

## **ЦИКЛИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И УСТАЛОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВА Д16АТ ПРИ ПРОГРАММНОМ НАГРУЖЕНИИ.**

### **СООБЩЕНИЕ 1. НАКОПЛЕННОЕ ПОВРЕЖДЕНИЕ ПРИ СИММЕТРИЧНОМ НАГРУЖЕНИИ ПО ТРЕМ ЗАКОНАМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУДЫ НАПРЯЖЕНИЙ**

Энергетический критерий усталостного разрушения, предложенный в работе [1], устанавливает зависимость долговечности до возникновения макротрещины от величины рассеянной в элементарном объеме материала энергии. В работе [2] показано, что наилучшее согласование с результатами испытаний образцов из стали 40Х с концентраторами напряжений в условиях программного нагружения имеют расчетные значения долговечности, полученные в рамках энергетического критерия усталостного разрушения при расчете долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию. В работе [3] показано, что расчет долговечности в рамках энергетического критерия дает удовлетворительное согласование с результатами испытаний образцов из стали 30ХГСА, имеющих концентраторы напряжений, при блочном нагружении и в случае сложного напряженного состояния. Особенностью метода расчета долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию согласно энергетическому критерию разрушения является использование характеристик гладкого материала для расчета долговечности конструкций с концентраторами напряжений.

В данной работе проведены усталостные испытания алюминиевого сплава Д16АТ при мягком программном нагружении с целью сопоставления накопленного повреждения, рассчитанного по гипотезе линейного суммирования и согласно энергетическому критерию усталостного разрушения.

**Экспериментальное оборудование.** Исследования выполнены с использованием испытательного комплекса на базе машины УММ-01 [4].

Под мягким нагружением подразумевают нагружение постоянной амплитудой действующих напряжений.

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

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 имеются переходные

участки с изменяющейся амплитудой нагружения. Величины этих участков составляют 50 – 1000 циклов в зависимости от значений амплитуд нагрузки на соседних ступенях. Измерения деформаций на таких переходных участках не производились. Пример типовой программы испытаний с блоками, близкими к экспоненциальному распределению, показан на рис. 1.

Все усталостные испытания проведены с частотой нагружения 12,5 Гц в условиях нормальной температуры (20°C). Эксперименты выполнены на гладких образцах, показанных на рис. 2. 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.

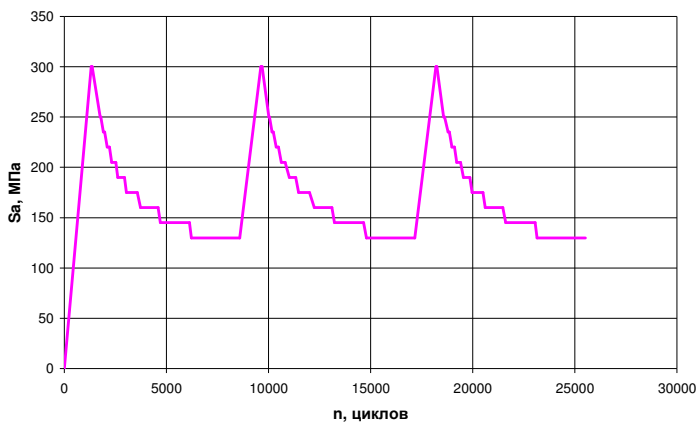


Рисунок 1 – Пример программы испытаний при блочном нагружении

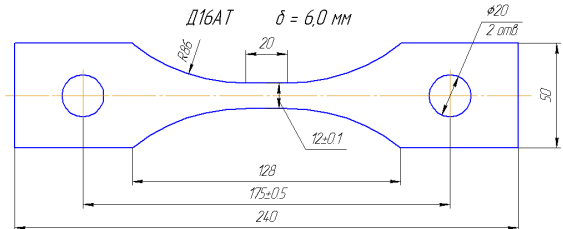


Рисунок 2 – Гладкий образец

**Расчет распределения амплитуд напряжений в блоках.** В качестве законов повторяемости перегрузок для тяжелых транспортных самолетов в авиастроении применяют экспоненциальный закон [5] и закон Рэлея [6]. Поэтому в настоящей работе рассмотрены именно эти законы распределения амплитуд нагрузок. Дополнительно проведены испытания при нормальном законе распределения.

Плотность распределения амплитуд напряжений  $\sigma_a$  в блоке программы испытаний составляет:

а) для экспоненциального закона

$$f(\sigma_a) = \frac{1}{m_{\sigma a}} e^{-\frac{\sigma_a}{m_{\sigma a}}};$$

б) для нормального закона

$$f(\sigma_a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(\sigma_a - m_{\sigma a})^2}{2\sigma^2}};$$

в) для закона Рэлея

$$f(\sigma_a) = \frac{\sigma_a}{\sigma^2} e^{-\frac{\sigma_a^2}{2\sigma^2}},$$

где  $m_{\sigma_a}$  и  $\sigma^2$  – математическое ожидание и дисперсия величины  $\sigma_a$ .

