

УДК 620.179.1

DOI: 10.18372/0370-2197.2(87).14724

М. В. КАРУСКЕВИЧ, С. В. ЩЕПАК, С. В. ХИЖНЯК, Е. Ю.КОРЧУК

Национальный авиационный университет, Украина

ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16АТ

Получены оптические изображения деформационного рельефа у концентраторов напряжений при циклическом нагружении образцов алюминиевого сплава Д16АТ. Установлены значения насыщенности деформационного рельефа, соответствующие моменту возникновения усталостной трещины. Показана связь между поврежденностью материала у концентратора напряжений и процессом развития трещины.

Ключевые слова: усталостная трещина, деформационный рельеф, оптический контроль, параметр повреждения.

Введение. Для обоснования метода прогнозирования продолжительности стадии распространения усталостной трещины в плакированных алюминиевых сплавах проведены эксперименты с применением методов механических испытаний и компьютеризованного оптического мониторинга состояния поверхности вблизи концентраторов напряжений и усталостных трещин.

Использовались образцы, изготовленные из сплава Д16АТ. Для защиты от коррозии листовая сплав Д16АТ плакируется алюминием. Толщина плакирующего слоя составляет 5-7% толщины листа [1]. Пластичный плакирующий слой, имеющий, по сравнению с основным материалом, значительно более низкие значения предела пропорциональности, рассматривается в качестве индикатора накопленного усталостного повреждения. Для оптического исследования деформационного рельефа образцы полировались алмазной пастой в зоне концентраторов напряжения.

Количественная оценка насыщенности деформационного рельефа в зоне зарождения усталостной трещины выполнялась по цифровым оптическим изображениям, полученным с помощью стандартного оптического микроскопа при увеличении $200\times - 300\times$ (рис.1).

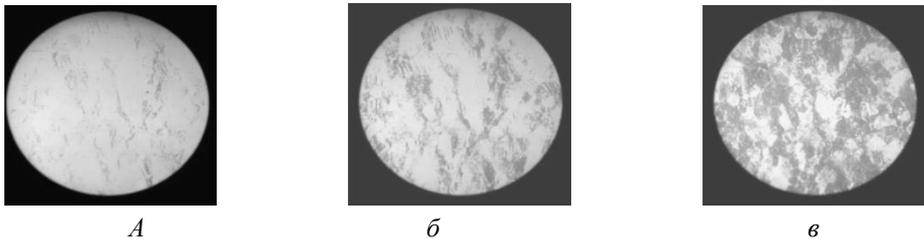


Рис. 1. Эволюция деформационного рельефа поверхности сплава Д16АТ при $\sigma_{\max}=147$ МПа, $R = 0$: а – при наработке 1% долговечности; б – при наработке 6% долговечности; в – при наработке 50 % долговечности

Природа формирования оптических изображений деформационного рельефа. Деформационный рельеф поверхности металлов, формирующийся при их циклическом нагружении имеет дислокационную природу. В модели Вуда [2] рассматривается следующая последовательность элементарных актов формирования рельефа: в течение той части цикла, когда нагрузка возрастает, на наибо-

лее благоприятно расположенной плоскости скольжения происходит сдвиг; при обратном действии нагрузки сдвиг происходит на параллельной плоскости, так как сдвиг по первичной плоскости затруднен механическим упрочнением и окислением образованной свободной поверхности. В цикле сдвига происходит выдавливание или вдавливание поверхности металла. Дальнейшее нагружение в соответствии с моделью Вуда приводит к формированию трещины (рис. 2).

