

ИСПЫТАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ АСИММЕТРИЧНОМ ЦИКЛЕ НАГРУЗКИ ПРИ ПЛОСКОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

В. Ермолай

*Кафедра прикладной механики Белостокского Политехнического Института
15-351 Белосток, Вейска 45С
e-mail: wjermo@cksr.ac.bialystok.pl*

В работе представлены результаты усталостного эксперимента для алюминия в плоском напряженном состоянии. Целью работы является описание поведения алюминия при асимметричном цикле нагрузки для разных напряженных состояний. Принят критерий усталостного разрушения и сделана его экспериментальная проверка.

Введение

Процесс усталости при асимметричном цикле связан с динамической ползучестью. Амплитуда циклического напряжения σ_a наложена на статическое напряжение σ_m и изменяет кинетику ползучести. В литературе для описания сопротивления динамической ползучести, а также усталостной прочности при асимметричном цикле, вводится эквивалентное напряжение амплитуды или средних напряжений. Например, для малых значений коэффициента амплитуды напряжения $A_\sigma = \sigma_a / \sigma_m$ эквивалентное напряжение в виде [1]

$$\sigma_\sigma = \sigma_m + F(A_\sigma, \nu), \quad (1)$$

где $F(A_\sigma, \nu)$ – функция, зависящая от коэффициента A_σ и частоты ν цикла. Для больших значений A_σ напряжение σ_σ выражается в следующей форме [2]:

$$\sigma_\sigma = \sigma_a + k\sigma_m, \quad (2)$$

где k – параметр, характеризующий влияние среднего напряжения.

Определение эквивалентных напряжений при асимметричном цикле связано с необходимостью достоверной, аналитической аппроксимации соотношений между средними σ_m и амплитудами σ_a значениями напряжений. В качестве возможных вариантов зависимости $\sigma_a = f(\sigma_m)$ были рассмотрены прямая, эллипс, гипербола, а также более сложные кривые.

Для значений $A_\sigma = 0.25; 0.5$ мы принимали в своих работах эквивалентный статический тензор напряжений в виде [3]

$$\sigma_{ij}^s = \sigma_{ij}^m + p\sigma_{ij}^a, \quad (3)$$

где $\sigma_{ij}^m, \sigma_{ij}^a$ – компоненты тензора напряжений (средних и амплитуды); p – коэффициент определен экспериментально.

Критерий разрушения

Для оценки сопротивления материалов усталостному разрушению при сложном напряженном состоянии в литературе представлено ряд критериев. Согласно с работой Маха [4], актуально около 30 критериев усталостной прочности при многоосном нагружении. Эти критерии рекомендуются для определения предела высокоциклической усталости при описании синусоидального, а также случайно переменного, сложного напряженного состояния. Среди критериев для синусоидальных нагружений представлены критерии для изотропных и анизотропных материалов, симметричного и асимметричного цикла, синхронного и асинхронного течения компонентов напряжённого состояния. В ряде работ, например Финдлей, Матгир и Щепанский [6], Диетрих и Турски [7], Писаренко и Лебедев [5], Дэиа и другие [8], усталостное разрушение описывают при помощи критериев статического разрушения при сложном напряженном состоянии. Это критерии: максимальных главных напряжений Галилеуша; максимальных касательных напряжений Треска – Гуеста; максимальной главной деформации Сайн – Венанта; энергии деформации формы Губера – Мизеса – Генки; полной энергии деформации Бальтроми. Более общие критерии разрушения представлены в работе Писаренко и Лебедева [5], Биргера и Мавлютова [9]. При построении модели разрушения пластичных и хрупких материалов учитывается возможность разрушения путем среза или путем отрыва. Первый вид разрушения характерен для пластичных материалов, второй – для хрупких.

Разрушение пластичных материалов описывает критерий интенсивности напряжений

$$\sigma_{\text{экр}} = \sigma_i, \quad (4)$$

$$\sigma_i = \sqrt{-3I_{2s}} = \sqrt{\frac{3}{2}s_{ij}s_{ij}}, \quad (5)$$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}, \quad (6)$$

где σ_i – интенсивность тензора напряжений; s_{ij} – компоненты девиатора напряжений; $\sigma_{\text{экр}}$ – эквивалентное напряжение; σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} – нормальные напряжения; σ_{12} , σ_{23} , σ_{31} – касательные напряжения. Для пластичных материалов используется также критерий максимальных касательных напряжений

$$\sigma_{\text{экр}} = \left(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1| \right)_{\text{max}} \quad (7)$$

Ответственными за хрупкие разрушения являются нормальные напряжения. Часто применяется для хрупких материалов критерий максимального напряжения σ_1 (в алгебраическом смысле)

$$\sigma_{\text{экр}} = \sigma_1, \quad (8)$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4\sigma_{12}^2}. \quad (9)$$

В работе [5] Писаренко и Лебедев представили функцию в виде

$$F(\sigma_{kl}, \sigma_1, m_i) = 0, \quad (10)$$

где σ_{kl} – касательное напряжение; σ_1 – максимальное нормальное напряжение; m_i – некоторые константы материала m_i .

