

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 635.033

Обоснование расчетной кривой усталости элементов конструкций из алюминиевых сплавов

П. А. Фомичев

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского “Харьковский авиационный институт”, Харьков, Украина

Конкретизирован метод расчета долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию элементов конструкций из алюминиевых сплавов при отнулевом регулярном нагружении. Проведено сравнение результатов расчета с данными испытаний образцов со свободным и заполненным отверстиями, а также проушин. Даны рекомендации по применению метода расчета долговечности по номинальным напряжениям.

Ключевые слова: метод расчета, долговечность, концентратор напряжений.

Введение. В основу метода расчета долговечности по номинальным напряжениям [1] положены экспериментальные кривые усталости образцов со свободным отверстием. Такие образцы с отношением ширины к диаметру отверстия $B/d = 6$ стандартизованы в авиационной отрасли. Коэффициент концентрации напряжений при упругом деформировании по нетто-напряжениям равен 2,6, по брутто – 3,12. Брутто-напряжения находят без учета ослабления поперечного сечения образца по отверстию. Диаметр отверстия зависит от применяемого крепежа, обычно он равен 6–8 мм. Испытывают стандартные плоские образцы в машинах при отнулевом цикле нагружения. Получаемую при этом кривую усталости называют базовой. Расчет долговечности элементов конструкций проводят с использованием эффективного коэффициента концентрации напряжений, определяемого экспериментально или по эмпирическим соотношениям, основанным на результатах испытаний образцов со свободным отверстием и проушин. В образцах с отверстием концентрация напряжений обусловлена обтекающими отверстием напряжениями. Для проушин реализуется контактная задача взаимодействия между болтом и образцом, нагрузка на последний передается через напряжения смятия, максимальные напряжения возникают в точках разрыва дуги контакта. Испытания проводят до разрушения и устанавливают зависимость числа циклов от величины максимальных номинальных напряжений. Аппроксимируют кривые усталости степенными уравнениями.

Метод расчета долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию (НДС), основанный на энергетическом критерии усталостного разрушения [2–4], позволяет теоретически рассчитать долговечность

до возникновения микротрещин на поверхности отверстия и макротрещин в концентраторе напряжений. В качестве исходных данных о свойствах материала в методе использованы циклические деформационные и усталостные характеристики, полученные по результатам испытаний гладких образцов.

Целью данной работы является конкретизация метода расчета долговечности по локальному НДС элементов конструкций из алюминиевых сплавов при отнулевом регулярном нагружении и формирование рекомендаций по применению метода расчета долговечности по номинальным напряжениям.

Метод расчета долговечности по локальному НДС. Метод расчета при отнулевом регулярном нагружении состоит в следующем.

1. *Расчет локальных напряжений и деформаций в вершине надреза при максимальном номинальном напряжении $\sigma_{n\max}$ цикла нагрузок.* Локальное напряжение может быть найдено в результате решения нелинейной задачи деформирования материала по методу конечных элементов или по уточненной формуле Нейбера [5]

$$\sigma_{\max} \varepsilon_{\max} = K_T^2 \sigma_{n\max} \varepsilon_{n\max} F_M, \quad (1)$$

где σ_{\max} , ε_{\max} – максимальные напряжение и деформация в вершине надреза; $\sigma_{n\max}$, $\varepsilon_{n\max}$ – максимальные номинальные напряжение и деформация цикла нагрузок; K_T – теоретический коэффициент концентрации напряжений при упругом деформировании материала; F_M – поправочная функция, вычисляемая из условия совпадения результатов упругопластических расчетов методом конечных элементов и по формуле Нейбера (1).

Зависимость деформаций от напряжений при монотонном деформировании материала можно представить в виде суммы линейного и степенного слагаемых:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K_C} \right)^{1/m_c}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости материала; m_c , K_C – параметры уравнения, получаемые из экспериментальной диаграммы деформирования материала при монотонном нагружении. В некоторых работах (например, [1]) уравнение (2) записывают в виде трех слагаемых.

Применительно к широко распространенным в авиастроении алюминиевым сплавам Д16 и В95 при числе циклов до разрушения образцов с отверстием, которое превышает $3 \cdot 10^3$ цикл, можно использовать уравнение (2), а уравнение (1) – упростить. В этом случае допустимо пренебречь нелинейной деформацией для номинальных напряжений и считать $F_M = 1$. Формула (1) примет вид

$$\sigma_{\max} \varepsilon_{\max} = \frac{(K_T \sigma_{n\max})^2}{E}. \quad (3)$$

Решение нелинейного уравнения (3) с учетом (2) позволяет найти максимальное напряжение в надрезе, соответствующее $\sigma_{n\max}$.

