

Долговечность элементов конструкций при регулярном и программном нагружениях после предварительной перегрузки

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Предложен расчетный метод, позволяющий получать зависимость долговечности элемента конструкции от величины предварительной перегрузки при регулярном и программном нагружениях. Приведено сопоставление расчетов по предложенному методу с результатами проведенных экспериментальных исследований долговечности лабораторных образцов после предварительной перегрузки.

Ключевые слова: долговечность элементов конструкций, коэффициент концентрации, циклическое нагружение, локальное напряженно-деформированное состояние, предварительная статическая перегрузка, статические и ресурсные испытания самолетов.

В процессе создания, производства и сертификации авиационной техники проводят статические и ресурсные испытания, для которых специально изготавливают два отдельных планера самолета. Совмещение статических и ресурсных испытаний на одном экземпляре самолета позволит значительно снизить материальные и трудовые затраты, сократить общее время запуска самолета в серийное производство.

Совмещение испытаний заключается в проведении сначала статических испытаний на одной консоли крыла, затем ресурсных – на другой. При статическом нагружении одной консоли вторая консоль будет нагружена какой-либо частью уравновешивающей статической нагрузки. Поскольку уровни напряжений такой нагрузки превышают напряжения при последующих ресурсных испытаниях, то эту нагрузку также называют предварительной статической перегрузкой.

Экспериментально установлено, что предварительная перегрузка влияет на долговечность конструкции при последующих ресурсных испытаниях [1, 2]. Причина этого связана с возникающими после перегрузки остаточными напряжениями и деформациями в концентраторах напряжений, которые изменяют условия нагружения материала в зонах концентрации напряжений.

Для реализации совмещения испытаний необходимо установить связь между величиной предварительной перегрузки и изменением долговечности при последующем циклическом нагружении.

Учет остаточных напряжений при расчете долговечности элементов конструкции путем корректировки кривой усталости предложен в работе [3] для случая регулярного нагружения, однако применение данной модели требует знания кривой усталости элемента конструкции без остаточных напряжений, испытанного с такими же параметрами нагружения. Расчету долговечности конструкций при нерегулярном нагружении при наличии остаточных напряжений в литературе уделено недостаточно внимания.

В данной статье предложен метод расчета долговечности элементов конструкций при регулярном и нерегулярном программном нагружениях после предварительной перегрузки, выполнено сопоставление расчетов с результатами проведенных экспериментальных исследований долговечности образцов с концентратором напряжений.

Разработанный метод относится к методам расчета долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию и использует энергетический критерий усталостного разрушения. Метод включает модель расчета остаточных напряжений и деформаций, возникающих после предварительной перегрузки, модель расчета локального напряженно-деформированного состояния в концентраторе при последующем циклическом нагружении, а также модель расчета накопленного повреждения и долговечности.

В качестве исходных данных в методе использованы циклические деформационные и усталостные характеристики материала [4, 5] вместе с его моделями монотонного и циклического деформирования [6, 7], полученные в результате испытаний гладких образцов при растяжении-сжатии.

Для расчета упругопластических напряжений и деформаций в концентраторе напряжений применено уравнение Нейбера [8] с поправочной функцией F_M

$$K_\sigma \cdot K_\varepsilon = K_T^2 \cdot F_M, \quad (1)$$

где

$$K_\sigma = \frac{\sigma}{\sigma_H}, \quad K_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_H};$$

σ, ε – локальные упругопластические напряжения и деформации;

σ_H, ε_H – номинальные напряжения и деформации;

K_T – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Поправочная функция F_M впервые предложена Н.А. Махутовым [9]. Она зависит от действующих напряжений, теоретического коэффициента концентрации, диаграммы деформирования. В работе [10] предложено использовать модифицированную функцию, которая может быть определена в результате упругопластического расчета напряженно-деформированного состояния в опасной точке рассматриваемой зоны конструкции методом конечных элементов (МКЭ) для конкретных условий нагружения по следующему выражению:

$$F_M = \frac{\sigma^{МКЭ} \varepsilon^{МКЭ}}{K_T^2 \sigma_H \varepsilon_H}, \quad (2)$$

где $\sigma^{МКЭ}, \varepsilon^{МКЭ}$ – упругопластические напряжения и деформации, определенные с помощью МКЭ.

