

Этапы расчета параметров роста трещины усталости в листовом алюминиевом сплаве АД-37

*Институт механики им. С.П. Тимошенко НАН Украины
Авиационный научно-технический комплекс им. О.К. Антонова*

Показано влияние разброса механических свойств на процесс накопления повреждений и пластической зоны, на скорость роста трещины усталости. Разработана блок-схема структурного метода расчета и проведено сравнение теоретической кривой и экспериментальных данных скорости роста трещины усталости в листовом новом материале АД-37.

Ключевые слова: трещина усталости, скорость роста, накопление повреждений, разброс механических свойств, пластическая зона, блок-схема, экспериментальное исследование.

Введение

Структурная модель накопления повреждений и развития трещины усталости, полученная в [1] и модифицированная в [2, 3] применительно к исследованию нового алюминиевого сплава АД-37, позволяет не только прогнозировать скорость роста трещины усталости на основе ограниченного числа дорогостоящих экспериментов на скорость роста трещины, но и предсказывать критический размах коэффициента интенсивности напряжений при циклическом нагружении. Главной особенностью разработанного метода является учет изменения упругих характеристик и кривой деформирования материала АД-37 по мере накопления в нем повреждения, которое оценивается количественно введением параметра повреждения D , изменяющегося от 0 (исходный материал) до 1 (разрушенный в данной точке материал). Трудности же применения таких моделей связаны с большим количеством влияющих факторов, параметры которых входят в уравнение скорости роста трещины усталости, приведенной в [2]. Данная статья описывает, как учитывалось в структурной модели влияние различных факторов на скорость роста трещины усталости в листовом алюминиевом сплаве АД-37 при циклическом нагружении.

1 Влияние разброса механических свойств на процесс накопления повреждений

Поскольку явления повреждения и разрушения обнаруживают четкую вероятностную природу [1], поэтому результаты испытаний на долговечность имеют значительный статистический разброс. Введем следующие обозначения, используя методологию, предложенную в статье [4]. Если прочность характеризуется скалярным параметром, например, σ_b , то для общего случая будем обозначать его r , а уровень нагрузки – также скалярным параметром – эквивалентным напряжением Мизеса

$$S = \left(\frac{3}{2} \times \sigma' \times \sigma' \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Тогда одна из форм соотношений для определения ресурса будет иметь вид [1,4]:

$$T(s, r) = t_c (r/s)^m, \quad (2)$$

здесь t_c – постоянная, имеющая размерность времени или наработки, m – положительный показатель (кривой усталости).

Выбор величин r и t_c взаимообусловлен. Так, если r имеет смысл прочности при стандартных кратковременных испытаниях, то t_c следует интерпретировать как характерную продолжительность этих испытаний. В другом случае, если параметр r характеризует прочность при длительных испытаниях на исходной базе, то эта база ассоциируется с параметром t_c .

При дискретном, циклическом нагружении формула (2) принимает вид:

$$N(s | r) = N_c (r/s)^m, \quad (3)$$

который используется далее в этой работе, в том числе для идентификации параметров уравнения эволюции повреждаемости [4]. В (3) используем общепринятые обозначения. N_c – характерное число циклов нагружения. Параметр r применяется как предел выносливости на базе испытаний N_c . На практике ситуация усложняется тем, что параметр прочности r является случайной величиной, плотность вероятности $p_r(x)$ которой считаем известной.

При прогнозировании ресурса [1,4] статистический разброс показателей долговечности, как известно, значительно превышает статистический разброс соответствующих показателей прочности (σ_b), трещиностойкости (K_c) и др. В работе используется распределение Вейбулла для статистического описания параметра прочности, а именно:

$$F_r(x) = 1 - \exp\left[-(x/r_c)^\alpha\right], \quad (4)$$

здесь r_c – характерный параметр прочности, например, σ_b .

Показатель α удовлетворяет неравенству $\alpha \geq 1$. Формула (4) используется далее для обработки результатов испытаний на кратковременную прочность и испытаний на усталость.

