

УДК 539.43

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ОСТАТОЧНЫМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ

© 2012 г.

А.А. Миронов, Ю.Н. Орешкин

*Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева*

miran56@mail.ru

Поступила в редакцию 10.10.2012

Выполнен анализ влияния на скорость роста усталостных трещин различных факторов, связанных с наличием в конструкции остаточных деформаций в виде местного искажения формы. Представлены результаты экспериментального исследования развития усталостных трещин в алюминиевых сплавах в условиях растяжения с изгибом после предварительного пластического деформирования при наличии остаточных напряжений от пластического изгиба. Предложены расчетные модели, позволяющие учесть влияние рассмотренных факторов на скорость роста трещин. Приведено сравнение данных эксперимента с результатами расчета ресурса пластины с ребрами жесткости, имеющей остаточные деформации.

Ключевые слова: усталостная трещина, коэффициент интенсивности напряжений, пластическая деформация.

Для тонкостенных конструкций автомобильного, железнодорожного, речного и морского транспорта одним из распространенных видов повреждений являются остаточные деформации в виде местного искажения формы в результате локального пластического деформирования. Такие повреждения, как показывают исследования [1], не оказывают существенного влияния на предельную статическую прочность при условиях нагружения, не вызывающих потери устойчивости. Местное повышение напряжений, обусловленное искажением формы, приводит к снижению усталостной прочности. Малоизученными являются вопросы о влиянии остаточных деформаций на вторую стадию усталостного разрушения, связанную с ростом усталостных трещин.

Среди факторов, вызванных наличием остаточных деформаций и влияющих на скорость развития трещин, можно выделить следующие: изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) в виде перераспределения напряжений срединного слоя и появления дополнительных напряжений изгиба, пластическое деформирование металла, появление остаточных напряжений.

Область остаточных деформаций рассматривается как элемент тонкой оболочки. В рамках сдвиговой теории изгиба НДС в вершине сквозной трещины для условий локализованного течения материала в общем случае определяется пятью вели-

чинами коэффициентов интенсивности напряжений (КИН). Наибольший практический интерес представляют трещины нормального отрыва, характеризующиеся соответственно КИН срединного слоя K_0 и изгиба K_u . В работе [2] показано, что в качестве параметра, определяющего статическую трещиностойкость в условиях растяжения с изгибом, может быть использовано приведенное значение КИН:

$$K_{np} = K_u / 3 + \sqrt{K_u^2 / 9 + K_0^2}. \quad (1)$$

Анализ явления контакта берегов трещины на сжатой поверхности, выполненный с использованием численной процедуры метода конечных элементов (МКЭ), показывает, что хотя контакт берегов вызывает значительное изменение значений КИН, в то же время не оказывает существенного влияния на предельное состояние в широком диапазоне соотношений K_0 и K_u и требует своего учета лишь в случаях, близких к нагружению изгибом без растяжения.

Экспериментальные исследования развития усталостных трещин в условиях одновременного растяжения и изгиба были выполнены на образцах из сплава 1561 (АМг61) толщиной 5 мм при отношениях максимальных напряжений изгиба σ_u к напряжениям срединного слоя σ_0 , равных 0, 1, 1,5, и коэффициентах асимметрии цикла нагружения $R = 0,2$ для σ_0 и $R = 0,56$ для σ_u .

На рис. 1 приведены кинетические диаграммы усталостного разрушения (КДУР) образцов, представляющие собой зависимость скорости роста трещины от размаха КИН. Светлые точки соответствуют размаху КИН срединного слоя ΔK_0 , темные точки – размаху приведенного КИН ΔK_{np} , вычисленному в соответствии с (1). Увеличение скорости роста трещины, связанное с дополнительным изгибом образцов, наблюдается на стадии ее развития по прямому излому.

Из представленных результатов следует, что в качестве параметра, определяющего скорость роста усталостной трещины в условиях растяжения с изгибом на стадии ее развития по прямому излому, может быть использована величина приведенного КИН, определяемая выражением (1).

Экспериментальные исследования влияния на кинетику усталостных трещин предварительного пластического деформирования выполнены на образцах из сплавов АМг6М, К482Т1 и Д16АТВ. На рис. 2, 3 светлыми точками представлены КДУР для образцов из сплавов соответственно АМг6М и К482Т1, подвергнутых предварительному продольному растяжению в диапазоне остаточных деформаций до 6%. На рис. 4 светлыми точками представлены КДУР для образцов из сплава Д16АТВ, подвергнутых предварительному продольному и поперечному растяжению до значения остаточных деформаций 2%.

