

УДК 539.376

А. Д. ПОГРЕБНЯК¹, М. Н. РЕГУЛЬСКИЙ¹, В. В. КАСПЕРСКАЯ¹,
Н. А. МЕДВЕДЕВА²

¹Институт механики им. С.П. Тимошенко НАН Украины, Киев

²Национальный авиационный университет, Киев

К ОЦЕНКЕ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МНОГОЦИКЛОВОМ АСИММЕТРИЧНОМ НАГРУЖЕНИИ С УЧЕТОМ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Выполнена расчетно-экспериментальная оценка предельного состояния ряда авиационных материалов с учетом концентрации напряжений в условиях многоциклового асимметричного нагружения растяжением-сжатием. Решение базируется на использовании предложенных ранее моделей предельного состояния. Получено удовлетворительное согласование результатов расчета с экспериментальными данными.

Ключевые слова: сопротивление усталости, асимметричное многоцикловое нагружение, модель предельного состояния, концентрация напряжений, авиационные материалы.

Введение. Применение конструкционных материалов в изделиях предусматривает исследование их механических свойств с учетом влияния различного рода факторов, в той или иной степени формирующих их работоспособность в конкретных условиях эксплуатации

Проявление фактора концентрации напряжений и его влияние на несущую способность конструкций, подверженных в эксплуатации действию циклических нагрузок, имеет свои особенности по сравнению со статическим нагружением.

При циклическом нагружении чувствительность конструкционных материалов к концентрации напряжений определяется их свойствами и для конкретного материала она существенно зависит как от уровня концентрации, оцениваемого теоретическим коэффициентом концентрации напряжений α_σ , так и от интенсивности проявления масштабного эффекта, который, в свою очередь, зависит от вида напряженного состояния (однородное или неоднородное).

Степень влияния концентрации напряжений на сопротивление усталости принято оценивать по эффективному коэффициенту концентрации напряжений K_σ , представляющему собой отношение предела выносливости σ_{-1} гладких образцов к пределу выносливости $\sigma_{-1н}$ образцов с концентратором напряжений, либо коэффициентом чувствительности к концентрации напряжений $q = (K_\sigma - 1) / (\alpha_\sigma - 1)$.

Результаты многочисленных экспериментальных исследований, обобщенные в фундаментальных монографиях и справочной литературе [1-10 и др.], свидетельствуют о том, что чувствительность к концентрации напряжений при симметричном цикле нагружения конструкционных материалов с увеличением предела прочности повышается.

В меньшей степени исследована чувствительность к концентрации напряжений конструкционных материалов в условиях асимметричного нагружения.

Выполненный в отмеченных выше работах анализ показал неоднозначность влияния асимметрии цикла нагружения на чувствительность материала к концентратору напряжений.

С ростом статической компоненты цикла нагружения чувствительность к концентрации напряжений может, как снижаться, что получено при асимметричном изгибе, так и увеличиваться при растяжении-сжатии или оставаться примерно на одном уровне для исследованных материалов. Вместе с тем значения эффективного коэффициента концентрации напряжений K_σ возрастают практически во всех случаях асимметричного циклического нагружения с увеличением статической компоненты цикла σ_m до величин, составляющих 0,5...0,6 предела прочности σ_b .

Средние сжимающие напряжения повышают предельную амплитуду при асимметричном нагружении стальных образцов с надрезами, с необработанной поверхностью после литья и образцов, подвергнутых воздействию коррозионных сред [11]. В условиях растягивающей статической нагрузки поведение исследованных надрезанных образцов аналогично поведению гладких образцов: диаграммы предельных амплитуд цикла в этом случае близки к линейной зависимости Гудмана. Такой же результат получен при испытании конструкционных сталей при асимметричном кручении, что позволяет рекомендовать зависимость Гудмана к использованию в расчетах на прочность. Вместе с тем, по мнению автора работы [6], она может привести к ненадежному определению пределов выносливости при асимметричном нагружении образцов с концентраторами напряжений из сплавов с высоким отношением предела текучести к пределу прочности при растяжении. В этих материалах разрушение может происходить при напряжениях в вершине концентратора, меньших предела текучести (надрез снижает предельные значения как циклической, так и статической компоненты цикла нагружения).

Сопротивление усталости различных алюминиевых сплавов при асимметричном нагружении может сильно различаться в зависимости от коэффициента концентрации напряжений α_σ и соотношения напряжений в цикле.