Как следует из (4), статистический разброс параметра прочности, например, σ_b , зависит от показателя α . Чем больше α , тем компактнее распределение параметра $r = \sigma_b$. Так для коэффициента вариации w_{σ_b} получаем формулу:

$$w_{\sigma_b} = \left[\frac{\Gamma(1 + 2/\alpha)}{\Gamma^2(1 + 1/\alpha)} - 1 \right]^{1/2}. \quad (5)$$

Двухпараметрическое распределение Вейбулла (4) является наиболее удобной вероятностной моделью для однопараметрического семейства кривых усталости (3). Степенная зависимость в (3) согласована с формой, в которой параметр прочности входит в распределение (4). Кроме того, само распределение (4) является одним из асимптотических распределений крайних значений и соответствует общепринятым инженерным представлениям о механизме зарождения усталостных трещин [1,4]. Как известно, эмпирические функции распределения допускают удовлетворительную аппроксимацию результатов испытаний прямыми линиями на вероятностной бумаге Вейбулла. Таким образом, в дальнейшем принимаем обозначение m для показателя степени кривой усталости, α – параметр распределения Вейбулла для описания разброса характеристик прочности и др. величин.

Механизм малоциклового усталости определяется повторными пластическими деформациями. Поэтому для его описания используют деформационные критерии. Для экспериментальной проверки критериев и оценки их параметров проводят испытания при жестком нагружении, т.е. задавая

амплитуды пластических или полных деформаций. Такие же условия возникают при зарождении трещин усталости, когда пластические деформации развиваются в относительно небольшом объеме, примыкающем к вершине трещины (концентратору напряжений). При этом почти все параметры процесса зависят, в основном, от упругих деформаций в остальном объеме детали (удаленном поле).

Один из известных деформационных критериев малоциклового усталости предложен Коффиным в 1954г.

$$N^\mu \Delta e_p = C, \quad (6)$$

здесь N – циклическая долговечность, Δe_p – размах пластической деформации цикла, μ и C – эмпирические постоянные. Постоянную C обычно выражают через истинную предельную деформацию e при стандартных испытаниях на растяжение.

Деформационные критерии имеют существенное преимущество – возможность описания в рамках математической модели как малоциклового, так и классической усталости. Типичный пример объединенного деформационного критерия – уравнение Мэнсона (1965г.):

$$\Delta e = CN^{-\mu} + 3,5N^{-\nu} \sigma_b / E, \quad (7)$$

где Δe – размах полной деформации цикла, σ_b – предел прочности при растяжении, E – модуль упругости. Правая часть уравнения (7) представляет собой сумму ординат кривых усталости при пластическом деформировании и классической многоциклового усталости.

В работе [6] критерии (6) и (7) обобщены на случай, когда в зоне пластичности возле концентратора развивается поврежденность. Уравнение (6) представлено в форме:

$$\Delta e_p = \sigma_b' (2N_f)^b / E, \quad (8)$$

здесь коэффициент усталостной прочности σ_b' и показатель степени b задаются соотношением

$$\sigma_b' = E \left(\frac{1+\beta}{\alpha C} (1 - e^{-\alpha}) \right)^{\frac{1}{1+\beta}}, b = -\frac{1}{1+\beta} \quad (9)$$

Уравнение (8) можно представить в форме

$$D = -\frac{1}{\alpha} \ln \left[1 - (1 - e^{-\alpha}) \frac{N}{N_f} \right] \quad (10)$$

2 Влияние пластического деформирования в конце трещины усталости

При циклическом нагружении листового материала АД-37 пластические деформации возникают у фронтов трещины уже при достаточно низких номинальных напряжениях S . Однако это же существенно сказывается на устойчивости развития трещины, если в основном массиве (удаленном поле) материал деформируется линейно упруго. Это, на первый взгляд, противоречие и позволяет в инженерной практике широко применять методы линейной механики разрушения. В принципе, линейное приближение является асимптотическим в том смысле, что выполняется тем точнее, чем меньше номинальные напряжения S по сравнению с пределом текучести σ_m и пределом прочности σ_e .

Аналогичным условием является соотношение размеров трещины с размером пластической зоны. Поэтому при достаточно высоких номинальных напряжениях необходимо в явном виде учитывать наличие пластических деформаций в окрестности фронта трещины, а при увеличении нагрузок – и в дальнем поле. Учет пластичности в условиях малоциклового усталости обычно проводят, отвлекаясь от эффектов локальной разгрузки, остаточных деформаций и пр. Используются упрощенные модели пластической зоны, например, модель Леонова – Панасюка – Дагдейла. Более адекватным подходом является использование уравнений теории пластичности и развитие моделей, которые в условиях циклического нагружения и растущей трещины можно реализовать только в рамках вычислительного эксперимента.

