

ЦИКЛИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И УСТАЛОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВА Д16АТ ПРИ АСИММЕТРИЧНОМ МЯГКОМ РЕГУЛЯРНОМ НАГРУЖЕНИИ

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 с концентраторами напряжений имеют расчетные значения долговечности, полученные в рамках энергетического критерия усталостного разрушения при расчете долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию. Этот метод основан на использовании циклических деформационных и усталостных характеристик конструкционных материалов, которые, в свою очередь, зависят от средних напряжений цикла нагружения. В данной работе проведено исследование циклических деформационных и усталостных характеристик сплава Д16АТ при асимметричном мягком регулярном нагружении.

В настоящее время в авиационной промышленности получили широкое распространение технологические методы увеличения долговечности, сводящиеся, главным образом, к созданию сжимающих остаточных напряжений в концентраторах. Такие напряжения снижают локальные средние напряжения последующего циклического нагружения, приводя к увеличению долговечности элемента конструкции. Поэтому в работе особое внимание уделено области сжимающих средних напряжений.

Экспериментальное оборудование. Исследования выполнены с использованием испытательного комплекса на базе машины УММ-01 [3] при асимметричном мягком регулярном нагружении. Под мягким нагружением подразумевают нагружение постоянной амплитудой действующих напряжений.

Измерение деформации в рабочей зоне 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 выполнять выход на заданную величину в течение одного цикла нагружения. В связи с этим каждый эксперимент имеет начальный переходной участок с изменяющейся амплитудой нагружения. Величина этого участка составляет 500...1500 циклов пропорционально заданной

амплитуде нагрузки. Этот участок в числе циклов до разрушения не учитывался и измерения деформаций на нем не проводились.

Все усталостные испытания выполнены при частоте нагружения 12,5 Гц в условиях нормальной температуры (20 °С).

Эксперименты выполнены на гладких образцах из сплава Д16АТ. Общий вид образца показан на рис. 1.

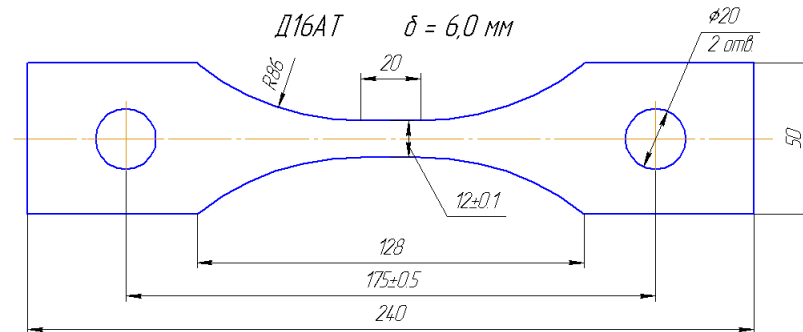


Рисунок 1 – Гладкий образец

Материал образцов – листы толщиной 6 мм. Образцы испытаны при амплитудных нагрузках, соответствующих долговечности $7 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^5$ циклов до разрушения, для следующего ряда положительных средних напряжений: 250, 200, 160, 110, 0 МПа и отрицательных средних напряжений: 25, 50, 100, 150, 200 МПа.

Определение долговечности образцов. Зависимость долговечности гладких образцов от амплитуд напряжений для различных значений средних напряжений показана на рис. 2 в логарифмических координатах. Это позволяет аппроксимировать полученные результаты линейными функциями с использованием метода наименьших квадратов.

Тогда уравнение связи долговечности с амплитудой напряжений может быть представлено в виде

$$N \cdot \sigma_a^M = C, \quad (1)$$

где N – число циклов до разрушения образца;

σ_a – амплитуда действующих напряжений;

M, C – параметры уравнения.

Существенные разбросы значений долговечности от образца к образцу в области сжимающих средних напряжений могут быть объяснены использованием дополнительных накладок для предотвращения потери устойчивости испытываемых плоских образцов.

