

Расчет предельного состояния алюминиевых сплавов при асимметричном циклическом растяжении–сжатии

А. В. Желдубовский, А. Д. Погребняк, М. Н. Регульский

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

Рассматривается проблема расчета циклической прочности алюминиевых сплавов при воздействии статических и циклических нагрузок. Расчеты выполнены с использованием моделей предельного состояния, описывающих все известные формы диаграмм предельных напряжений.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, циклическая прочность, диаграммы предельных напряжений.

Введение. Сплавы на основе алюминия широко применяются во многих отраслях техники благодаря достаточно высокой прочности, малому удельному весу, высокой коррозионной стойкости. Особенно широко они используются в авиационной промышленности для изготовления таких ответственных элементов как шпангоуты, лонжероны, панели обшивки и др. Детали и узлы авиационных конструкций в процессе эксплуатации подвержены комплексу нагрузок, сочетающему комбинацию статических и переменных нагрузок. Предельное состояние материала в этих условиях определяется на основе изохронных диаграмм предельных напряжений, построение которых осуществляется, как правило, на основе результатов экспериментальных исследований. Для их описания чаще всего используются линейная или параболическая зависимости [1–3 и др.]. Анализ экспериментально полученных диаграмм свидетельствует о достаточно широком спектре их форм, в связи с чем указанные зависимости не обеспечивают корректных расчетных оценок прочностных свойств.

В работах [4, 5] предложена и апробирована зависимость между компонентами асимметричного цикла нагружения в виде степенной трансцендентной функции, позволяющей описать все известные формы диаграмм предельных напряжений. Ниже этот метод распространен на решение задач расчета и прогнозирования циклической прочности алюминиевых сплавов в условиях асимметричного растяжения–сжатия, во многом характерного для реальных условий эксплуатации авиационных конструкций.

1. Постановка задачи. Модели предельного состояния. Задача решается применительно к области многоциклового усталости ($f \geq 10$ Гц, $n_R \geq 10^4 - 10^5$ цикл), когда максимальные напряжения в цикле не превышают макроскопический предел текучести материала. При этом его разрушение является квазихрупким и не сопровождается накоплением пластических деформаций. Рассматривается область комнатных и низких гомологических температур, когда отсутствует проявление реологических эффектов. Исследуются гладкие цилиндрические образцы из алюминиевых сплавов в условиях асимметричного растяжения–сжатия.

Для решения задачи воспользуемся моделями предельного состояния [4, 5], устанавливающими зависимость между разрушающими статическими σ_m и циклическими σ_a напряжениями при долговечности n_R .

Выполненный анализ показал возможность применения предложенных моделей для описания как эффектов разупрочнения по отношению к линейному закону (модель предельного состояния с разупрочнением), так и эффектов упрочнения (модель предельного состояния с упрочнением).

1.1. *Модель предельного состояния с разупрочнением.* Уравнение предельного состояния в этом случае представим в виде

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_n} = \left[\cos\left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B}\right) \right]^\lambda \Rightarrow \frac{\sigma_a}{\sigma_n} - \left[\cos\left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B}\right) \right]^\lambda = 0, \quad (1)$$

где σ_n – предел усталости при симметричном цикле; σ_B – предел кратковременной прочности; λ – коэффициент чувствительности к асимметрии цикла нагружения. Уравнение (1) точно удовлетворяет граничным условиям, соответствующим циклической прочности при симметричном цикле и кратковременной прочности, а именно $\sigma_a = \sigma_n$ при $\sigma_m = 0$ и $\sigma_m = \sigma_B$ при $\sigma_a = 0$.

Разложим функцию $\cos(\cdot)$ в ряд. В этом случае, ограничиваясь тремя членами разложения, из выражения (1) получаем приближенную оценку

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_a}{\sigma_n} &= \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^2 + \frac{1}{24} \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^4 \right]^\lambda \Rightarrow \\ &\Rightarrow \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_n} \right)^\xi + \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^2 - \frac{1}{24} \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^4 = 1, \end{aligned} \quad (2)$$

а ограничиваясь двумя членами –

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_n} = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^2 \right]^\lambda \Rightarrow \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_n} \right)^{1/\lambda} + \frac{\pi^2}{8} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^2 = 1. \quad (3)$$

1.2. *Модель предельного состояния с упрочнением.* В этом случае уравнение предельного состояния имеет вид

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_n} \right) = \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B}\right)^\xi \right] \Rightarrow \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_n} \right) - \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B}\right)^\xi \right] = 0, \quad (4)$$

где коэффициент $\xi \cong 1/\lambda$.