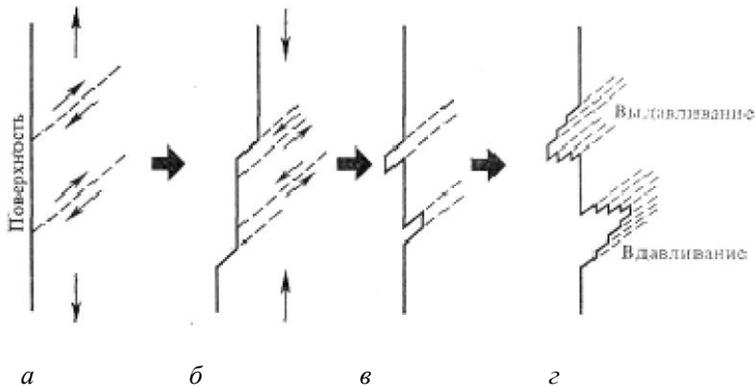


Рис. 2. Модель зарождения усталостной трещины, предложенная Вудом: *а* – первоначальный сдвиг по плоскости скольжения; *б* – обратное действие нагрузки – сдвиг по параллельной плоскости; *в* – формирование экструзий и интрузий; *г* – интенсификация процесса формирования экструзий и интрузий [2]

При исследовании циклически деформируемого металла методом оптической микроскопии картина отражения зависит от свойств отражающей поверхности. При неровной поверхности отражённые лучи идут во всевозможных направлениях. Поверхность считается неровной, если размеры её неровностей не меньше длины световой волны, то есть примерно не меньше одного микрометра. Поверхность с микронеровностями, соизмеримыми с длиной волны видимого света, называется матовой. Если размер неровностей меньше длины волны света, то поверхность называется зеркальной. При отражении от зеркальной поверхности параллельность пучка сохраняется: отражённые лучи идут также параллельно.

Таким образом, отражение света может быть: зеркальным, которое дают полированные поверхности; направленно-рассеянным, при котором максимум силы света совпадает с направлением зеркального отражения; диффузным, которое дают идеально рассеивающие матовые поверхности (рис.3).

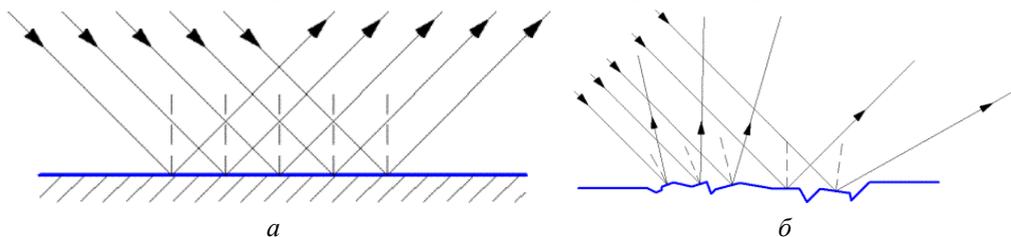


Рис.3. Зеркальное отражение (*а*) и диффузное отражение (*б*).

Если наблюдаемая поверхность имеет неровности, то возможно отражение лучей всех указанных видов отражения. Соответственно на изображении это будет обозначено разной степенью освещённости разных участков исследуемого

объекта. Темные пятна на рассматриваемых оптических изображениях представляют собой области интрузий и экструзий, возникающих в лакирующем слое в результате циклического нагружения.

Оптическая схема формирования изображения поверхности с помощью металлографического микроскопа показана на рис. 4.

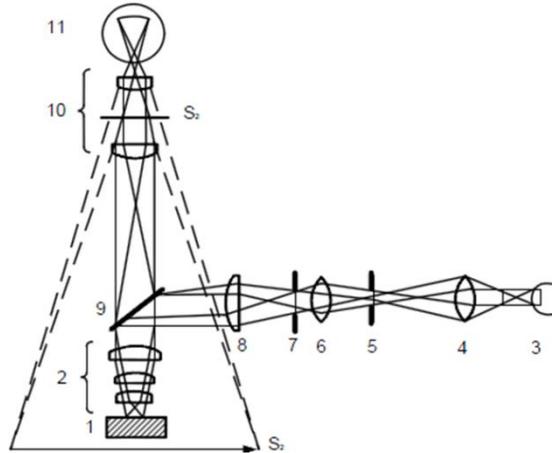


Рис. 4 Оптическая схема металлографического микроскопа

Объект (1) помещают перпендикулярно оптической оси микроскопа в передней фокальной плоскости объектива (2) и освещают через объектив почти параллельно оптической оси пучком света от осветительной системы (3-8) через полупрозрачное зеркало (9). Наблюдают объект через проекционный объектив (10) с помощью окуляра (11).

