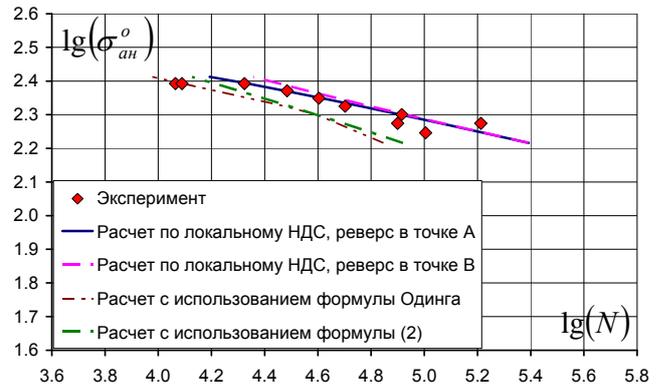
Образцы с выборками глубиной 2 мм испытаны при асимметричном цикле нагружения со средними осевыми напряжениями растяжения, равными 80 МПа. При этом амплитуда номинальных напряжений от изгиба составляет 14...16% амплитуды номинальных осевых напряжений.

Эксперименты по определению долговечности образцов с отверстием выполнены на образцах с выборкой глубиной 2 мм и центральным отверстием диаметром 5 мм. Испытания проведены при асимметричном цикле нагружения со средними осевыми напряжениями растяжения, равными 80 МПа. Диапазон изменения обобщенного коэффициента концентрации напряжений, предложенного в работе [1], составил $K_{Ta}=2,95...3,26$.

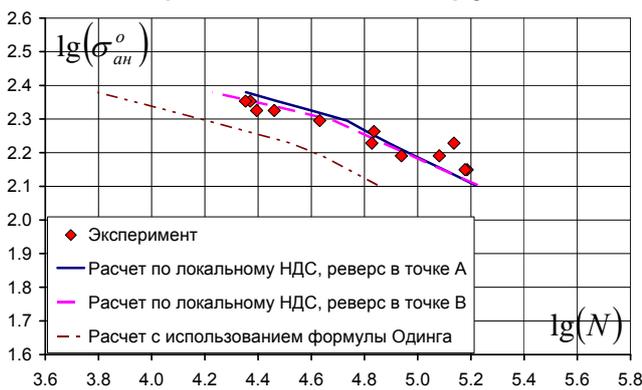
Сопоставление рассчитанных значений долговечности, полученных с помощью расчета по локальному НДС, расчета по номинальным напряжениям и в результате экспериментов, приведено на рисунке 2.



Выборка глубиной 2 мм, симметричный цикл нагружения

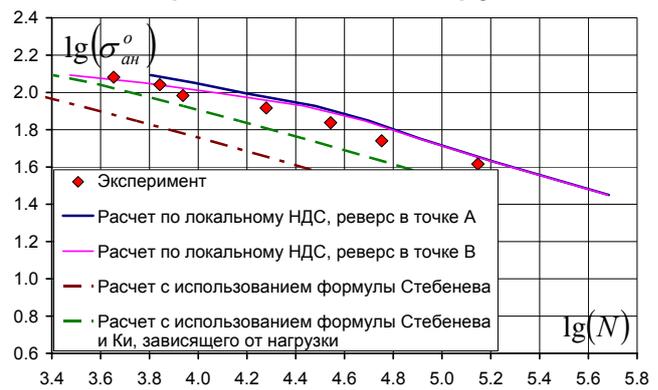


Выборка глубиной 1,17 мм, симметричный цикл нагружения



Выборка глубиной 2 мм, асимметричный цикл нагружения,

$$\sigma_{mH}^o = 80 \text{ МПа}$$



Выборка глубиной 2 мм (образец с отверстием), асимметричный цикл

$$\text{нагружения, } \sigma_{mH}^o = 80 \text{ МПа}$$

Рисунок 2 – Долговечность образцов с выборкой при регулярном нагружении

Установлено, что расчет долговечности по локальному НДС и реверсом в точке А дает, по совокупности, наилучшее согласование с результатами усталостных испытаний как для гладких образцов с выборкой, так и образцов с выборкой и отверстием. Расчетные величины долговечности лежат в полосе разбросов экспериментальных значений. Необходимо отметить, что расчет долговечности по предложенному методу с использованием разных точек реверса для материала Д16АТ дает близкие значения величин долговечности.