Число циклов наработки при нагрузке  $\sigma_{ai}$  пропорционально вероятности возникновения ее в блоке

$$p_i = \frac{\int_{\sigma_{ai}-\Delta\sigma_a}^{\sigma_{ai}+\Delta\sigma_a} f(\sigma_a) d\sigma_a}{\sum_{i=1}^k p_i},$$

где  $\Delta\sigma_a$  – величина интервала в окрестности  $\sigma_{ai}$ .

Тогда относительная наработка на  $i$ -й ступени

$$\bar{n}_i = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^k p_i},$$

где  $k$  – число ступеней в блоке программы испытаний.

Расчет числа циклов на ступени проведен по аналогии с [7] с учетом следующих исходных данных:

- для экспоненциального закона распределения

$$m_{\sigma_a} = 0,1 \cdot \sigma_{a \max}; \quad \Delta\sigma_a = 0,025 \cdot \sigma_{a \max};$$

- для нормального закона распределения

$$m_{\sigma_a} = 0,5 \cdot \sigma_{a \max}; \quad \sigma^2 = 0,03 \cdot \sigma_{a \max}^2; \quad \Delta\sigma_a = 0,025 \cdot \sigma_{a \max};$$

- для закона распределения Рэлея

$$\sigma^2 = 0,06 \cdot \sigma_{a \max}^2; \quad \Delta\sigma_a = 0,025 \cdot \sigma_{a \max},$$

где  $\sigma_{a \max}$  – максимальная амплитуда напряжений в блоке программы испытаний.

Полученные распределения напряжений в блоке показаны на рис. 3. Амплитуды напряжений и соответствующие им наработки представлены в относительных координатах

$$\bar{\sigma}_{ai} = \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a \max}}; \quad \bar{n}_i = \frac{n_i}{n_b},$$

где  $\bar{\sigma}_{ai}$  – относительная амплитуда напряжений на  $i$ -й ступени;

$n_i$  – число циклов нагружения на  $i$ -й ступени;

$n_b$  – число циклов в полном блоке программы испытаний.

Число циклов наработки на первой, максимальной по амплитуде напряжений, ступени, полученное расчетным путем, оказалось малым для надежной регистрации значений деформации в экспериментах, поэтому в реализованных программах нагружения данное значение увеличено. Для каждого распределения реализованы следующие

величины максимальной амплитуды напряжений  $\sigma_{a \max}$  на перегрузочной ступени в блоке: 300, 270, 250, 240, 210 МПа.