Исходя из этой формулы, они сформулировали критерий, где выступает функция касательных напряжений в виде интенсивности напряжений σ_i , главное напряжение σ_1 а также β константа материала

$$\sigma_{red} = \beta \sigma_i + (1 - \beta) \sigma_1. \quad (11)$$

Эта модель учитывает взаимное влияние двух механизмов разрушения, т.е. среза и отрыва, и потому справедлива как для пластичных, так и для хрупких материалов.

Целью данной работы является экспериментальное исследование и формулировка критерия усталостного разрушения для асимметричного цикла при плоском напряжённом состоянии.

Эксперимент и результаты испытаний

Эксперименты были проведены при плоском напряжённом состоянии при циклическом растяжении с частотой 15Hz и статическом кручении. Исследования проведены на трубчатых образцах ($d_B = 17, d_0 = 14, l_0 = 60$ мм) из алюминиевого сплава при комнатной температуре 293K. Образцы сделаны из прокатанного стержня. Циклическая нагрузка была реализована при значении коэффициента амплитуды интенсивности напряжений $A_{\sigma_i} = \sigma_i^a / \sigma_i^m = 0; 0.25; 0.5$ (σ_i^a – интенсивность напряжений амплитуды, σ_i^m – интенсивность средних напряжений). Напряжённое состояние было характеризо-

вано через $\lambda = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{11}}$ (σ_{12} – касательное напряжение; σ_{11} – нормальное напряжение).

Эксперимент для алюминия выполнен при:

1) $A_{\sigma_i} = 0; \lambda = 0; 0.5; 0.9$, 2) $A_{\sigma_i} = 0.25; \lambda = 0; 0.43; 0.73$; 3) $A_{\sigma_i} = 0.5; \lambda = 0; 0.16; 0.3$.

В этой работе был принят (по результатам эксперимента при циклическом растяжении и статическом кручении) критерий усталостного разрушения на базе критерия Лебедева [5], модифицированный к виду:

$$\sigma_{red}^f = \beta_f(A_{\sigma_i}) \sigma_{max} + (1 - \beta_f(A_{\sigma_i})) \sigma_i. \quad (12)$$

Модификация заключается в зависимости β_f от коэффициента амплитуды интенсивности напряжений $A_{\sigma_i} = \sigma_i^a / \sigma_i^m$. Главное максимальное напряжение σ_{max} и интенсивность напряжений σ_i мы вычисляли по преобразованию циклического напряженного состояния на статическое напряженное состояние из формулы (3). Значение β_f было вычислено методом наименьших квадратов.

Время до разрушения t_r (перечислено из числа циклов N_f), зависящее от эквивалентных напряжений σ_{red}^f , представлено на рис.1 для сплава алюминия при

a) $A_{\sigma_i} = 0; \lambda = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{11}} = 0; 0.5; 0.9$, b) $A_{\sigma_i} = 0.25; \lambda = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{11}} = 0; 0.43; 0.73$; c) $A_{\sigma_i} = 0.5;$

$\lambda = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{11}} = 0; 0.16; 0.3$.

