

УДК 629.735.33

А.С. Третьяков, канд. техн. наук,
А.А. Черных, канд. техн. наук

**ЦИКЛИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И УСТАЛОСТНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВА Д16АТ
ПРИ ПРОГРАММНОМ НАГРУЖЕНИИ.
СООБЩЕНИЕ 2. АМПЛИТУДА ОСТАТОЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Характерной особенностью спектров нагружения авиационных конструкций является наличие огибающего цикла нагружения, который существенно (более чем в 2 раза) превосходит остальные циклы по амплитуде и встречается один раз за типовой полет. В качестве законов распределения повторяемости нагрузок для тяжелых пассажирских и транспортных самолетов применяются экспоненциальный закон [1, 2] и закон Рэлея [3]. Однако гипотеза линейного суммирования повреждений, широко используемая в авиационной отрасли в настоящее время, дает существенную систематическую ошибку не в запас долговечности именно для таких спектров нагрузок [4, 5]. Поэтому чрезвычайно актуальным является применение энергетической гипотезы суммирования усталостных повреждений. Использование такого физически ясного критерия разрушения реализовано в рамках метода расчета долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию. Для расчета долговечности по этому методу необходимо знать параметры локального цикла деформирования материала в концентраторе напряжений. Их определение проводится на основе деформационных и усталостных характеристик материала, полученных в однородном поле напряжений при испытаниях гладких образцов при регулярном и нерегулярном программном нагружении.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований усталостной долговечности алюминиевого сплава Д16АТ при мягком программном асимметричном нагружении. Под мягким нагружением подразумевают нагружение с контролируемой амплитудой напряжений. Эти испытания, а также испытания при симметричном программном нагружении, изложенные в работе [6], выполнены с целью получения циклических деформационных и усталостных характеристик данного материала при нерегулярном программном нагружении. Проведено сопоставление накопленного повреждения, рассчитанного по гипотезе линейного суммирования и согласно энергетическому критерию усталостного разрушения. Предложено объяснение систематическому расчету не в запас долговечности по гипотезе линейного суммирования на высоких уровнях нагрузок. Сформирована модель расчета амплитуд остаточных деформаций при программном нагружении без учета циклического упрочнения с наработкой (кинетики остаточной деформации).

Экспериментальное оборудование. Исследования выполнены с использованием испытательного комплекса на базе машины УММ [7]. Все усталостные испытания проведены при частоте нагружения 12,5 Гц в условиях нормальной температуры (20°C).

Измерение деформации проведено в однородном поле напряжений (в рабочей части гладких образцов) с помощью тензометров арочного типа, в которых применены фольговые тензодатчики КФ-5П, соединенные по мостовой схеме.

Эксперименты выполнены на стандартных гладких образцах [6]. Материал образцов – лист Д16АТ толщиной 6 мм. Образцы испытаны при нагрузках, соответствующих долговечности 6 – 60 блоков нагружения, что соответствует $5 \cdot 10^4$ – $5 \cdot 10^5$ циклов до разрушения.

Распределение амплитуд напряжений в блоке – экспоненциальное. Параметры распределения аналогичны приведенным в [6]. Общее число циклов на всех ступенях в одном блоке нагружения – 6000. Блок состоит из 10 ступеней. Испытания проведены при средних напряжениях, равных 80, 145 и 195 МПа. Также проведены фрагментарные испытания при сжимающих средних напряжениях, равных минус 80 МПа.

Необходимо отметить, что одной из особенностей конструкции электромеханических усталостных машин является сравнительно медленное изменение амплитуды нагрузки, которое не позволяет выполнить переход от одной ступени к другой в течение одного цикла нагружения. В связи с этим между ступенями присутствуют переходные участки с изменяющейся в течение 50 – 1000 циклов амплитудой нагружения. Измерения деформаций на таких переходных участках не проводились.

Определение средних амплитуд остаточных деформаций на ступенях. Амплитуда остаточной деформации соответствует амплитуде деформаций при средних напряжениях.

В результате проведенных экспериментов получены зависимости амплитуд остаточной деформации, измеренных на каждой ступени блоков нагружения, от наработки n/N . Пример зависимости остаточной деформации от наработки приведен на рисунке 1.

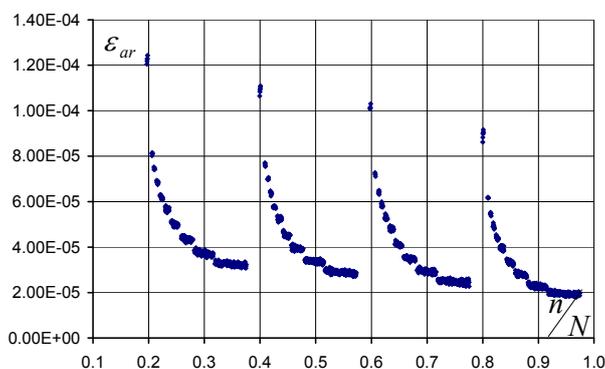


Рисунок 1 – Зависимость амплитуды остаточной деформации от наработки при программном нагружении, $\sigma_{a \max} = 300$ МПа

Изменение остаточной деформации с наработкой (кинетика) в пределах одной ступени незначительно вследствие ее относительно небольшой длительности. Различие текущих значений амплитуд остаточных деформаций на ступени объясняется экспериментальными разбросами. Поэтому значения амплитуды остаточной деформации на каждой ступени усреднены:

$$\varepsilon_{ar i} = \frac{1}{n_i} \cdot \int_{n_{i \text{ нач}}}^{n_{i \text{ нач}} + n_i} \varepsilon_{ar}(n) dn,$$

где $n_{i \text{ нач}}$ – число отработанных циклов к началу текущей ступени;

n_i – число циклов наработки на ступени.