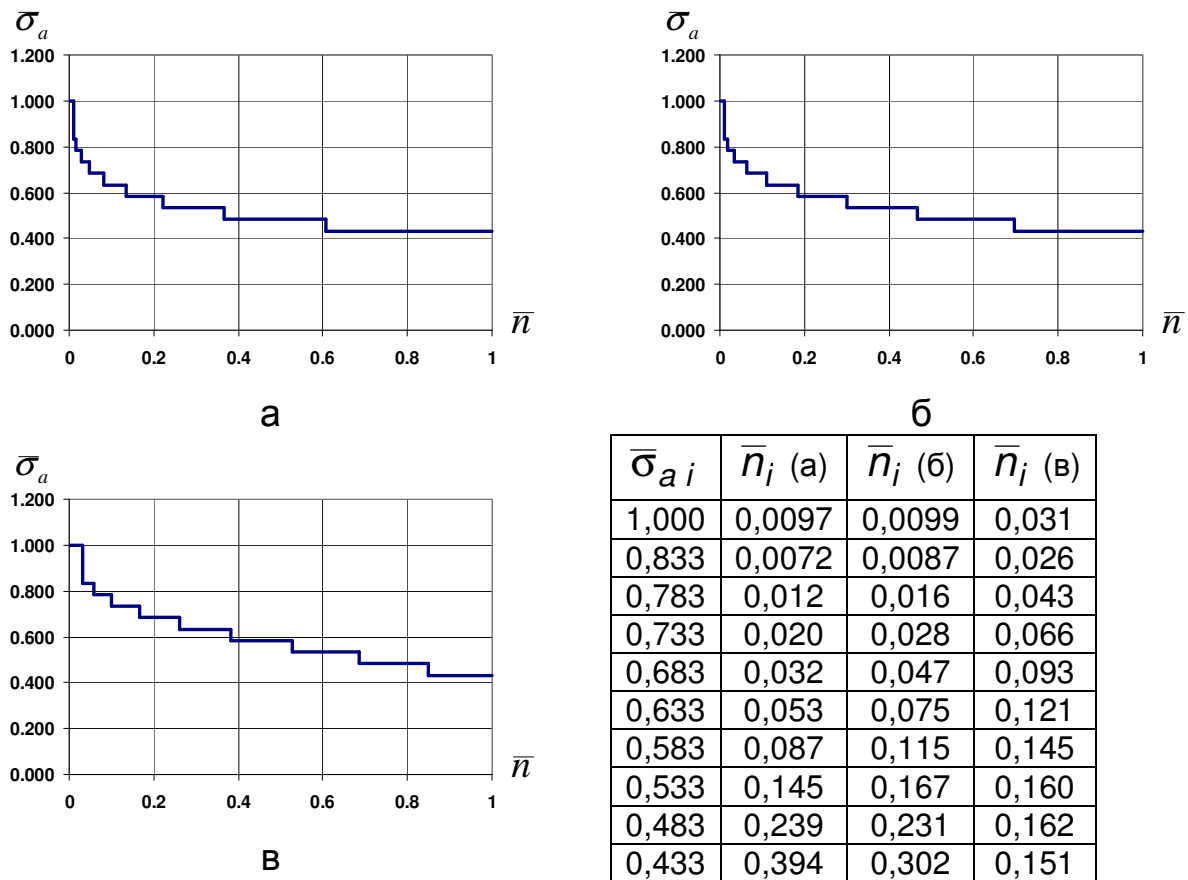


Рисунок 3 – Законы распределения амплитуд напряжений в блоке программы испытаний:

а – экспоненциальный; б – Рэлея; в – нормальный

**Определение средних амплитуд остаточных деформаций.** Под амплитудой остаточной деформации понимаем значение деформации при равенстве действующих номинальных напряжений нулю или их среднему значению.

В результате проведенных экспериментов получены значения амплитуды остаточной деформации на каждой ступени блока нагружения. На рис. 4 приведены зависимости амплитуды остаточной деформации от наработки  $n/N$ .

Величины средних значений амплитуды остаточной деформации на каждой ступени определены так:

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

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

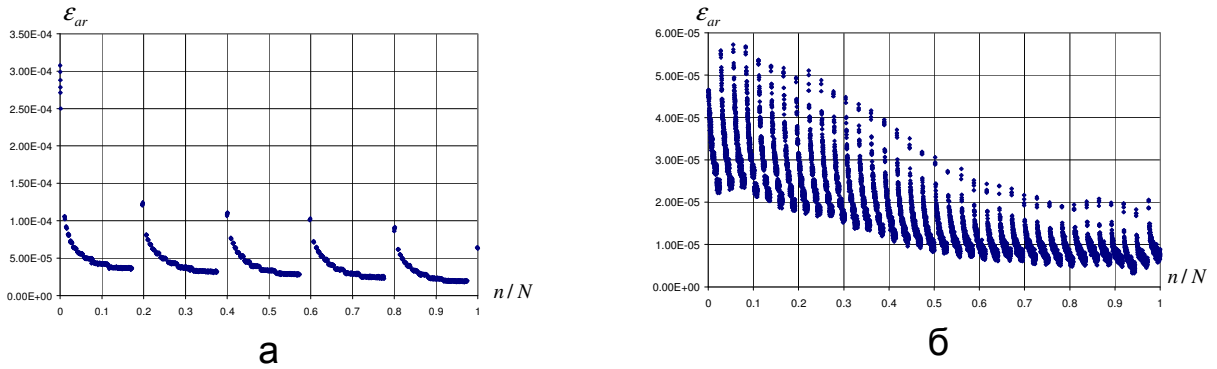


Рисунок 4 – Зависимости амплитуды остаточной деформации от наработки при программном нагружении:

а - экспоненциальный закон распределения,  $\sigma_{a \max} = 300$  МПа;

б - закон распределения Рэлея,  $\sigma_{a \max} = 210$  МПа

Примеры зависимости средних значений амплитуд остаточных деформаций от амплитуд напряжений для каждой ступени блока программы испытаний показаны на рис. 5.

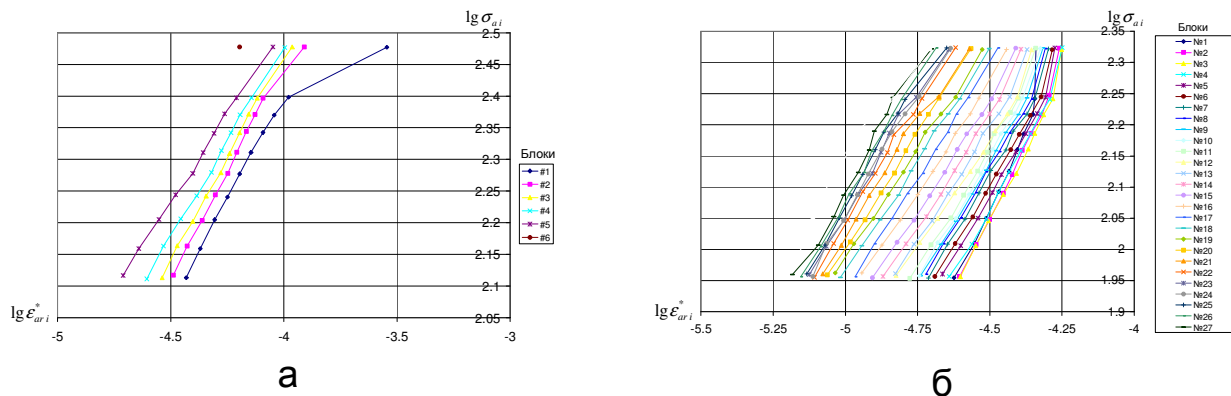


Рисунок 5 – Зависимость средних значений амплитуд остаточных деформаций от амплитуд напряжений:

а – экспоненциальный закон распределения,  $\sigma_{a \max} = 300$  МПа;

б - закон распределения Рэлея,  $\sigma_{a \max} = 210$  МПа

Зависимость средних значений амплитуд остаточных деформаций от амплитуд напряжений в логарифмических координатах аппроксимирована линейной функцией.