Уравнение (1) может быть представлено в виде

$$\sigma \cdot \varepsilon = K_T^2 \cdot \sigma_H \cdot \varepsilon_H \cdot F_M. \quad (3)$$

Расчет остаточных напряжений и деформаций. Схема локального деформирования материала в концентраторе напряжений при предварительной перегрузке $\sigma_{H\text{пер}}$ и разгрузке показана на рис. 1.

Максимальное локальное напряжение $\sigma_{\text{пер}}$ предварительной перегрузки найдем из выражения (3) с учетом деформирования на начальном участке нагружения по диаграмме монотонного деформирования [6]

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K_c} \right)^{\frac{1}{m_c}}, \quad (4)$$

где E – модуль упругости материала;
 K_c и m_c – параметры материала.

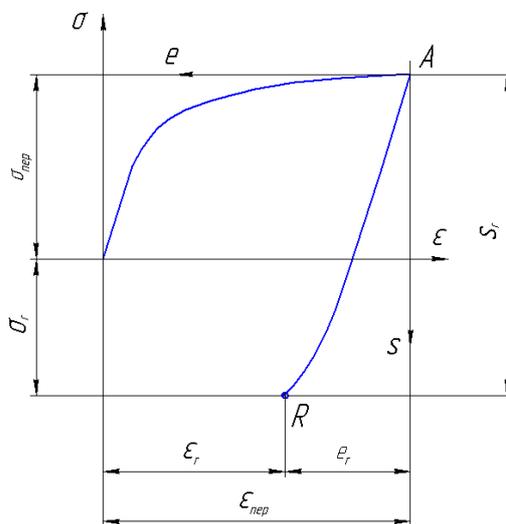


Рис. 1. Деформирование материала в концентраторе напряжений при действии предварительной перегрузки и разгрузки

В качестве номинальных напряжений в уравнении (3) задаем напряжения предварительной перегрузки $\sigma_{н\ nep}$. Поправочную функцию F_M рассчитываем по (2) с помощью МКЭ с учетом диаграммы монотонного деформирования.

Остаточные напряжения σ_r и деформации ε_r при разгрузке после предварительной перегрузки (точка R на рис. 1) определим по зависимости

$$\sigma_r = \sigma_{nep} - s_r, \quad \varepsilon_r = \varepsilon_{nep} - e_r,$$

где ε_{nep} – максимальные деформации при предварительной перегрузке.

Размахи напряжений s_r и деформаций e_r найдем из уравнения Нейбера, записанного через величины в координатах разгрузки « s - e » при помещении начала координат в точку A (рис. 1), т. е.

$$s \cdot e = K_T^2 s_n e_n \cdot F_M. \quad (5)$$

Деформирование при разгрузке из максимальных напряжений происходит по уравнению кривой разгрузки

$$e = \frac{s}{E} + \left(\frac{s}{p_p} \right)^{\gamma_p}, \quad (6)$$

где p_p и γ_p – параметры материала, установленные по экспериментальной кривой разгрузки.

В качестве номинальных напряжений в уравнении (5) задаем напряжения предварительной перегрузки, т.е. $s_H = \sigma_{H\text{пер}}$. Поправочную функцию F_M рассчитываем по (2) с помощью МКЭ с учетом деформирования по кривой разгрузки (6).

Определение параметров локальных циклов деформирования материала в концентраторе напряжений при последующем регулярном и программном нагружениях. Циклическое нагружение элемента конструкции задано амплитудными и средними номинальными напряжениями $\sigma_{a n i}$ и $\sigma_{m n i}$ (рис. 2). Индексом « i » обозначен номер ступени нагружения в блоке программы.

Рассмотрим подробнее регулярное нагружение. Схема локального деформирования материала в концентраторе напряжений показана на рис. 3. Номер цикла обозначен k .

