

АМПЛИТУДА ОСТАТОЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ **СООБЩЕНИЕ 1. УСТАЛОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА Д16АТ РАСТЯЖЕНИЕМ-СЖАТИЕМ И МЕСТНЫМ ИЗГИБОМ**

В настоящее время существуют методы расчета долговечности элементов конструкций по локальному напряженно-деформированному состоянию (НДС) [1,2]. Критерием усталостной прочности, позволяющим прогнозировать долговечность, в этих методах является амплитуда остаточной деформации или рассеянная за цикл нагружения энергия [2,3,4]. Реализация такого подхода нашла свое отражение в работах [3,5,6,7] и др.

На сегодняшний день накоплен большой объем экспериментальных исследований, описывающих закономерности изменения амплитуды остаточной деформации при циклическом нагружении гладких образцов из различных материалов при регулярном и программном нагружении [8–14].

Для дальнейшего совершенствования методов расчета долговечности по локальному НДС необходимы исследования, направленные на выявление закономерностей изменения амплитуды остаточной деформации в условиях неоднородного поля напряжений как при регулярном, так и нерегулярном нагружении. Однако автору известна только одна работа в этой области [15].

Настоящая работа посвящена анализу полученных экспериментально амплитуд остаточной деформации, реализующихся при циклическом деформировании гладких образцов, нагруженных комбинацией растяжения-сжатия и изгиба, и сравнению полученных значений с расчетными.

Потребность в таком исследовании вызвана тем, что во множестве элементов авиационных конструкций, вследствие их малой жесткости, наряду с напряжениями от растяжения-сжатия возникают местные напряжения от изгиба. К таковым можно отнести зоны монолитных цельнофрезерованных панелей в местах переходов толщин, стыки внахлест фюзеляжных обшивок, стыки панелей крыла и т.д. В общем случае изгибные напряжения нелинейно зависят от действующих усилий [16,17], что связано с изменением эксцентриситета передачи нагрузки в зависимости от ее величины.

Для расчета долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию необходимо знать параметры локальных циклов деформирования материала в концентраторе напряжений, в частности амплитудные и средние напряжения, амплитудные полные и остаточные деформации.

Методика определения напряжений и полных деформаций локального цикла деформирования материала в концентраторе напряжений для элементов конструкции, нагруженных совместным растяжением-сжатием и изгибом, изложена в работе [16]. Ниже предложена методика расчета амплитуды остаточной деформации для такого вида нагружения.

Методика расчета амплитуды остаточной деформации в концентраторе напряжений при циклическом растяжении-сжатии и изгибе

В работе [18] амплитуда остаточной деформации в концентраторе напряжений определяется как деформация в момент равенства текущего номинального напряжения его среднему значению. В координатах разгрузки этот момент соответствует равенству локальных упругих напряжений произведению теоретического коэффициента концентрации и амплитуды номинальных напряжений: $S = K_T \cdot \sigma_{ан}$. Такое определение введено для элементов конструкций, имеющих линейную зависимость упругого локального напряженного состояния в концентраторе напряжений от прикладываемой нагрузки.

Однако в случае, когда величина коэффициента концентрации зависит от нагрузки, равенство номинального напряжения своему среднему значению соответствует другим упругим локальным напряжениям. Так, для соединений этот момент времени соответствует следующим локальным упругим напряжениям [19]:

$$S = \frac{K_T^p + K_T^c}{2} \cdot \sigma_{ан},$$

где K_T^p , K_T^c – теоретические коэффициенты концентрации напряжений на контуре нагруженного отверстия детали при растяжении и сжатии.

В связи с этим в работе [19], посвященной расчету долговечности соединений элементов конструкций, нагруженных усилиями растяжения-сжатия, введено уточнение первоначального определения амплитуды остаточной деформации. Согласно [19] амплитуда остаточной деформации – это деформация в момент равенства локального упругого напряжения своему среднему значению.

В [16] отмечено, что величина коэффициента концентрации напряжений в случае совместных растяжения-сжатия и изгиба также оказывается зависимой от действующей нагрузки. Поэтому в данной работе используется определение амплитуды остаточной деформации, данное в [19].