Градиент напряжений в вершине надреза можно определить так [6]:

$$G_{\sigma} = \frac{2P}{P'} \bar{G}_y; \quad (4)$$

$$P = \frac{(K_T \sigma_{n \max})^2}{E}; \quad P' = \frac{2\sigma_{\max}}{E} + \frac{1 + m_c}{m_c} \left(\frac{\sigma_{\max}}{K_c} \right)^{1/m_c},$$

где \bar{G}_y – относительный градиент упругих напряжений.

Применительно к полосе с отверстием градиент \bar{G}_y можно вычислить по формуле [7]

$$\bar{G}_y = \frac{2,3}{\rho}, \quad (5)$$

где ρ – радиус отверстия.

2. *Формирование локального цикла деформирования материала в вершине концентратора напряжений.* Амплитуду локальных напряжений рассчитываем по формуле Нейбера с учетом диаграммы циклического деформирования материала:

$$\sigma_a \varepsilon_{at} = \frac{(K_T \sigma_{an})^2}{E}, \quad (6)$$

где σ_a , ε_{at} – амплитуды напряжения и полной деформации; σ_{an} – амплитуда номинального напряжения, $\sigma_{an} = \sigma_{n \max} / 2$.

Диаграмма циклического деформирования материала имеет вид [8]

$$\varepsilon_{at} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K_m} \right)^{1/m}; \quad (7)$$

$$K_m = K \left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^{\nu} \right), \quad (8)$$

где K , m – параметры материала при симметричном цикле нагрузок; ν – коэффициент; σ_B – предел прочности материала; σ_m – среднее напряжение локального цикла деформирования в вершине концентратора напряжений,

$$\sigma_m = \sigma_{\max} - \sigma_a. \quad (9)$$

Решив нелинейное уравнение (6) с учетом (7)–(9), получим значения амплитуды и среднего напряжения локального цикла нагрузок.

3. *Определение амплитуды остаточной деформации в вершине концентратора напряжений.* Амплитуда остаточной деформации ε_{ar} численно равна амплитуде деформации в момент равенства номинального напряжения его среднему значению в цикле нагрузок:

$$\varepsilon_{ar} = \varepsilon_{at} - \frac{K_T \sigma_{an}}{E}, \quad (10)$$

или с учетом (6):

$$\varepsilon_{ar} = \varepsilon_{at} - \sqrt{\frac{\sigma_a}{E}} \varepsilon_{at}. \quad (11)$$

Амплитуды остаточной деформации и напряжения определяют величину рассеянной в вершине надреза энергии за цикл нагрузок:

$$W = K_\phi \sigma_a \varepsilon_{ar}, \quad (12)$$

где K_ϕ – коэффициент формы петли гистерезиса [9], который для алюминиевых сплавов изменяется незначительно и может быть принят постоянным, $K_\phi = 3$.

4. Расчет числа циклов нагружения N до возникновения микротрещин на поверхности концентратора напряжений. Расчет проводим по формуле [4]

$$R_m W^\alpha N = 1, \quad (13)$$

$$R_m = R \left(1 + r \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right), \quad (14)$$

где R , α – параметры уравнения кривой усталости (13) при симметричном цикле нагрузок; r – коэффициент, учитывающий наличие среднего напряжения.

5. Расчет числа циклов нагружения N_f до возникновения макротрещины в концентраторе напряжений. Расчет выполняем в соответствии со следующей методикой. Число циклов N_f находим по напряжениям σ_{ad} , вычисленным на расстоянии d от вершины надреза:

$$\sigma_{ad} = \sigma_a - G_\sigma d. \quad (15)$$

Ввиду малости размера d , который для сплавов Д16 и В95 соответственно составляет 0,12 и 0,08 мм, среднее напряжение цикла локальных нагрузок можно принимать равным величине σ_m в вершине концентратора напряжений.