После достижения максимальной амплитуды напряжений, величины амплитуды остаточной деформации на последующих ступенях аппроксимированы согласно зависимости, предложенной в работе [8].

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

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

$c$  – параметр материала.

Зависимости средних амплитуд остаточных деформаций на перегрузочных ступенях от амплитуд максимальных напряжений в логарифмических координатах и их сравнение с аналогичной зависимостью при регулярном нагружении, взятой из работы [9], показаны на рис. 6.

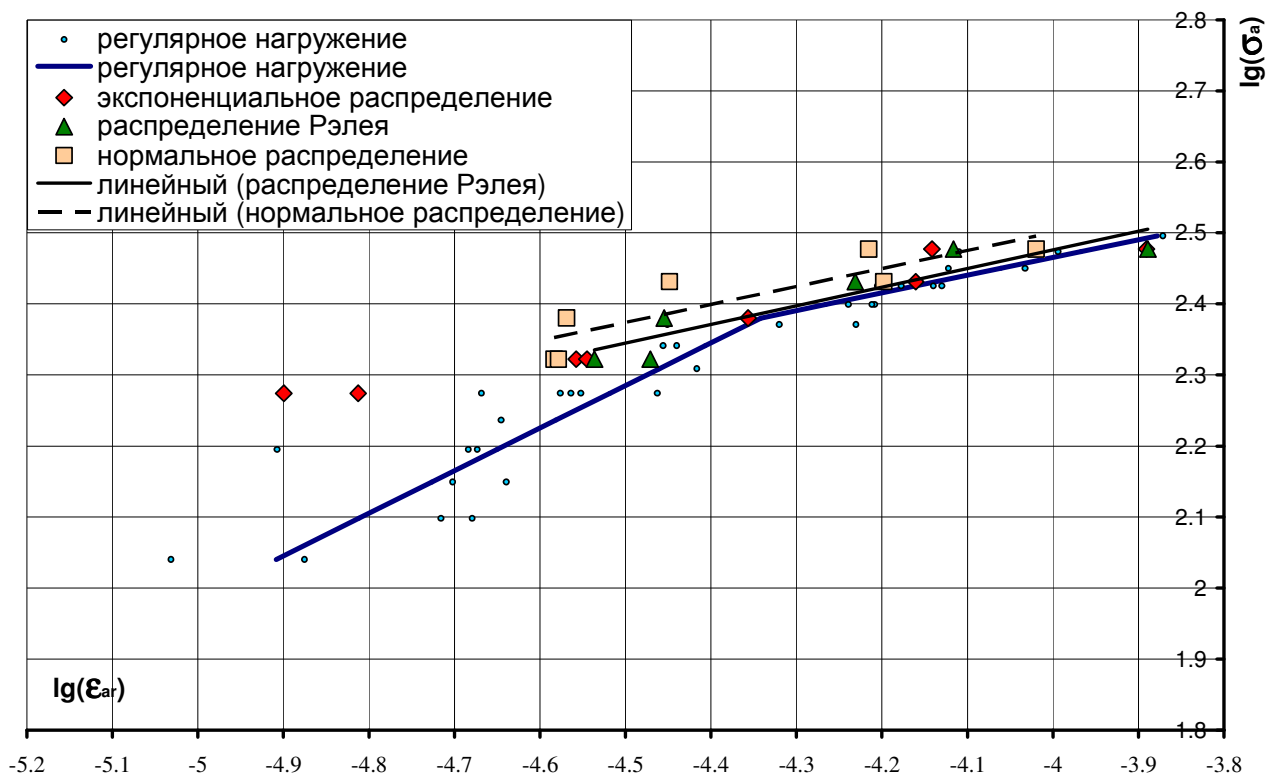


Рисунок 6 – Сравнение средних амплитуд остаточных деформаций на максимальной ступени при программном и регулярном нагружениях

Зависимости средних амплитуд остаточных деформаций на всех ступенях для экспоненциального и рэлеевского законов распределения от амплитуд соответствующих напряжений показаны на рис. 7, для нормального закона распределения – на рис. 8. Величины остаточных деформаций на каждом уровне нагрузок усреднены по нескольким экспериментам. Для сравнения на рис. 7 и 8 показана аналогичная зависимость при регулярном нагружении.