Расчет долговечности образцов с выборкой без концентраторов напряжений по номинальным напряжениям с использованием формулы Одингга (1) приводит к ошибке от 1,2 до 3,7 раз, по зависимости (2) – от 1,1 до 3,3 раз в запас долговечности.

Расчет долговечности образцов с выборкой и отверстием по номинальным напряжениям с использованием формулы Стебенева (3) приводит к ошибке от 4,2 до 5,5 раз, с ней же, но коэффициентом изгиба, зависящим от нагрузки, – от 1,6 до 2,1 раз в запас долговечности.

Программное нагружение. Эксперименты выполнены на двух типоразмерах гладких образцов с выборкой и одном типоразмере образца с выборкой и отверстием.

Эксперименты проведены в диапазоне долговечности от 3 до 70 блоков нагружения до разрушения. Распределение амплитуд осевых напряжений – экспоненциальное. Параметры распределения аналогичны таковым в работе [12]. Число ступеней в блоке равно 10. Один блок содержит 6000 циклов.

Гладкие образцы с выборками глубиной 2 мм испытаны при симметричном цикле нагружения осевыми напряжениями растяжения-сжатия. При этом амплитуда номинальных напряжений от изгиба составляет 28...37% номинальных осевых напряжений.

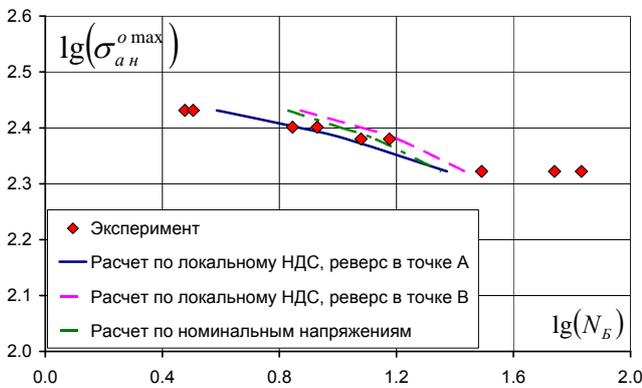
Гладкие образцы с выборками глубиной 2,54 мм испытаны при асимметричном цикле нагружения с положительными средними осевыми напряжениями растяжения, равными 80 МПа. При этом величина амплитуды номинальных напряжений от изгиба составляет 19...27% номинальных осевых напряжений.

Эксперименты по определению долговечности образцов с отверстием выполнены на образцах с выборкой глубиной 2 мм и центральным отверстием диаметром 5 мм. Образцы испытаны при асимметричном цикле нагружения с положительными средними осевыми напряжениями растяжения, равными 80 МПа. Диапазон изменения обобщенного коэффициента концентрации напряжений составил $K_{Tа}=3,38...3,83$.

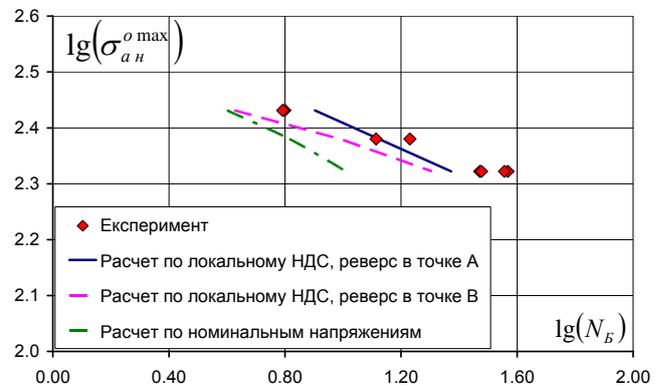
Сопоставление рассчитанных значений долговечности, полученных с помощью расчета по локальному НДС, расчета по номинальным напряжениям и в результате экспериментов, показано на

рисунке 3. Приведены зависимости числа блоков до разрушения (возникновения трещины) от амплитуды максимальных осевых напряжений в блоке.