Отметим вначале качественные различия, которые вносит учет неупругого деформирования в модель роста усталостной трещины. Если в основном массиве пластины материал деформируется линейно упруго, то погрешность формулы Ирвина для высвобождающейся энергии G не превышает величины λ_p/L , где λ_p – характерная длина пластической зоны. Вычисление силы сопротивления Γ осложнено тем, что необходимо учитывать деформационное и циклическое упрочнение. Пока пластические деформации в концевой зоне малы, удельная работа разрушения γ практически постоянна и соответствует значению γ_0 в линейной механике разрушения. По мере продвижения фронта трещины γ увеличивается и достигает предельного, максимального значения γ_b , при котором исчерпывается сопротивление материала. При этом удельная работа разрушения является функционалом истории нагружения и роста трещины. В принципе такую зависимость можно ввести, используя концепцию континуальной поврежденности [1].

Для трещины отрыва длиной $2L$ в условиях плоского напряженного состояния введем следующие основные параметры процесса. Пусть радиус кривизны на фронте равен ρ , характерный размер концевой зоны – λ . Размер пластической зоны – λ_p , причем $\rho < \lambda < \lambda_p$. Если в удаленном поле пластина деформируется линейно упруго, то для пластической зоны применяем деформационную модель со степенным упрочнением. В таком случае имеем

$$\sigma = Ee_m + B(e - e_m)^\eta, \quad (11)$$

где $e_m \leq e \leq e_b$. Здесь e_m – деформация текучести, e_b – предельная деформация, B – постоянная материала.

Показатель упрочнения η для АД-37 равен 0,335, тогда при развитых пластических деформациях получаем

$$\sigma \approx Be^\eta \quad (12)$$

Пренебрегаем влиянием остаточных напряжений и вторичных пластических деформаций после прохождения фронта трещины. Для приближенного вычисления коэффициентов концентрации на фронте трещины используем соотношение Нейбера

$$K_\sigma K_e = K^2 \quad (13)$$

Эта формула связывает коэффициент концентрации K_σ напряжений (ККН) и деформаций (ККД) для линейно деформируемого материала с коэффициентом концентрации K для материала, который описывается законом Гука.

Для достаточно острой трещины приближенно можно считать

$$\begin{aligned}
 K_{\sigma} &= \left(\frac{L}{\rho} \right)^{\eta/(1+\eta)} \\
 K_{\epsilon} &= \left(\frac{L}{\rho} \right)^{1/(1+\eta)}
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

В пределах концевой зоны размах деформаций Δe соответствует коэффициенту концентрации деформаций K_{ϵ} из (14). Тогда размер пластической зоны λ_p находим из условия $\Delta e = e_m$ при $x = L + \lambda_p$, т.е.

$$\lambda_p = \frac{L\lambda}{\rho} (\Delta e / e_m)^{1+\eta}
 \tag{15}$$

Рост поврежденности D также связан с размахом деформаций отрыва на продолжении фронта трещины. В соответствии с этим уравнение накопления поврежденности D для процессов с медленно изменяющимися параметрами принимаем в виде

$$\frac{\partial D}{\partial n} = \left(\frac{\Delta e}{e_f} \right)^m,
 \tag{16}$$

здесь m – показатель кривой малоциклового усталости, e_f – параметр, определяемый из кривых усталости для серии образцов сплава.

3 Блок-схема расчета скорости роста трещины в листовом материале АД-37

Блок-схема структурного метода расчета скорости роста трещины усталости в листовом материале АД-37 включает в себя четыре группы информационных данных (смотри рис. 1).

1. Исходными данными при использовании разработанного структурного метода являются паспортные данные на материал, включающие E , $\sigma_{0.2}$, e_b , кривую деформирования, состав материала. Используя кривую деформирования, определяем коэффициент B , показатель упрочнения η и записываем аналитическое выражение кривой деформирования исходного (неповрежденного) материала (11). Паспортные данные также используем для определения характерного размера концевой зоны λ и радиуса кривизны в конце модельной трещины ρ .

2. Второй группой информационных данных являются показатели циклического нагружения материала (σ_{\max} , σ_{\min} , f), наработка N и длина трещины L , которые используются для определения характерного размера концевой зоны λ и радиуса кривизны в конце модельной трещины ρ .

3. Обязательными экспериментальными исследованиями при применении разработанного структурного метода расчета скорости роста трещины усталости в листовом материале АД-37 являются определение показателя степени m кривой малоциклового усталости, а также показателя степени α распределения Вейбулла прочности листового материала (4).