По значению амплитуды напряжения σ_{ad} и формуле (7) вычисляем амплитуду полной деформации ε_{atd} , затем по (11) – амплитуду остаточной деформации ε_{ard} . Зависимость для расчета рассеянной за цикл нагружения энергии W_d аналогична формуле (12):

$$W_d = K_\phi \sigma_{ad} \varepsilon_{ard}. \quad (16)$$

Уравнение кривой усталости до возникновения макротрещины в надрезе принимает вид

$$R_m W_d^\alpha N_f = 1. \quad (17)$$

Важно отметить, что параметры приведенных выше зависимостей для расчета амплитуд полной и остаточной деформаций, числа циклов до возникновения трещин могут быть получены по результатам испытаний гладких образцов с использованием метода петли гистерезиса. При этом объем испытаний не превышает обычно требуемого для получения кривой усталости в форме Велера $\sigma - N$ и зависимостей для расчета эквивалентных по коэффициенту асимметрии цикла напряжений. В лаборатории “Прочность и надежность авиаконструкций” Харьковского авиационного института (ХАИ) разработаны автоматизированные системы, управляемые компьютером. Системы включают блоки аналоговой и цифровой обработки сигналов, пропорциональных напряжениям и деформациям, специализированные навесные тензометры, необходимое программное обеспечение [10]. Применительно к сплавам Д16АТ, АМцМ и стали 30ХГСА в состоянии поставки численные значения параметров для расчета долговечности по локальному НДС приведены ранее [2–4].

Результаты экспериментальных исследований. Проведены усталостные испытания плоских образцов из сплавов Д16АТ и В96пчТ2 с концентраторами напряжений при отнулевом регулярном нагружении до разрушения. В качестве концентраторов напряжений рассмотрены свободное и заполненное стальным болтом, поставленным без зазора и натяга, отверстие, а также проушины с болтами различных диаметров. Коэффициенты концентрации напряжений получены по методу конечных элементов. Применительно к заполненному отверстию и проушинам решены задачи контактного взаимодействия болтов различного диаметра с образцами. Конечноэлементные модели образцов показаны на рис. 1. Размеры образцов и значения теоретических коэффициентов концентрации напряжений для нетто-сечения приведены в таблице.

Размеры образцов и коэффициенты концентрации напряжений для нетто-сечения

Отверстие	D , мм	B , мм	A , мм	K_T
Свободное	6	36	–	2,60
Заполненное	6	36	–	2,28
Проушина	6	26	16	4,37
»	8	26	16	3,42
»	10	26	16	2,85

Примечание: D – диаметр отверстия; B – ширина образца; A (для проушин) – расстояние от центра отверстия до торца образца по направлению прикладываемой к болту нагрузки.

Далее все кривые усталости представлены в зависимости от нетто-напряжений, экспериментальные данные обозначены точками. Там, где возможно результаты испытаний, которые проведены в ХАИ, дополнены аналогичными результатами испытаний, выполненными в Центральном аэрогидродинамическом институте им. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ) под руководством Б. Ф. Богданова.

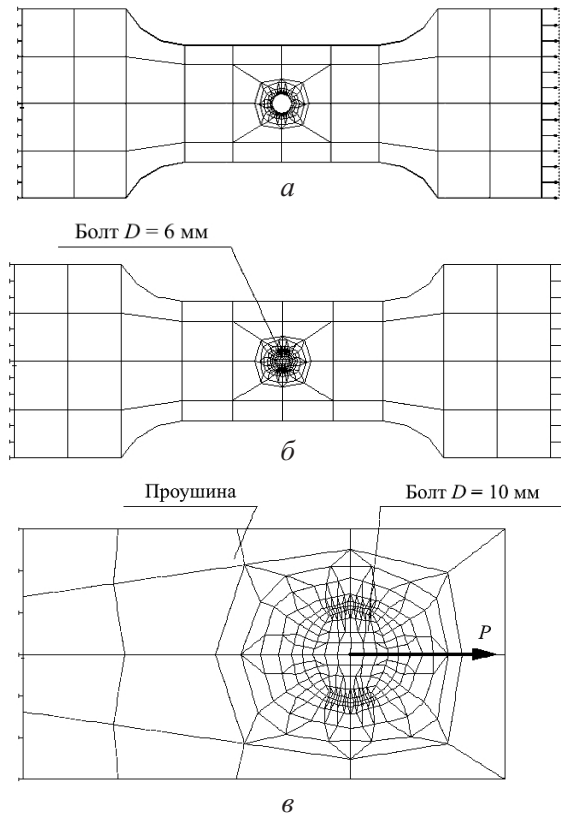


Рис. 1. Граничные условия и конечноэлементные модели испытанных образцов: *а*, *б* – со свободным и заполненным отверстием соответственно; *в* – проушина.