Амплитуда остаточной деформации в концентраторе может быть определена после нахождения амплитуд локального напряжения и полной деформации согласно методике, предложенной в [16], в результате решения уравнения

$$\sigma_a \cdot \varepsilon_{at} = K_{Ta}^2 \cdot \frac{(\sigma_{aH})^2}{E} \cdot F_M, \quad (1)$$

где $\sigma_{aH} = \sigma_{aH}^{\Sigma}$ – амплитуда суммарных номинальных напряжений от растяжения-сжатия и изгиба [16];

ε_{at} – амплитуда полной упругопластической деформации;

K_{Ta} – обобщенный коэффициент концентрации напряжений [16]:

$$K_{Ta} = \frac{\sigma_{max}^y - \sigma_{min}^y}{\sigma_{max H}^{\Sigma} - \sigma_{min H}^{\Sigma}},$$

где σ_{max}^y , σ_{min}^y – максимальное и минимальное напряжения на контуре концентратора напряжений при упругом деформировании с максимальным и минимальным номинальными напряжениями цикла нагрузок;

$\sigma_{max H}^{\Sigma}$, $\sigma_{min H}^{\Sigma}$ – максимальное и минимальное суммарные номинальные напряжения [16];

F_M – поправочная функция.

Амплитуда полной упругопластической деформации определена по уравнению циклического деформирования

$$\varepsilon_{at} = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{ae} = \frac{\sigma_a}{E}$ – амплитуда упругой деформации;

$\varepsilon_{ap} = (1+t) \cdot \varepsilon_{ar}$ – амплитуда пластической деформации;

ε_{ar} – амплитуда остаточной деформации в однородном поле напряжений;

$t = \frac{1}{2^{\gamma-1} - 1}$; $\gamma = 2 + h \cdot \frac{\varepsilon_{ar}}{\varepsilon_{at}}$; h – параметры контура петли гистерезиса.

Методика определения величин ε_{ap} и γ для случая действия растяжения-сжатия с изгибом приведена ранее, в работе [16].

При нерегулярном блочном нагружении амплитуда остаточной деформации ε_{ar} в однородном поле напряжений на максимальных ступе-

нях нагружения определяется аналогично расчету при регулярном нагружении. При этом необходимо учитывать повреждение, накопленное на остальных ступенях. Для последующих в блоке ступеней нагружения в уравнении (2) использована зависимость для определения амплитуды остаточной деформации при нерегулярном нагружении, предложенная в работе [9]:

$$\varepsilon_{ar}^i = \varepsilon_{ar}^{max} \cdot \left(\frac{\sigma_a^i}{\sigma_a^{max}} \right)^{\frac{1}{c}},$$

где ε_{ar}^{max} , ε_{ar}^i – величины остаточных деформаций в однородном поле напряжений на максимальной и последующих ступенях нагружения в блоке;

σ_a^{max} , σ_a^i – величины упругопластических напряжений на максимальной и последующих ступенях нагружения в блоке;

i – номер ступени;

c – параметр материала.

Как будет показано ниже, кинетика амплитуды остаточной деформации (циклическое упрочнение с наработкой) существенно ослаблена в неоднородном поле напряжений по сравнению с однородным. Это позволяет использовать приближенные модели определения амплитуды остаточной деформации ε_{ar} при регулярном и нерегулярном блочном нагружениях, основанные на средних значениях остаточной деформации.

Такие модели, сформированные для одного из основных конструкционных авиационных алюминиевых сплавов – Д16АТ, предложены в работах [12–14]. Там же приведены циклические деформационные характеристики Д16АТ, необходимые для расчета параметров локальных циклов деформирования в неоднородном поле напряжений.

Схема деформирования материала в концентраторе напряжений предложена в работе [15] и показана на рис. 1.

Кривая 1 соответствует диаграмме деформирования материала в координатах «деформация – напряжение в концентраторе», кривая 2 – «деформация – произведение обобщенного коэффициента концентрации напряжений на номинальное напряжение». Начало отсчета системы координат « σ – ε » расположено в центре петель.

При разгрузке из вершины петли локальное упругое напряжение изменяется от $K_{Ta} \cdot \sigma_{ан}$ до нуля в координатах « σ – ε ». При этом в координатах разгрузки « S – e » деформация возрастает от нуля до e_r , а локальное упругопластическое напряжение – до S_r .