На примере регулярного нагружения показано, что расчет долговечности гладких образцов с выборкой по номинальным напряжениям при использовании формулы Одингга (1) и специальной зависимости (2) дает близкие значения величин долговечности. Поэтому на рисунке показаны только результаты расчета по общепринятой формуле Одингга. Также определено, что использование зависимости В.Н. Стебенева (3) дает очень сильное занижение долговечности. Поэтому на рисунках приведены результаты расчетов долговечности только с использованием уравнения (2) и зависимости (3) с коэффициентом изгиба, зависящим от нагрузки.

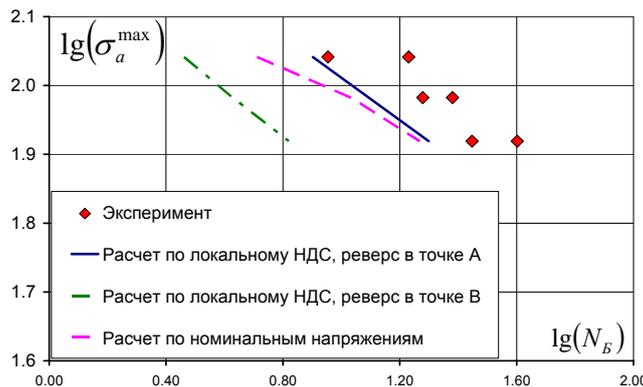


Выборка глубиной 2 мм,
симметричный цикл нагружения



Выборка глубиной 2,54 мм,
асимметричный цикл нагружения,

$$\sigma_{тн}^o = 80 \text{ МПа}$$



Выборка глубиной 2 мм (образец с отверстием), асимметричный цикл
нагружения, $\sigma_{тн}^o = 80 \text{ МПа}$

Рисунок 3 – Долговечность образцов с выборкой
при программном нагружении

Установлено, что и при программном нагружении наилучшее согласование с опытными данными обеспечивает метод расчета по локальному НДС с использованием модели реверса напряжений в точке А.

В этом случае результаты расчета долговечностей гладких образцов лежат в полосе разброса результатов экспериментов. Для образцов с отверстием среднее отличие расчета от эксперимента не превышает 1,7 раза в запас долговечности.

Использование модели с реверсом напряжений в точке В обеспечивает несколько худшее согласование с экспериментальными данными по сравнению с моделью реверса напряжений в точке А, в частности, может приводить к ошибке до 2,4 раз не в запас долговечности.

Определение долговечности по номинальным напряжениям и гипотезе линейного суммирования приводит к наихудшему согласованию с экспериментальными данными, а именно, может приводить к отклонению как не в запас долговечности до 2,2 раз, так и в запас долговечности до 4,9 раз.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что применение для расчета долговечности элементов конструкций, нагруженных растяжением-сжатием и местным изгибом, метода расчета долговечности по локальному НДС и энергетическому критерию разрушения позволяет добиться значительно лучшего согласования с экспериментальными данными, чем расчет по номинальным напряжениям.

Использование для материала Д16Т в методе расчета по локальному НДС двух различных моделей фиксирования точек реверса напряжений приводит к получению близких значений расчетной долговечности. При этом модель с фиксацией реверса в точке А по совокупности дает несколько лучшее согласование с опытными данными.

Список использованных источников

1. Халилаева, Р.Ю. Исследование напряжений от изгиба в двух- и трехрядных соединениях внахлест и их влияние на долговечность / Р.Ю. Халилаева [Текст] // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2 (58). – Х., 2009. – С. 32 – 38.