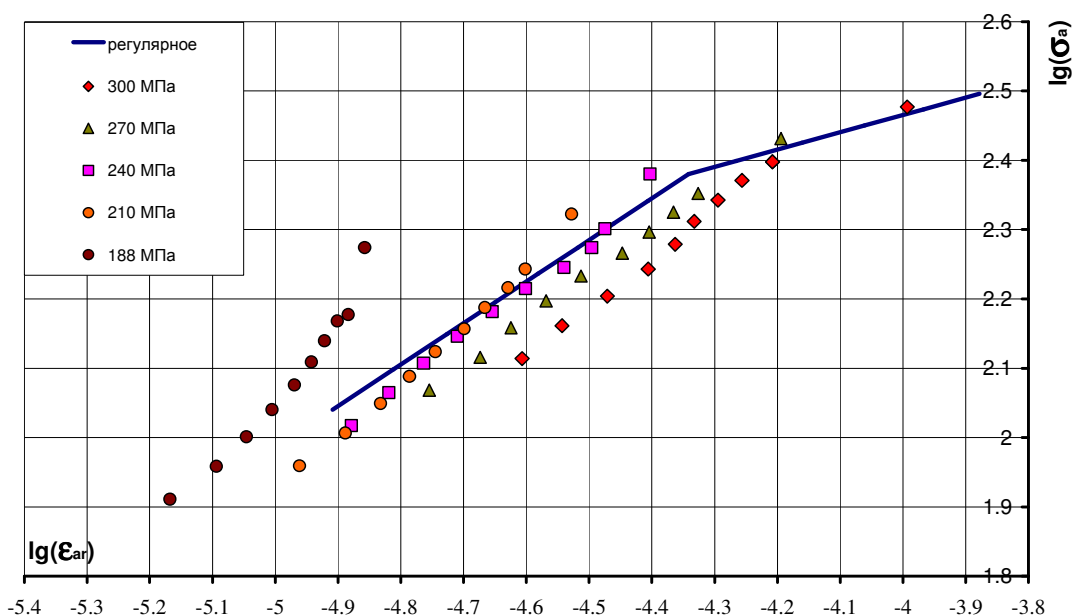


Рисунок 7 – Сравнение средних амплитуд остаточных деформаций при программном и регулярном нагружениях для экспоненциального закона распределения и закона Рэлея

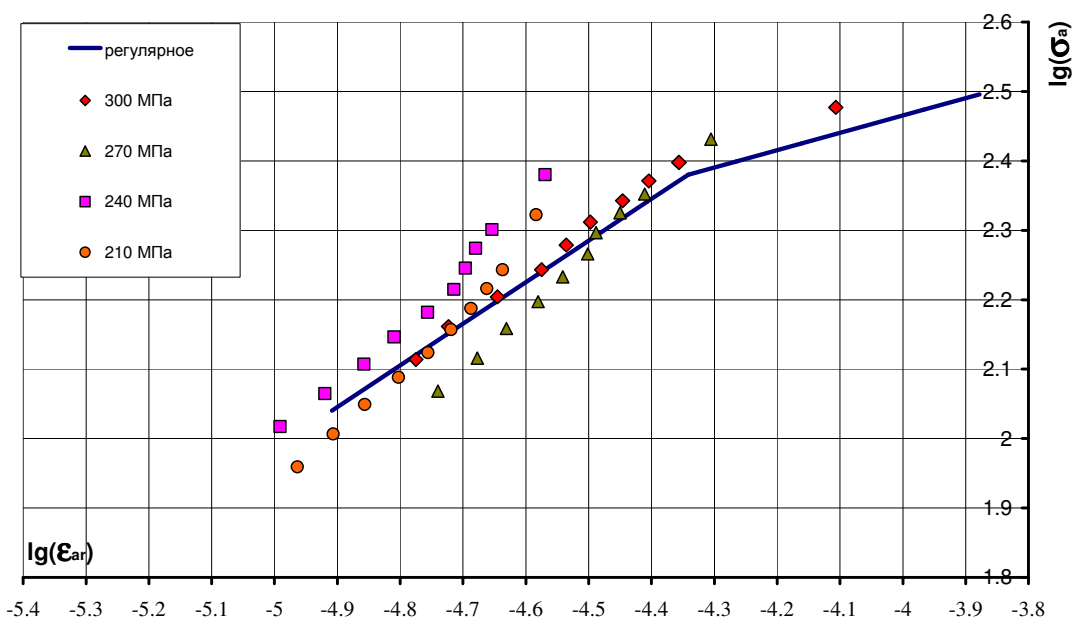


Рисунок 8 – Сравнение средних амплитуд остаточных деформаций при программном и регулярном нагружениях для нормального закона распределения

Необходимо отметить, что в случаях экспоненциального закона распределения и закона Рэлея величины средних амплитуд остаточных деформаций, определенных на максимальной ступени по всем блокам до разрушения, близки к их значениям на соответствующих уровнях напряжений при регулярном нагружении. Для нормального распределения эти значения имеют параллельное смещение в сторону

меньших величин остаточных деформаций. Отличие достигает 1,35 раза.