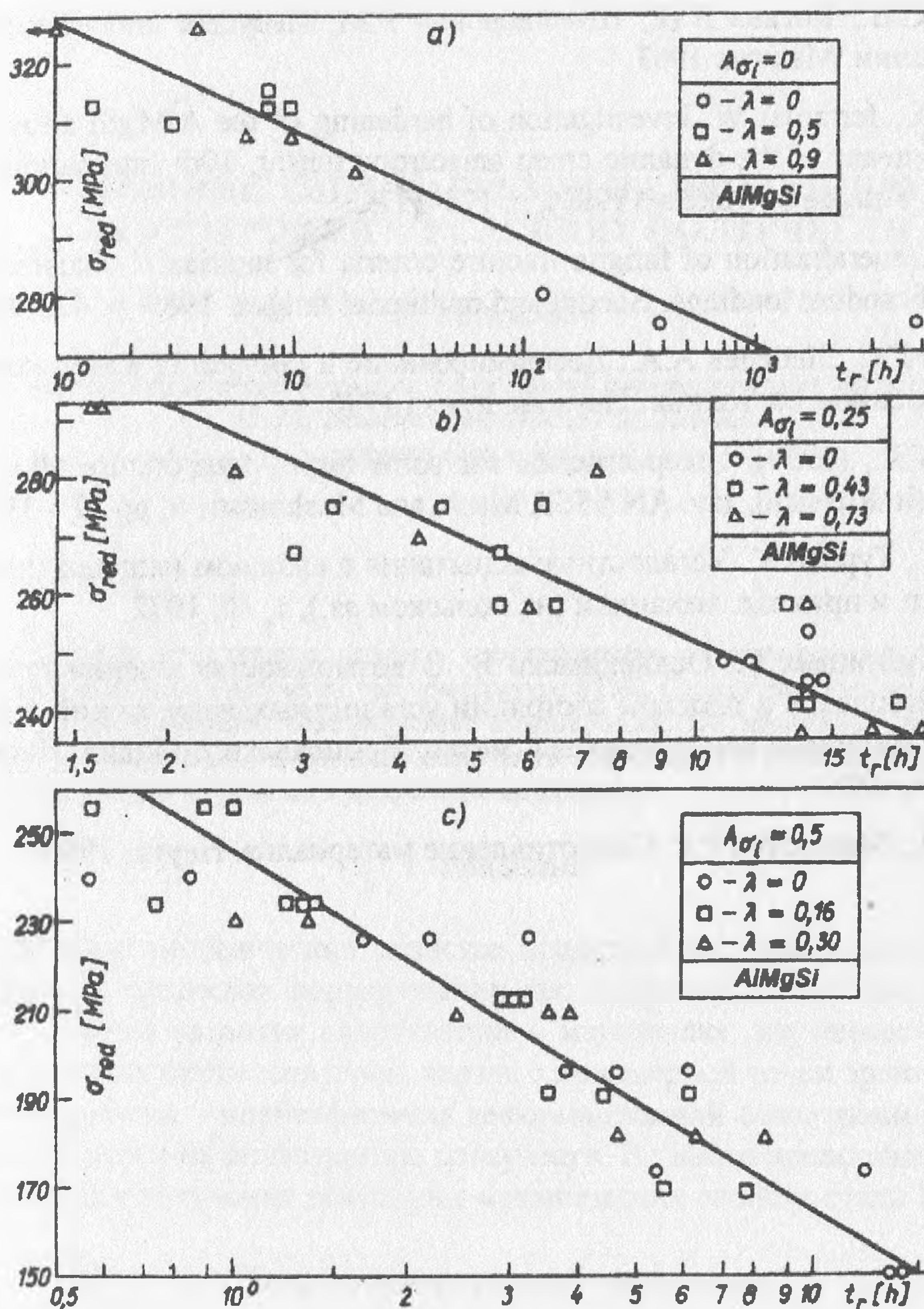


Рис. 1. Диаграммы долговечности $\ln(t_r)$, зависящей от эквивалентных напряжений σ_{red}^f для алюминия: а - $A_{\sigma_i} = 0$; б - $A_{\sigma_i} = 0.25$; в - $A_{\sigma_i} = 0.5$.

Заключение

Критерий разрушения на σ_{red}^f правильно описывает усталостный процесс. Для сплава алюминия при $A_{\sigma_i} = 0; 0.25$ разрушение происходит в пластичном состоянии, потому что $\beta_f = 0$. Разрушение пластично-хрупкое происходит в алюминии при $A_{\sigma_i} = 0.5$.

Список литературы

1. Голуб В.П. Некоторые аспекты ползучести при циклических нагрузках // Журн. проблем прочности, 5, 1987, С.20-24.

2. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчёты деталей машин. Машгиз.1963.
3. Jakowluk A., Jermolaj W. Investigation of hardening of the AlMgSi alloy in the fatigue process by means of the dynamic creep anisotropy tensor, 10th International Colloquium on Mechan. Fatigue of Metals. (1989), p. 173-177.
4. Macha E. Generalization of fatigue fracture criteria for multiaxial sinusoidal loadings in the range of random loadings. Biaxial and multiaxial fatigue. 1989, p. 425-436
5. Писаренко Г.С., Лебедев А.А., Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Наукова думка,1976.
6. Sdobyrev V.P., (1959), Creep criterion for some high - temperature alloys in complex stress state (in Russian), Izv. AN SSSR Mech. and Mashinostr, 6, pp.12 – 19.
7. Диетрих Л., Турски К. Усталостные испытания в сложном напряженном состоянии. Жур.Теорет. и приклад. механики (на польском яз.), 1, 10, 1972.
8. Дэиа И., Кузницкая Б., Освиецимски В. О возможностях оценки предельного состояния материалов в плоском состоянии усталостных напряжений. Научные работы инстит. материаловед. и приклад. механ. Вроцлавского Полит. Инстит.(на польском яз), 14, 1980
9. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов. Наука, 1986.