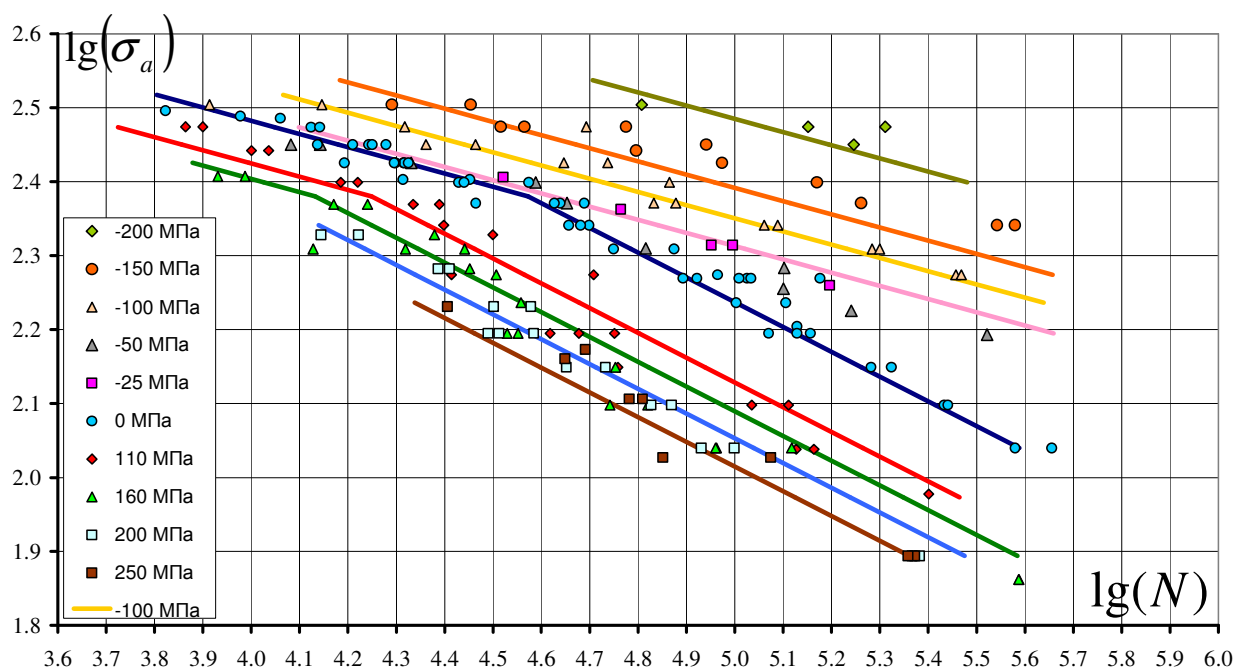


Рисунок 2 – Зависимость долговечности от амплитуды напряжений при различных средних напряжениях

В результате установлено:

- положительные средние напряжения приводят к систематическому уменьшению долговечности, отрицательные – к увеличению;

- в области положительных средних напряжений зависимости долговечности от амплитуды напряжений имеют перелом в районе 240 МПа. Однако в области отрицательных средних напряжений этот перелом отсутствует. Причем отсутствие перелома наблюдается уже при весьма малых сжимающих средних напряжениях (25, 50 МПа).

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

Виды аппроксимирующих уравнений и методика обработки экспериментальных результатов аналогичны предложенным в работе [4].

Для каждого испытанного образца экспериментально получены зависимости остаточной деформации от наработки и определены величины средних значений остаточной деформации

$$\varepsilon_{ar}^* = \frac{1}{N} \cdot \int_0^N \varepsilon_{ar}(n) dn, \quad (2)$$

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

Измерения величин остаточных деформаций проведены для всех серий экспериментов, кроме испытаний при отрицательных средних напряжениях, равных 150, 200 МПа, и части испытаний при 100 МПа. Это вызвано тем, что на образцы устанавливались накладки для предотвращения потери устойчивости, которые не позволяли выполнить установку тензомера.

В процессе нагружения с постоянной амплитудой напряжений сплав Д16АТ проявляет свойства циклического упрочнения, показанные на рис. 3.