Примеры типовых зависимостей амплитуд остаточных деформаций $\varepsilon_{ar i}$ от амплитуд напряжений $\sigma_{a i}$, изменяющихся от блока к блоку нагружения, показаны на рисунке 2. Различными маркерами показаны значения остаточных деформаций, соответствующих разным блокам нагружения. Цифрой обозначен номер блока.

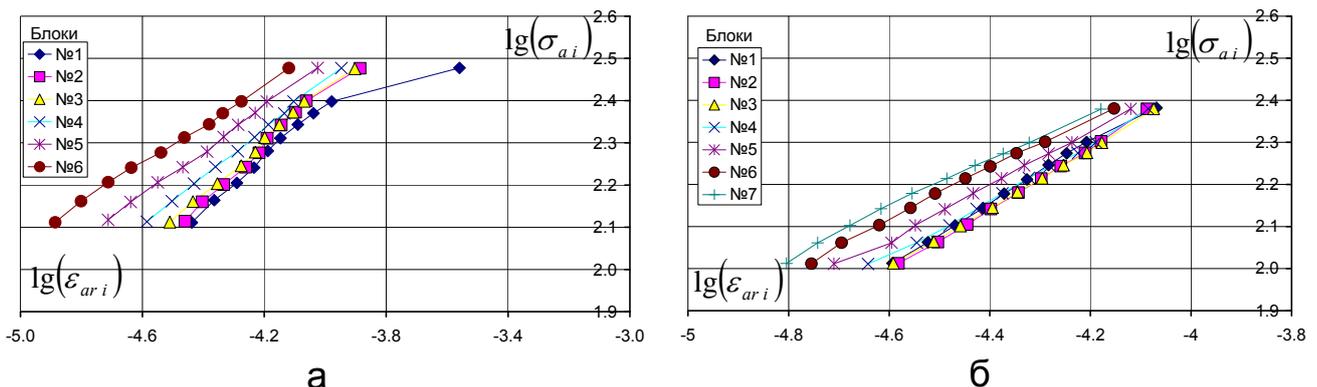


Рисунок 2 – Зависимости значений амплитуд остаточных деформаций от амплитуд напряжений:

а – закон распределения Рэлея; $\sigma_{a \text{ max}} = 300$ МПа; $\sigma_m = 0$ МПа;

б – экспоненциальный закон; $\sigma_{a \text{ max}} = 240$ МПа; $\sigma_m = 145$ МПа

По совокупности испытаний установлено, что зависимости амплитуд остаточных деформаций от напряжений имеют перелом на уровне 230...260 МПа, который значителен на нескольких первых блоках нагружения, а затем постепенно сглаживается. Перелом по уровню напряжений близок к перелому основной диаграммы деформирования при регулярном нагружении, равному $\sigma_{ap} = 240$ МПа [8].

Зависимость значений амплитуды остаточных деформаций от амплитуд напряжений в логарифмических координатах может быть без существенной погрешности описана двумя линейными функциями: выше и ниже перелома диаграммы.

Соотношение между амплитудами остаточных деформаций при переходах со ступени на ступень в блоке нагружения имеет вид, аналогичный уравнению, предложенному в работе [9]:

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

где $\varepsilon_{ar max}$ – амплитуда остаточных деформаций на максимальной ступени текущего блока при амплитуде напряжений $\sigma_{a max}$;

c – параметр материала.

При аппроксимации использованы два значения параметра c : ниже и выше перелома (c_1 и c_2 соответственно):

$$\varepsilon_{ar i} = \begin{cases} \varepsilon_{ar max} \cdot \left(\frac{\sigma_{a i}}{\sigma_{a max}} \right)^{\frac{1}{c_2}} & \text{при } \sigma_{a i} \geq \sigma_{a p}; \\ \varepsilon_{ar p}^{\Pi} \cdot \left(\frac{\sigma_{a i}}{\sigma_{a p}} \right)^{\frac{1}{c_1}} & \text{при } \sigma_{a i} < \sigma_{a p}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{где } \varepsilon_{ar p}^{\Pi} = \varepsilon_{ar max} \cdot \left(\frac{\sigma_{a p}}{\sigma_{a max}} \right)^{\frac{1}{c_2}};$$

$\sigma_{a p}$ – амплитуда напряжений, соответствующих точке перелома диаграммы деформирования. Принято, что напряжения точки перелома соответствуют таковым при регулярном нагружении.

Определение значений параметров c_1 , c_2 . Значения параметров c_1 , c_2 вычислены для каждого блока нагрузок во всех экспериментах как тангенсы углов наклона аппроксимирующих прямых выше и ниже точки перелома. Параметры c_1 и c_2 определены для каждого из экспериментов, проведенных при асимметричном и симметричном нагружениях. Получены зависимости c_1 и c_2 от числа блоков нагружения.

Установлено, что значения c_1 и c_2 близки для экспериментов с различными уровнями максимальных напряжений в блоке. Поэтому их значения усреднены для каждого номера блока по всем экспериментам с одинаковым законом распределения амплитуд напряжений. Полученная по результатам симметричного нагружения зависимость параметров c_1 , c_2 от блока к блоку показана на рисунке 3.

