

# ОБРАЗОВАНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ОБРАЗЦАХ С МНОЖЕСТВЕННЫМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ

С.Р. Игнатович, Е.В. Каран, В.С. Краснопольский, Д.Г. Шкуратов,  
И.И. Швиднюк

Национальный авиационный университет, Украина

**Abstract.** In this work test procedure of specimens with multiple holes made of aluminum alloy D16AT is considered for multiple site damage assessment. Special methodology for fatigue cracks initiation and propagation registration is developed. According to experimental data kinetic diagrams of fatigue crack propagation are obtained. Crack propagation rate and number of cycles up to estimated length crack formation are defined.

**Введение.** Современные авиационные конструкции согласно нормативным документам (АП-25, FAR-25) должны отвечать требованиям прочности, надежности и безопасной эксплуатации на протяжении всего срока своей службы. Обеспечение соответствия этим требованиям создает необходимость периодического контроля конструкции с целью своевременного обнаружения повреждений. Среди различных видов таких повреждений следует выделить усталостные трещины в элементах конструкций. К наиболее опасным видам усталостного повреждения авиационных конструкций относится многоочаговое повреждение (Multiple Site Damage – MSD), которое характеризуется наличием множественных усталостных трещин в одном конструктивном элементе [1].

Основным местом локализации данного вида повреждения являются швы заклепочных соединений авиационной конструкции из-за концентрации напряжений у отверстий под заклепку. Трещины зарождаются у края отверстий в случайные моменты времени и растут со случайной скоростью. Распространение относительно небольших по размерам трещин между отверстиями может привести к разрушению перемычки между ними. В результате формируется магистральная трещина, которая из-за перераспределения напряжений по сечению заклепочного соединения начинает достаточно быстро распространяться вдоль такого соединения и приводит к разрушению конструкции в целом [2]. Потому проблема изучения образования и распространения усталостных трещин в подобных соединениях является актуальной и важной для прогнозирования остаточного ресурса конструкции.

Настоящая работа посвящена экспериментальным исследованиям многоочагового повреждения в образцах из алюминиевого сплава Д16АТ, имитирующих заклепочный шов реальной конструкции. Данный сплав широко применяется в авиационных конструкциях.

**Подготовка образцов.** Образцы для исследования многоочагового усталостного повреждения изготавливались из листового алюминиевого сплава марки Д16АТ толщиной 1,5 мм. В состоянии поставки лист имел габаритные размеры 4000×1500 мм, нормальную точность изготовления, закаленный и искусственно состаренный, с обычной обработкой поверхности. На гильотине производилась вырубка заготовок образцов с последующим доведением заданных геометрических размеров фрезерованием. Форма и размеры образцов для исследований выбирались из соображения их надежной фиксации в захватах испытательной машины и для расположения нескольких концентраторов напряжения, имитирующих фрагмент обшивки летательного аппарата. В образце выполнены 14 отверстий под заклепку диаметром 4 мм, которые расположены в три ряда по 5, 4 и 5 отверстий соответственно (рис. 1.1.).

Сверление отверстий выполнялось на сверлильном станке с высокой скоростью вращения. После сверления отверстия обрабатывались с использованием специальной развёртки. Такая технология предотвращала появление наплывов и надиров у отверстий, которые способствуют зарождению усталостных трещин.

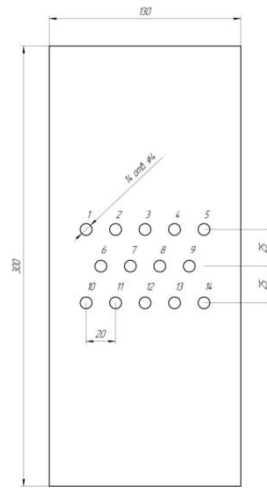


Рис. 1.1. Образец для испытаний.

После сверления и развёртывания отверстий выполнялось полирование поверхности образца вдоль концентраторов алмазной пастой – АСМ 60/40 до показателя шероховатости  $R_a = 0,320 \dots 0,050$  мкм, что позволяло надёжно регистрировать трещину на начальных стадиях её роста.

**Оборудование для испытаний.** Для выполнения испытаний в условиях осевого растяжения использовалась гидропульсирующая испытательная машина МУП-20 (рис. 1.2). Частота нагружения составляла 11,12 Гц.