Наиболее достоверная информация о влиянии концентрации напряжений на предельное состояние при многоцикловом асимметричном нагружении может быть получена из экспериментальных диаграмм предельных амплитуд цикла, построенных по результатам испытаний образцов с соответствующим концентратором. Однако из-за трудоёмкости подобных исследований предпринимались попытки корректировки известных зависимостей для диаграмм предельных напряжений с целью их уточнения и возможности использования при расчетных оценках влияния концентрации напряжений на сопротивление усталости конструкционных материалов при асимметричном нагружении.

К решению этой задачи авторы подходят с разных позиций [1, 11]. В ряде работ предлагается учитывать влияние концентрации напряжений при асимметричном нагружении путем введения в уравнение диаграммы предельных амплитуд напряжений эффективного коэффициента концентрации напряжений K_σ [11]

$$\sigma_a = \frac{1}{K_\sigma} \left(\sigma_{-1} - \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} \sigma_m \right), \quad (1)$$

где σ_0 – предел ограниченной выносливости при отнулевом цикле нагружения. При этом предполагается, что значение K_σ не зависит от асимметрии нагружения.

В то же время эффект концентрации напряжений может быть отнесен только к циклической составляющей σ_a . Тогда диаграмма предельных амплитуд с учетом концентрации напряжений описывается уравнением

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_T} \right), \quad (2)$$

где σ_T – предел текучести материала. Однако и в этом случае полагают, что коэффициент K_σ не зависит от асимметрии нагружения в пределах изменения статической компоненты вплоть до σ_T .

В работе [11] отмечается, что в литературных источниках имеется недостаточно информации по испытаниям гладких и надрезанных образцов при асимметричном нагружении, в связи с чем сформулированные выводы требуют дополнительных исследований.

Таким образом, задача по оценке влияния концентрации напряжений на сопротивление усталости при асимметричном нагружении требует дальнейших исследований с целью обеспечения необходимой точности прочностных расчетов деталей машин. Существующие подходы к её решению с использованием экспериментальных методов сопряжены, как правило, с большой трудоемкостью исследований, длительными сроками их проведения.

Известные расчетные методы, к сожалению, не обеспечивают необходимой точности из-за использования зависимостей, которые не отражают поведение исследованных материалов, адекватное реальному.

Одним из возможных путей решения данной задачи является использование моделей предельного состояния, апробированных как при испытаниях гладких образцов конструкционных материалов, так и образцов с надрезом в условиях асимметричного циклического нагружения [12; 13; 14].

Постановка задачи. В настоящей работе на примере алюминиевых конструкционных сплавов 14S-T6 и 75S-T6, а также титановых сплавов BT6 и Ti8823 проведена апробация предложенных ранее моделей предельного состояния применительно к построению диаграмм предельных амплитуд напряжений образцов с концентраторами напряжений при асимметричном растяжении-сжатии.

Методика расчета и построения диаграмм предусматривает сравнительно небольшой объем базового эксперимента, необходимого для определения констант материала, и позволяет выполнять построение предельных диаграмм в широком диапазоне изменения статической составляющей цикла нагружения и баз испытаний (число циклов до разрушения).

Экспериментальные данные по испытаниям образцов алюминиевых сплавов заимствованы из работ [16; 17]. Данные по испытаниям титановых сплавов – из работ [18; 19].

Одним из наиболее характерных примеров асимметричного циклического нагружения является таковое для элементов конструкций крыла самолета, когда на статические нагрузки, обусловленные весом всей конструкции самолета и переносимым грузом, накладываются нагрузки циклического характера от флуктуаций воздушного потока. В связи с этим, исследования характеристик сопротивления усталости авиационных легких сплавов, применяемых в несущих конструкциях летательных аппаратов, с учетом асимметрии нагружения и при наличии концентрации напряжений, являются весьма актуальными.

Модели предельного состояния конструкционных материалов с учетом концентрации напряжений. Общее выражение для модели предельного состояния может быть представлено следующим образом:

$$\sigma_{\text{ном.}} = f(\sigma_a; \sigma_m; c_i), \quad (3)$$

где $\sigma_{ном.}$ – номинальные напряжения в образце, подверженном многоциклового асимметричному нагружению; σ_a , σ_m – циклическая и статическая составляющие цикла нагружения; c_i – материальные константы.