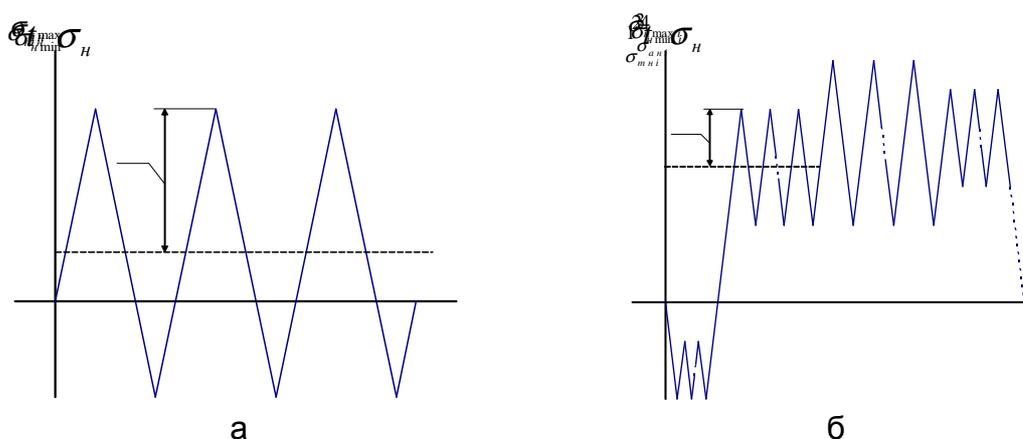


Рис. 2. Циклическое нагружение:
а – регулярное нагружение; б – нерегулярное программное нагружение

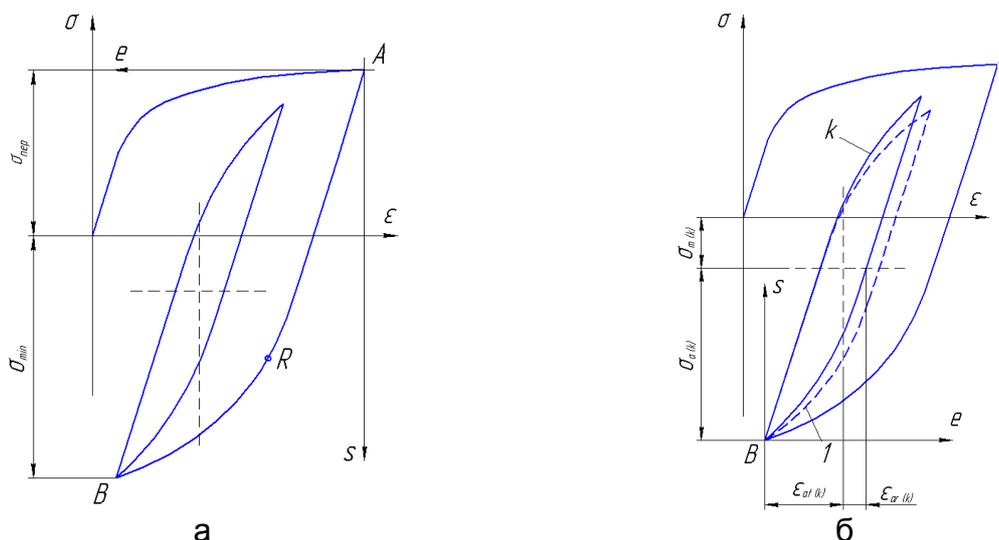


Рис. 3. Циклическое деформирование материала в концентраторе напряжений после предварительной перегрузки

При приложении циклической нагрузки деформирование материала начинается из точки R , формируются петли гистерезиса. Точка B , показанная на

рис. 3,а, соответствует минимальным напряжениям и деформациям циклического нагружения. Участок деформирования от точки R до точки B представляет собой продолжение кривой разгрузки. Тогда искомое минимальное локальное напряжение, соответствующее точке B , определим по выражению

$$\sigma_{min} = \sigma_{nep} - s_p.$$

Размах напряжений s_p найдем из уравнения (5) с учетом (6). Размах номинальных напряжений в уравнении (5) соответствует $s_H = \sigma_{H nep} - 2\sigma_{aH}$.

Для каждого k -го цикла (рис. 3,б) проводим расчет амплитуд локальных напряжений σ_a и полных деформаций ε_{at} из уравнения Нейбера (3), записанного в виде

$$\sigma_a \cdot \varepsilon_{at} = K_T^2 \sigma_{aH} \varepsilon_{atH} \cdot F_M, \quad (7)$$

где ε_{atH} – амплитуда номинальной деформации.