На рис. 2 приведены данные испытаний образцов из сплава Д16АТ со свободным отверстием.

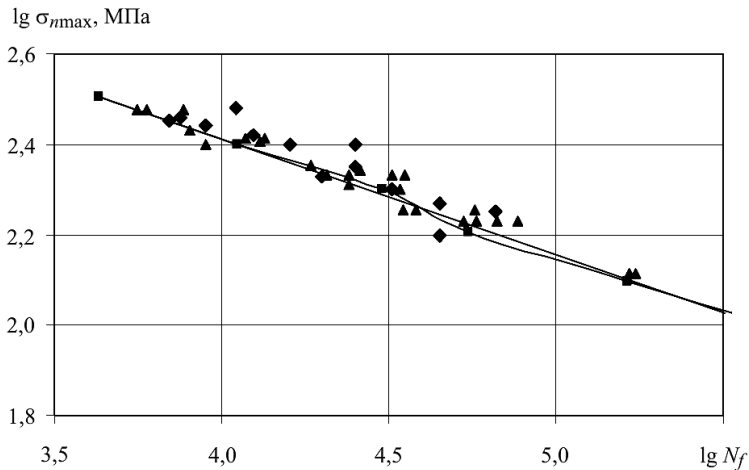


Рис. 2. Расчетная и экспериментальная кривые усталости образцов из сплава Д16АТ со свободным отверстием по данным ХАИ (◆) и ЦАГИ (▲). (Здесь и на рис. 3–6: ■ – расчет долговечности по локальному НДС до возникновения макротрещины в концентраторе напряжений; прямые линии получены путем аппроксимации теоретической зависимости степенным уравнением.)

Рис. 3 иллюстрирует результаты испытаний образцов из сплава В95пчТ2 с отверстием, проведенных в ХАИ и ЦАГИ.

На рис. 4 показаны результаты испытаний проушин из сплава Д16АТ с болтом диаметром 10 мм, которые также проводили в ХАИ и ЦАГИ. Обозначение теоретической кривой аналогично рис. 2, 3.

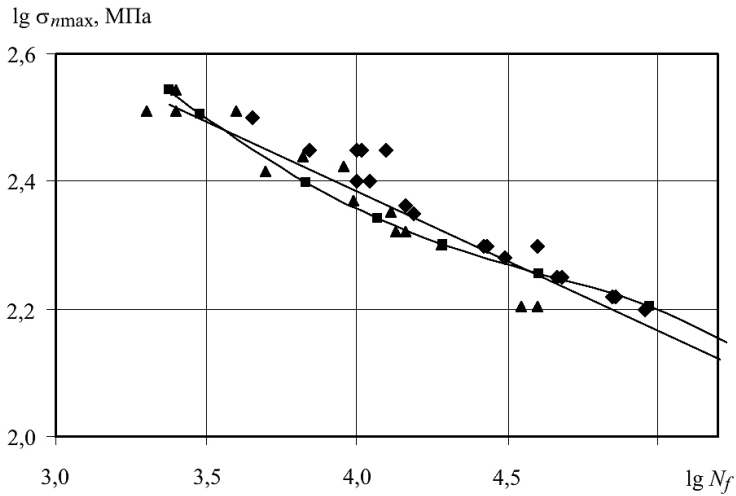


Рис. 3. Расчетная и экспериментальная кривые усталости образцов из сплава В95пчТ2 со свободным отверстием по данным ХАИ (◆) и ЦАГИ (▲).