4. Очень важной и трудоемкой группой являются расчетные исследования, включающие расчеты размеров пластической зоны по линейному закону, критического коэффициента интенсивности напряжений (КИН), пластической зоны в среде конечно-элементного анализа Nastran, КИН, характеризующий

сопротивление материала накоплению повреждения, а также параметров, характеризующих повреждение материала D . Результаты расчета пластической зоны в среде Nastran используются при определении σ_{\max} и σ_{\min} в конце модельной трещины, размаха КИН, а также при определении характерного размера концевой зоны λ . Важными расчетными характеристиками являются зависимости параметра повреждения D и механических характеристик от циклов нагрузки.

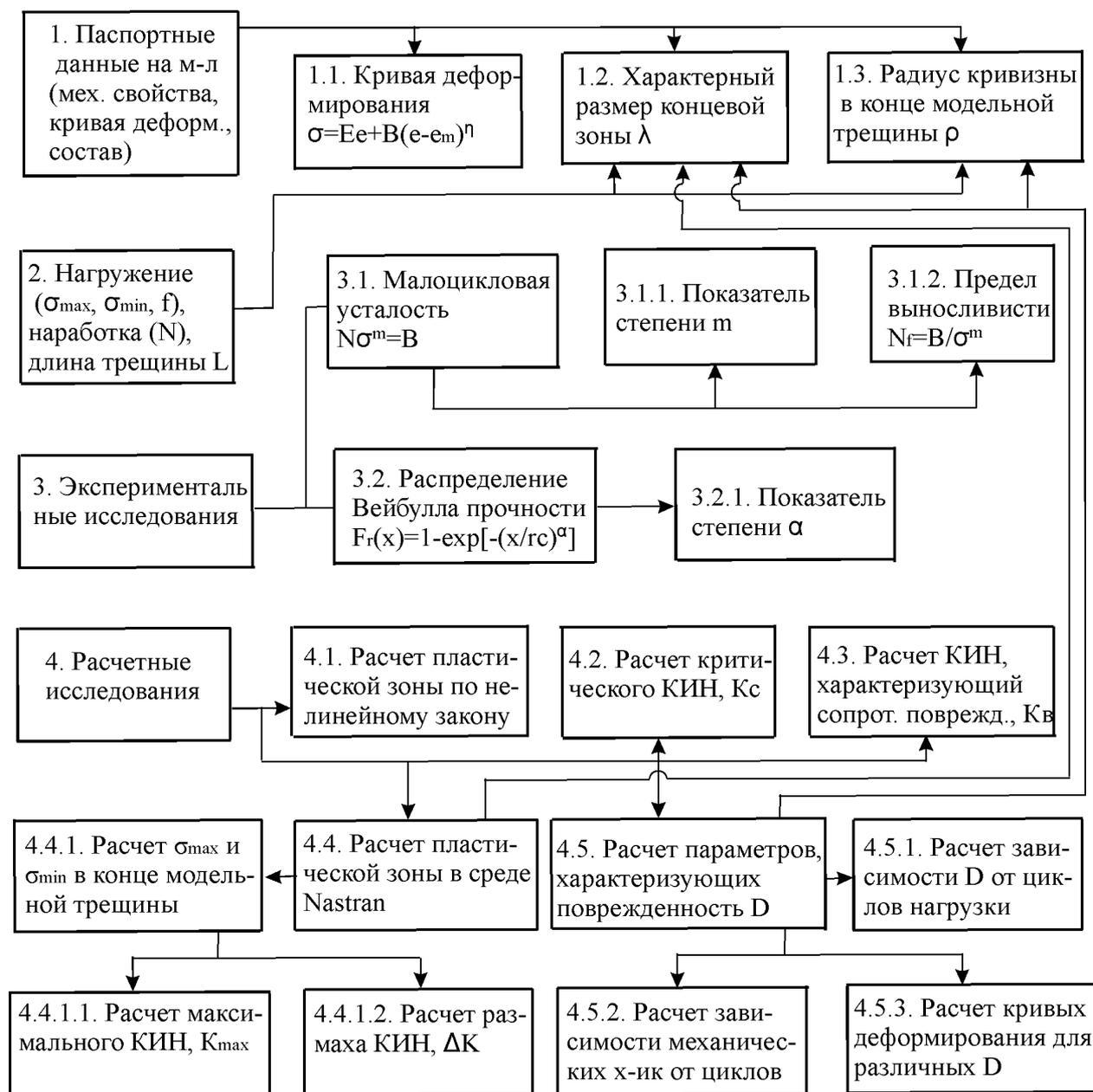


Рис. 1. Блок-схема структурного метода расчета скорости роста трещины усталости листового материала АД-37

4 Сравнение расчетной кривой скорости роста трещины усталости и экспериментальных данных

Особенностью проведенных испытаний скорости роста усталостных трещин в образцах из листов сплава АД37(1370), являлось то, что испытывались тонкие плоские образцы размером 1,1x200x600 мм, подвергнутые различным видам закалки и механической обработки поверхности.