Связь амплитудных напряжений и деформаций задана диаграммой циклического деформирования [7]

$$\varepsilon_{at} = \frac{\sigma_a}{E} + \varepsilon_{ar}(1+t), \quad (8)$$

где $t = \frac{1}{2^{\gamma-1} - 1}$, $\gamma = 2 + h \cdot \frac{\varepsilon_{ar}}{\varepsilon_{at}}$;

h – параметр материала;

ε_{ar} – амплитуда остаточной деформации.

Амплитуда остаточной деформации задана выражением [7]

$$\varepsilon_{ar} = \varepsilon_{ar}^* \cdot f(\sigma_a, \sigma_m, x),$$

где $\varepsilon_{ar}^* = \left(\frac{\sigma_a}{K_m(\sigma_m)} \right)^{\frac{1}{m}}$;

$f(\sigma_a, \sigma_m, x)$ – функция упрочнения (разупрочнения) материала;

x – относительная наработка, равная $x = n/N$;

N – долговечность материала при регулярном нагружении амплитудой σ_a и при средних напряжениях σ_m ;

K_m – коэффициент, учитывающий влияние средних напряжений.

Подробно расчет коэффициента K_m рассмотрен в [4].

Поправочную функцию F_M рассчитываем по (2) с помощью МКЭ с учетом диаграммы циклического деформирования (8).

Так как диаграмма циклического деформирования зависит от амплитудных и средних напряжений, то их расчет проводим итерационно с учетом формулы

$$\sigma_m = \sigma_{min} + \sigma_a.$$

В случае программного нагружения фиксируемая точка B (рис. 3,а) будет являться нижней вершиной петли гистерезиса огибающего цикла, т. е. цикла с наибольшей амплитудой напряжений в блоке нагружения. Расчет локальных

напряжений и деформаций, соответствующих данной точке, проводим так же, как и при регулярном нагружении. Схема последующего циклического деформирования по контуру огибающего цикла с формированием петель гистерезиса вложенных циклов (циклов с меньшей амплитудой напряжений) показана на рис. 4.

После нахождения параметров петли гистерезиса огибающего цикла по выражению (7) определим фиксируемые точки реверса вложенных циклов. Эти точки принадлежат контуру петли огибающего цикла (точки *B, D, F, G* на рис. 4). Их координаты могут быть найдены из (5) с учетом деформирования по контуру огибающего цикла. Контур петли гистерезиса задан выражением [7]

$$e = \frac{s}{E} + 2\varepsilon_{ar}(1+t) \left(\frac{s}{2\sigma_a} \right)^\gamma. \quad (9)$$

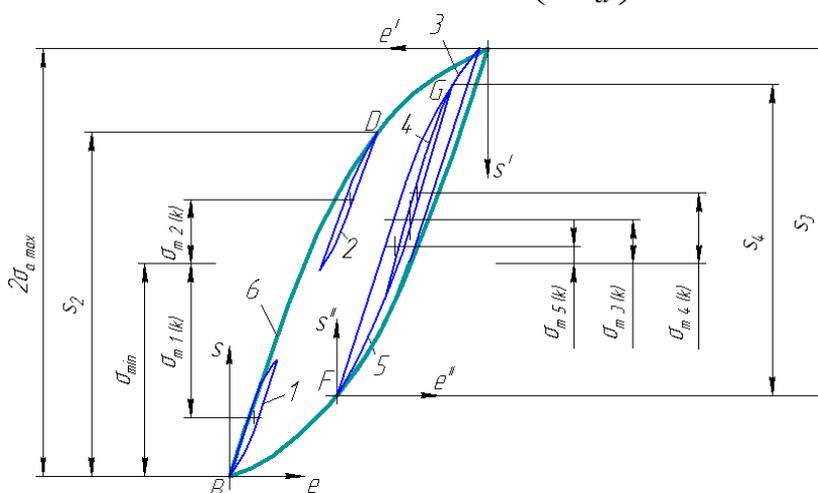


Рис. 4. Огибающий и вложенные циклы деформирования в концентраторе напряжений

Амплитудные напряжения находим из уравнения (7) с учетом изменения средней амплитуды остаточной деформации при программном нагружении по зависимости [7]

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

где $\varepsilon_{ar i-1}^*$ – амплитуда остаточной деформации на предыдущей ступени блока нагружения;

$\varepsilon_{ar i}^*$ – средняя амплитуда остаточной деформации на текущей *i*-й ступени.