2. Третьяков, А.С. Анализ местных напряжений от изгиба, возникающих в монолитных панелях крыльев пассажирских и транспортных самолетов [Текст] / А.С. Третьяков, Р.Ю. Решетникова //

Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2 (70). – Х., 2012. – С. 96 – 106.

3. Третьяков, А.С. Анализ напряженно-деформированного состояния плоских образцов нагруженных комбинацией растяжения-сжатия и изгиба [Текст] / А.С. Третьяков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2 (58). Х., 2009. – С. 59 – 65.

4. Трощенко, В.Т. Энергетический критерий усталостного разрушения [Текст] / В.Т. Трощенко, П.А. Фомичев // Пробл. прочности. – 1993. – №1. – С. 3 – 10.

5. 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.

6. Фомичев, П.А. Энергетический метод расчета долговечности при нерегулярном нагружении. Сообщение 2. Долговечность при программном нагружении [Текст] / П.А. Фомичев // Пробл. прочности. – 1995. – №8. – С. 3 – 11.

7. Фомичев, П.А. Метод расчета долговечности при случайном нагружении, основанный на энергетическом критерии усталостного разрушения [Текст] / П.А. Фомичев // Пробл. прочности. – 2008. - №2. – С. 82 – 97.

8. Фомичев, П.А. Параметр, характеризующий долговечность тел с концентраторами напряжений [Текст] / П.А. Фомичев // Повреждение материалов во время эксплуатации, методы его диагностирования и прогнозирования: тр. Междунар. науч.-техн. конф., Тернополь, 21 – 24 сент. 2009 г. – С. 82 – 89.

9. Третьяков, А.С. Амплитуда остаточной деформации при циклическом нагружении в условиях неоднородного поля напряжений. Сообщение 1. Усталостные испытания образцов из сплава Д16АТ растяжением-сжатием и местным изгибом [Текст] / А.С. Третьяков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (71). – Х., 2012. – С. 97 – 109.

10. Фомичев, П.А. Методика определения локальных упругопластических напряжений и деформаций в условиях совместного циклического растяжения-сжатия и изгиба [Текст] / П.А. Фомичев, А.С. Третьяков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (59). – Х., 2009. – С. 33 – 43.

11. Третьяков, А.С. Циклические деформационные и усталостные характеристики сплава Д16АТ при асимметричном мягком регулярном

нагрузении [Текст] / А.С. Третьяков, А.А. Черных // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. Аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (59). Х., 2009. – С. 45 – 53.

12. Черных, А.А. Циклические деформационные и усталостные характеристики сплава Д16АТ при программном нагружении. Сообщение 1. Накопленное повреждение при симметричном нагружении по трем законам распределения амплитуды напряжений [Текст] / А.А. Черных, А.С. Третьяков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та Вып. 4 (60). Х., 2009. – С. 64 – 76.

13. Третьяков, А.С. Циклические деформационные и усталостные характеристики сплава Д16АТ при программном нагружении. Сообщение 2. Амплитуда остаточной деформации [Текст] / А.С. Третьяков, А.А. Черных // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Вып. 1 (69). Х., 2012. – С. 47 – 60.

14. Фомичев, П.А. Методы прогнозирования долговечности элементов конструкций при нерегулярном нагружении, основанные на энергетическом критерии разрушения: дис. ... д-ра техн. наук: 01.02.04; защищена 1992 / Фомичев Петр Александрович. – Х., 1992. – 456 с.

15. Когаев, В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность [Текст] / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 223 с.

16. Машиностроение. Энциклопедия. Т.4-21. Самолеты и вертолеты. Кн. 1. Аэродинамика, динамика полета и прочность [Текст] под ред. В.Г. Дмитриева. М.: Машиностроение, 2002. – 799 с.

17. Соппротивление усталости элементов конструкций [Текст] / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебенев и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.

18. Стебенев, В.Н. Методика оценки сопротивления усталости соединений [Текст] / В.Н. Стебенев // Тр. ЦАГИ. – Вып. 2117. – М.: Изд. отдел ЦАГИ, 1981–С. 42–54.

Поступила в редакцию 10.12.2012.

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