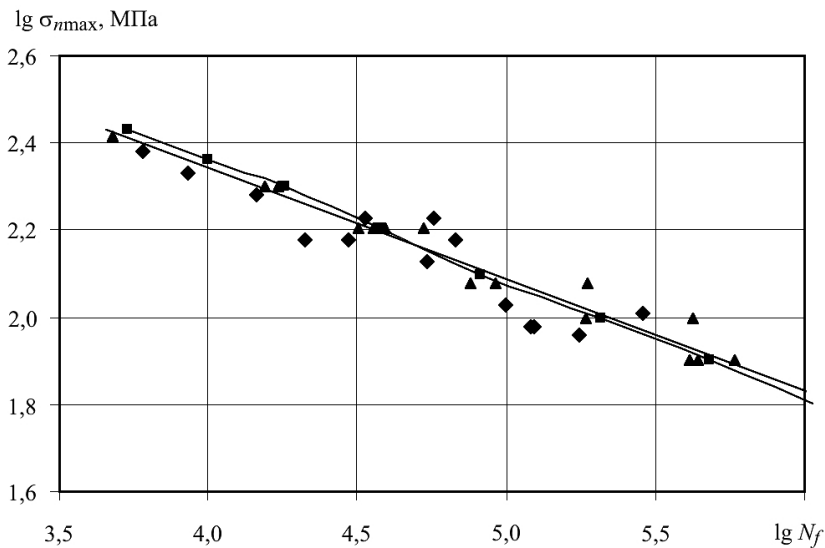


Рис. 4. Расчетная и экспериментальная кривые усталости проушин $D = 10$ мм из сплава Д16АТ по данным ХАИ (◆) и ЦАГИ (▲).

Можно отметить, что экспериментальные данные, полученные в ХАИ и ЦАГИ, принадлежат единым статистическим совокупностям (рис. 2–4).

На рис. 5, 6 представлены результаты расчетов и испытаний образцов с заполненным отверстием и трех типов проушин с различными диаметрами болтов, проведенных в ХАИ.

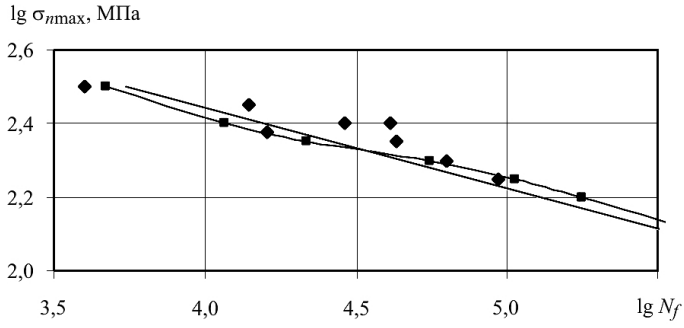


Рис. 5. Расчетная и экспериментальная кривые усталости образцов из сплава В95пчТ2 с заполненным отверстием (◆), $D = 6$ мм.

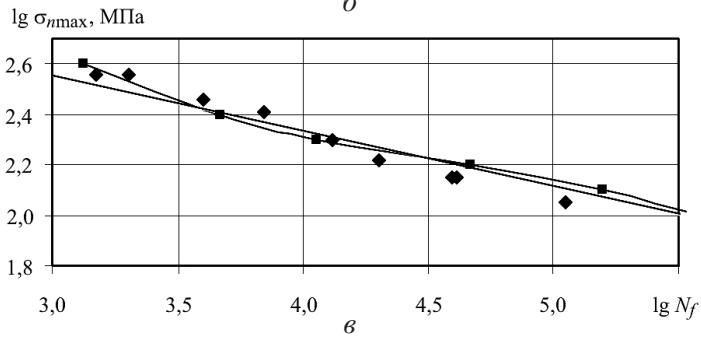
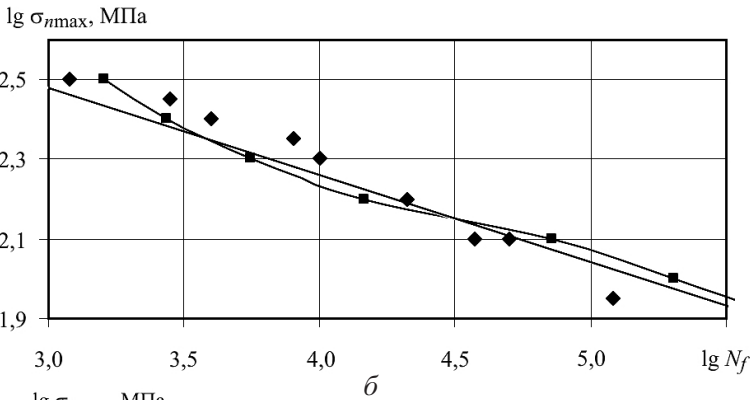
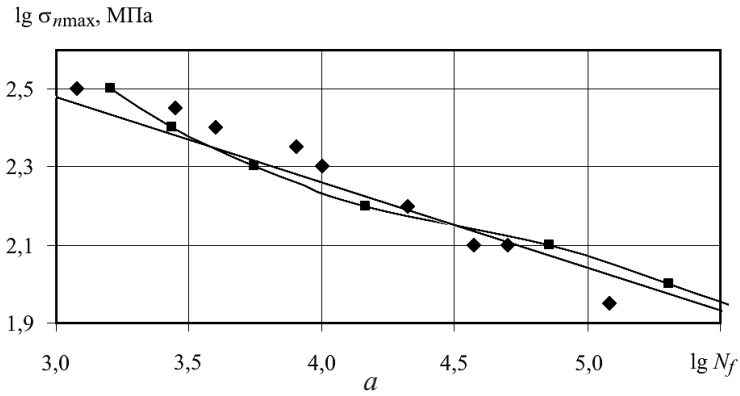