Уравнение (4) также точно удовлетворяет граничным условиям, а именно: $\sigma_a = \sigma_n$ при $\sigma_m = 0$ и $\sigma_m = \sigma_B$ при $\sigma_a = 0$.

Раскладывая функцию $\arccos(\cdot)$ в ряд и выполняя над выражением (4) операции, аналогичные приведенным выше по отношению к выражению (1), получим для приближенных оценок следующие соотношения:

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_n}\right) + \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right)^{\xi} + \frac{1}{3\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right)^{3\xi} = 1 \quad (5)$$

и

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_n}\right) + \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right)^{\xi} = 1. \quad (6)$$

Погрешности точных и приближенных оценок предельного состояния оцениваются в дальнейшем на основе сопоставления результатов расчета с данными экспериментальных исследований.

1.3. *Методика определения материальных констант.* Практическое использование моделей предельного состояния требует определения из эксперимента трех характеристик материала: предела кратковременной прочности σ_b , ограниченного предела усталости при симметричном цикле σ_n и коэффициентов чувствительности к асимметрии цикла λ и ξ .

Значения σ_b и σ_n определяются на основе проведения стандартных испытаний гладких цилиндрических образцов на кратковременную прочность и на усталость соответственно. Величина σ_b в условиях одноосного растяжения вычисляется по диаграмме растяжения $\sigma - \varepsilon$. Для определения значений σ_n по результатам испытаний на усталость рассчитывается по методу наименьших квадратов уравнение кривой усталости в виде

$$n_R = \frac{1}{C(\sigma_n)^q} \Rightarrow \sigma_n = \left(\frac{1}{Cn_R}\right)^{1/q}, \quad (7)$$

где C и q – коэффициенты уравнения.

Коэффициенты λ и ξ определяются из дополнительного единичного эксперимента при отнулевом ($\sigma_m = \sigma_a$) асимметричном цикле. Используя выражения (1) и (4), для коэффициентов λ и ξ получаем

$$\lambda = \frac{\lg \sigma_a^0 - \lg \sigma_{-1}^0}{\lg \left[\cos \left(\frac{\pi \sigma_m^0}{2 \sigma_b^0} \right) \right]} \quad \text{и} \quad \xi = \frac{\lg \frac{\sigma_a^0}{\sigma_{-1}^0} - \lg \frac{2}{\pi}}{\lg \left[\arccos \left(\frac{\sigma_m^0}{\sigma_b^0} \right) \right]}. \quad (8)$$

Здесь σ_a^0 , σ_m^0 – амплитуда и среднее напряжение отнулевого цикла в базовом единичном эксперименте; σ_{-1}^0 – ограниченный предел усталости при симметричном цикле, соответствующий долговечности n_R^0 под дейст-

вием напряжений σ_m^0 и σ_a^0 . Под единичным экспериментом при этом понимается эксперимент, осуществленный при одном фиксированном уровне σ_m^0 и σ_a^0 . Для учета влияния статистических свойств материала на этом уровне напряжений можно испытать несколько идентичных образцов.

Значения коэффициентов λ и ξ определяют форму диаграмм предельных напряжений и, следовательно, выбор соответствующей модели для оценки предельного состояния исследуемого материала.

2. Расчет циклической прочности при асимметричном нагружении. Решается задача расчета предельных (разрушающих) напряжений асимметричного цикла для образцов алюминиевых сплавов в условиях одноосного растяжения–сжатия и изгиба.

2.1. *Объект исследования.* Расчет диаграмм предельных напряжений осуществлен для 20-ти марок алюминиевых сплавов. Применительно к некоторым из них варьировался химический состав, режим термообработки, технология изготовления, что расширило количество исследованных объектов. Условно в данном исследовании они подразделены на три группы. Критерием такого деления выступают прочностные и пластические свойства. К первой группе отнесены высокопрочные сплавы с пределом прочности $\sigma_B = 480 - 580$ МПа и удлинением $\delta = 12 - 15\%$; ко второй группе – сплавы средней прочности с пределом прочности $\sigma_B = 360 - 470$ МПа и удлинением $\delta = 15 - 20\%$ и к третьей группе – сплавы низкой прочности с пределом прочности $\sigma_B = 170 - 310$ МПа и удлинением $\delta = 20 - 35\%$.