Анализ полученных данных показывает, что на стадии развития трещины по прямому излому предварительное пластическое деформирование во всех случаях приводит к увеличению скорости ее роста. Наиболее чувствительными к предварительному растяжению оказываются сплавы с более высоким показателем степени деформационного упрочнения. При этом более интенсивно скорость роста трещин меняется при малых остаточных деформациях, соответствующих области более высокой степени деформационного упрочнения. Полученные данные согласуются с результатами работы [3] и позволяют в качестве основного механизма, определяющего влияние предварительного пластического деформирования на кинетику усталостных трещин, принять явление смыкания берегов трещины, обнаруженное Эльбером. В рамках данной концепции предварительное деформационное упроч-

нение уменьшает пластическое раскрытие вершины трещины при последующем ее росте, что приводит к более позднему в цикле нагружения смыканию берегов трещины и, соответственно, к увеличению эффективного размаха КИН.

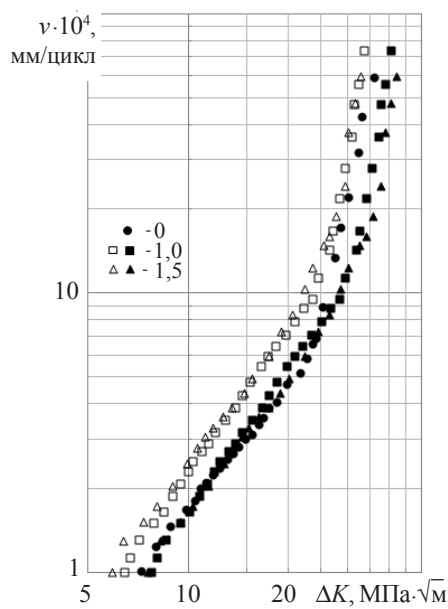


Рис. 1

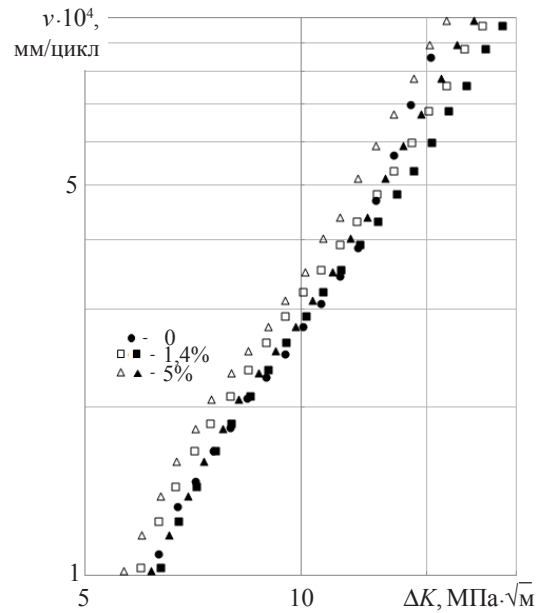


Рис. 2

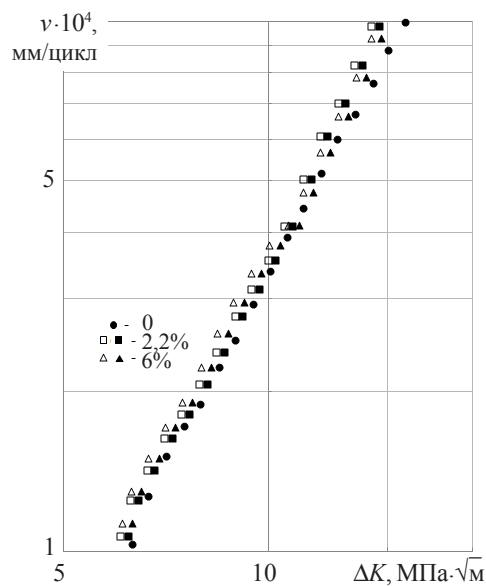


Рис. 3

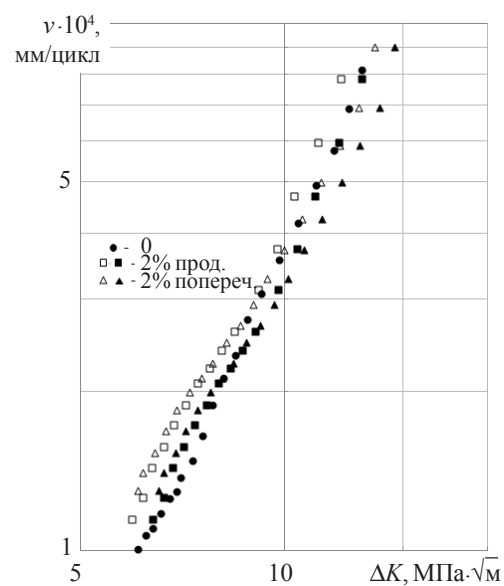


Рис. 4

В работе [4] в рамках модели Дагдейла сформулирована постановка задачи и получены уравнения для описания закономерностей пластического смыкания берегов трещины. Численное решение указанных уравнений с учетом изменения напряжения в монотонной пластической области перед вершиной трещины до значения σ_T^p , определяемого степенью предварительного деформирования, позволяет по-

строить зависимость относительной величины КИН в момент открытия трещины $\bar{K}_{op} = K_{op} / K_{max}$ от относительной величины $\bar{\sigma}_T^p = \sigma_T^p / \sigma_T$ (рис. 5). Для циклического нагружения с $R > 0$ используется аппроксимация в виде: $\bar{K}_{op}(R) = \bar{K}_{op} + (1 - \bar{K}_{op})R^2$.

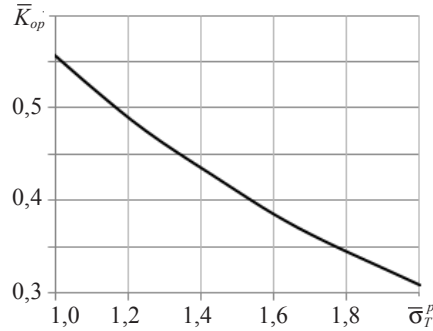


Рис. 5

Предварительное пластическое деформирование изменяет условие текучести на линии продолжения трещины. Для определения σ_T^p используем кинематическую модель упрочнения:

$$0,5(s_{ij} - \rho_{ij})(s_{ij} - \rho_{ij}) = \sigma_T^2 / 3, \quad (2)$$

где s_{ij} – компоненты девиатора напряжений, ρ_{ij} – компоненты тензора остаточных микронапряжений, описывающие траекторию смещения центра поверхности текучести и определяемые величиной деформационного упрочнения $\Delta\sigma_T$ на диаграмме предварительного деформирования. В рамках асимптотического двухосного напряженного состояния в вершине трещины из (2) следует выражение для напряжения на линии продолжения трещины, соответствующее условию текучести, имеющее одинаковый вид при продольном и поперечном предварительном деформировании:

$$\sigma_T^p = \sqrt{\sigma_T^2 - 3\Delta\sigma_T^2 / 4} + \Delta\sigma_T / 2.$$

Увеличение эффективного размаха КИН $\Delta K_{ef} = K_{max} - K_{op}$ вследствие упрочнения материала приводит к сдвигу КДУР в логарифмических координатах вдоль оси ΔK на величину поправки, определяемую отношением

$$\Delta K_{ef} \left(\bar{\sigma}_T^p > 1 \right) / K_{ef} \left(\bar{\sigma}_T^p = 1 \right).$$

На рис. 2–4 темными точками приведены КДУР предварительно деформированных образцов, полученные с учетом указанной поправки. Совпадение диаграмм на участке развития трещины по прямому излому свидетельствует о возможности использования модели смыкания берегов трещины для учета предварительного пластического деформирования материала.

Экспериментальные исследования влияния на кинетику усталостных трещин самоуравновешенных по толщине остаточных напряжений выполнены на образцах из сплава Д16АТВ толщиной 6 мм. Остаточные напряжения создавались предварительным пластическим изгибом заготовки по цилиндрической поверхности и составляли на поверхности 110 МПа. После изготовления образцы соединялись парно в пакет, что устраняло их кривизну, но создавало постоянный изгибающий

момент. В результате испытаний наблюдалось незначительное увеличение скорости роста трещины, которое объяснялось действием постоянного изгибающего момента и, по мнению авторов, не было связано с остаточными напряжениями от предварительного пластического изгиба.