При формулировке и апробации моделей предельного состояния гладких образцов конструкционных материалов исследуемые материалы условно подразделялись на хрупкие и пластичные, что и определяло выбор модели для последующих расчетов

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_n} = \frac{2}{\pi} \left[\arccos \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^\xi \right]; \quad (4)$$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_n} = \left[\cos \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right) \right]^\lambda, \quad (5)$$

где σ_n – предел ограниченной выносливости для гладких образцов при симметричном цикле нагружения, определяемый из уравнения кривой усталости, полученного экспериментальным путем по результатам испытаний гладких стандартных образцов, и которое в степенном представлении имеет следующий вид

$$N = \frac{1}{C \sigma_n^q}. \quad (6)$$

Здесь N – долговечность, определяемая числом циклов до разрушения; C и q – параметры уравнения кривой усталости.

Для образцов с концентратором напряжений соответствующие выражения для этих моделей запишем следующим образом

$$\frac{\sigma_{ан}}{\sigma_{нн}} = \frac{2}{\pi} \left[\arccos \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{вн}} \right)^\xi \right]; \quad (7)$$

$$\frac{\sigma_{ан}}{\sigma_{нн}} = \left[\cos \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_{вн}} \right) \right]^\lambda, \quad (8)$$

где $\sigma_{вн}$ – предел прочности образцов с концентратором; $\sigma_{ан}$, $\sigma_{нн}$ – амплитуда и предел ограниченной выносливости образцов с концентратором. При этом $\sigma_{нн}$ определяется исходя из уравнения кривой усталости аналогичного (6), рассчитываемого по результатам усталостных испытаний образцов с концентратором напряжений при симметричном цикле нагружения.

Показатели степени λ и ξ в выражениях (4) и (5) или (7) и (8) играют роль констант материала и определяются из базового эксперимента при отнулевом цикле нагружения как для гладких образцов, так соответственно и для образцов с концентратором. Использование в базовом эксперименте именно отнулевого цикла, при котором $\sigma_a = \sigma_m$ (или $\sigma_{ан} = \sigma_{нн}$), обусловлено его наиболее полной информативностью, отражающей реакцию материала на действие как циклической, так и статической компоненты циклического асимметричного нагружения. При наличии более полной информации о результатах испытаний образцов материала на усталость с различной асимметрией нагружения показатель λ или ξ может быть определен методом минимизации функционала суммы квадратов отклонений [15].

Как свидетельствуют многочисленные исследования, концентраторы напряжений в виде надрезов и отверстий, а также изменения их геометрии незначительно влияют на характеристики кратковременной прочности малопластичных материалов. Поэтому в уравнениях моделей (7) и (8) может быть использовано значение предела прочности σ_b , определенное при испытании гладких образцов. В то же время исследования кратковременных характеристик прочности некоторых материалов показывают, что значение предела прочности $\sigma_{вн}$ образцов с концентратором напряжений может быть выше, чем гладких. Учитывая это, при использовании зависимостей (7) и (8) предварительно необходимо провести испытания образцов с надрезом и определить их предел прочности $\sigma_{вн}$. Геометрия надреза в этом случае должна соответствовать геометрии надреза образцов материала, применительно к которому планируется определить предельное состояние при асимметричном нагружении.

То же самое относится и к определению показателей λ и ξ в соотношениях (7) и (8). Использование показателей λ и ξ , определенных в базовом эксперименте на гладких образцах, безусловно, может привести к значительным ошибкам в оценке предельного состояния образцов с надрезом. Поэтому значения показателей степени λ и ξ для таких образцов следует определять по результатам базовых экспериментов при отнулевом цикле на образцах с соответствующим концентратором напряжений.

Расчет показателей λ и ξ в случае растяжения-сжатия для образцов с концентратором осуществляется посредством разрешения зависимостей (7) и (8) относительно λ и ξ , а соответствующие формулы имеют следующий вид

$$\lambda = \frac{\lg \sigma_{ан}^0 - \lg \sigma_{мн}^0}{\lg \left[\cos \frac{\pi}{2} \frac{\sigma_{мн}^0}{\sigma_{вн}} \right]} \quad (9)$$

и

$$\xi = \frac{\lg \frac{\sigma_{ан}^0}{\sigma_{мн}} - \lg \frac{2}{\pi}}{\lg \left[\arccos \frac{\sigma_{мн}^0}{\sigma_{вн}} \right]}, \quad (10)$$

где $\sigma_{ан}^0$, $\sigma_{мн}^0$ – амплитудное и среднее значения отнулевого цикла нагружения, а $\sigma_{вн}$ – предел прочности образцов с концентратором; $\sigma_{мн}$ – предел ограниченной выносливости при симметричном цикле для этих же образцов с концентратором, соответствующий их долговечности при отнулевом цикле.