2.2. *Основные расчетные соотношения.* Уравнения (1)–(3) и (4)–(6) связывают между собой три переменные величины – амплитуду разрушающих напряжений σ_a , статическое напряжение σ_m и число циклов до разрушения n_R . Воспользовавшись уравнениями (2), (3), (5) и (6), определим выражения для амплитуды напряжения σ_a , при условии, что σ_m и n_R заданы. При этом решения (2) и (5) принимаются в дальнейшем как точные, так как практически совпадают с решениями (1) и (4) соответственно. В этом случае, исходя из моделей предельного состояния (2) и (3), с учетом выражения (7) получаем выражения для амплитуды циклических напряжений

$$\sigma_a = \left(\frac{1}{Cn_R} \right)^{1/q} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^2 + \frac{1}{24} \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^4 \right]^\lambda \quad (9)$$

и

$$\sigma_a = \left(\frac{1}{Cn_R} \right)^{1/q} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^2 \right]^\lambda \quad (10)$$

Используя модели предельного состояния (5) и (6), определяем выражения для амплитуды циклического напряжения с учетом (7) в виде

$$\sigma_a = \left(\frac{1}{Cn_R} \right)^{1/q} \left[1 - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^\xi - \frac{1}{3\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^{3\xi} \right] \quad (11)$$

и

$$\sigma_a = \left(\frac{1}{Cn_R} \right)^{1/q} \left[1 - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^{\frac{q}{\xi}} \right]. \quad (12)$$

Модели предельного состояния (1)–(3) и (4)–(6), а также построенные на их основе выражения (9)–(12) используются далее для определения величины амплитуды разрушающих напряжений и построения диаграмм предельных напряжений в условиях асимметричного растяжения–сжатия. Предельное состояние оценивается с использованием заимствованных экспериментальных данных.

2.3. *Расчет циклической прочности алюминиевых сплавов.* Применительно к группе высокопрочных сплавов рассчитаны и построены диаграммы предельных напряжений для сплавов Д16Т, ВД17, 24S-T, 75S-T6, BS1476 и др.

На рис. 1, в качестве примера, сопоставлены результаты расчета (линии) с экспериментальными данными (точки) для сплавов высокой прочности. Здесь и далее штриховые линии отражают расчет с использованием зависимости (11), штрихпунктирные – зависимости (12). Темные точки характеризуют сочетание статических и циклических напряжений отнулевого или близкого к нему цикла нагружения, применяемое для определения коэффициентов λ и ξ . Расчет и сопоставление выполнены для долговечностей $5 \cdot 10^8$ (а, б) и $5 \cdot 10^7$ цикл (в). Экспериментальные данные для указанных сплавов заимствованы из работ [2, 6]. Значения пределов прочности σ_B и текучести σ_Y , коэффициентов λ и ξ , использованных в расчетах предельного состояния сплавов данной группы, приведены в таблице, которая содержит также указанные характеристики остальных групп.

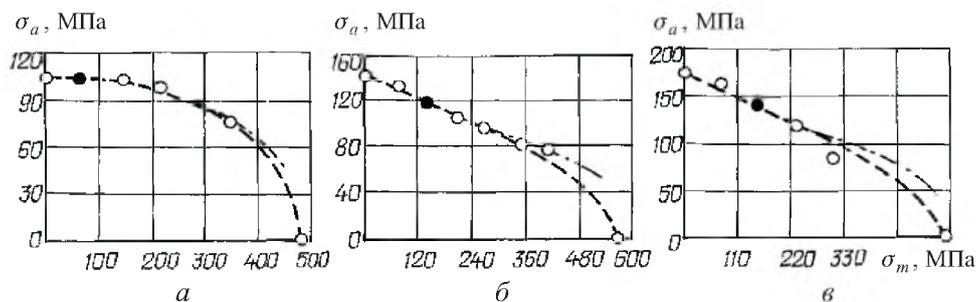


Рис. 1. Диаграммы предельных напряжений для сплавов 2014-T6 (а), 7075-T6 (б) и BS1476 (4% Cu) (в).