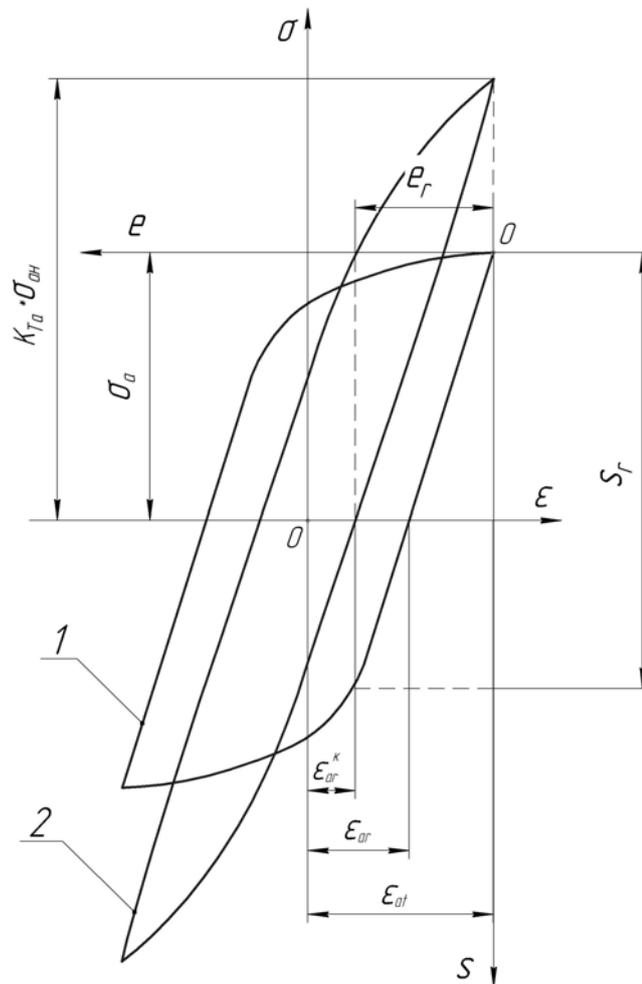


Рисунок 1 – Деформирование материала в концентраторе напряжений

Деформация e_r и напряжение S_r могут быть найдены в результате решения уравнения

$$S_r \cdot e_r = K_{Ta}^2 \cdot S_H \cdot e_H \cdot F_M.$$

Номинальные напряжения и деформации в правой части составят:

$$S_H = \sigma_{ан}, \quad e_H = \varepsilon_{ан}.$$

Тогда зависимость для определения S_r будет иметь вид

$$S_r \cdot \left(\frac{S_r}{E} + 2 \cdot \varepsilon_{ар} \cdot \left(\frac{S_r}{2 \cdot \sigma_a} \right)^\gamma \right) = K_{Ta}^2 \cdot \sigma_{ан} \cdot \varepsilon_{ан} \cdot F_M.$$

Уравнение решается численно, например с помощью метода Ньютона.

Величина остаточной деформации в неоднородном поле напряжений (концентраторе напряжений) после разгрузки составит

$$\varepsilon_{ar}^K = \varepsilon_{at} - e_r$$

Приближенно величину остаточной деформации в концентраторе можно также определить в соответствии с теоремой Ильюшина об упругой разгрузке [20]:

$$\varepsilon_{ar}^K = \varepsilon_{at} - K_{Ta} \cdot \frac{\sigma_{ан}}{E} \quad (3)$$

В этом случае величина амплитуды полной деформации должна быть выражена в следующем виде:

$$\varepsilon_{at} = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ar}.$$

Экспериментальное исследование амплитуды остаточной деформации при циклическом растяжении-сжатии и изгибе образцов из сплава Д16АТ

Экспериментальное определение величин амплитуды остаточной деформации проведено на специально спроектированных гладких образцах с выборками в рабочей зоне (рис. 2). Наличие выборки приводит к эксцентриситету при передаче нагрузки и появлению наряду с напряжениями растяжения-сжатия напряжений от изгиба, то есть к возникновению неоднородного поля напряжений в рабочей зоне образца.