Оценка предельного состояния с учетом концентрации напряжений.

Оценка влияния концентрации напряжений на сопротивление усталости осуществлялась как с помощью эффективных коэффициентов концентрации напряжений K_σ , так и посредством построения диаграмм предельных амплитуд напряжений для гладких образцов и соответственно для образцов с концентраторами.

Разрешая выражения для моделей предельного состояния (4) и (5) относительно амплитуды σ_a , получаем формулы для построения диаграмм предельных амплитуд напряжений гладких образцов. Аналогично, разрешая выражения (7) и (8) относительно амплитуды $\sigma_{ан}$, получим формулы для построения диаграмм для образцов с концентраторами.

Исходными данными для расчетов при определении влияния концентрации напряжений на предельное состояние алюминиевых сплавов послужили результаты испытаний при комнатной температуре сплавов 14S-T6 и 75S-T6 [16, 17]. Эти испытания проводились на гладких образцах диаметром 10 мм в рабочей части и на образцах с круговым надрезом. Теоретический коэффициент концентрации напряжений составлял $\alpha_\sigma = 2,4$ и $3,4$ при радиусе надреза у вершины 0,80 мм и 0,25 мм соответственно. Рассматриваемые алюминиевые сплавы имеют относительно невысокую пластичность при растяжении δ_p (в пределах 15%). Расчеты и построения диаграмм предельных амплитуд напряжений для этих сплавов выполнены в соответствии с моделью (4) для гладких образцов и моделью (7) для образцов с концентратором. Необходимые данные, в частности пределы прочности σ_b , пределы ограниченной выносливости при симметричном цикле σ_n , а также параметры отнулевого цикла, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Данные для построения диаграмм предельных амплитуд цикла напряжений и пределы выносливости образцов из алюминиевых сплавов

Сплав	σ_b	σ_a^0	σ_m^0	σ_n^0	n^0 , цикл	ξ	σ_m	σ_r	σ_p	$\delta, \%$
	МПа						МПа			
14S-T6, гладкие образцы	516,7	126,6	126,6	164,4	10^7	0,74	60,4	132,7	142,8	-7,61
							255,1	94,5	97,92	-3,60
14S-T6, $\alpha_\sigma=2,4$	668,7	70,9	70,9	95,8	10^7	0,41	38,0	81,6	76,7	6,00
							300,7	44,9	46,7	-4,01
14S-T6, $\alpha_\sigma=3,4$	582,5	49,6	49,6	68,9	10^7	0,34	25,9	55,2	53,4	3,26
							342,1	25,9	25,6	1,16
75S-T6, гладкие образцы	586,1	71,4	71,4	131,0	10^7	0,20	80,1	68,9	69,6	-1,02
							137,9	55,2	60,4	-9,42
75S-T6, $\alpha_\sigma=3,4$	657,7	43,4	43,4	62,0	10^7	0,29	48,3	41,4	42,7	-3,14
							85,7	34,5	38,8	-12,50
75S-T6, гладкие образцы	586,1	221,1	221,9	348,2	10^4	0,63	124,3	265,5	262,6	1,09
							403,9	150,3	146,0	2,86
75S-T6, $\alpha_\sigma=3,4$	662,0	105,9	105,9	165,5	10^4	0,34	115,0	101,7	104,0	-2,26
							228,2	84,5	84,4	0,12

Характерная особенность сопротивления алюминиевых сплавов циклическим нагрузкам состоит в том, что кривые усталости не имеют горизонтального участка, параллельного оси абсцисс, в диапазоне исследованных долговечностей (более 10^8 циклов). В связи с этим в расчетах используются значения пределов ограниченной выносливости σ_n при симметричном цикле, отнесенные к конкретному числу циклов до разрушения.

На рис. 1 и 2 приведены расчетные (линии) и экспериментальные (точки) диаграммы предельных амплитуд цикла для сплавов 14S-T6 при $n_R = 10^7$ цикл и 75S-T6 при $n_R = 10^4$ и 10^7 цикл. Наблюдается хорошее соответствие между расчетом и данными экспериментов.