Рассмотренные модели учета влияния остаточных деформаций на циклическую трещиностойкость конструкций использованы в исследовании кинетики усталостного разрушения широко распространенного конструктивного элемента, состоящего из пластин, подкрепленных продольными ребрами и поперечным набором, выполненного из сплава Д16. В лабораторных условиях в результате локального нагружения была получена одиночная бухтина между ребрами жесткости. Максимальная величина остаточного прогиба при толщине пластины 3 мм составила 12 мм. Процесс усталостного разрушения сопровождался развитием трещины в трех направлениях, в каждом из которых определялась ее длина l_i : в область бухтины – l_1 , в область неповрежденной пластины – l_2 , в стенку ребра – l_3 . Ресурс конструктивного элемента определялся разрушением продольного ребра жесткости. На рис. 6 представлено сравнение экспериментальных данных (сплошные кривые) с результатами расчетов (штриховые кривые) изменения длин трещины l_i в зависимости от числа циклов нагружения N . Расчет выполнялся пошаговым методом.

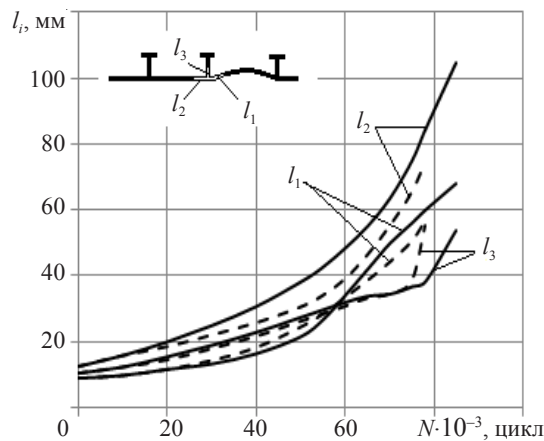


Рис. 6

Приращение длины трещины по одному из направлений задавалось, приращение длины трещины по двум другим направлениям определялись из условия равенства числа циклов нагружения:

$$N_j = \int_{l_i^j}^{l_i^{j+1}} \frac{1}{v} dl_i,$$

где j – шаг приращения длины трещины, $v = C(\Delta K_{np})^m$ – аппроксимация КДУР в виде формулы Пэриса, $\Delta K_{np} = \Delta \sigma_{np} \sqrt{\pi l_i} F(l_i)$, $F(l_i)$ – функция влияния геометрии конструкции, значения которой определялись с использованием МКЭ.

Расхождение экспериментального и расчетного значений ресурса составило 8%. Из сравнения полученных данных с результатами расчетов для конструктивного элемента без бухтины следует, что наличие остаточных деформаций приводит

к снижению ресурса на 30%. Из анализа результатов, полученных в ходе решения задачи, следует, что определяющим фактором влияния остаточных деформаций на ресурс является перераспределение напряжений срединного слоя. Изменения ΔK_{np} , связанные с дополнительным изгибом и пластическим деформированием металла, не превысили в рассматриваемом случае 10%. Следует ожидать, что развитие трещины из центральной области остаточных прогибов приведет к увеличению ресурса конструкции.

Список литературы

1. Оценка работоспособности сосудов с вмятинами и выпучинами / В.М. Долинский, В.И. Черемская, Д.И. Берестов, В.М. Кравец // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2006. № 3. С. 52–54.
2. Волков В.М., Миронов А.А. Особенности расчета статической трещиностойкости пластин в условиях изгиба с растяжением // Прикладные проблемы прочности и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьков. ун-т, Горький. 1985. Вып. 31. С. 41–46.
3. Schijve J. The effect of pre-strain on fatigue crack growth and crack closure // Engineering Fracture Mechanics. 1976. V. 8. P. 575–581.
4. Budiansky B., Hutchinson J. Analysis of closure in fatigue crack growth // J. of Applied Mechanics. Tr. ASME. 1978. Ser. E. V. 45, No 2. P. 267–276.

FEATURES OF THE CALCULATION CYCLIC CRACK RESISTANCE OF THIN-WALLED STRUCTURES WITH RESIDUAL DEFORMATIONS

A.A. Mironov, Yu.N. Oreshkin

Performed an analysis of influence on the rate of fatigue cracks growth of various factors which associated with the presence of residual strains in the structure in the form of a local shape distortion. Presented the results of experimental study of growth of fatigue cracks in aluminum alloys under tension with a bend, after preliminary plastic deformation, in the presence of residual stresses from plastic bending. Proposed computational models which allows to account for the effects of the considered factors on the rate of crack growth. The comparison of experimental data with the calculated results of the resource plate with stiffeners with residual deformations.

Keywords: fatigue crack, stress intensity factor, plastic deformation.