Средние величины амплитуд остаточных деформаций, определенных на последующих ступенях по всем блокам до разрушения, в ряде случаев существенно отличаются от значений остаточных деформаций на соответствующих уровнях напряжений при регулярном нагружении. При этом значения средних остаточных деформаций по ступеням для распределений по экспоненциальному закону и закону Рэлея лежат в одной совокупности. Величины остаточных деформаций для нормального распределения систематически меньше.

Такое отличие может быть объяснено интенсивным циклическим упрочнением (уменьшением величины остаточной деформации с наработкой) на ступенях нагружения с большой амплитудой напряжений, которые в нормальном распределении имеют большую длительность по числу циклов (в три и более раз) по сравнению с распределениями по законам Рэлея и экспоненциальному.

Зависимости имеют перелом, близкий по величине напряжений к перелому основной диаграммы циклического деформирования.

**Расчет повреждения по энергетическому критерию и гипотезе линейного суммирования.** Проведен анализ величин повреждения, накопленного до разрушения образцов. Значения получены в результате расчетов по гипотезе линейного суммирования повреждений и энергетическому критерию разрушения.

Накопленное в эксперименте повреждение складывается из повреждений в блоках  $D_6$  и повреждений на переходах между ступенями  $D_n$ :

$$D_{\Sigma} = D_6 + D_n. \quad (2)$$

Повреждение в блоках, полученное по гипотезе линейного суммирования, вычислено следующим образом:

$$D_{6 \text{ л.с.}} = \sum_{i=1}^K \frac{n_i}{N_i(\sigma_{a i})},$$

где  $K$  – общее число реализованных в эксперименте ступеней нагружения;

$N_i(\sigma_{a i})$  – долговечность при регулярном симметричном нагружении амплитудой  $\sigma_{a i}$ , определяемая по кривой Велера

$$\sigma_a^M \cdot N = C;$$

$M$  и  $C$  – коэффициенты кривой Велера.

Повреждение на переходе между соседними ступенями с одной амплитуды на другую можно выразить в виде интеграла



$$D_{п л.с.} = \int_0^{\Delta n} \frac{dn}{N(\sigma_a)}, \quad (3)$$

где  $\Delta n$  – число циклов наработки, которое занимает переход.

Амплитуда напряжений на переходе пропорциональна числу циклов нагружения. Пусть величина амплитуды изменяется линейно от значения  $\sigma_{a1}$  до  $\sigma_{a2}$ , тогда

$$\sigma_a = \sigma_{a1} + \frac{\Delta\sigma_a}{\Delta n} \cdot n, \quad (4)$$

где  $\Delta\sigma_a = \sigma_{a2} - \sigma_{a1}$ .

Подставим (4) в (3) и выполним интегрирование, тогда выражение для повреждения на переходе примет вид

$$D_{п л.с.} = \frac{\sigma_{a2}^{M+1} - \sigma_{a1}^{M+1}}{\frac{\Delta\sigma_a}{\Delta n} (M+1) \cdot C}.$$

Повреждение в блоках согласно энергетическому критерию разрушения вычислено так:

$$D_{б э.к.} = R \sum_{i=1}^K W_{r i}^* \cdot n_i,$$

где  $R$  и  $\alpha$  – константы материала, численные значения которых приведены в [9];

$W_{r i}^*$  – рассеянная за цикл нагружения энергия:

$$W_{r i}^* = K_\phi \cdot \sigma_{a i} \cdot \varepsilon_{a r i}^*, \quad (5)$$

где  $K_\phi$  – коэффициент формы петли гистерезиса.

Повреждение на переходе с амплитуды  $\sigma_{a1}$  на амплитуду  $\sigma_{a2}$  при расчете согласно энергетическому критерию может быть выражено в виде интеграла

$$D_{п э.к.} = R \int_0^{\Delta n} W_r^\alpha dn; \quad W_r = K_\phi \cdot \sigma_a \cdot \varepsilon_{a r}.$$

Амплитуда остаточной деформации между ступенями изменяется согласно выражению (1). Тогда рассеянная энергия на переходе составит

$$W_r = K_\phi \cdot \sigma_a \cdot \varepsilon_{a r 2}^* \cdot \left( \frac{\sigma_a}{\sigma_{a2}} \right)^{\frac{1}{c}}.$$

Преобразовав последнее выражение с учетом (5), получим

$$W_r = W_{r2}^* \cdot \left( \frac{\sigma_a}{\sigma_{a2}} \right)^{\frac{1}{c}+1}.$$

Выражение для повреждения с учетом (4) после решения интеграла примет вид

$$D_{п.э.к.} = \frac{R \cdot W_{r2}^* \alpha \cdot \left( \sigma_{a2}^{\alpha \left( \frac{1}{c} + 1 \right) + 1} - \sigma_{a1}^{\alpha \left( \frac{1}{c} + 1 \right) + 1} \right)}{\frac{\Delta \sigma_a}{\Delta n} \cdot \left( \alpha \left( \frac{1}{c} + 1 \right) + 1 \right) \cdot \sigma_{a2}^{\alpha \left( \frac{1}{c} + 1 \right)}}.$$

Результаты расчета согласно энергетическому критерию разрушения и гипотезе линейного суммирования приведены на рис. 11, 12.