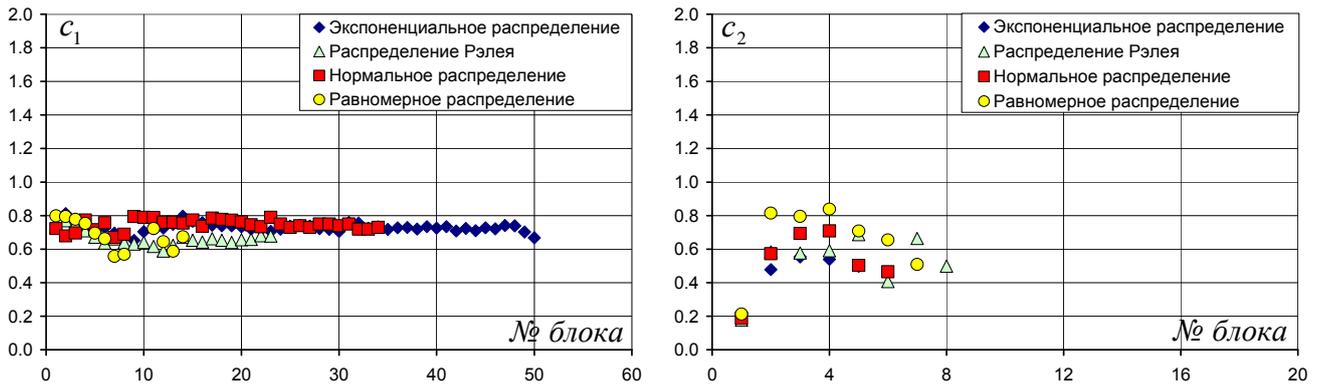


Рисунок 3 – Зависимость параметров c_1 , c_2 от номера блока при симметричном нагружении с различными законами распределения напряжений

Величины c для рассмотренных законов распределения амплитуд напряжений близки. Отличие параметров c для различных распределений не превышает разбросов от блока к блоку и от эксперимента к эксперименту при одном распределении. Принято, что величина параметра c не зависит от закона распределения амплитуд напряжений.

В связи с этим испытания при асимметричном нагружении проведены только при одном законе распределения напряжений – экспоненциальном. Средние напряжения σ_m составили 80, 145 и 195 МПа. Проведены также фрагментарные испытания при сжимающих средних напряжениях, равных минус 80 МПа. Ограниченность уровней нагружения при сжимающих средних напряжениях вызвана тем, что при напряжениях, превышающих минус 320 МПа, образец теряет устойчивость. С другой стороны, при амплитуде напряжений меньше 210 МПа долговечность превышает 10^6 циклов и величины остаточных деформаций становятся меньше значений, стабильно измеряемых используемым испытательным комплексом.

Результаты испытаний при асимметричном нагружении обработаны аналогично описанной ранее методике.

Зависимости параметров c_1 и c_2 от номера блока, полученные в результате испытаний при асимметричном нагружении, показаны на рисунке 4. Для сравнения приведены также значения c_1 и c_2 , полученные при симметричном нагружении, усредненные по всем законам распределения напряжений.

Установлено, что величины параметров c не зависят от средних напряжений. Различия величин c при разных средних напряжениях лежат в полосе разброса значений c от блока к блоку.

Разбросы величин c , наблюдаемые в экспериментах, могут быть объяснены весьма малыми значениями амплитуды остаточной деформации и относительной ширины петли гистерезиса.

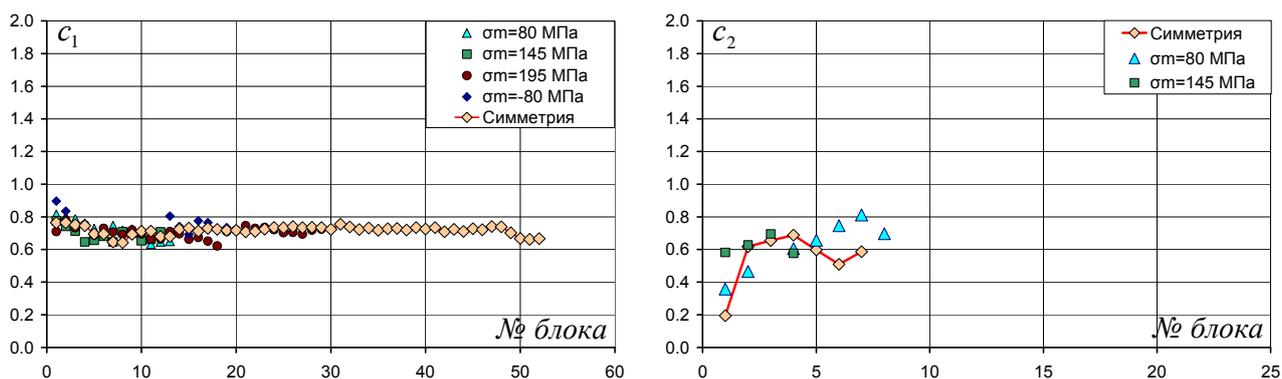


Рисунок 4 – Зависимость параметров C_1 , C_2 от номера блока при асимметричном нагружении

Например, для программ нагружения, в которых $\sigma_{a \max} = 210$ МПа, величины могут быть менее $\varepsilon_{ar} = 6 \cdot 10^{-6}$, $\varphi = 0,005$, где $\varphi = \frac{\varepsilon_{ar}}{\varepsilon_{at}}$, а ε_{at} – амплитуда полной деформации. Такие параметры петли гистерезиса являются предельными по точности измерения данного комплекса [7].