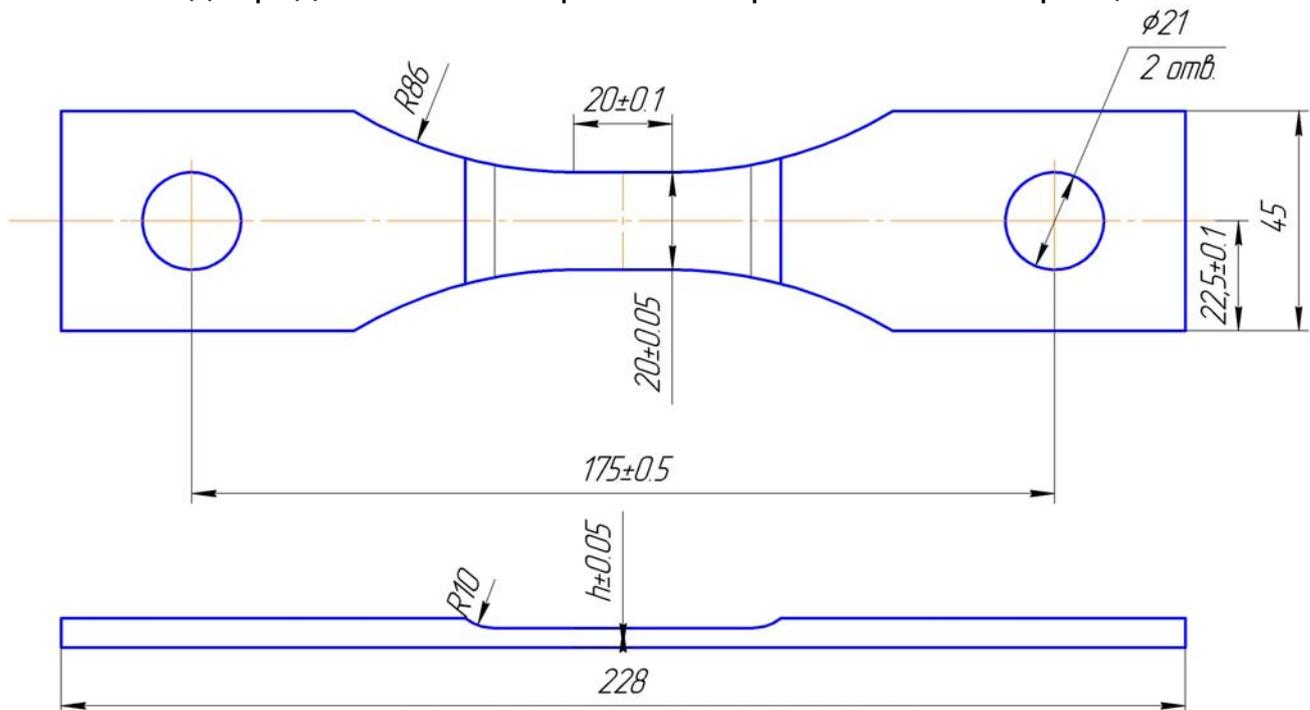


Рисунок 2 – Образец с выборкой

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, используемые в качестве исходных данных для упругопластических расчетов, приведены в работе [21].

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

Все испытания проведены при мягком нагружении с контролируемой амплитудой напряжений.

В качестве номинальных напряжений приняты осевые напряжения, то есть напряжения от усилия растяжения-сжатия, в сечении, ослабленном выборкой.

Величины амплитуд остаточной деформации измерены с помощью арочного тензометра, установленного посередине рабочей зоны образца со стороны выборки. Тарировочный коэффициент тензометра определен заранее путем серии замеров величины полной деформации на гладком образце без выборки.

В результате испытаний получены зависимости амплитуды остаточной деформации ε_{ar}^K в рабочей части образца от числа циклов нагружения. Примеры полученных зависимостей при регулярном и программном нагружениях показаны на рис. 3.