Рис. 6. Расчетная и экспериментальная кривые усталости проушин (◆) с различным диаметром из сплава В95пчТ2: а, б, в – $D = 6, 8, 10$ мм соответственно.

Анализ полученных результатов. Из данных, приведенных на рис. 2–6, следует, что между теоретическими кривыми усталости и результатами экспериментальных исследований отмечается хорошее согласование. Применительно к образцам со свободным отверстием теоретические кривые близки к левой границе рассеяния экспериментальных данных. Это можно объяснить тем, что расчет проводился до возникновения макротрещины, а испытания – до разрушения образцов. При испытаниях проушин такое не наблюдается. Возможно, это связано с проявлением фреттинга, особенно при больших долговечностях, хотя для уменьшения его влияния между болтом и стенкой образца наносилась смазка.

Все расчеты проводились только с использованием параметров теоретических моделей, полученных по результатам испытаний гладких образцов.

Представляет интерес анализ соотношения долговечностей до возникновения макро- и микротрещин в концентраторе напряжений. Из соотношений (13) и (17) следует

$$\frac{N_f}{N} = \left(\frac{W}{W_d} \right)^\alpha \quad (18)$$

или

$$\frac{N_f}{N} = \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{ad}} \right)^{\alpha(1+m)/m} \quad (19)$$

Последнее равенство справедливо, поскольку для малопластичных материалов амплитуда остаточной деформации в концентраторе напряжений практически равна половине амплитуды пластической деформации [3]. После подстановки (15) в (19) с учетом (4) и последующих преобразований имеем

$$\frac{N_f}{N} = \frac{1}{(1 - B \bar{G}_y d)^{\alpha(1+m)/m}}, \quad (20)$$

где

$$B = \frac{2(K_T \sigma_{n \max})^2}{\sigma_a \left(2\sigma_{\max} + E \frac{1+m_c}{m_c} \left(\frac{\sigma_{\max}}{K_c} \right)^{1/m_c} \right)}. \quad (21)$$

Величина B зависит от действующих на образец с концентратором напряжений нагрузок и изменяется для анализируемых сплавов от 0,15–0,16 в области малой долговечности до двух при практически упругом деформировании. В связи с этим отношение N_f/N возрастает с уменьшением номинальных напряжений от 1,06–1,09 до некоторого значения, которое при радиусе отверстия 3 мм для сплава Д16АТ равно 1,79, для В95пчТ2 – 1,46, оставаясь далее постоянным.

Важно отметить, что основные уравнения, используемые для расчета долговечности по локальному НДС, а именно: максимального напряжения (3);

градиента напряжений (4); амплитуды напряжения (6) и остаточной деформации (10) зависят от произведения теоретического коэффициента концентрации на максимальное номинальное напряжение. Таким образом, локальный цикл деформирования материала в вершине надреза полностью определяется этим произведением. Как следствие, число циклов до возникновения трещин на поверхности надреза для различных концентраторов напряжений будет совпадать при условии равенства произведения теоретического коэффициента концентрации на номинальное напряжение.

Согласно методу расчета долговечности по номинальным напряжениям долговечность тел с произвольными концентраторами определяют на основе базовой кривой усталости образцов со свободным отверстием, для которых коэффициент концентрации $K_{T0} = 2,6$. Для базовой кривой усталости зависимость (20) примет вид

$$\frac{N_{f0}}{N_0} = \frac{1}{(1 - B\bar{G}_{y0}d)^{\alpha(1+m)/m}}, \quad (22)$$

где N_{f0} , N_0 – числа циклов до возникновения макротрещины в образце и микротрещин на поверхности отверстия образца; \bar{G}_{y0} – относительный градиент упругих напряжений в образце со свободным отверстием радиуса ρ_0 , вычисленный по формуле (5).