Сопоставление диаграмм предельного состояния гладких и надрезанных образцов для сплава 14S-T6 показывает несколько разную чувствительность к статической компоненте цикла в широком диапазоне её изменения, вплоть до $\sigma_m/\sigma_b \approx 0,5$.

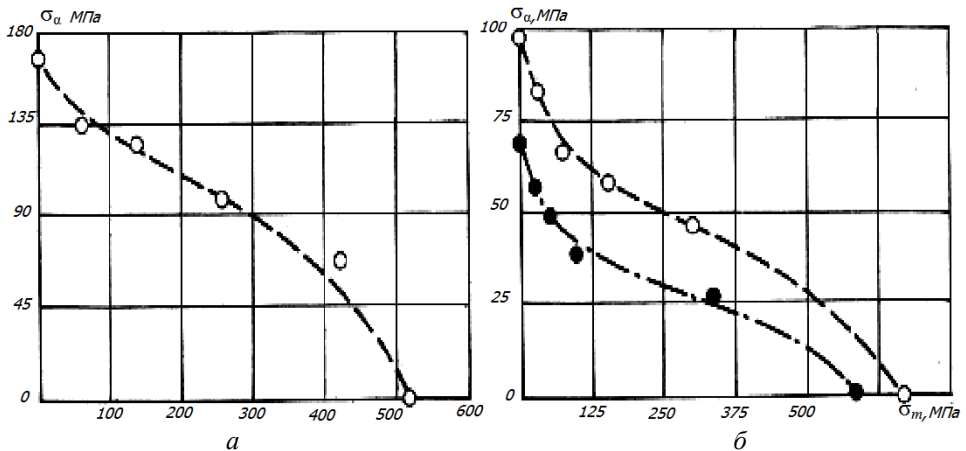


Рис. 1. Диаграммы предельных амплитуд цикла сплава 14S-T6 в условиях асимметричного растяжения-сжатия при $n_R = 10^7$ цикл: а – гладкие образцы, $\alpha_\sigma = 1,0$; б – образцы с концентратором напряжений, \circ – $\alpha_\sigma = 2,4$, \bullet – $\alpha_\sigma = 3,4$

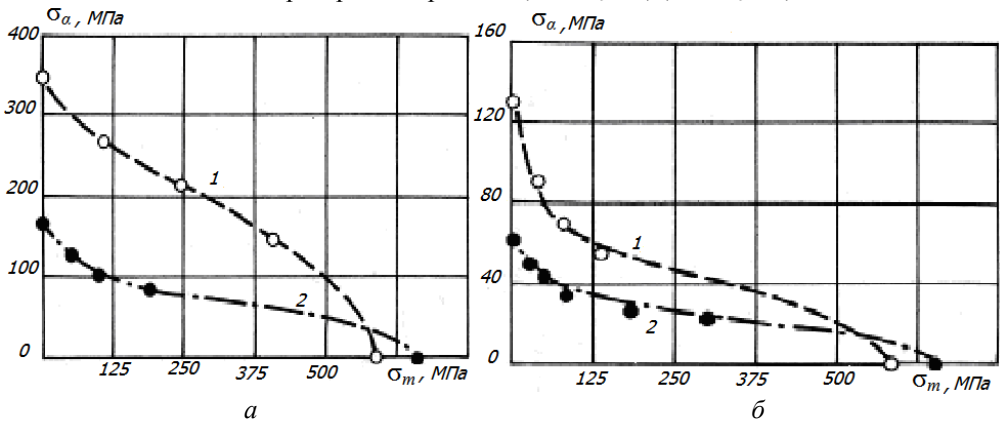


Рис. 2. Диаграммы предельных амплитуд цикла сплава 75S-T6 в условиях асимметричного растяжения-сжатия при $n_R = 10^4$ (а) и 10^7 (б) цикл: 1 – гладкие образцы; 2 – образцы с концентратором напряжений при $\alpha_\sigma = 3,4$.

Характерно, что диаграммы предельного состояния гладких образцов близки к линейным, в то время как концентратор напряжений обуславливает изменение их общего вида – они в большей степени являются вогнутыми, в первую очередь это относится к диаграммам, построенным при $\alpha_\sigma = 3,4$. Близкие результаты получены при проведении расчетов и построении диаграмм предельных амплитуд цикла для сплава 75S-T6 при долговечностях 10^4 и 10^7 цикл.