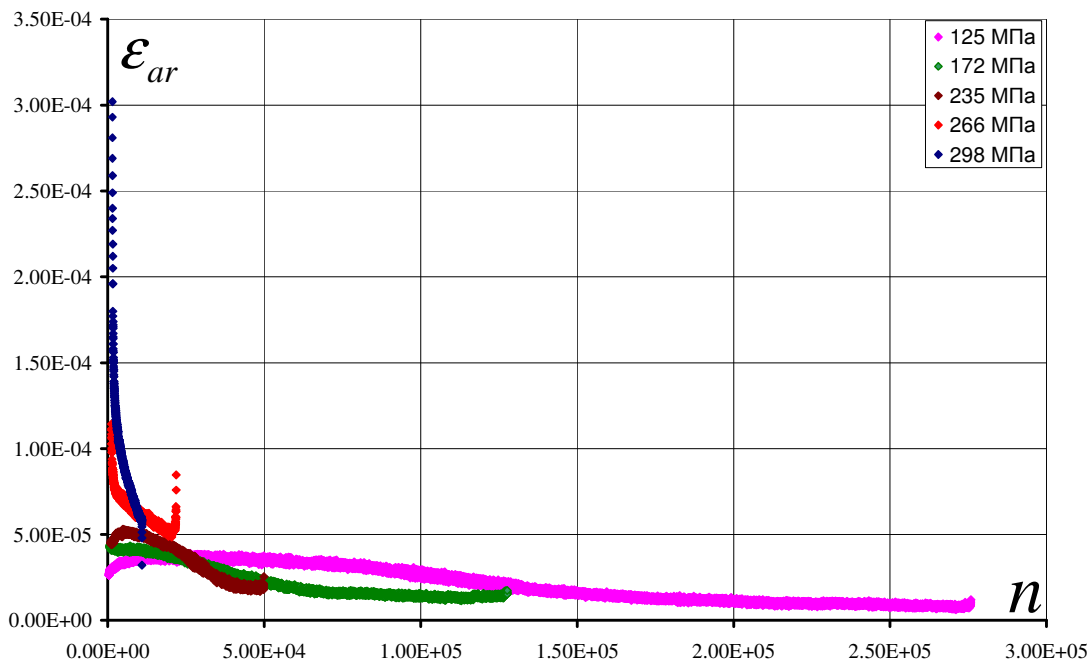


Рисунок 3 – Циклическое упрочнение Д16АТ с наработкой при симметричном нагружении.

Зависимость средних значений амплитуд остаточных деформаций от амплитуд напряжений характеризует основная диаграмма циклического деформирования, показанная в логарифмических координатах на рис. 4. В этих координатах зависимость может быть аппроксимирована линейной функцией, тогда

$$\varepsilon_{ar}^* = \left(\frac{\sigma_a}{K_m} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (3)$$

где K_m , m – параметры уравнения.