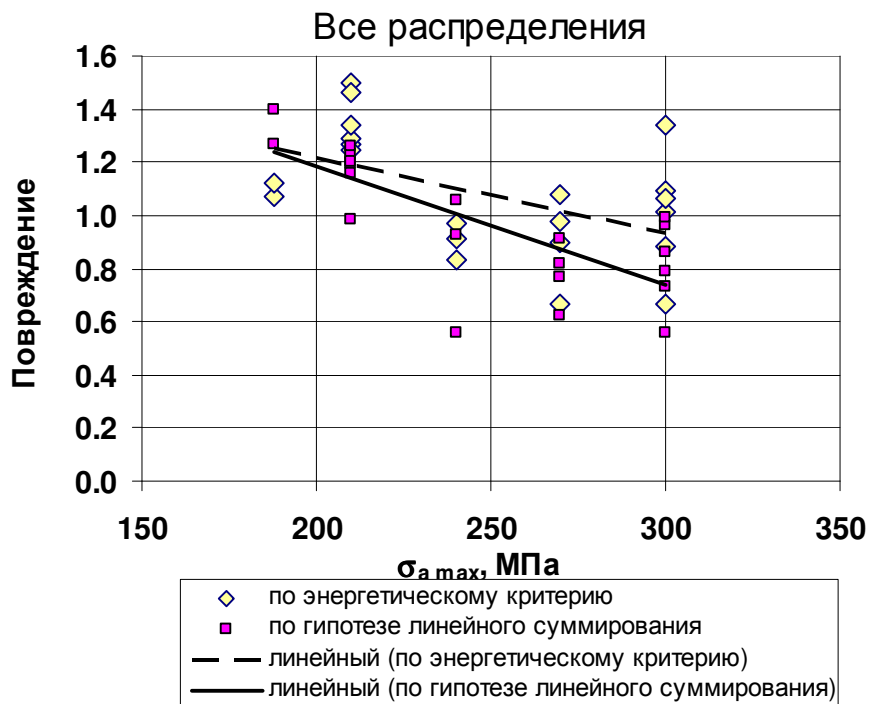


Рисунок 11 – Накопленные до момента разрушения повреждения (сводный по всем законам распределения)

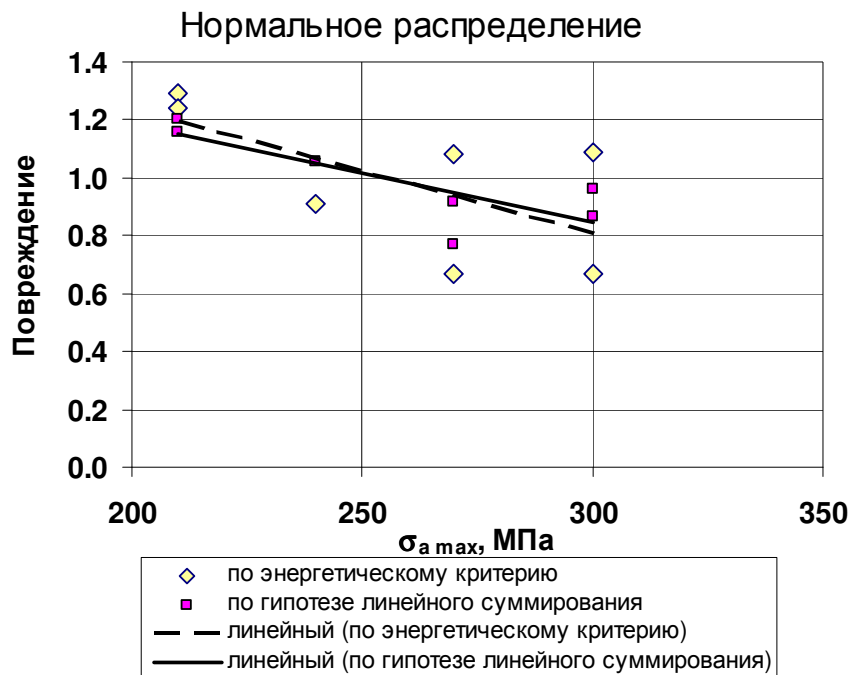
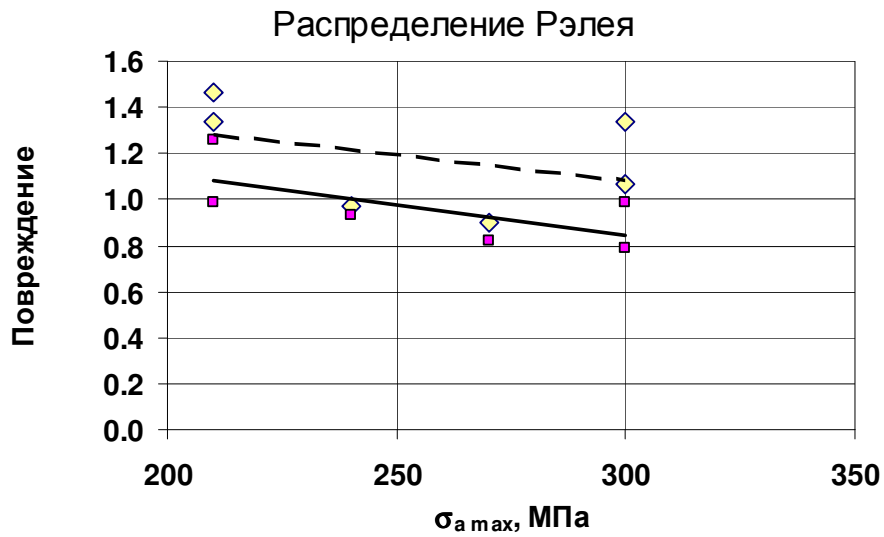
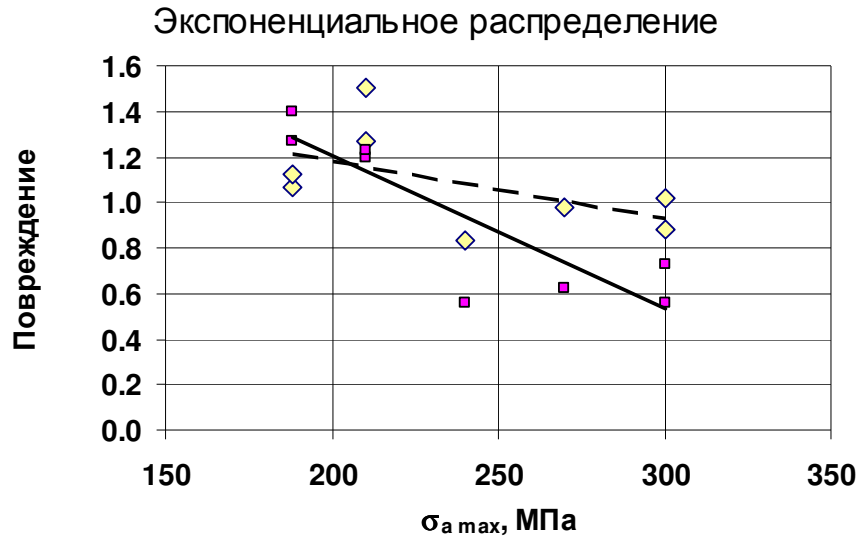