В случае равенства произведения K_T на номинальное напряжение $\sigma_{n\max}$ для произвольного надреза и базового образца

$$N = N_0$$

разделим (20) на (22). Тогда получим

$$\frac{N_f}{N_{f0}} = \left(\frac{1 - B\bar{G}_{y0}d}{1 - B\bar{G}_y d} \right)^{\alpha(1+m)/m}. \quad (23)$$

Из уравнения (23) следует, что если относительные градиенты упругих напряжений в произвольном надрезе и образце со свободным отверстием совпадают, то равны и числа циклов до возникновения трещин при условии равенства произведения K_T на номинальное напряжение $\sigma_{n\max}$. Приближенно можно считать, что относительные градиенты совпадают при равенстве радиусов отверстий.

По-видимому, впервые такое предположение было сформулировано В. П. Павелко [11] при обработке многочисленных экспериментальных данных по усталостной долговечности заклепочных соединений из сплава Д16Т. Им было показано, что долговечность образцов со свободным отверстием, заклепочных соединений с обычной технологией изготовления и высокоресурсных соединений с натягом совпадает при условии равенства окружных напряжений, найденных в предположении линейного физического закона. Следует отметить, что такие окружные напряжения являются фиктивными, они могут

значительно превышать не только предел текучести, но и предел прочности материала.

Аппроксимируем кривую усталости до возникновения макротрещины (17) степенным уравнением вида

$$(K_T \sigma_{n \max})^M N_f = C, \quad (24)$$

где M , C – параметры уравнения, вычисляемые из условия наилучшей аппроксимации результатов расчета по зависимости (17).

Применительно к базовой кривой усталости образца со свободным отверстием уравнение (24) запишем так:

$$(K_{T0} \sigma_{n \max})^M N_{f0} = C. \quad (25)$$

Приравняем левые части (24) и (25):

$$N_f = N_{f0} \left(\frac{K_{T0}}{K_T} \right)^M. \quad (26)$$

Соотношение (26) справедливо, если радиусы отверстий произвольного концентратора напряжений и стандартного образца одинаковы. В ином случае воспользуемся аналогией с соотношением (23). В уравнении (23) величина B при отнулевом нагружении изменяется от 0,15 до 2. Для приближенного учета радиуса концентратора напряжений в расчете по номинальным напряжениям можно принять среднее значение $B = 1$. Показатель степени в (23) есть тангенс угла наклона кривой усталости. Для алюминиевых сплавов параметр диаграммы циклического деформирования m может зависеть от нагрузки [2, 3]. Примем осредненное значение показателя степени в (23), численно равное M в зависимости (24). В таком случае соотношение (26) преобразуется следующим образом:

$$N_f = N_{f0} \left(\frac{K_{T0}(1 - \bar{G}_{y0}d)}{K_T(1 - \bar{G}_y d)} \right)^M. \quad (27)$$

Эту же формулу можно получить из (26) путем корректировки коэффициентов концентрации напряжений с учетом размера начальной макротрещины d [4].

В рамках рассматриваемого диапазона числа циклов до возникновения трещин для расчета долговечности стандартного образца используем степенное уравнение

$$(\sigma_{n \max})^M N_{f0} = A. \quad (28)$$

На рис. 4–6 результаты по уравнению (27) показаны прямой линией. Числа циклов до возникновения макротрещин, вычисляемые по зависимости (27),

хорошо согласуются с экспериментальными данными в диапазоне долговечностей, для которого найден показатель степени M . Хотя значения N_f по уравнениям (17) и (27) отличаются незначительно, тангенсы углов наклона кривой (17) переменны. Численные значения показателя степени в (27) существенно зависят от диапазона нагрузок, для которого проведена аппроксимация.

Согласно методу расчета долговечности по номинальным напряжениям показатель степени M находят по результатам усталостных испытаний образцов в ограниченной области нагрузок. Это затрудняет экстраполяцию уравнения (28) на более широкую область долговечности. Наряду с рассеянием экспериментальных данных отмеченное позволяет объяснить встречающиеся в литературных источниках значительные различия между M для одного и того же алюминиевого сплава.