Средние напряжения определим с учетом координат фиксируемых точек реверса, например, для цикла №2 на рис. 4 выражение будет записано так:

$$\sigma_{m2} = \sigma_{min} + s_2 - \sigma_{a2},$$

где σ_{a2}, σ_{m2} – амплитудные и средние напряжения данного цикла;

s_2 – размах напряжений, определяющий положение фиксируемой точки реверса данного вложенного цикла.

Рассчитанные параметры петель гистерезиса позволяют для каждого цикла рассчитать амплитуды остаточной деформации в концентраторе напряжений в момент равенства номинальных напряжений своему среднему значению (рис. 5)

$$\varepsilon_{ar\kappa} = \varepsilon_{at} - e_r.$$

Величину деформации e_r находим из (5) с учетом деформирования по контуру петли гистерезиса (9). В качестве номинальных напряжений в уравнении (5) задаем амплитудные напряжения цикла, т.е. $s_H = \sigma_{ani}$. Поправочную функцию F_M рассчитываем по (2) с помощью МКЭ с учетом диаграммы циклического деформирования (8).

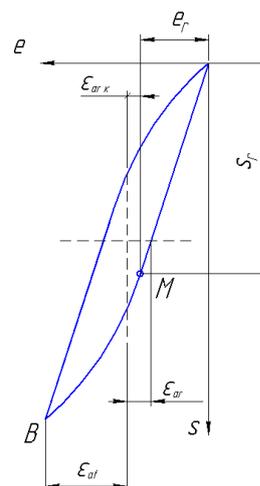


Рис. 5. Амплитуда остаточной деформации в концентраторе напряжений

Расчет накопленного повреждения и долговечности. Согласно энергетическому критерию усталостного разрушения [11, 12] расчет накопленного повреждения проводим по величине рассеянной энергии по выражениям:

- при регулярном нагружении

$$D = \sum_{k=1}^N R_{m(k)} \cdot W_{r(k)}^\alpha;$$

- при программном нагружении

$$D = \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^{n_{cm}} \sum_{k=1}^{n_i} R_{mji(k)} \cdot W_{rji(k)}^\alpha,$$

- где k – номер цикла деформирования;
 i – номер ступени в блоке программы испытаний;
 j – номер блока нагружения;
 n_i – число циклов на ступени нагружения;
 n_{cm} – число ступеней в блоке нагружения;
 $W_{r(k)}$ – энергия, рассеиваемая за цикл нагружения [12]

$$W_{r(k)} = K_\phi \cdot \sigma_{a(k)} \cdot \varepsilon_{ar\kappa(k)};$$

$R_{m(k)}$ – коэффициент, учитывающий асимметрию цикла нагружения [12]

$$R_{m(k)} = R \left(1 + r \cdot \frac{\sigma_{m(k)}}{\sigma_e} \right);$$

- R, r и α – параметры материала;
 K_ϕ – коэффициент формы петли гистерезиса;
 N, T – число циклов (блоков) нагружения до разрушения.

Суммирование накопленного повреждения проводим поциклово. Разрушению соответствует значение $D = 1$. Под разрушением понимаем возникновение макротрещины длиной 0,2 мм.

Экспериментальное исследование долговечности лабораторных образцов после предварительной перегрузки. Образцы с концентратором напряжений, показанные на рис. 6, испытаны при регулярном и программном нагружении.

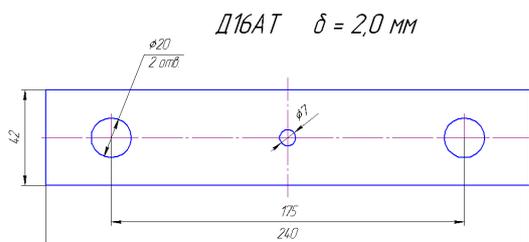


Рис. 6. Образец с концентратором напряжений

Материал образцов – алюминиевый сплав Д16АТ, лист толщиной 2,0 мм. Теоретический коэффициент концентрации напряжений в данных образцах для сечения “брутто” составил $K_T = 3,1$.