Сопоставление рассчитанных и экспериментальных пределов ограниченной выносливости в широком диапазоне изменения статической компоненты σ_m (см. табл. 1) свидетельствует о том, что погрешность δ расчета по отношению к эксперименту, как правило, не превышает 10%. Однако в ряде случаев погрешность может быть больше 10%, что, видимо, обусловлено методическими особенностями испытаний и является, скорее всего, исключением.

Значения эффективных коэффициентов концентрации напряжений K_σ , полученные посредством рассчитанных в соответствии с (4) и (7) диаграммами предельных амплитуд напряжений для гладких образцов и образцов с концентраторами приведены в табл. 2.

Таблица 2

Эффективные коэффициенты концентрации напряжений K_σ

Материал, условия нагружения	Статическая компонента					
	0	100	200	300	400	500
Сплав 14S-T6, $\alpha_\sigma=2,4$, $n^0 = 10^7$ цикл	1,77	1,99	1,97	1,87	1,63	-
Сплав 14S-T6, $\alpha_\sigma=3,4$, $n^0 = 10^7$ цикл	2,38	3,06	3,13	3,09	2,87	-
Сплав 75S-T6, $\alpha_\sigma=3,4$, $n^0 = 10^4$ цикл	2,10	2,56	2,59	2,57	2,47	2,15
Сплав 75S-T6, $\alpha_\sigma=3,4$, $n^0 = 10^7$ цикл	2,11	1,76	1,70	1,65	1,56	-

Видно, что величина K_σ зависит как от уровня концентрации напряжений, оцениваемого посредством теоретического коэффициента концентрации напряжений α_σ , так и от величины статической составляющей цикла нагружения, влияние которой не является однозначным. Число циклов до разрушения также влияет на величину K_σ .

Исследования влияния концентрации напряжений на характеристики сопротивления усталости титановых сплавов, описанные в работах [18, 19], также проводились на гладких цилиндрических образцах и образцах с круговыми надрезами различной геометрической формы в условиях асимметричного циклического нагружения растяжением-сжатием.

Для образцов из титанового сплава ВТ6 [18] значения теоретического коэффициента концентрации напряжений α_σ равны 1,7 и 4,2, а для образцов из сплава Ti 8823 [19] – $\alpha_\sigma = 4$.

На рис. 3 представлены диаграммы предельных амплитуд напряжений для указанных титановых сплавов, построенные в соответствии с моделями предельного состояния (5), (7) и (8). На поле этих диаграмм представлены также точки, соответствующие экспериментальным данным.

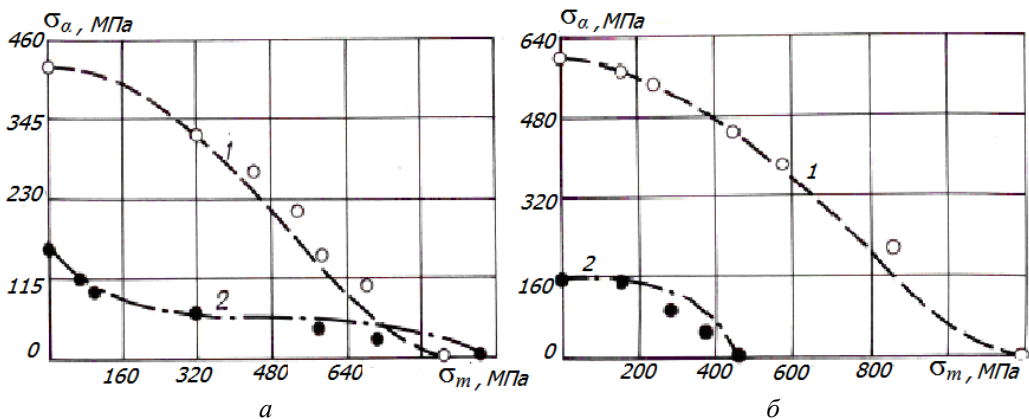


Рис. 3. Диаграммы предельных амплитуд напряжений титановых сплавов ВТ6: (а) и Ti8823 (б) при асимметричном растяжении-сжатии: 1 – гладкие образцы, 2 – надрезанные образцы

Выбор модели предельного состояния (4) или (5), а также (7) или (8) для расчета диаграмм предельных амплитуд напряжений осуществляли посредством метода минимизации функционала суммы квадратов отклонений, поскольку в данном случае имелось достаточное число экспериментальных данных для применения этого метода.