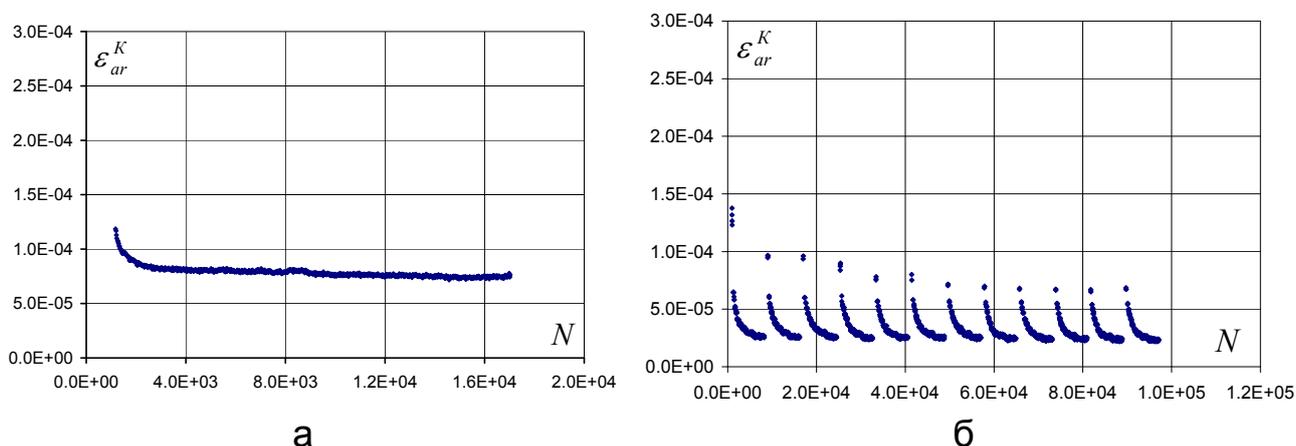


Рисунок 3 – Примеры зависимостей амплитуды остаточной деформации от наработки в гладких образцах с выборкой:
а – регулярное нагружение, б – программное нагружение

Установлено, что изменение амплитуды остаточной деформации с наработкой в неоднородном поле напряжений существенно меньше, чем в однородном, и не превышает 1,7–2,5 раз. В то время как в однородном поле напряжений такое уменьшение составляет от 3 до 5 раз.

Для каждого испытанного образца определена величина среднего значения остаточной деформации

$$\varepsilon_{ar}^{K*} = \frac{1}{N} \cdot \int_0^N \varepsilon_{ar}(n) dn,$$

где $\varepsilon_{ar}(n)$ – текущее значение остаточной деформации;
 n – текущее число циклов нагружения.

Регулярное нагружение

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, составляла 24...26% и 18...20% амплитуды номинальных осевых напряжений соответственно.

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

Значения средней амплитуды остаточной деформации ε_{ar}^{K*} , полученные в результате экспериментальных измерений при регулярном нагружении, и вычисленные по формуле (3) приведены на рис. 4.

Расчеты амплитуды остаточной деформации 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) [18].

Необходимо отметить незначительное, в данном случае, отличие величин остаточных деформаций, рассчитанных с использованием разных точек реверса напряжений для материала Д16АТ, что объясняется его сравнительно малой пластичностью в исследуемых диапазонах нагрузок.

Программное нагружение

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

Образцы с выборками глубиной 2,54 мм испытаны при асимметричном цикле нагружения с положительными средними осевыми напряжениями растяжения, равными 80 МПа.