Величины предварительной растягивающей перегрузки составили 275 и 300 МПа. Для оценки влияния предварительной перегрузки на долговечность также выполнены

испытания без перегрузки. В результате циклических испытаний получены значения долговечности до возникновения трещины длиной 0,2 мм.

Регулярное нагружение происходило по отнулевому циклу. Результаты испытаний показаны на рис. 7 в виде зависимости «максимальное номинальное напряжение $\sigma_{n\ max}$ – число циклов до возникновения трещины N » в двойных логарифмических координатах.

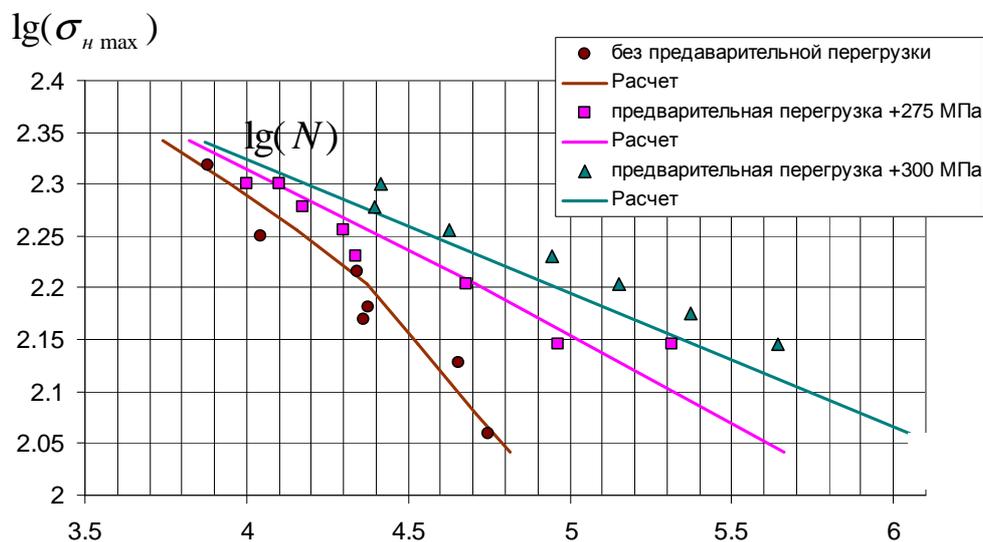


Рис. 7. Долговечность образцов с концентратором напряжений при регулярном нагружении после предварительной перегрузки

Предварительная перегрузка 275 МПа привела к увеличению долговечности от 1,2 до 4,5 раза в рассмотренном диапазоне нагрузок. В среднем увеличение долговечности составило 2,5 раза.

Предварительная перегрузка 300 МПа привела к увеличению долговечности от 2 до 15 раз, в среднем – 5,6 раза.

Данные по увеличению долговечности при регулярном нагружении при наличии остаточных напряжений, созданных после предварительной перегрузки, согласуются с результатами, приведенными в работе [13] для элемента конструкции с отверстиями для перетекания топлива, остаточные напряжения в которых созданы технологическими методами упрочнения отверстий.

Расчетные кривые на рис. 7, полученные по предлагаемому методу, хорошо согласуются с экспериментальными. Расчеты выполнены с учетом поправочной функции.

Программное нагружение образцов реализовано при экспоненциальном законе распределения амплитуд напряжений. Расчет ступеней программы нагружения подробно рассмотрен в [5]. Блоки нагружения состояли из 10 ступеней. Суммарное число циклов в блоке составило 6000. Программа нагружения показана на рис. 8 в относительных координатах

$$\bar{\sigma}_{a i} = \frac{\sigma_{a i}}{\sigma_{a \max}}, \quad \bar{n}_i = \frac{n_i}{n_{\bar{\sigma}}},$$

где $\sigma_{a i}$ – амплитуда напряжений на i -й ступени;

$\sigma_{a \max}$ – максимальная амплитуда напряжений в блоке нагружения;

n_i – число циклов нагружения на i -й ступени;

$n_{\bar{\sigma}}$ – число циклов в полном блоке программы испытаний, $n_{\bar{\sigma}} = 6000$.