Диаграмма для гладких образцов из сплава ВТ6 соответствует модели (5) при $\lambda = 1,51$, а для образцов с надрезом – модели (7) при $\xi = 0,27$.

Диаграммы для гладких образцов из сплава Тi 8823 соответствует модели (5) при $\lambda = 1,49$, а для образцов с надрезом – модели (7) при $\xi = 2,68$.

В табл. 3 представлены данные, необходимые для расчета приведенных на рис. 3 диаграмм предельных амплитуд напряжений.

Таблица 3

Данные для построения диаграмм предельных амплитуд цикла напряжений титановых сплавов ВТ6 и Тi 8823

Сплав	σ_b	σ_a^0	σ_m^0	σ_n^0	λ	ξ
	МПа					
ВТ6, гладкие образцы	839,4	317,2	317,2	420,9	1,51	1,00
ВТ6, $\alpha_\sigma = 4,2$	923,5	98,1	98,1	153,98	3,23	0,27
Тi 8823, гладкие образцы	1192,7	450,0	450,0	594,4	1,49	1,01
Тi 8823, $\alpha_\sigma = 4,0$	448,5	151,83	151,81	157,32	0,24	2,68

В зависимости от исходных механических свойств, в частности пластичности, реакция материала на асимметричное циклическое нагружение может быть неоднозначной. Прежде всего, это относится к образцам с концентрацией напряжений. Примером этого могут служить диаграммы предельных амплитуд напряжений гладких и надрезанных образцов титановых сплавов, приведенные на рис. 3.

Выводы. Результаты выполненного исследования подтверждают возможность адекватного описания усталостного поведения авиационных материалов при асимметричном многоцикловом нагружении посредством рассчитанных по предложенным моделям предельного состояния диаграмм предельных амплитуд напряжений как для гладких образцов, так и для образцов с концентраторами напряжений.

Расчет и построение диаграмм на основе предложенных моделей существенно расширяет возможности исследования влияния фактора концентрации напряжений на характеристики сопротивления усталости материалов при асимметричном циклическом нагружении, которое характерно для многочисленных конструкций транспортного назначения. При этом объем базового эксперимента, необходимого для расчета коэффициентов моделей, весьма ограничен, что позволяет существенно уменьшить число трудоемких испытаний, которые требуются для построения предельных диаграмм экспериментальным путем.

Особенности влияния концентрации напряжений на сопротивление усталости подтверждают необходимость их учета в расчетах на прочность элементов конструкций, подвергающихся в процессе эксплуатации асимметричным режимам нагружения. Предложенный подход позволит повысить достоверность расчетной оценки влияния фактора концентрации напряжений на сопротивление усталости конструкций.