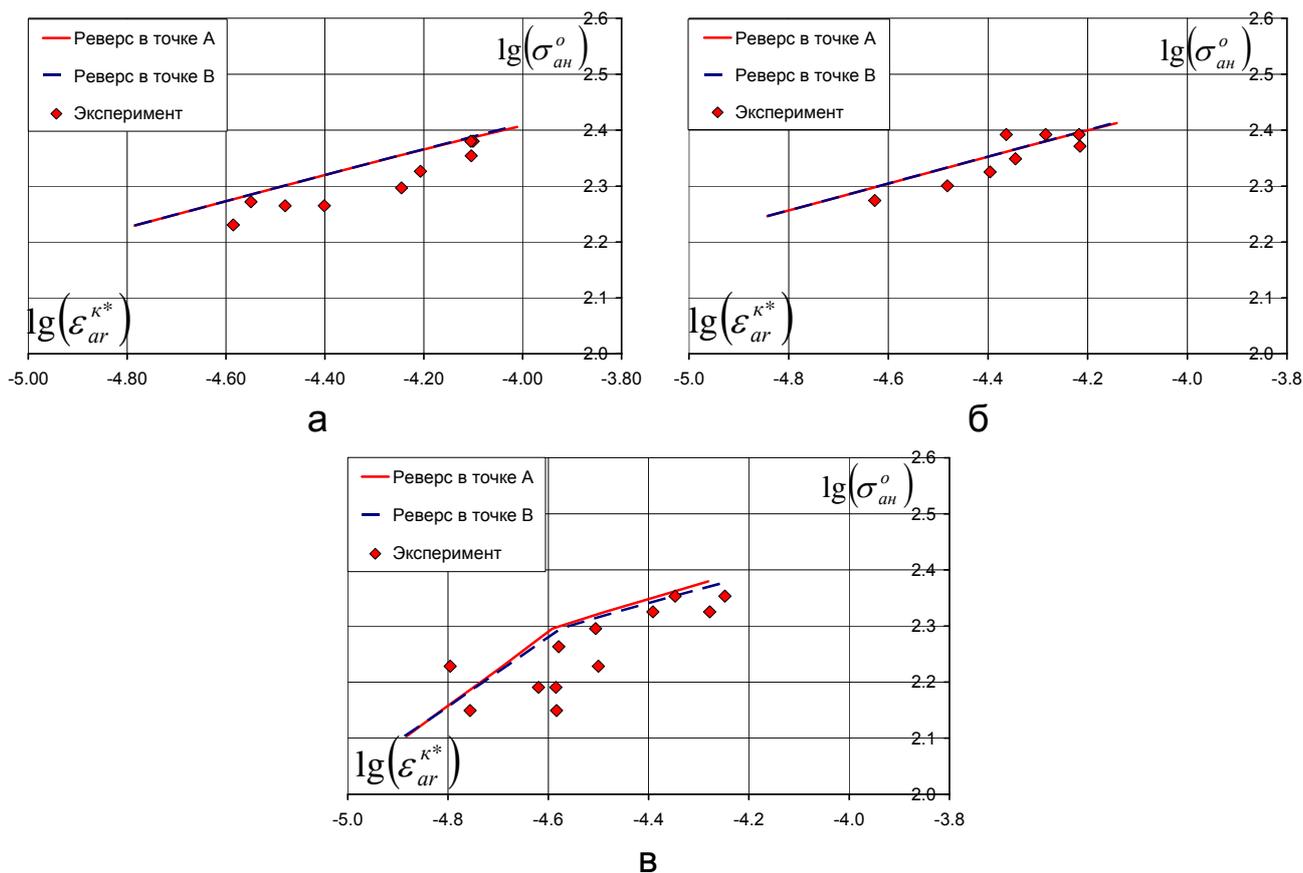


Рисунок 4 – Амплитуда остаточной деформации в образцах с выборками при регулярном нагружении:

а – выборка глубиной 2 мм, симметричный цикл нагружения,
 б – выборка глубиной 1,17 мм, симметричный цикл нагружения,

в – выборка глубиной 2 мм, асимметричном цикл нагружения, $\sigma_{mH}^o = 80$ МПа

При этом величина амплитуды номинальных напряжений от изгиба составляла 19...27% номинальных осевых напряжений.

Распределение амплитуд осевых напряжений – экспоненциальное. Параметры распределения аналогичны приведенным в работе [13]. Число ступеней в блоке равно 10. Один блок содержит 6000 циклов.

Экспериментальные значения ε_{ar}^{K*} при программном нагружении получены путем усреднения амплитуды остаточной деформации на каждой ступени по всем блокам до разрушения образца. Полученные экспериментальные и расчетные значения показаны на рис. 5. Точками одного вида обозначены средние значения остаточных деформаций на каждой ступени для одного испытанного образца.

Выборка глубиной 2 мм,
симметричный цикл нагружения

Выборка глубиной 2,54 мм,
асимметричный цикл нагружения,
 $\sigma_{mH}^o = 80$ МПа