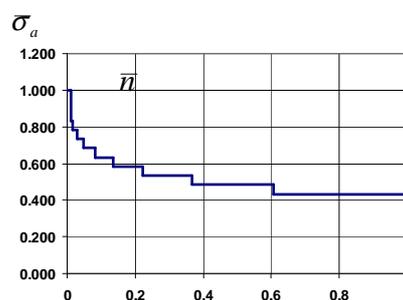


Рис. 8. Блок программы нагружения

Нагружение на максимальной (первой) ступени программы происходило по отнулевому циклу. Средние напряжения последующих циклов меньшей амплитуды соответствовали средним напряжениям циклического нагружения на максимальной ступени.

Результаты экспериментов показаны на рис. 9 в виде зависимости «максимальное номинальное напряжение $\sigma_{n \max}^{(1)}$ в программе нагружения – количество блоков до возникновения трещины $N_{\bar{\sigma}}$ » в двойных логарифмических координатах. Максимальное напряжение $\sigma_{n \max}^{(1)}$ в программе нагружения определяется первой ступенью с максимальной амплитудой напряжений и равно $2\sigma_{a \max}$.

Результаты испытаний при программном нагружении для рассматриваемого диапазона нагрузок не подтверждают такого увеличения долговечности после предварительной перегрузки, как при регулярном нагружении.

На больших уровнях нагружения увеличение долговечности практически отсутствует. Влияние предварительной перегрузки проявляется при снижении величины максимального напряжения максимальной (первой) ступени программы нагружения. Увеличение долговечности на малых уровнях нагружения достигает 2,5 раза.

Следует отметить, что в случае программного нагружения результаты долговечности образцов при двух различных предварительных перегрузках находятся в одной совокупности, хотя при регулярном нагружении после таких перегрузок долговечность отличается до 3 раз.

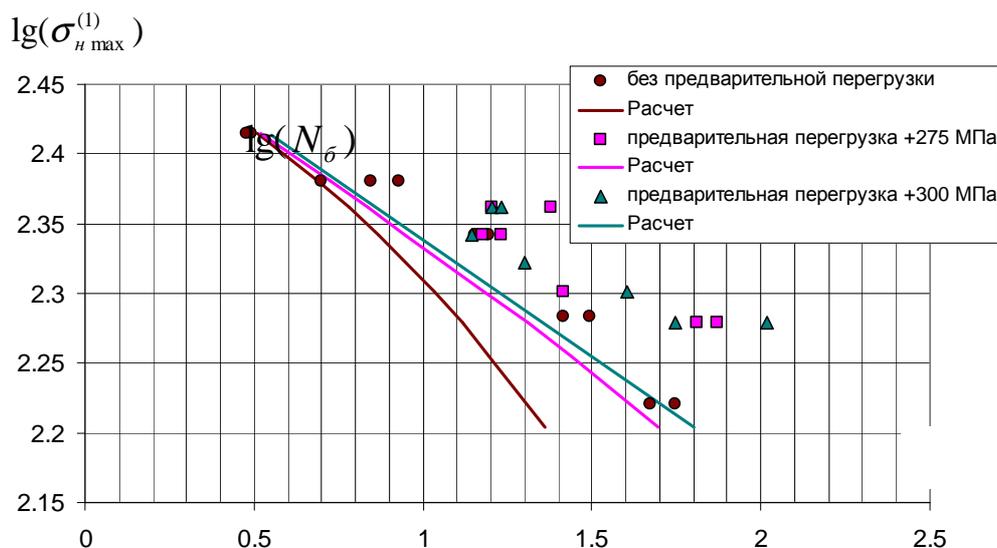


Рис. 9. Долговечность образцов с концентратором напряжений при программном нагружении после предварительной перегрузки

Расчетные кривые на рис. 9, полученные по предлагаемому методу, показывают меньшие значения долговечности, чем в экспериментах, тем самым обеспечивая расчет «в запас» до 2,3 раза. При этом расчеты подтверждают значительно меньшее увеличение долговечности при программном нагружении по сравнению с регулярным после предварительной перегрузки.

Выводы

Предложен метод расчета долговечности элементов конструкций при регулярном и программном нагружении после предварительной перегрузки, который позволяет получить зависимость долговечности от величины перегрузки, необходимую при решении задачи совмещения статических и ресурсных испытаний на одном планере самолета. Данный метод относится к методам расчета долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию и основан на энергетическом критерии усталостного разрушения. В качестве исходных данных при расчете долговечности использованы свойства материала конструкции.