Список литературы

1. Когаев В. П. Расчёты на прочность при напряжениях, переменных во времени. - М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
2. Хейвуд Р. Б. Проектирование с учетом усталости / Пер. с англ. под ред. чл.-кор. АН СССР И. Ф. Образцова. – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.
3. Михайлов-Михеев П. Б. Справочник по металлическим материалам турбино- и моторостроения. – М.-Л. : Машгиз, 1961. – 838 с.
4. Одинг И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. – М.: Машгиз, 1962. – 260 с.
5. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов / Пер. с англ. под ред. С. В. Серенсена. – М.: Машиностроение, 1964. – 276 с.
6. Форрест П. Усталость металлов / Пер. с англ. под ред. С. В. Серенсена. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
7. Серенсен С. В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович // Руководство и справочное пособие. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
8. Трощенко В. Т. Сопротивление материалов деформированию и разрушению / В. Т. Трощенко, А. Я. Красовский, В. В. Покровский и др. // Справочное пособие из 2-х частей. – Ч. 2. – Киев : Наук. думка, 1994. – 704 с.
9. Smith J. O. The effect of range of stress on the fatigue strength of metals // Bulletin. University of Illinois. – 1942. – Vol. XXXIX, N26. – 49 p.
10. Gunn K. Effect of yielding on the fatigue properties of testpieces containing stress concentrations // Aero Quarterly, 1955. – N6. – 277 p.
11. Ужик Г. В. Определение запаса прочности при несимметричных циклах изменения напряжений в деталях машин. – Вестник машиностроения, 1944. – №5. – С. 3 – 17.
12. Голуб В.П. К оценке предельного состояния материалов при асимметричном многоцикловом нагружении / В. П.Голуб, В. И. Крижановский // Пробл. прочности. – 1994. – № 4. – С. 3-15.
13. Голуб В.П. К оценке предельного состояния материалов при асимметричном циклическом нагружении и сложном напряженном состоянии / В. П.Голуб, В. И. Крижановский // Прикл. механика. – 1995. – № 2. – С. 67-79.
14. Голуб В. П. Метод расчета усталостной прочности металлических и композитных материалов при асимметричном многоцикловом нагружении / В. П. Голуб, В. И. Крижановский, А. Д. Погребняк // Прикл. механика, 2004. – Том 40, №11. – С. 106 – 115.
15. Регульский М. Н. Определение параметров модели предельного состояния конструкционных материалов при асимметричном многоцикловом нагружении / М. Н. Регульский, А. Д. Погребняк, В. Н. Пельх // Проблемы прочности, 2012, №1. – С. 47 – 57.
16. Grover H. J. Fatigue Strengths of Aircraft Materials. Axial load fatigue test of notched sheet specimens of 24S-T3 and 75S-T6 aluminium alloys and of SAE 4130 steel With Stress-Concentration Factor of 2.0 and 4.0 / H. J. Grover, S. M. Bishop, L. R. Jackson // NASA. Tech. Note 2389. – 1951. – P. 1 – 64.
17. Lazan B. J. Strength properties of rolled aluminum alloys under various combinations of alternating and mean axial fatigue stresses / B. J. Lazan, A. A. Blatherwick // Proc. ASTM. – 1953. – Vol. 53. – P. 856 – 870.
18. Титановые сплавы в машиностроении // Б. Б. Чечулин, С. С. Ушков, И. Н. Разуваева, В. Н. Гольдфайн. – Л.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
19. Чейт Р. Влияние некоторых факторов на сопротивление высокоцикловой усталости при контролируемых напряжениях метастабильного β -сплава титана / Р. Чейт, Р. Е. Пастернак // ТОИР. – 1978. – Том 100, №4. – С. 96 – 98.

*А. Д. ПОГРЕБНЯК, М. М. РЕГУЛЬСЬКИЙ, В. В. КАСПЕРСЬКА,
Н. А. МЄДВЕДСЬКА*

ДО ОЦІНКИ ГРАНИЧНОГО СТАНУ АВІАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ БАГАТОЦИКЛОВОМУ АСИМЕТРИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ З УРАХУВАННЯМ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ

Виконано розрахунково-експериментальну оцінку граничного стану ряду авіаційних матеріалів з урахуванням концентрації напружень за умов багатоциклового асиметричного навантаження розтягом-стиском. Розв'язок базується на використанні раніш запропонованих моделей граничного стану. Отримано задовільне узгодження результатів розрахунку з експериментальними даними.

Ключові слова: опір втоми і діаграма втоми, асиметричне багатоциклове навантаження, модель граничного стану, концентрація напружень, авіаційні матеріали.

A. D. POGREBNIYAK, M. N. REGUL'SKY, V. V. KASPERSKA, N. A. MEDVEDEVA

ESTIMATION OF ULTIMATE STATE OF AVIATION MATERIALS UNDER MULTICYCLING ASYMMETRICAL LOADING ASSUMING STRESS CONCENTRATION FACTOR

Calculation of sensibility to stress concentration is performed for some aviation constructive materials under conditions of high-cycle asymmetrical loading by tension-compression. The proposed ultimate state models are applied to solving this problem. The base experiment of small volume, that is needed to get material constants, should be implemented under asymmetrical cyclic loading with cyclic and statically components which are equal one another. The diagram of fatigue under symmetrical cyclic loading is needed too for using mentioned models. An adequate correlation of the calculated results with experimental data is obtained for two aluminium and two titanium aviation alloys.

Key words: fatigue resistance, asymmetric multi-cycle loading, ultimate state model, aviation materials, stress concentration factor, diagram of fatigue.

Погребняк Анатолий Дмитриевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института механики НАН Украины, geav@inmech.creep.kiev.ua.

Регульский Михаил Николаевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института механики НАН Украины, geav@inmech.creep.kiev.ua.

Касперская Валентина Владимировна – канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института механики НАН Украины.

Медведева Наталья Анатольевна – канд. техн. наук, доцент кафедры машиноведения Национального авиационного университета.