Неровности в виде выступов, впадин, разрывов и трещин рассеивают лучи в разных направлениях. В результате такого отражения не все лучи попадают в объектив микроскопа и участвуют в построении изображения, а только пучки, ограниченные апертурным углом. Впадины (интрузии) и выпуклости (экструзии) выделяются полутенями и тенями различной интенсивности.

Лучи от гладких мест поверхности, перпендикулярных падающим лучам, дают ярко и ровно освещенное изображение. Затемнёнными являются изображения выступов и впадин, лучи от которых лишь частично участвуют в построении изображений. Лучи, попадающие на трещины, щели, изломы испытывают многократные отражения и теряют энергию, то есть как бы поглощаются ими. Поэтому изображения трещин, щелей, изломов видны в виде тёмных линий, указывающих их расположение на поверхности и повторяющих геометрию и размеры дефектов.

Использование оптического микроскопа с увеличением $300^{\times} \dots 400^{\times}$ обеспечивает наблюдение и измерение поверхностных дефектов, в том числе формирующихся при циклическом нагружении лакированного сплава Д16АТ экструзий и интрузий, размер которых составляет несколько микрометров.

Результаты исследования деформационного рельефа в зоне формирования усталостной трещины. В качестве характеристики локальной поврежденности, формирующейся у концентраторов напряжений использовался предложенный ранее параметр повреждения [3].

Параметр повреждения определялся по цифровым фотографиям деформационного рельефа. Фотографии поверхности циклически деформированных образцов обрабатывались с помощью вычислительной программы, что позволяло определить параметр повреждения, как числовое значение относительной площади поверхности со следами деформации в зоне контроля.

Предельное (критическое, $D_{кр.}$) значение параметра повреждения определяет состояние материала, при котором усталостная трещина формируется и начинает распространение.

Рисунок 5 иллюстрирует соответствующий разброс значений параметра $D_{кр.}$ для группы образцов, испытанных при одном и том же режиме нагружения.

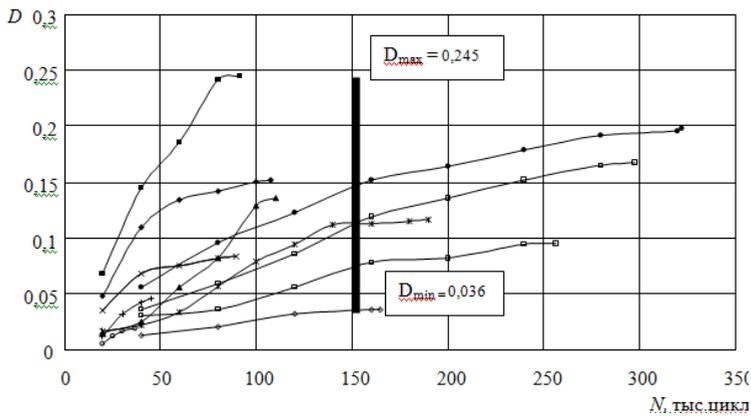


Рис. 5. Разброс значений $D_{кр.}$ для группы образцов

Использовались следующие обозначения: $N_{тр.1,0}$ — количество циклов до формирования усталостной трещины длиной 1,0 мм; N_p — количество циклов нагружения до разрушения; $N_{тр.}$ — продолжительность распространения усталостной трещины.

Полученные результаты могут быть представлены в виде зависимости продолжительности стадии распространения усталостной трещины от критического параметра повреждения $D_{кр.}$ (рис. 6). При этом, $N_{тр.}$ определяется как разность количества циклов, при котором образец разрушается и количества циклов, при котором возникает трещина длиной 1 мм, т.е.