Вторая группа алюминиевых сплавов (средней прочности) включала сплавы Д16Т, АК4, АК4-1, АМг-6, BS1476 (1% Mg, 0,6% Si) и др. В качестве примера, на рис. 2 сопоставлены результаты расчетов (линии) с экспериментальными данными (точки) для сплавов средней прочности. Расчет и сопоставление приведены для долговечностей $n_R = 10^5$ (1) и $2 \cdot 10^7$ (2) (а), $n_R = 10^7$ (б) и $n_R = 5 \cdot 10^7$ цикл (в). Экспериментальные данные для вышеуказанных материалов заимствованы из работ [6–8] соответственно.

Значения кратковременных характеристик исследованных сплавов и коэффициентов чувствительности к асимметрии цикла

Сплав	σ_B , МПа	σ_Y , МПа	λ	ξ
2014-T6	481	–	0,29	2,64
7075-T6	564	489	1,09	1,10
BS1476 (4% Cu)	541	387	2,23	0,92
Д16Т	425	274	1,70	1,05
АК4-1	391	297	2,20	0,84
BS1476 (1% Mg, 0,6% Si)	362	328	1,02	1,21
52S-36	269	–	0,36	2,33
6061-T6	310	–	0,66	1,72
BS1477 (4% Mg)	307	177	0,96	0,76

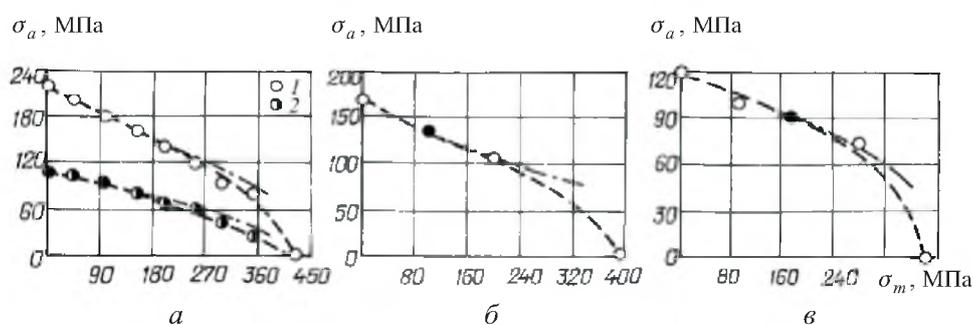


Рис. 2. Диаграммы предельных напряжений для сплавов Д16Т (а), АК4-1 (б) и BS1476 (в).

Группа низкопрочных алюминиевых сплавов включала сплавы 52S-6, 6061-T6, BS1477 (2 и 4% Mg), BS1470, 61S, BS1476 и др.

На рис. 3 представлены результаты сопоставления расчетов (линии) с экспериментальными данными (точки) для сплавов низкой прочности, заимствованными из работ [2, 6]. Расчеты и сопоставления выполнены для долговечностей $n_R = 5 \cdot 10^8$ (а, б) и $n_R = 5 \cdot 10^7$ цикл (в).

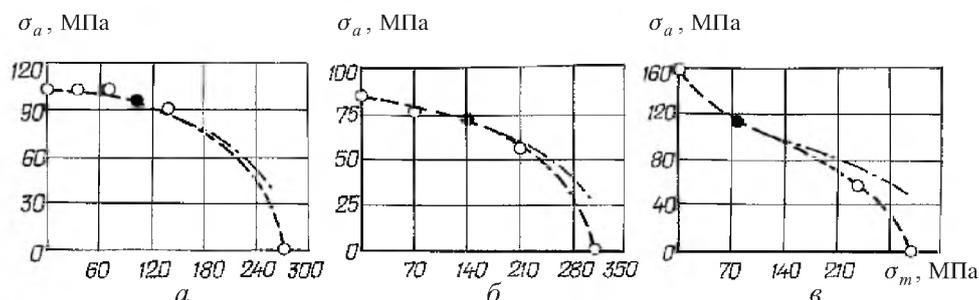


Рис. 3. Диаграммы предельных напряжений для сплавов 52S-36 (а), 6061-T6 (б) и BS1477 (4% Mg) (в).