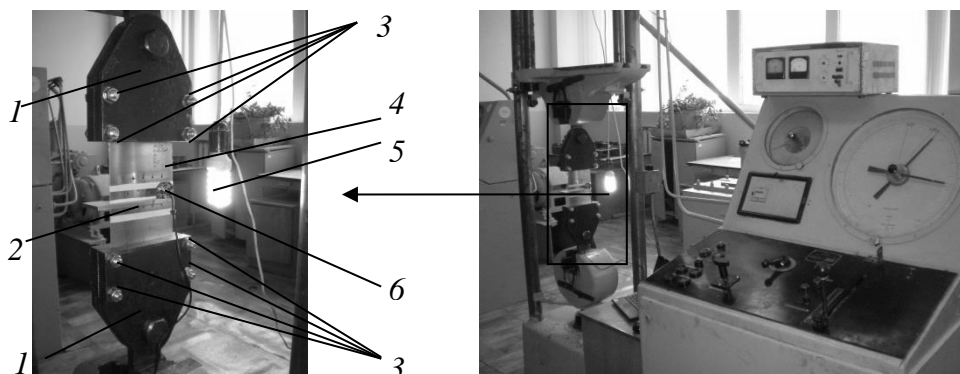


Рис. 1.2. Испытательная машина МУП-20: 1 – захваты; 2 – штатив для крепления камеры на образце; 3 – болты затяжные; 4 – образец; 5 – лампа; 6 – камера.

Крепление образца на испытательной машине осуществлялось специальными захватами с центрирующими отверстиями, что обеспечивало равномерное распределение напряжения по сечениям образца. Эти отверстия предотвращают перекос образца в захватах и обеспечивают его центрирование.

Образцы нагружались циклическим растяжением при трех значениях максимальных номинальных напряжениях цикла в нетто сечениях вдоль горизонтальной линии с пятью отверстиями: 80 МПа; 100 МПа и 120 МПа (по три образца на каждый режим нагружения). Напряжения в нетто сечении вдоль линии с четырьмя отверстиями были меньше по величине, и это учитывалось при определении КИН.

**Методика регистрации и измерения длин усталостных трещин.** Все трещины, образовавшиеся на образце в процессе его нагружения, регистрировались цифровой камерой *Logitech QuickCam E3500* с распределительной способностью  $960 \times 720$  пикселей и увеличением  $\times 20$  (рис. 1.3). Управление камерой осуществлялось посредством оригинального программного обеспечения *Logitech WebCam 1.10.1113.0 Software (ENU)* установленного на персональном компьютере. Подключение камеры к персональному компьютеру выполнялась через порт *USB 2.0*.

С целью уменьшения веса камеры и возможности ручной регулировки резкости, плата камеры с линзой была освобождена от корпуса, как показано на рис. 1.3 б).



Рис. 1.3. Цифровая камера *Logitech QuickCam E3500*: а) камера в корпусе; б) плата камеры с линзой.

Для крепления камеры на образце был разработан специальный штатив, который позволяет одной камерой фотографировать каждую зону вероятного появления трещины (рис. 1.4). В штативе выполнен прорезь для установки платы камеры с натяжкой. Использование штатива позволяет получать снимки на одинаковом фокусном расстоянии, а крепление его на образце устраняет размытость снимков.

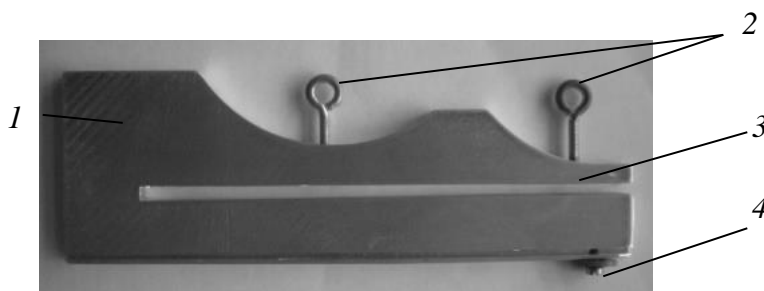


Рис. 1.4. Штатив для крепления камеры на образце: 1 – тело штатива; 2 – винты для фиксации штатива на образце; 3 – прорезь для образца; 4 – винт крепления камеры.