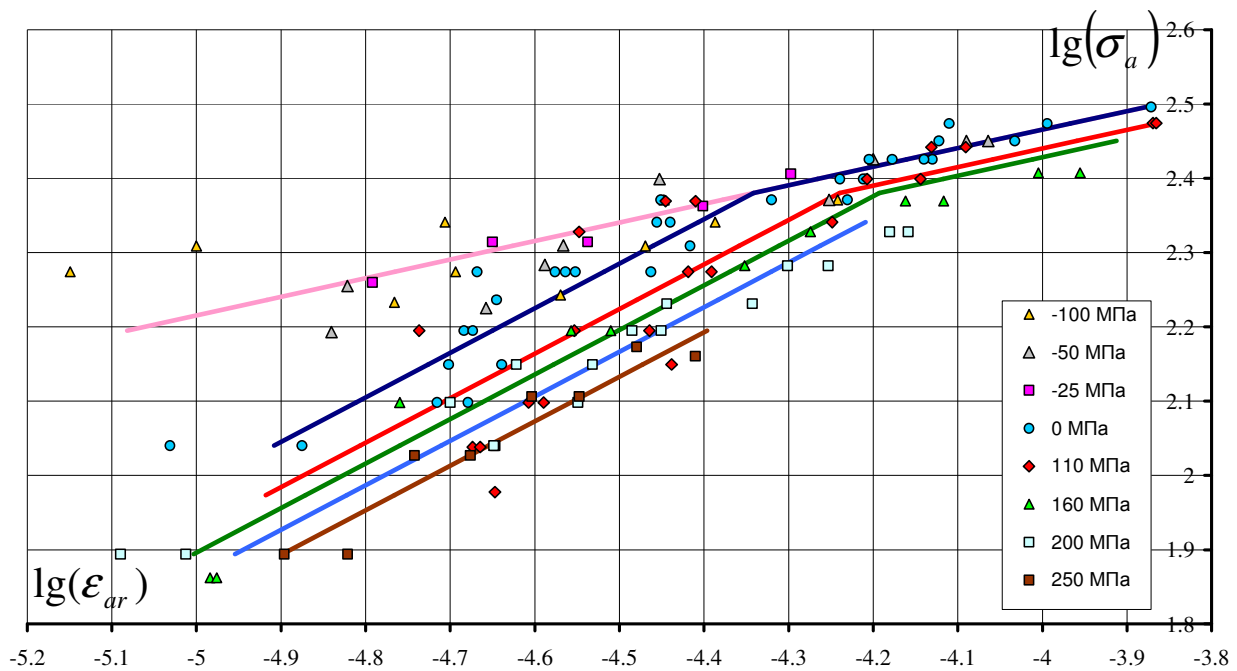


Рисунок 4 – Зависимость средних значений амплитуд остаточных деформаций от амплитуд напряжений при различных средних напряжениях

В результате установлено:

- положительные средние напряжения приводят к систематическому увеличению средней остаточной деформации;
- в области положительных средних напряжений зависимость средней остаточной деформации от амплитуды напряжений имеет перелом в районе 240 МПа. Однако в области отрицательных средних напряжений этот перелом отсутствует. Причем отсутствие перелома наблюдается также при весьма малых сжимающих средних напряжениях (25, 50 МПа);
- отрицательные средние напряжения не влияют на величину средней остаточной деформации выше точки перелома и приводят к уменьшению остаточной деформации ниже точки перелома.

Тангенсы углов наклонов зависимостей остаточной деформации от амплитуды напряжений для различных средних напряжений близки. Поэтому приняты единые тангенсы для верхнего и нижнего участков зависимостей для различных средних напряжений цикла нагружения. Принято также, что при отрицательных средних напряжениях значения остаточных деформаций не зависят от величины средних напряжений и равны остаточным деформациям при симметричном нагружении, определенным по тангенсу верхнего участка.

В результате обработки результатов экспериментов получены значения K_m при различных σ_m . Зависимость отношения параметров

основной диаграммы циклического деформирования при асимметричном нагружении от отношения средних напряжений к напряжению временного сопротивления показана на рис. 5.

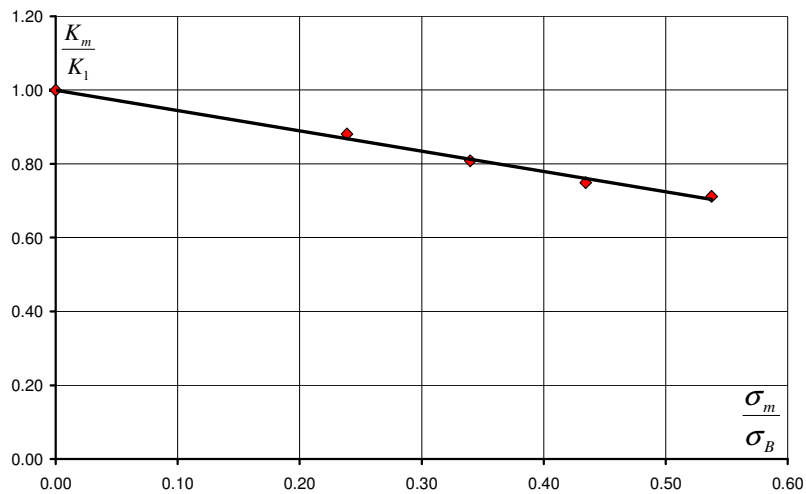


Рисунок 5 – Зависимость K_m от асимметрии нагружения ниже точки перелома

Зависимость параметров основной диаграммы от асимметрии нагружения ниже точки перелома аппроксимирована линейной функцией и имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma_m < 0, \quad K_m = K_2; \quad m = m_2; \\ \sigma_m \geq 0, \quad K_m = K_1 \cdot \left(1 - \nu \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_b} \right); \quad m = m_1, \end{aligned} \quad (4)$$

где K_1, K_2 – параметры основной диаграммы при симметричном нагружении для участков ниже и выше точки перелома соответственно; ν – параметр уравнения.