Рисунок 12 – Накопленные до момента разрушения повреждения

Повреждение по энергетическому критерию разрушения для отдельных распределений и по всей совокупности близко либо больше 1, что обеспечивает расчет долговечности в запас. Среднее значение повреждения составило 1,08.

Повреждение по гипотезе линейного суммирования в среднем также близко к единице, но для программ нагружения с большими максимальными амплитудами напряжений систематически меньше 1 и достигает величины 0,6, что приводит к ошибке при расчете долговечности до 1,7 раз не в запас. Причем ошибка возрастает при увеличении неравномерности числа циклов на ступенях в блоке.

### Выводы

Установлено, что среднее значение амплитуды остаточной деформации на ступени зависит как от уровней нагрузки, так и от вида распределения нагрузок в блоке. При этом среднее значение амплитуды остаточной деформации на максимальной ступени в блоке может как совпадать, так и отличаться от среднего значения при регулярном нагружении в зависимости от вида распределения.

Накопленное повреждение для программ нагружения с большими максимальными амплитудами напряжений, рассчитанное по гипотезе линейного суммирования, приводит к систематическому отличию по долговечности не в запас, достигающему 1,7 раза.

Определение накопленного повреждения по энергетическому критерию разрушения приводит к расчету долговечности в запас во всем исследованном диапазоне в среднем в 1,1 раза.

### Список использованных источников

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

2. Фомичев П.А. Энергетический метод расчета долговечности при нерегулярном нагружении. Сообщение 2. Долговечность при программном нагружении / П.А. Фомичев // Пробл. прочности. - 1995. - №8. - С. 3-11.

3. Фомичев П.А. Локальное деформирование материала при программном нагружении в условиях сложного напряженного состояния / 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.

4. 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 им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2 (53). – Х., 2008. – С. 24 – 34.

5. Тейлор Дж. Нагрузки, действующие на самолет: пер. с англ. / Дж. Тейлор. – М.: Машиностроение, 1971. – 371 с.

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

7. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / В.П. Когаев. – М.: Машиностроение, 1977. – 233 с.

8. Фомичев П.А. Изменение амплитуды пластической деформации при регулярном и программном мягком нагружении сталей / П.А. Фомичев, И.Ю. Трубочанин // Проблемы прочности. – 1991, №2. С. 39 - 44.

9. Третьяков А.С. Циклические деформационные и усталостные характеристики сплава Д16АТ при асимметричном мягком регулярном нагружении / 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.

*Поступила в редакцию 12.12.2009 г.*

*Рецензент: канд. техн. наук, проф. Н.И. Семишов,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*