Зависимость параметров C_1 , C_2 , усредненных по всей совокупности проведенных экспериментов при симметричном и асимметричном нагружениях, от номера блока показана на рисунке 5.

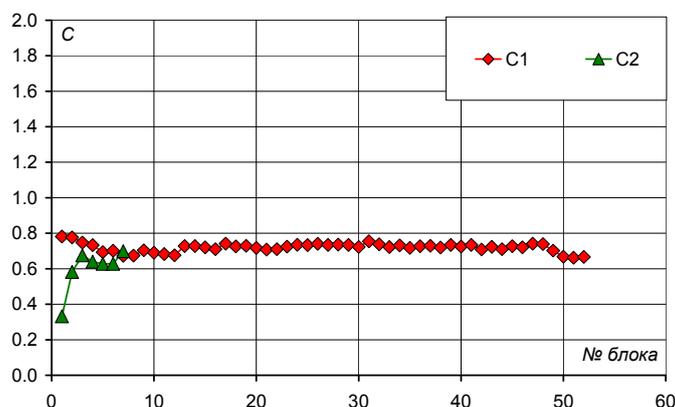


Рисунок 5 – Зависимость параметров c_1 , c_2 от номера блока

Можно отметить, что в большинстве экспериментов наблюдается незначительное уменьшение величины c_1 на протяжении начальных 4 – 14 блоков. Затем значение c_1 стабилизируется и практически не изменяется до разрушения. Параметр c_1 усреднен по всей совокупности экспериментов. В результате установлено, что $c_1 = 0,7$.

Параметр c_2 , наоборот, существенно увеличивается на протяжении начальных 2 – 3 блоков с 0,3 до 0,6...0,7. После чего он также практически постоянен до разрушения образца. Среднее значение параметра c_2

после стабилизации равно 0,65. Принято, что c_2 на первом блоке нагрузок равен тангенсу угла наклона основной диаграммы циклического деформирования $m_2 = 0,25$ [8], а затем $c_1 = c_2 = 0,7$.

Определение усредненных по всем блокам амплитуд остаточных деформаций на ступенях. Проведено усреднение амплитуд остаточных деформаций на каждой ступени по всем блокам нагружения до разрушения для каждого эксперимента. Зависимости усредненных амплитуд остаточных деформаций ε_{ar}^* от амплитуд максимальных напряжений, соответствующих максимальным ступеням, показаны на рисунке 6. На рисунке показано также их сравнение с аналогичной зависимостью при регулярном нагружении, взятой из работы [8].