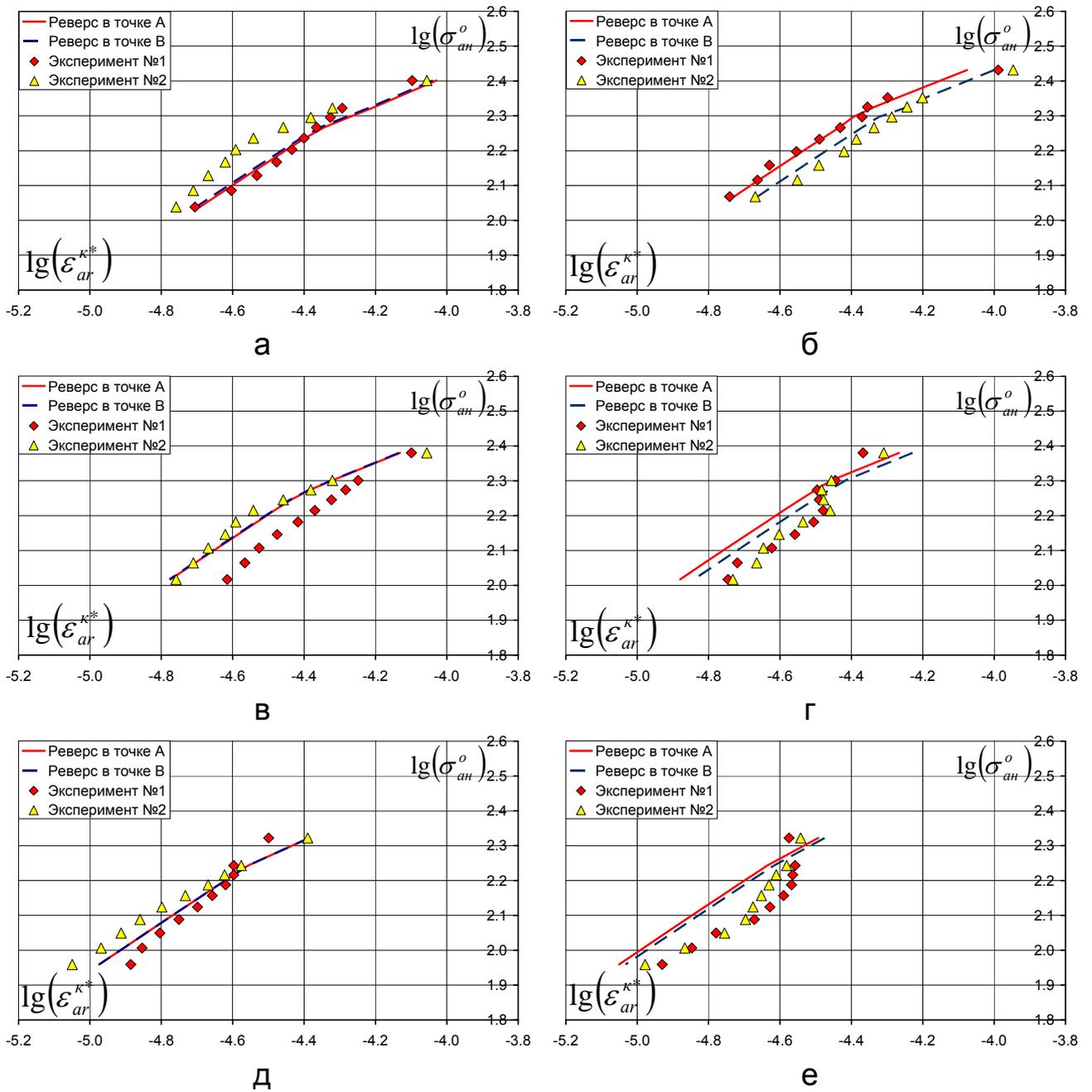


Рисунок 5 – Амплитуда остаточной деформации в образцах с выборкой при программном нагружении:

а, б – $\sigma_{ан max}^o = 270$ МПа,

в, г – $\sigma_{ан max}^o = 240$ МПа,

д, е – $\sigma_{ан max}^o = 210$ МПа

Установлено, что среднее отличие расчетных и экспериментальных значений амплитуды остаточной деформации, по совокупности, при регулярном нагружении составляет 1,3 раза, а при программном – 1,25 раза. Можно отметить хорошее согласование расчетных и экспериментальных значений амплитуды остаточной деформации на больших уровнях действующих нагрузок и удовлетворительное – на средних и малых уровнях нагрузок. В ряде экспериментов на малых уровнях нагрузки наблюдается смещение измеренных величин амплитуды остаточной деформации в большую сторону относительно расчетных значений (в среднем на 20...30%). Такое отличие объяснимо электрическим и механическим шумами, которые зачастую приводят к завышению измеряемых величин остаточных деформаций.

Выводы

Разработана методика расчета амплитуды остаточной деформаций в элементах конструкции с концентраторами напряжений при циклическом упругопластическом растяжении-сжатии и изгибе.

Выполнено экспериментальное определение величин амплитуды остаточной деформации при регулярном и программном нагружениях в неоднородном поле напряжений – на гладких образцах с выборкой.

Обнаружено, что изменение амплитуды остаточной деформации с наработкой в неоднородном поле напряжений существенно меньше, чем в однородном.

Установлено хорошее согласование экспериментальных значений амплитуд остаточных деформаций и величин, полученных расчетным путем, с использованием приближенной модели циклического деформирования материала без учета изменения остаточной деформации с наработкой.