На снимках автоматически регистрировалось точное время каждой сделанной фотографии, что позволяло с высокой точностью определять число циклов на момент фотографирования. Полученные снимки отображают порядковый номер отверстия, длину трещины, а также направление её роста. В процессе эксперимента фиксируется очерёдность появления трещин.

При группировке фотографий по зонам, в которых появилась и развивалась трещина, определялось число циклов наработки. С использованием программы «Scale 1.0» вычислялись длины трещин. Эта программа позволяет определить расстояние в пикселях между двумя точками, указанными оператором с последующим пересчётом с помощью коэффициента в метрическую систему.

Полученные данные по длинам трещин использовались для построения кинетической диаграммы усталостного разрушения – зависимости скорости роста трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжения.

Кривые роста трещин представлялись в виде функций их длины ( $a$ ) от числа циклов нагружения ( $N$ ). По этим зависимостям для любой длины трещины определялись значения скорости распространения трещин ( $da/dN$ ).

Данные о размерах трещин использовались также для определения размаха коэффициента интенсивности напряжения (КИН) в цикле. КИН рассчитывался по формуле

$$\Delta K = Y(a)\Delta\sigma\sqrt{\pi a}, \quad (1)$$

где  $\Delta\sigma$  – размах номинальных напряжений в нетто сечении образца по линии отверстий с учетом разгрузки этого сечения уже имеющимися трещинами;  $Y(a)$  – геометрическая функция коррекции, описывающая влияние на КИН высоких напряжений у отверстия из-за эффекта концентрации.

Размах номинального напряжения, действующего в сечении, рассчитывался по формуле:

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta F}{b \left( l - kd - \sum_{i=1}^n a_i \right)} \quad (2)$$

где  $\Delta F$  – размах растягивающей силы на образце;  $l$  – ширина образца;  $k$  – количество отверстий в сечении;  $d$  – диаметр отверстий;  $b$  – толщина образца;  $a_i$  – длина  $i$ -й трещины;  $n$  – количество трещин в сечении.

Параметр  $Y(a)$  описывает влияние на КИН высоких напряжений у отверстия из-за эффекта концентрации. Для пластины с отверстием радиусом  $r$ , из которого исходит трещина длиной  $a$ , параметр  $Y(a)$  определяется по формуле

$$Y(a) = 1 + 2,36 \exp \left[ -2,08 \left( \frac{a}{r} \right) \right]. \quad (3)$$

По результатам испытаний для всех трещин в образцах получена обобщенная кинетическая диаграмма усталостного разрушения, которая имеет три характерные участка – участок низких скоростей (I), участок средних скоростей (II) и участок высоких скоростей (III) роста трещин (рис. 1.5).

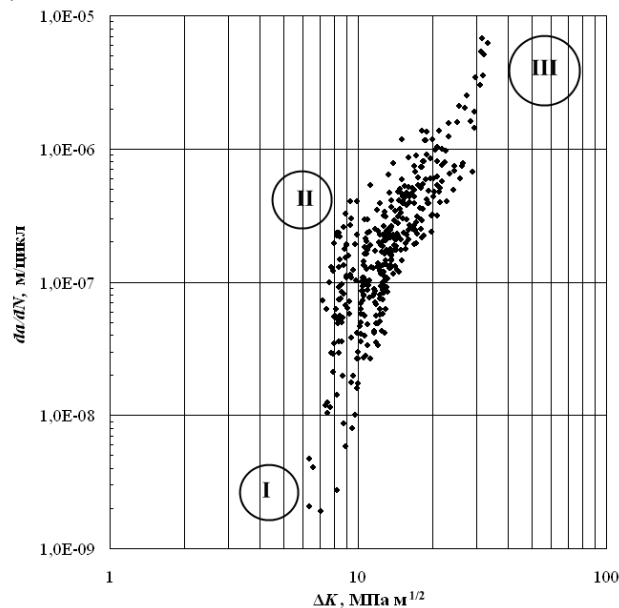


Рис. 1.5. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения алюминиевого сплава Д16АТ, полученная при испытаниях образцов с отверстиями.

### Литература

1. Метод определения соответствия к АП 25.571. Обеспечение безопасности конструкции по условиям прочности при длительной эксплуатации. – М.: Минтранс, 1996. – 29 с.
2. Recommendations for regulatory action to prevent widespread fatigue damage in the commercial airplane fleet: a report of the AAWG (Final Report) / Airworthiness Assurance Working Group. – 1999. – 162 p.