Разработана модель расчета остаточных напряжений и деформаций в концентраторе напряжений, возникающих при разгрузке после предварительной перегрузки

Учтено влияние остаточных напряжений на формирование локальных циклов деформирования материала в концентраторе напряжений при расчете долговечности в случаях как регулярного, так и программного нагружений.

Выполнено сопоставление расчетов долговечности по предложенному методу с результатами проведенных экспериментов при регулярном и программном нагружении образцов с концентратором напряжений после предварительной перегрузки. По результатам испытаний следует отметить, что

при регулярном нагружении увеличение долговечности до возникновения трещины после действия предварительной перегрузки может достигать 15 раз, в то время как при программном нагружении те же величины перегрузки приводят к увеличению лишь в 2,5 раза. Получено удовлетворительное согласование расчетов с экспериментальными данными.

Список литературы

1. Марин, Н.И. Статическая выносливость элементов конструкций [Текст] / Н.И. Марин. – М.: Машиностроение, 1968. – 162 с.
2. Воробьев, А.З. Влияние периодически повторяющихся перегрузок на прочность дюралюминиевой трубы при повторном изгибе [Текст] / А.З. Воробьев // Труды ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского. – Вып. 809. – М.: Бюро научной информации ЦАГИ, 1960. – 9 с.
3. Борисов, С.П. К расчету характеристик сопротивления материалов усталости в зонах концентрации напряжений [Текст] / С.П. Борисов // Научный вестник МГТУ ГА. Сер. Аэродинамика, прочность, поддержание летной годности ВС. – 2005. – С.84-90.
4. 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. 45-53.
5. 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.
6. Черных, А.А. Выбор уравнения для аппроксимации экспериментальных диаграмм деформирования [Текст] / 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. 113-120.
7. 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.
8. Нейбер, Г. Теория концентрации касательных напряжений в призматических телах при произвольной нелинейной зависимости между напряжением и деформацией [Текст] / Г. Нейбер // Прикладная механика. Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер. Е. – 1961. – Т. 28, №4. – С. 71-77.
9. Махутов, Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность [Текст] / Н.А. Махутов. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
10. Гребенюк, Я.В. Прогнозирование долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию элементов конструкций с геометрическими нерегулярностями: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.03; защищена 2004 / Гребенюк Ярослав Владимирович. – Х., 2004. – 204 с.

11. Трощенко, В.Т. Энергетический критерий усталостного разрушения [Текст] / В.Т. Трощенко, П.А. Фомичев // Проблемы прочности. – Вып.1. – 1993. – С. 3-10.
12. 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.
13. Гребеников, А.Г. Экспериментальное исследование влияния последовательного применения дорнования и барьерного обжата на усталостную долговечность стрингеров в зоне отверстий для перетекания топлива [Текст] / А.Г. Гребеников, Г.А. Кривов, Е.Т. Василевский, В.А. Матвиенко, В.А. Резник, А.М. Гуменный, С.П. Светличный, И.П. Змиевской // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 43. – 2009. – С. 54-64.

Рецензент: кандидат технических наук, доцент Львов М.П.,
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Поступила в редакцию 02.09.11

Довговічність елементів конструкцій при регулярному та програмному навантаженнях після попереднього перевантаження

Запропоновано розрахунковий метод, що дозволяє отримувати залежність довговічності елемента конструкції від величини попереднього перевантаження при регулярному і програмному навантаженнях. Наведено зіставлення розрахунків довговічності за запропонованим методом з результатами проведених експериментальних досліджень довговічності лабораторних зразків після попереднього перевантаження.

Ключові слова: довговічність елементів конструкцій, коефіцієнт концентрації, циклічне навантаження, локальний напружено-деформований стан, попереднє статичне перевантаження, статичні та ресурсні випробування літаків.

Durability of structural elements under regular and program cyclic loadings after preliminary overload

The calculation method is proposed to obtain the dependence between the durability of structural elements and the value of preliminary overload under the regular and program loadings. The comparison is given between the test results for specimens with stress concentrator and the durability calculations made with help of the proposed method.

Keywords: durability of structural elements, concentration coefficient, cyclic loading, local stress-strain state, preliminary static overload, static and durability tests of aircraft.