Предложенная методика необходима для расчета долговечности элементов конструкции по локальному напряженно-деформированному состоянию согласно энергетическому критерию долговечности.

Список использованных источников

1. Dowling, N.E. Notched member fatigue life predictions by the local strain approach [Text] / N.E. Dowling, W.R. Brose, W.K. Wilson // Fatigue under Complex Loading, Analyses and Experiments. – Ed. R.M. Wetzel. SAE Inc. Warrendale, PA. 1977. – P. 55 – 84.

2. Фомичев, П.А. Энергетический метод расчета долговечности при случайном нагружении [Текст] / П.А. Фомичев // Труды XIII Международного коллоквиума «Механическая усталость металлов». – Тернополь: Тернополь. гос. техн. ун-т им. И. Пулюя, 2006. – С. 119 – 127.

3. Трощенко, В.Т. Энергетический критерий усталостного разрушения [Текст] / В.Т. Трощенко, П.А. Фомичев // Проблемы прочности. – Вып.1. – 1993. – С. 3 – 10.

4. 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 . – С. 82 – 89.

5. Фомичев, П.А. Энергетический метод расчета долговечности при нерегулярном нагружении. Сообщение 1. Учет последовательности действия нагрузок [Текст] / П.А. Фомичев // Проблемы прочности. – Вып. 7. – 1995. – С. 3 – 12.

6. Фомичев, П.А. Энергетический метод расчета долговечности при нерегулярном нагружении. Сообщение 2. Долговечность при программном нагружении [Текст] / П.А. Фомичев // Проблемы прочности. – Вып. 8. – 1995. – С. 3 – 11.

7. Фомичев, П.А. Метод расчета долговечности при случайном нагружении, основанный на энергетическом критерии усталостного разрушения [Текст] / П.А. Фомичев // Проблемы прочности. – Вып. 2. – 2008. – С. 82 – 97.

8. Трощенко, В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении в условиях неоднородного напряженного состояния. Сообщение 1 [Текст] / В.Т. Трощенко, Н.И. Жабко // Проблемы прочности. – Вып. 9. – 1981. – С. 3 – 11.

9. Фомичев, П.А. Изменение амплитуды пластической деформации при регулярном и программном мягком нагружении сталей [Текст] / П.А. Фомичев, И.Ю. Трубочанин // Проблемы прочности. – Вып. 2. – 1991. – С. 39 – 44.

10. Фомичев, П.А. Исследование деформирования стали 30ХГСА при циклическом нагружении [Текст] / П.А. Фомичев, И.Ю. Трубочанин, Ю.А. Свирский // Проблемы прочности. – Вып. 5 – 1991. – С. 47 – 50.

11. Гребенюк, Я.В. Исследование деформирования конструкционных сталей при циклическом нагружении [Текст] / Я.В. Гребенюк // Авиационно-космическая техника и технология: Тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2001. – С. 343 – 346.

12. Третьяков, А.С. Циклические деформационные и усталостные характеристики сплава Д16АТ при асимметричном мягком регулярном нагружении [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. 44 – 52.

13. 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 им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4 (60). – Х., 2009. – С. 64 – 76.

14. Третьяков, А.С. Циклические деформационные и усталостные характеристики сплава Д16АТ при программном нагружении. Сообщение 1. 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.

15. Звягинцев, В.В. Экспериментальное исследование долговечности и циклической остаточной деформации в зоне концентрации напряжений [Текст] / В.В. Звягинцев, П.А. Фомичев // Прочность конструкций летательных аппаратов – Вып. 9. – Х., 1990. – С. 49 – 58.

16. 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.

17. Халилаева, Р.Ю. Исследование напряжений от изгиба в двух- и трехрядных соединениях внахлест и их влияние на долговечность [Текст] / Р.Ю. Халилаева // 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.

18. 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.

19. Гонтаренко, А.П. Методика расчета долговечности болтовых и заклепочных соединений по локальному напряженно-деформированному состоянию: дис... канд. техн. наук: 05.07.02; защищена 2000 / Гонтаренко Андрей Петрович – Х., 2000. – 130 с.

20. Безухов, Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести [Текст] / Н.И. Безухов. – М.: Высш. шк., 1968. – 512 с.

21. 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.

Поступила в редакцию 19.09.2012.

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