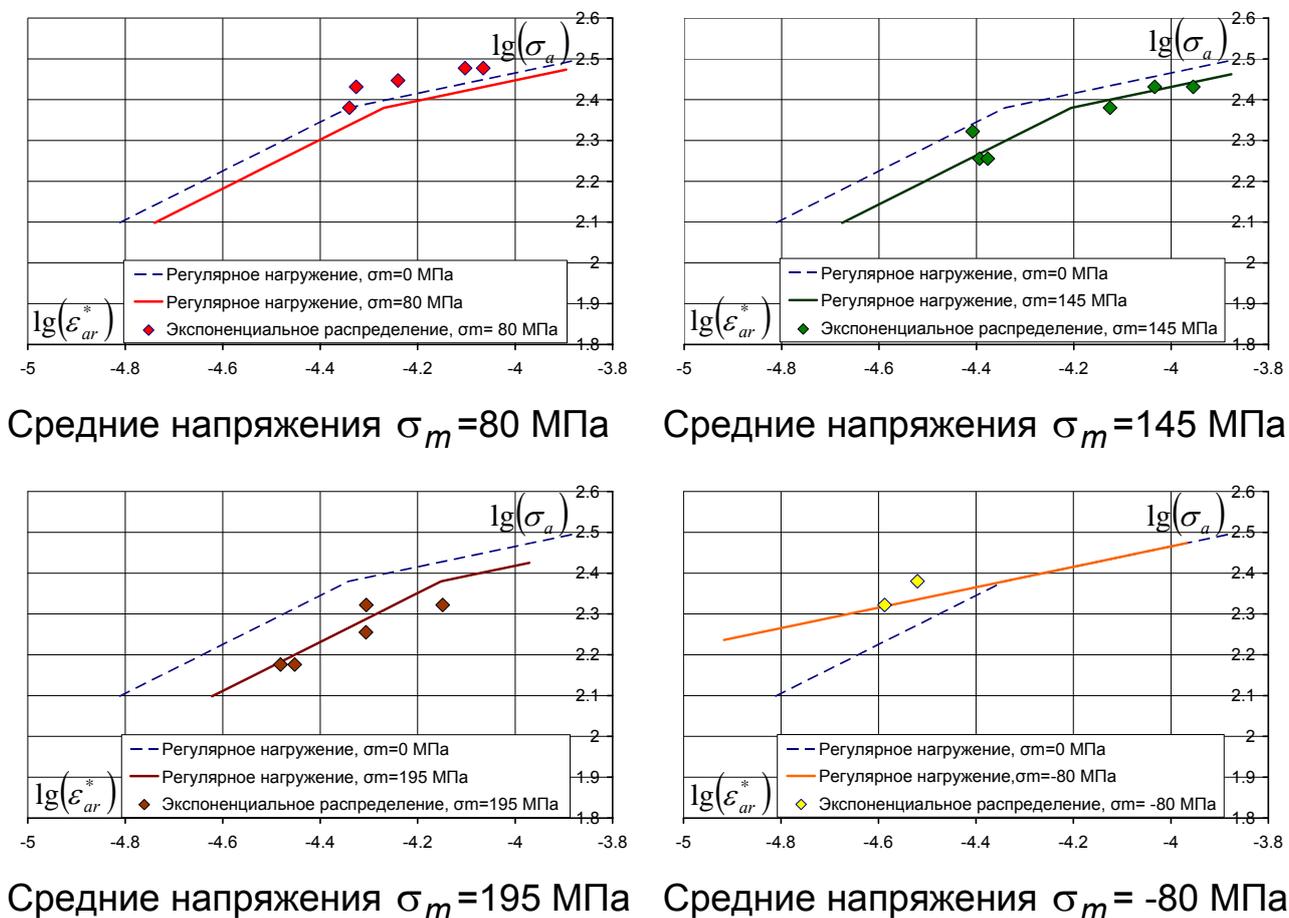


Рисунок 6 – Средние амплитуды остаточной деформации

на максимальной ступени при программном и регулярном нагружениях

Как видно из приведенных рисунков, величины средних остаточных деформаций ε_{ar}^* , соответствующих амплитуде напряжений на максимальной ступени нагружения в блоке, близки к значениям средних амплитуд остаточных деформаций, полученных при регулярном нагружении с такой же амплитудой напряжений.

Зависимости средних амплитуд остаточных деформаций ε_{ar}^* на всех ступенях от амплитуд соответствующих напряжений показаны на рисунке 7.

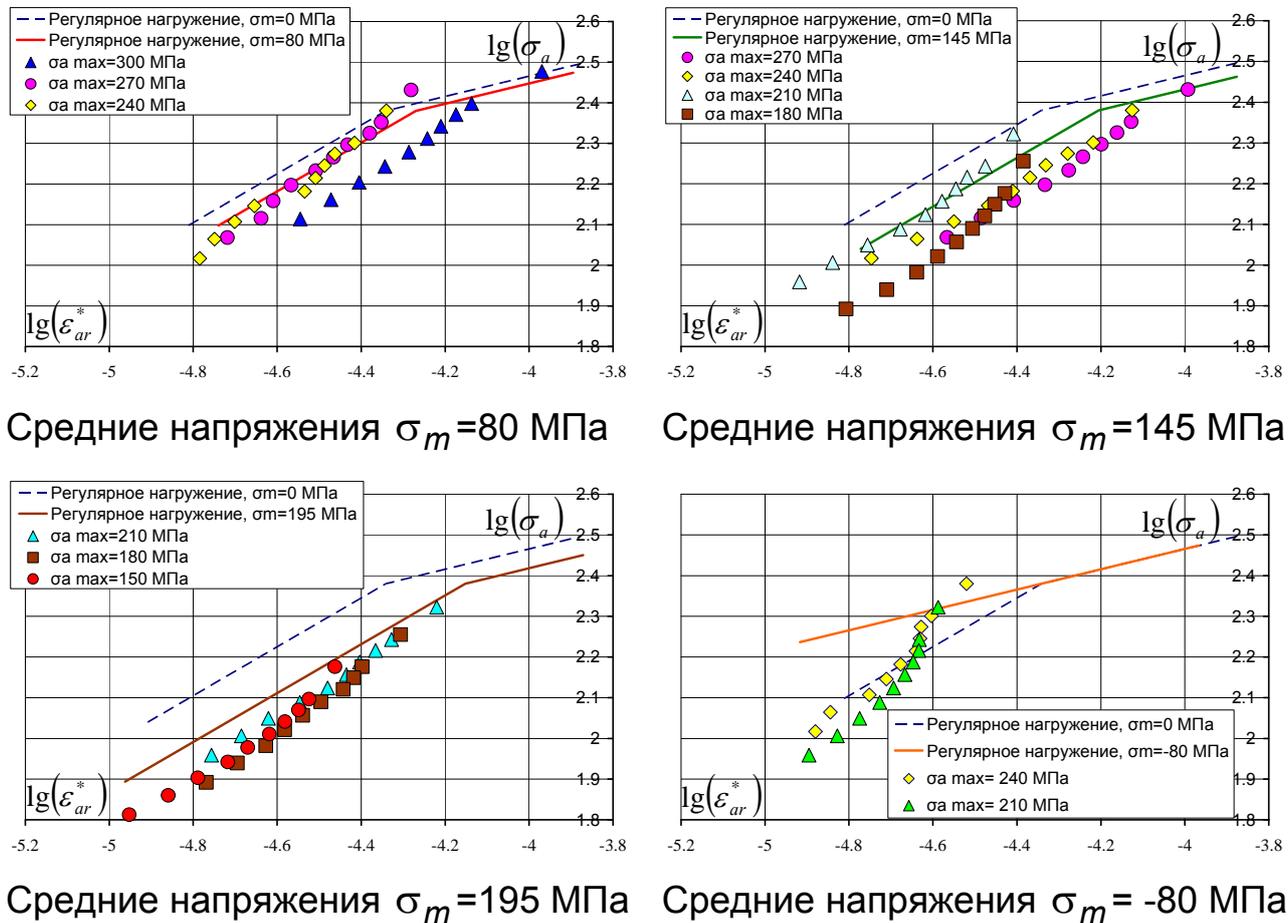


Рисунок 7 – Средние амплитуды остаточной деформации при программном и регулярном асимметричных нагружениях

Установлено, что при программном асимметричном нагружении величины средней остаточной деформации ε_{ar}^* на следующих после максимальной ступенях существенно больше, чем при регулярном нагружении. Это согласуется с результатами, полученными при симметричном нагружении.