Если амплитуда напряжения превышает напряжение точки перелома σ_{arp} , то необходимо определить остаточную деформацию ε_{arp} , соответствующую σ_{arp} для заданного среднего напряжения σ_m , а для нахождения амплитуды остаточной деформации на верхнем участке диаграммы использовать степенное уравнение

$$\varepsilon_{ar}^* = \varepsilon_{arp} \cdot \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{arp}} \right)^{\frac{1}{m_2}}, \quad (5)$$

Где $\varepsilon_{arp} = \left(\frac{\sigma_{ap}}{K_m} \right)^{\frac{1}{m}}$.

Это следует из параллельного смещения основных диаграмм с увеличением среднего напряжения.

Определение величин рассеянной энергии. Для каждого испытанного образца определена величина рассеянной энергии за цикл нагружения

$$W_c = K_{\phi} \cdot \sigma_a \cdot \varepsilon_{ar}^* \quad (6)$$

где K_{ϕ} – коэффициент формы петли гистерезиса, который принят равным 3.

Зависимость рассеянной энергии от долговечности для различных значений средних напряжений показана на рис. 6. Зависимость представлена в логарифмических координатах, что позволяет аппроксимировать полученные результаты линейными функциями.

Тогда

$$N = \frac{1}{R_m \cdot W_c^{\alpha}}, \quad (7)$$

где R_m , α – параметры уравнения.

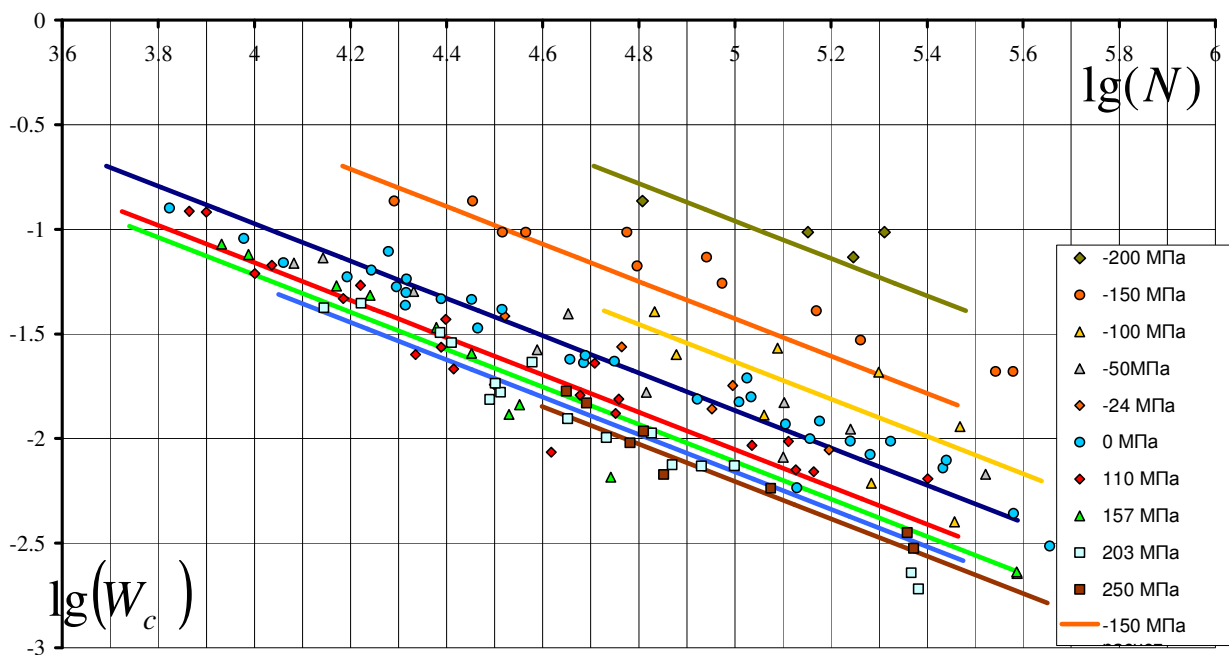


Рисунок 6 – Зависимость рассеянной энергии от долговечности для различных значений средних напряжений

В результате установлено:

- положительные средние напряжения приводят к систематическому увеличению рассеянной энергии, отрицательные – к уменьшению;

- тангенсы углов наклонов зависимостей от средних напряжений близки, что позволяет принять единые тангенсы для различных средних напряжений.