Все образцы имели в геометрическом центре механическим способом нанесенный сквозной продольный надрез длиной 5 мм и шириной не более 0,1 мм. Вершины надреза заострялись лезвием. Испытания образцов производились в универсальной испытательной машине УИМ-25. В машине образцы крепились гидрозахватами. Перед проведением испытаний были замерены фактические толщины образцов в местах предполагаемой наклейки тензорезисторов.

Режим нагружения основного блока - $R = 0,1$, $P_{\max} = 2860\text{ кг}$, $f = 2\text{ Гц}$, $\sigma_{\max} = 13\text{ кг/мм}^2$. При этом фиксировался момент страгивания трещины ($2l_0+1$ мм) и ее дальнейшее развитие до окончательной длины $2l = 65$ мм. В процессе испытаний на скорость роста трещин фиксировалось длина правой и левой половины трещины и соответствующее количество циклических нагружений. Зависимость длины трещины L от количества циклов нагружения представлены на рис.2. Расчет параметров циклической трещиностойкости в терминах скорости роста трещины dl/dN и размаха коэффициента интенсивности напряжений $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ производился согласно РД 50-345-82 [7].

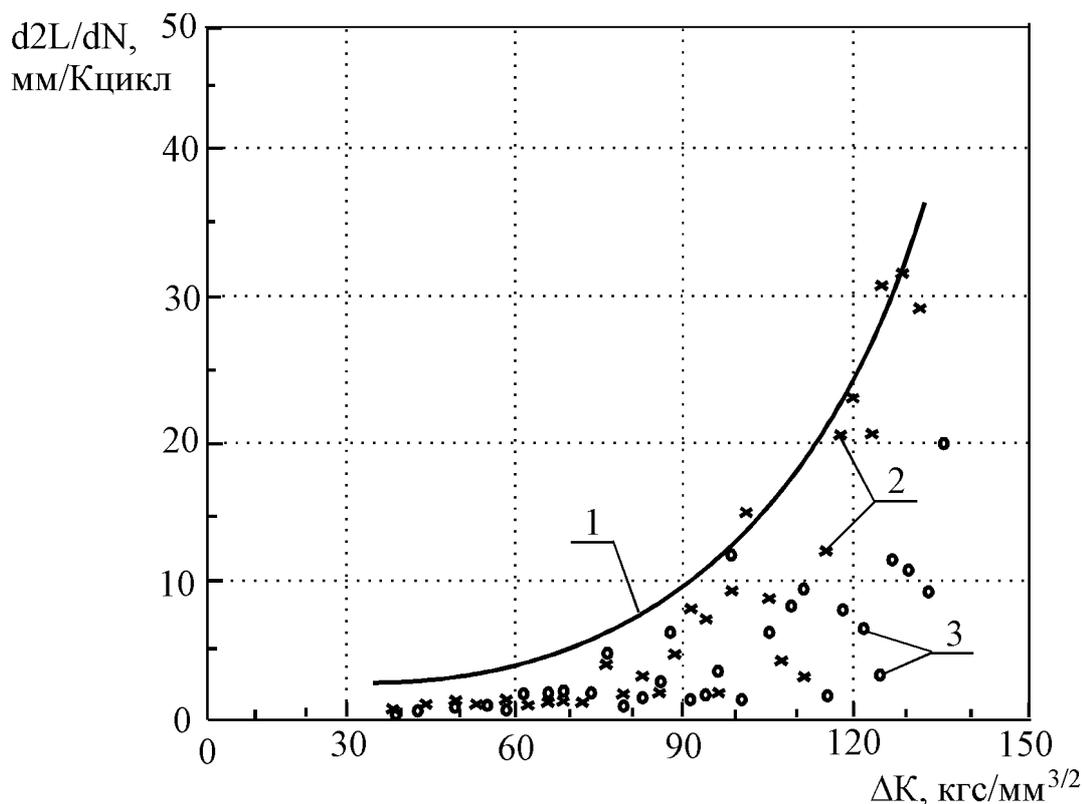


Рис. 2. Сравнение теоретических и расчетных значений зависимости скорости роста трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений для образцов 1П-1 и 1П-2: 1 (-) — теоретическая кривая; 2 (x) — эксперимент 1П-1; 3 (O) — эксперимент 1П-2

На рис. 2 представлены сравнение теоретических и расчетных значений зависимости скорости роста трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений для образцов 1П-1 и 1П-2. Оба образца из листов сплава АД37(1370) были закаленные на металлургическом заводе, искусственно состаренные и имели полированную поверхность.