Полученный результат может объяснить систематическую ошибку не в запас долговечности, возникающую при прогнозировании долговечности на основе базовой кривой выносливости при регулярном нагружении и гипотезы линейного суммирования повреждений.

Зависимости средних по всем блокам значений остаточных деформаций $\varepsilon_{ar i}^*$ на i -х ступенях от амплитуд напряжений в логарифмических координатах аппроксимированы двумя линейными функциями аналогично аппроксимации по блокам:

$$\varepsilon_{ar i}^* = \begin{cases} \varepsilon_{ar max}^* \cdot \left(\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{amax}} \right)^{\frac{1}{c_2^*}} & \text{при } \sigma_{ai} \geq \sigma_{ap}; \\ \varepsilon_{ar p}^* \cdot \left(\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{ap}} \right)^{\frac{1}{c_1^*}} & \text{при } \sigma_{ai} < \sigma_{ap}, \end{cases}$$

где $\varepsilon_{ar p}^* = \varepsilon_{ar max}^* \cdot \left(\frac{\sigma_{ap}}{\sigma_{amax}} \right)^{\frac{1}{c_2^*}}$.

Величины c_1^* , c_2^* определены как тангенсы углов наклонов зависимостей амплитуд остаточных деформаций $\varepsilon_{ar i}^*$ от амплитуд напряжений σ_{ai} выше и ниже их перелома.

Отличия значений c_1^* , c_2^* для трех законов распределений амплитуд напряжений при симметричном нагружении, а также для ряда средних напряжений не превосходят разбросов от эксперимента к эксперименту. Поэтому эти величины были усреднены по всем экспериментам:

- среднее значение параметра с выше перелома: $c_2^* = 0,45$;
- среднее значение параметра с ниже перелома: $c_1^* = 0,7$.

На основе проведенных исследований сформирована модель изменения остаточной деформации при программном нагружении без учета кинетики амплитуды остаточной деформации с наработкой.

Модель расчета амплитуды остаточной деформации при программном нагружении без учета кинетики остаточной деформации с наработкой. Кинетика амплитуды остаточной деформации в концентрате напряжений существенно ослаблена по сравнению с гладким материалом. Это позволяет предложить приближенную модель определения амплитуды остаточной деформации при блочном нагружении, которая основывается на средних значениях остаточной деформации.

В работе [6] установлено, что значение остаточной деформации ε_{ar}^* , полученное усреднением ε_{ar} по всем максимальным ступеням в блоках, меньше либо равно средней остаточной деформации на таком же уровне напряжений при регулярном нагружении. Этот вывод был сделан на основе испытаний гладких образцов сплава Д16АТ симметричным нагружением по трем законам распределения амплитуд напряжений. В рассматриваемой работе полученный вывод распространен и на асимметричное нагружение. Поэтому в запас долговечности можно принять, что средние значения ам-

плитуд остаточных деформаций на максимальной ступени равны таковым при регулярном нагружении.

Необходимо отметить, что такое допущение правомерно только для таких распределений нагрузок, в которых наработка на максимальной ступени блока намного меньше наработки на остальных ступенях, а число блоков до разрушения велико. Очевидно, что спектры нагружения авиационных конструкций, в которых огибающий цикл встречается один раз за типовой полет, как раз относятся к таким видам распределения.

В приведенной ниже модели также принято допущение о том, что величина текущей остаточной деформации на ступени равна среднему по всем ступеням до разрушения значению остаточной деформации ε_{ar}^* . Это допущение также приводит к расчету в запас долговечности.

Тогда модель расчета амплитуды остаточной деформации сплава Д16АТ при программном нагружении будет иметь следующий вид:

1. Величина среднего значения амплитуды остаточной деформации на максимальной ступени нагружения в блоке не зависит от закона распределения амплитуд напряжений и равна среднему значению величины остаточной деформации при регулярном нагружении с такой же амплитудой напряжений:

$$\varepsilon_{ar\ max}^* = \begin{cases} \left(\frac{\sigma_{a\ max}}{K_m} \right)^{\frac{1}{m_1}} & \text{при } \sigma_{a\ max} \leq \sigma_{a\ p}; \\ \varepsilon_{ar\ p}^* \cdot \left(\frac{\sigma_{a\ max}}{\sigma_{a\ p}} \right)^{\frac{1}{m_2}} & \text{при } \sigma_{a\ max} > \sigma_{a\ p}, \end{cases}$$

$$\text{где } \varepsilon_{ar\ p}^* = \left(\frac{\sigma_{a\ p}}{K_m} \right)^{\frac{1}{m_1}};$$

K_m, m_1, m_2 – параметры материала при регулярном нагружении [8].