$$N_{тр.} = N_{разр.} - N_{тр.1,0}$$

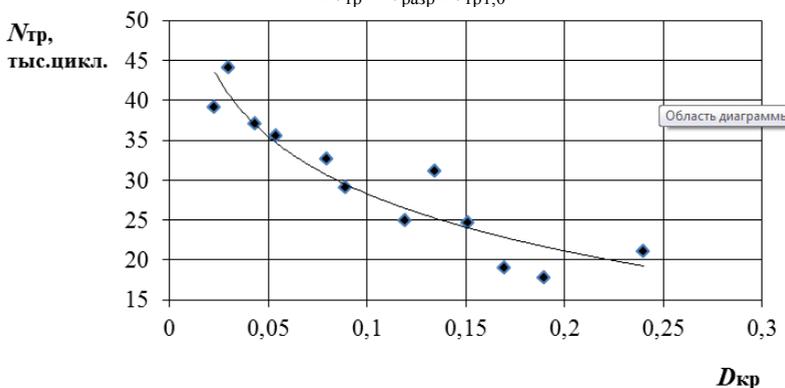


Рис. 6. Зависимость продолжительности стадии распространения усталостной трещины от критического параметра повреждения $D_{кр.}$ при $\sigma_{max} = 60,0$ МПа и коэффициенте асимметрии $R=0$

Для данной зависимости получено регрессионное уравнение:

$$N_{тр} = -0,214Ln(D_{кр}) + 5,119$$

и коэффициент детерминации: $R^2 = 0,8244$.

Как видно из приведенного графика и результата корреляционного и регрессионного анализов, между критическим параметром повреждения и продолжительностью распространения трещины от длины 1,0 мм. до разрушения существует тесная корреляционная связь.

Полученная зависимость показывают, что при увеличении критического значения насыщенности деформационного рельефа продолжительность распространения трещины уменьшается.

Аналогичные испытания проводились при максимальных напряжениях 60,0; 70,0; 80,0 МПа с коэффициентом асимметрии $R=0$ и при асимметричном цикле нагружения.

Выводы.

Проведенные эксперименты и анализ полученных результатов позволили предложить новый метод прогнозирования предельного состояния элементов авиационных конструкций по параметрам деформационного рельефа поверхностного слоя в зоне формирования усталостной трещины.

Определена связь предельной насыщенности деформационного рельефа на стадии формирования усталостной трещины с продолжительностью стадии распространения трещины в гладких образцах сплава Д16АТ и в конструктивных элементах обшивки фюзеляжа.

Список литературы

1. Белова А.Ф. Производство полуфабрикатов из алюминиевых сплавов / А.Ф. Белова. – М.: Металлургия, 1985. – 352 с.
2. Wood W.A. Recent observations on fatigue fracture in metals / W. A. Wood // ASTM STP237. –1958. –Р. 110– 121
3. Пат. 29683 Україна, МПК G 01 N 3/32. Спосіб прогнозування залишкової довговічності елементів авіаційної конструкцій по насиченості і фрактальній розмірності деформационного рельєфу / Ігнатівич С.Р., Карускевич М.В., Маслак Т.П., Пантелєєв В.М., Якушенко О.С.; заявник та патентовласник Національний авіаційний університет. – № u 200709909; заявл. 04.09.07; опубл. 25.01.08, Бюл. № 2.

Стаття надійшла до редакції 13.05.2020.

Карускевич Михайло Віталійович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри конструкції літальних апаратів аерокосмічного факультету Національного авіаційного університету.

Щепак Сергій Вікторович – канд. техн. наук, доцент кафедри конструкції літальних апаратів аерокосмічного факультету Національного авіаційного університету.

Хижняк Сергій Васильович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри конструкції літальних апаратів аерокосмічного факультету Національного авіаційного університету.

Корчук Олена Юрївна – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри філологічних та природничих дисциплін Інституту міжнародного співробітництва та освіти Національного авіаційного університету, 2802korchuk@ukr.net.

М. В. КАРУСКЕВИЧ, С. В. ЩЕПАК, С. В. ХИЖНЯК, О. Ю. КОРЧУК

ОПТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ВТОМНОЇ ПОШКОДЖЕНОСТІ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ Д16АТ

На зразках зі сплаву Д16АТ проведено експерименти зі застосуванням методів механічних випробувань, оптико-електронного моніторингу стану поверхні поблизу концентраторів напружень і втомних тріщин.

Пластичний плакуючий шар, яким вкрито листовий алюмінієвий сплав, розглядається в якості індикатора втомного пошкодження. У зоні концентратора напруження відбувається формування деформаційного рельєфу з наступним його насиченням під час збільшення циклічного навантаження, що відповідає дислокаційній моделі зародження втомної тріщини. Відповідно до цієї моделі відбувається наступна послідовність елементарних актів: початковий зсув по площині ковзання; зворотна дія навантаження – зсув по паралельній площині так як зсув по першій площині утруднений механічним зміцненням і окисленням вільної поверхні, що тільки утворилась; видавлювання або вдавлювання поверхні металу; посилення процесу формування екструзій та інтрузій.