5 Выводы

1. Выбран метод учета влияния разброса механических свойств на процесс накопления повреждения в конструкционном материале, который находится под действием циклических нагрузок.

2. Проведено исследование влияния пластического деформирования в конце трещины усталости на процесс накопления повреждения. Определено выражение для расчета размера пластической зоны в конце трещины. Получено выражение связи повреждения с пластической деформацией.

3. Разработана блок-схема структурного метода расчета скорости роста трещины усталости в листовом материале АД-37, которая включает в себя четыре группы информационных данных:

1) паспортные данные на материал (механические свойства, кривая деформирования, состав);

2) нагружение (σ_{\max} , σ_{\min} , f), наработка (N), длина трещины (L);

3) экспериментальные исследования;

4) расчетные исследования.

4. Проведено сравнение теоретических и расчетных значений зависимости скорости роста трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений.

Список литературы

1. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций.-М.: Машиностроение, 1990.- 448 с.

2. Климюк А.Н., Лиманский И.В. Идентификация определяющих параметров модели усталостного разрушения пластины. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.:НАКУ «ХАИ». – 2008. – Вып.39. – с.123 – 133.

3. Маслов Б.П., Климюк А.Н. Расчетно-экспериментальное исследование нового алюминиевого сплава АД-37 // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.:НАКУ «ХАИ». – 2009. – Вып.43. – с.124 – 132.

4. Д.С. Кива, Маслов Б.П., Климюк А.Н., Концептуальный подход к определению параметров надежности агрегатов планера самолета из КМ // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.:НАКУ «ХАИ». – 2006. – Вып.32. – С. 5 – 16.

5. Фомичев П.А., Звягинцев В.В. Прогнозирование долговечности тел с надрезами по локальному напряженно-деформированному состоянию. Сообщ. 1. Определение напряжений и деформаций в надрезе при циклическом упругопластическом деформировании. // Проблемы прочности. – 2000. – С.37-45.

6. Peerlings R.H.J., Brekelmans W.A.M., R. de Borst, Geers M.G.D. Gradient-enhanced damage modeling of high-cycle fatigue Int. J. Numer. Engng.,49, (2000). P.1547-1569.

7. РД 50-345-82."Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении)".

8. Маслов Б.П., Шатило Л.В. Розподіл напружень біля кінця тріщини у матеріалі з мікропошкодженнями // Вісник Львівського університету. Сер. прикладна математика та інформатика, №10, (2005). - с.122-126.

9. Maslov B.P. Stress concentration in pop -compressible multi -component material. Int. Appl. Mech., 36, N3, (2000), 108-114.

Рецензент: кандидат технических наук Е.Т. Василевский,
ГП «Антонов», Киев

Поступила в редакцию 01.06.10

Етапи обчислення параметрів зростання тріщини втоми в листовому алюмінієвому сплаві АД-37

Показано вплив розкиду механічних характеристик на процес накопичення пошкодження і пластичної зони, на швидкість зростання тріщини втоми. Розроблено блок-схему структурного методу обчислення і проведено порівняння теоретичної кривої і експериментальних даних швидкості зростання тріщини втоми в листовому новому матеріалі АД-37.

Ключові слова: тріщина втоми, швидкість зростання, накопичення пошкодження, розкид механічних характеристик, пластична зона, блок-схема, експериментальне дослідження.

Steps in evaluation of fatigue crack growth rate in АД-37 aluminum alloy

Effects of scatter in mechanical properties on the process of damage accumulation, as well as effects of plasticity zone on fatigue crack growth rate are shown. A flow chart of structure-based analysis technique is developed and the theoretical curve for fatigue crack growth rate in new АД-37 sheet is compared with available experimental data.

Keywords: fatigue crack, growth rate, damage accumulation, scatter in mechanical properties, plasticity zone, flow chart, experimental investigation.