2. Средние значения величин амплитуд напряжений на последующих (i -х) ступенях нагружения в блоке определяются согласно выражению (2):

$$\varepsilon_{ar i}^* = \begin{cases} \varepsilon_{ar max}^* \cdot \left(\frac{\sigma_{a i}}{\sigma_{a max}} \right)^{\frac{1}{c_2^*}} & \text{при } \sigma_{a i} \geq \sigma_{a p}, \\ \varepsilon_{ar p}^* \cdot \left(\frac{\sigma_{a i}}{\sigma_{a p}} \right)^{\frac{1}{c_1^*}} & \text{при } \sigma_{a i} < \sigma_{a p}, \end{cases} \quad \text{если } \sigma_{a max} \geq \sigma_{a p};$$

$$\varepsilon_{ar max}^* \cdot \left(\frac{\sigma_{a i}}{\sigma_{a max}} \right)^{\frac{1}{c_1^*}}, \quad \text{если } \sigma_{a max} < \sigma_{a p}.$$

При этом значения параметров c_1^* , c_2^* не зависят от величин средних напряжений.

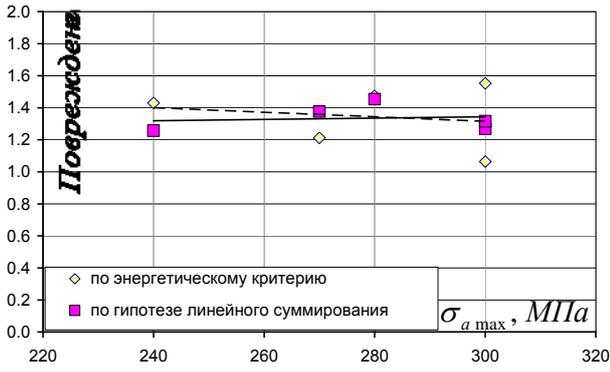
Предложенная модель с учетом указанных допущений может быть использована для вычисления параметров локального цикла деформирования материала в концентраторе напряжений приближенно, без учета кинетики остаточной деформации.

Расчет накопленного повреждения по энергетическому критерию и гипотезе линейного суммирования. Проведен анализ величин повреждений, накопленных до разрушения образцов. Выражения для определения накопленных повреждений приведены в [6].

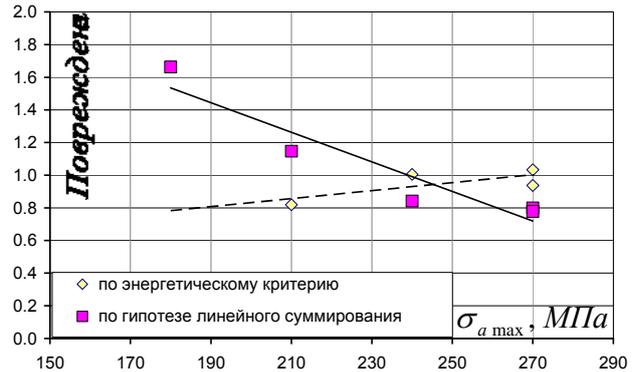
Результаты расчета накопленного повреждения для испытаний при асимметричном нагружении приведены на рисунке 8.

Повреждение по гипотезе линейного суммирования в среднем равно 1,26, но для программ нагружения с большими максимальными амплитудами напряжений систематически уменьшается. При этом для уровня средних напряжений, равных 145 МПа, повреждение достигает величины 0,8 уже при максимальной амплитуде, равной 270 МПа, что приведет к расчету не в запас долговечности. Таким образом, изменение повреждения от уровня максимальных напряжений при асимметричном нагружении качественно совпадает с результатами, полученными при симметричном нагружении [6].

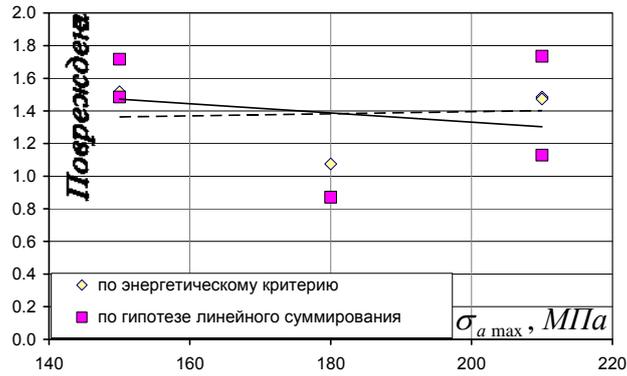
Повреждение, вычисленное по энергетическому критерию разрушения, в среднем равно 1,24 и систематически больше 1, что обеспечивает расчет долговечности в запас. Несколько большее среднее значение повреждения при асимметричном нагружении по сравнению с симметричным (1,08) [6] может быть объяснено систематическим завышением величин амплитуды остаточной деформации на ступенях с низкими уровнями напряжений. К такому завышению могут приводить электромеханические шумы испытательной машины, которые при асимметричном нагружении существенно больше по своей величине.



Средние напряжения $\sigma_m = 80$ МПа



Средние напряжения $\sigma_m = 145$ МПа



Средние напряжения $\sigma_m = 195$ МПа

Рисунок 8 – Накопленные до момента разрушения повреждения для ряда средних напряжений

Сводные результаты для испытаний при симметричном и асимметричном нагружениях приведены на рисунке 9.