В результате обработки результатов экспериментов получены значения R_m при различных σ_m . Зависимость параметров R_m при асимметричном нагружении от отношения средних напряжений к напряжениям временного сопротивления показана на рис. 7.

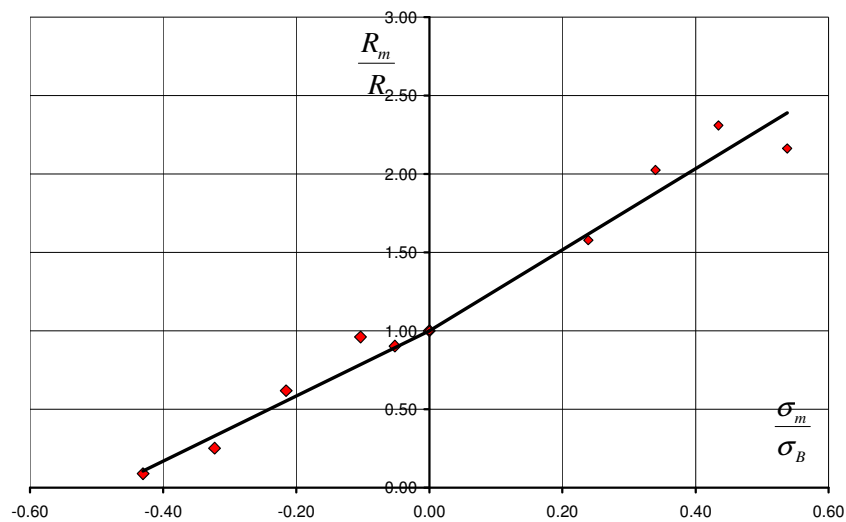


Рисунок 7 – Зависимость R_m от асимметрии нагружения

Зависимость параметра R_m от асимметрии нагружения в области полученных экспериментальных данных может быть аппроксимирована двумя линейными функциями – для растяжения и сжатия, и имеет следующий вид:

$$R_m = R \cdot \left(1 + r_{p(c)} \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_b} \right), \quad (8)$$

где r_p – параметр уравнения для положительных средних напряжений;

r_c – параметр уравнения для отрицательных средних напряжений.

Коэффициенты уравнений (1) - (8), необходимые для расчета циклических деформационных характеристик материала Д16АТ, показаны в табл. 1.

Таблица 1 – Коэффициенты, характеризующие циклические деформационные и усталостные свойства сплава Д16АТ

$K_1, \text{МПа}$	m_1	$K_2, \text{МПа}$	m_2	ν	K_ϕ	α	R	r_p	r_c
96631	0,6	2921	0,25	0,55	3,0	1,12	$1,23 \cdot 10^{-3}$	2,6	2,1

Сплошные линии, показанные на рисунках 2, 4, 6, построены с использованием полученных коэффициентов по формулам (3), (6), (7).

Необходимо отметить, что область применения предложенных зависимостей соответствует зоне перехода от малоциклового к многоциклового и собственно многоциклового усталости, для которых характерны замкнутые петли гистерезиса и несущественно одностороннее накопление деформаций.

Выводы

В результате выполненных экспериментальных исследований получены коэффициенты, характеризующие циклические деформационные и усталостные свойства сплава Д16АТ. Эти параметры необходимы для расчетов долговечности элементов конструкций с концентраторами напряжений по локальному напряженно-деформированному состоянию.

Список использованных источников

1. Троценко В.Т. Энергетический критерий усталостного разрушения / В.Т. Троценко, 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 // Пробл. прочности. – 1995. – №8. – С. 3-11.
3. Фомичев П.А. Методика экспериментальных исследований циклических деформационных и усталостных характеристик конструкционных материалов / П.А. Фомичев, А.С. Третьяков, А.А. Черных // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та. – Вып. 2 (53). Х., 2008. – С. 24-34.
4. 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.

Поступила в редакцию 18.09.09.

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