При дослідженні деформаційного рельєфу методом оптичної мікроскопії було проаналізовано зміну насиченості темних ділянок поверхні, які являють собою чергування інтрузій та екструзій, що виникають у плакуючому шарі в результаті циклічного навантаження.

Параметр пошкодженості, який було запропоновано раніше як характеристика локальної пошкодженості, визначався по цифровим фотографіям деформаційного рельєфу. Фотографії оброблялись за допомогою обчислювальної програми, що дозволяло визначити параметр пошкодження як числове значення відносної площини поверхні зі слідами деформації в зоні контролю. Критичне значення параметру пошкодження визначає стан матеріалу, при якому втомна тріщина формується і починає розповсюджуватися.

Встановлено значення насиченості деформаційного рельєфу, що відповідають моменту виникнення втомної тріщини. Показано зв'язок граничної насиченості деформаційного рельєфу на стадії формування втомної тріщини з тривалістю стадії розповсюдження тріщини.

У результаті дослідження запропоновано новий метод прогнозування граничного стану елементів авіаційних конструкцій по параметрам деформаційного рельєфу поверхневого шару в зоні формування втомної тріщини.

Ключові слова: втомна тріщина, деформаційний рельєф, оптичний контроль, параметр пошкодження.

M. V. KARUSKEVICH, S.V. SHCHEPAK, S.V. KHIZHNIAK, O.Yu. KORCHUK

OPTICAL MONITORING OF ALUMINUM ALLOY D16AT FATIGUE DAMAGE

Specimens of the D16AT alloy have been tested and explored by the computer aided optical method of the surface state analysis in the area near the stress concentrator and fatigue crack track. Ductile clad layer of the aluminum alloy is considered to be indicator of the accumulated fatigue damage. In the area of the stress concentrator the surface deformation relief emerges and develops with increase of the saturation under the cyclical loading. The mechanism of the crack nucleation complies with current dislocation model. According to the dislocation model the crack nucleates in the following elementary stages: initial slip along the slip plane, reversal motion on the parallel plane as the primary plane is strengthened and oxidized, formation of extrusions and intrusions on the surface, further saturation of deformation relief.

At the exploring of the deformation relief, formed by the extrusions and intrusions, the evolution of the surface relief intensity have been quantitatively analyzed by the computer aided optical method. Proposed early damage parameter which defines local fatigue damage is estimated by the digital photos of the surface deformation relief. Original software is used to calculate damage parameter as a relative area of the surface with features of micro plastic deformation in the checked area. Critical damage parameter defines the state of material correspondent to the crack initiation and beginning of its propagation. The values of deformation relief saturation correspondent to crack initiation are found. The relation of the deformation relief critical saturation and duration of the fatigue crack propagation stage is shown.

As a result of the work the new method for the prediction the critical state of aircraft structural components by the parameters of the deformation relief at the stress concentrators has been proposed.

Key words: fatigue crack, deformation relief, optical control, damage parameter

Reference

1. Belova A.F. *Proizvodstvo polufabrikatov iz aljuminievyh splavov* / A.F. Belova. – M.: Metallurgija, 1985. – 352 s.
2. Wood W.A. Recent observations on fatigue fracture in metals / W. A. Wood // ASTM STP237. –1958. –P. 110– 121
3. Pat. 29683 Ukraina, MPK G 01 N 3/32. Sposib prohnozuvannia zalyshkovoï dovhovichnosti elementiv aviatsiinoï konstruktsii po nasychenosti i fraktalnoi rozmirnosti deformatsii-noho reliefu / Ihnatovych S.R., Karuskevych M.V., Maslak T.P., Pantelieiev V.M., Yakushenko O.S.; zaiavnyk ta patentovlasnyk Natsionalnyi aviatsiinyi universytet. – № u 200709909; zaiavl. 04.09.07; opubl. 25.01.08, Biul. № 2.