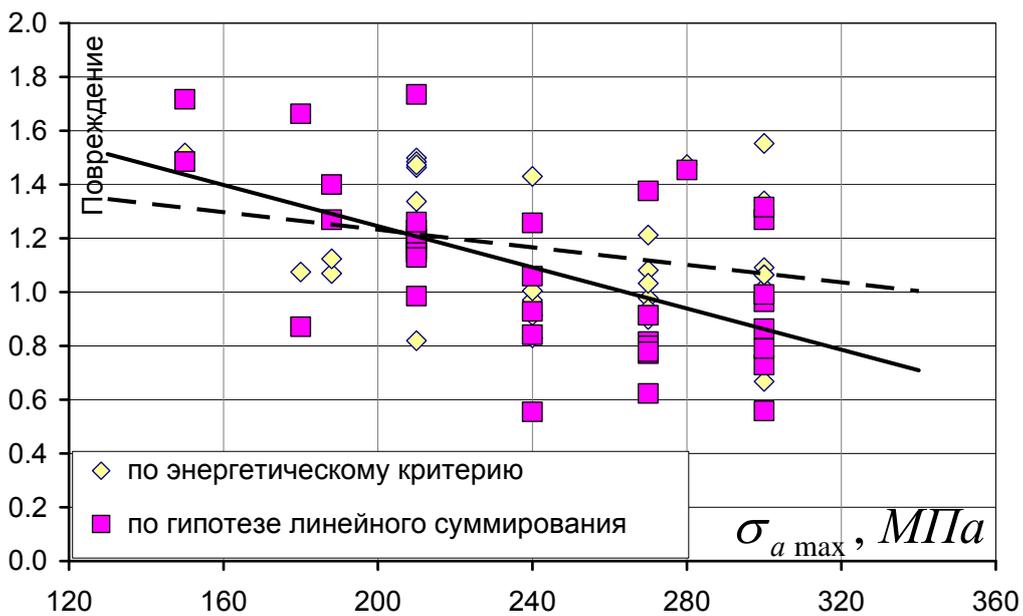


Рисунок 9 – Накопленные до момента разрушения повреждения при симметричном и асимметричном нагружениях

В результате можно прийти к заключению, что выводы, сделанные на основе испытаний при симметричном нагружении, могут быть распространены и на асимметричное нагружение. Видно, что гипотеза линейного суммирования систематически занижает долговечность (в 1,5 раза и более) на малых уровнях нагружения, а на высоких уровнях нагрузки может завышать более чем в 1,3 раза. Вычисление повреждения в соответствии с энергетическим критерием приводит к расчету в запас долговечности во всем исследованном диапазоне нагрузок (от 1,1 до 1,3 раза).

Выводы

Получены зависимости значений амплитуд остаточных деформаций ε_{ar} от амплитуд напряжений для трех законов распределения амплитуд напряжений и ряда уровней средних напряжений. Установлено, что на высоких уровнях нагрузки средние значения остаточных деформаций ε_{ar}^* на ступенях значительно больше, чем величины остаточных деформаций при регулярном нагружении. Это объясняет систематический расчет не в запас долговечности по гипотезе линейного суммирования повреждений при таких уровнях нагрузок. При этом повреждение, вычисленное по энергетическому критерию усталостного разрушения, во всем диапазоне нагрузок превышает 1, что обеспечивает расчет долговечности в запас.

По полученным зависимостям определены значения параметров c_1 и c_2 , характеризующих изменение остаточных деформаций при программном нагружении. Установлено, что величины параметров c_1 и c_2 не зависят от закона распределения и величины средних напряжений.

Предложена модель расчета амплитуды остаточной деформации при программном нагружении без учета кинетики. Модель основана на использовании параметров c_1^* , c_2^* , характеризующих тангенс угла наклона зависимости средних остаточных деформаций ε_{ar}^* от амплитуд напряжений. Эта модель необходима для расчетов долговечности элементов конструкций с концентраторами напряжений по локальному напряженно-деформированному состоянию.

Список использованных источников

1. Тейлор, Дж. Нагрузки, действующие на самолет [Текст]: пер. с англ. / Дж. Тейлор. – М.: Машиностроение, 1971. – 371 с.
2. Стрижиус, В.Е. Типизированная программа нагружения элементов конструкции крыла регионального транспортного самолета [Текст] / В.Е. Стрижиус // Научный вестник МГТУ ГА. Сер. Аэромеханика, прочность, поддержание летной годности ВС. – М., 2006. – С. 145 – 154.

3. Райхер, В.Л. Гипотеза спектрального суммирования и ее применение для определения усталостной долговечности при действии случайной нагрузки [Текст] / В.Л. Райхер. – М.: Изд. отдел ЦАГИ, 1969. – 38 с.

4. Басов, В.Н. Экспериментальное исследование усталостной долговечности конструктивного элемента при условиях нагружения, характерных для крыла пассажирского самолета [Текст] / В.Н. Басов, А.З. Воробьев, Ю.А. Свирский // Труды ЦАГИ. – Вып. 2117. – М.: Изд. отдел ЦАГИ, 1981. – С. 3 – 13.

5. Басов, В.Н. Особенности усталостной долговечности современных алюминиевых сплавов при нерегулярном нагружении [Текст] / В.Н. Басов, Г.И. Нестеренко // Прочность, колебания и ресурс авиационных конструкций: сб. науч. работ. Труды ЦАГИ. – Вып. 2675. – М.: Изд. отдел ЦАГИ, 2007. – С. 174 – 180.

6. 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.

7. Фомичев, П.А. Методика экспериментальных исследований циклических деформационных и усталостных характеристик конструкционных материалов [Текст] / П.А. Фомичев, 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. 2 (53). – Х., 2008. – С. 24 – 34.

8. 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.

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

Поступила в редакцию 05.03.2012.

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