В некоторых случаях удобно проводить расчет долговечности элементов конструкции с концентраторами напряжений по величине приведенных напряжений $\sigma_{пр}$, подставляя их в формулу (28) вместо $\sigma_{n\max}$:

$$\sigma_{пр} = \sigma_{n\max} \frac{K_T(1 - \bar{G}_y d)}{K_{T0}(1 - \bar{G}_{y0} d)}, \quad (29)$$

где $\sigma_{n\max}$ – максимальное номинальное напряжение действующего на элемент конструкции цикла нагрузок.

Расчет долговечности по формулам (27) или (28) с учетом (29) совпадает.

Таким образом, располагая кривой усталости стандартного образца (28) и результатами расчета напряженного состояния элемента конструкции в упругой постановке, по уравнению (27) можно определить число циклов нагружения до возникновения макротрещины в элементе конструкции.

Выводы

1. Метод расчета долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию дает результаты, которые удовлетворительно согласуются с данными испытаний образцов из сплавов Д16 и В95 с отверстиями и проушинами, проведенных в ХАИ и ЦАГИ. Исходными данными для расчетов служили циклические деформационные и усталостные характеристики сплавов, полученные по результатам испытаний гладких образцов.

2. В качестве расчетной кривой усталости до возникновения макротрещин целесообразно принимать кривую, полученную с использованием метода расчета долговечности по локальному НДС.

3. Доказано, что кривые усталости элементов конструкций совпадают при равенстве произведения теоретического коэффициента концентрации напряжений на максимальное номинальное напряжение цикла нагрузок и одинаковых радиусах отверстий.

4. Отмечена существенная зависимость показателя степени обычно принимаемого уравнения кривой усталости от действующих нагрузок. Степенное уравнение может быть использовано в случае интерполяции результатов

испытаний, экстраполяция такого уравнения может приводить к ошибкам в расчете долговечности.

5. Обосновано применение метода расчета долговечности по номинальным напряжениям элементов конструкций из алюминиевых сплавов с учетом базовой кривой усталости образцов со свободным отверстием и результатов расчета НДС этих элементов в упругой постановке.

Резюме

Конкретизовано метод розрахунку довговічності згідно з локальним напружено-деформованим станом елементів конструкцій з алюмінієвих сплавів за віднульового регулярного навантаження. Проведено порівняння розрахункових результатів із даними випробувань зразків із вільним і заповненим отвором та вушок. Даються рекомендації щодо використання методу розрахунку довговічності за номінальними напруженнями.

1. Воробьев А. З., Олькин Б. И., Стебенев В. Н. и др. Соппротивление усталости элементов конструкций. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
2. 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 // Пробл. прочности. – 2000. – № 3. – С. 37 – 45.
3. Фомичев П. А. Прогнозирование долговечности тел с надрезами по локальному напряженно-деформированному состоянию. Сообщ. 2. Определение параметра, характеризующего долговечность тел с концентраторами напряжений // Там же. – С. 46 – 55.
4. Фомичев П. А. Прогнозирование долговечности тел с надрезами по локальному напряженно-деформированному состоянию. Сообщ. 3. Учет градиентов напряжений и деформаций // Там же. – № 4. – С. 12 – 21.
5. Фомичев П. А. Параметр, характеризующий долговечность тел с концентраторами напряжений // Тр. междунар. конф. “Пошкодження матеріалу під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування”. – Тернополь, 2009. – С. 82 – 90.
6. Фомичев П. А. Расчет градиентов действительных напряжений и деформаций в зоне концентрации при упругопластическом циклическом деформировании. Сообщ. 1 // Пробл. прочности. – 1989. – № 9. – С. 98 – 100.
7. Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
8. Фомичев П. А., Трубочанин И. Ю. Изменение амплитуды пластической деформации при регулярном и программном мягком нагружении сталей // Пробл. прочности. – 1991. – № 2. – С. 39 – 44.
9. Фомичев П. А., Трубочанин И. Ю. Уравнение контура и коэффициент формы петли гистерезиса // Там же. – 1997. – № 3. – С. 30 – 38.

10. *Фомичев П. А., Третьяков А. С., Черных А. А.* Методика экспериментальных исследований циклических деформационных и усталостных характеристик конструкционных материалов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2008. – Вып. 2 (53). – С. 24 – 35.
11. *Павелко В. П.* Основы прикладной теории усталостного разрушения заклепочных соединений // Динамика, выносливость и надежность авиационных конструкций и систем. – М.: НИИГА, 1980. – С. 14 – 24.

Поступила 22. 03. 2010