3. Обсуждение результатов. Расчеты предельного состояния алюминиевых сплавов, отличающихся характеристиками прочности и пластичности, с использованием моделей предельного состояния, задаваемых степенной трансцендентной функцией, показали достаточно хорошее согласование с известными экспериментальными данными. Степень точности согласования, оцениваемая величиной погрешности δ , зависит от класса материала, структуры модели предельного состояния, от условий реализации единичного базового эксперимента. Наиболее существенное влияние на точность оценки предельного состояния оказывает выбор модели и вариант расчета – точный или приближенный. К сожалению, не во всех случаях в известных авторам экспериментальных исследованиях реализовано нагружение, соответствующее отнулевому циклу. В связи с этим расчет коэффициентов осуществляли, исходя из сочетания напряжений в цикле, близком к отнулевому циклу, что, безусловно, увеличивало погрешность оценок предельного состояния. Вместе с тем, максимальная относительная погрешность между результатами расчета и экспериментом не превышала 15% для исследованных диапазонов долговечностей.

Анализ экспериментальных данных продемонстрировал также относительно слабую чувствительность некоторых алюминиевых сплавов к асимметрии цикла нагружения, особенно в области невысоких значений статической составляющей цикла (см. рис. 1,а и 3,а,б). В этом случае диаграммы предельных напряжений являются выпуклыми (сплавы 2014-T6, 52S-36, 6061-T6, 24S-T, 61S, BS1476 и др.). В ряде случаев форма диаграмм предельных напряжений алюминиевых сплавов близка к S-образной или линейной (сплавы BS1477, Д16Т, АК4-1, АК-4, АМг-6, 14S-T6 и др.).

В целом модели для оценки и прогнозирования предельного состояния алюминиевых сплавов, как отмечалось выше, можно выбирать на основе единичного базового эксперимента при отнулевом асимметричном цикле и определения коэффициентов λ и ξ . Результаты расчетов свидетельствуют о том, что при значениях коэффициентов $\lambda < 1$ и $\xi > 1$ могут применяться модели, построенные на основе уравнения (4), а в случаях, когда коэффициенты $\lambda > 2$ и $\xi < 0,5$ – модели, построенные на основе уравнения (1). В переходной области значений коэффициентов λ и ξ использование обеих моделей дает равноценные результаты.

Заключение. Выполнены расчеты и построены диаграммы предельных напряжений серии алюминиевых сплавов. Показана возможность оценки и прогнозирования их предельного состояния при многоцикловом асимметричном нагружении с помощью моделей, основанных на применении степенной трансцендентной функции, показатель которой выступает в качестве дополнительной материальной константы и определяется на основе единичного эксперимента при отнулевом асимметричном цикле.

Работа выполнена при финансовой поддержке Европейского сообщества в соответствии с международным проектом INTAS 03-51-6046.

Резюме

Розглядається проблема розрахунку циклічної міцності алюмінієвих сплавів при впливі статистичних і циклічних навантажень. Розрахунки виконано з

використанням моделей критичного стану, що описують усі відомі форми діаграм кристичних навантажень.

1. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
2. Форрест П. Усталость металлов / Пер. с англ. под ред. С. В. Серенсена. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
3. Revuelta D. and Miravete A. Fatigue damage in composite materials // Int. Appl. Mech. – 2002. – **38**, No. 2. – P. 3 – 21.
4. Golub V. P., Kryzhanovskii V. I., and Pogrebniak A. D. A Method for fatigue analysis of metallic and composite materials under asymmetric high-cycle loading // Int. Appl. Mech. – 2004. – **40**, No. 11. – P. 1281 – 1289.
5. Golub V. P., Kryzhanovskii V. I., Pogrebniak A. D., and Romanov A. V. A method of modeling the interaction of creep and high-cycle fatigue // Int. Appl. Mech. – 2005. – **41**, No. 1. – P. 14 – 23.
6. Woodward A. R., Gunn K. W., and Forrest G. The effect of mean stress on the fatigue of aluminum alloys // Proc. of the Int. Conf. on Fatigue of Metals. – London, 1956. – Session 2, Paper 10. – P. 158 – 170.
7. Дерягин Г. А., Штовба Ю. К. Влияние асимметрии цикла нагружения на усталостные свойства алюминиевого сплава Д16Т // Вестник машиностроения. – 1968. – № 6. – С. 10 – 11.
8. Серенсен С. В., Гуацинтов Е. В., Когаев В. П., Степнов М. Н. Конструкционная прочность авиационных сплавов / Тр. МАТИ. – Вып. 54. – М.: Оборонгиз, 1962. – 102 с.

Поступила 04. 11. 2005