

© Л. А. Бохоева, В. Ю. Курохтин, В. Е. Рогов

ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА ТРЕЩИН В ИЗДЕЛИЯХ АВИАТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

В статье рассмотрен процесс усталостного разрушения и закономерностей развития усталостных трещин на основе ресурсные испытания образцов лопастей винта вертолета. Проведены видеосъемки процесса подрастания трещин в образцах во время ресурсных натуральных испытаний. Разработана методика распознавания трещин в изделиях авиационной техники, а также определения геометрических параметров трещин и скорости их подрастания с помощью математических методов теории распознавания образов и размытых множеств на базе ЭВМ. В результате обработки видеозаписей определяются геометрические параметры трещин и скорость изменения их габаритов. На основе полученных данных делаются выводы о сроке безопасной надежной эксплуатации объектов машиностроения, в которых присутствуют дефекты типа трещин.

Ключевые слова: ресурсные испытания, лопасть винта вертолета, усталостная прочность, трещина, бинаризация, матрица, распознавание образов.

L. A. Bokhoeva, V. Yu. Kurokhtin, V. E. Rogov

INVESTIGATION OF CRACKS GROWTH IN AEROTECHNICS PRODUCTS ON THE BASIS OF FULL-SCALE TESTS

In the article the process of tireless destruction and conformities to law of development of fatigue cracks is considered on resource tests the basis of helicopter rotor standards of blades. The video surveys cracks growing of process are conducted in standards during resource model tests. Methodology of cracks recognition is worked out in the aerotechics products and also determinations of geometrical parameters of cracks and their growth rate by means of mathematical methods patterns recognition of theory and washed out great numbers on the basis of COMPUTER. As a result of video recordings processing cracks geometric parameters and speed of their dimensions change are determined. On the basis of obtained data the conclusions are drawn about safe reliable lifetime of engineering objects in which such defects as cracks are present.

Keywords: life tests, helicopter rotor blade, fatigue strength, crack, binarization, matrix, pattern recognition.

Проблема предотвращения усталостных разрушений актуальна во всех отраслях машиностроения, особенно в таких, где аварии вследствие

разрушения ответственных деталей ведут к катастрофическим последствиям (авиация, железнодорожный транспорт и т.д.). Эта проблема приобретает еще большее значение в связи с быстрым ростом мощностей, увеличением скоростей, сил и других параметров рабочих процессов машин [1].

Сопротивление металлов усталостному разрушению характеризуется пределом выносливости (σ_{-1}). Пределом выносливости называют наибольшее напряжение цикла, которое выдерживает металл без разрушения при любом количестве циклов [2].

По мере роста числа циклов при любых значениях напряжений выше предела выносливости в металле последовательно протекают следующие процессы: 1) пластическая деформация; 2) зарождение трещин; 3) постепенное развитие некоторых из них с преобладающим распространением главной трещины; 4) быстрое окончательное разрушение.

Процесс усталостного разрушения начинается с пластической деформации поверхностных слоев детали (в соответствии с рисунком 1). Скорость локальных пластических деформаций при циклическом деформировании на несколько порядков превышает скорость пластической деформации при статической нагрузке [3]. Скольжение дислокаций начинается в зернах с благоприятной ориентацией вблизи концентраторов напряжений. С повышением числа циклов в поверхностных слоях возрастает плотность дислокаций и количество вакансий (рис. 1а). При достижении базового количества циклов формируется поверхностный упрочненный слой металла с большим количеством зародышевых трещин, размер которых не достиг критического (рис. 1б). Повышение количества циклов не может вызвать дальнейшего развития разрушения в таком слое [4]. И лишь когда напряжения превышают предел выносливости, трещины в поверхностном слое достигают критической длины (рис. 1в), после чего начинается процесс их слияния в магистральную трещину (рис. 1г) и распространение последней.

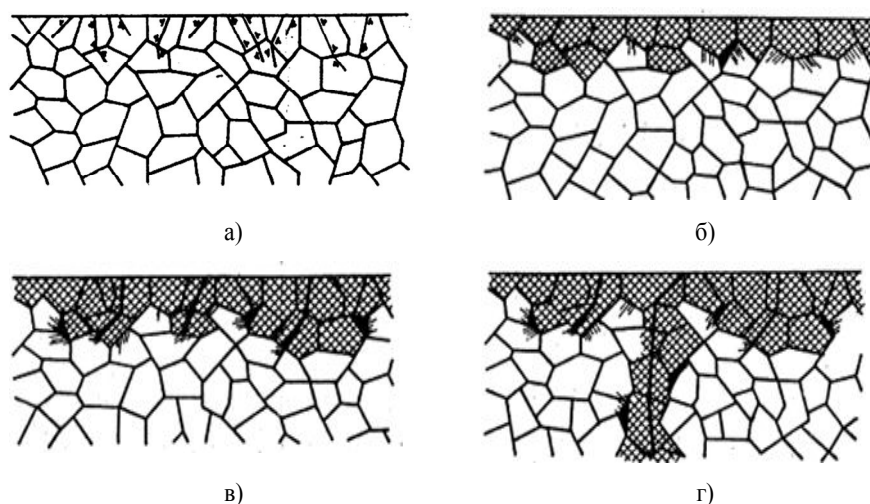


Рис. 1. Стадии развития усталостной трещины

С целью изучения процесса усталостного разрушения и закономерностей развития усталостных трещин были проведены ресурсные испытания образцов лопастей винта вертолета Ми-171 в научно-производственной лаборатории «Надежность, прочность изделий и конструкций» при ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления». На образцы прикладывалась растягивающая статическая нагрузка и знакопеременный изгибающий момент, в результате чего в образцах возникали напряжения, изменяющиеся по симметричному циклу [5]. В процессе испытаний происходила запись напряжений в режиме реального времени с помощью комплекса тензометрической аппаратуры и контрольно-измерительной системы.

В [6-8] описана методика нахождения ключевых усталостных характеристик, влияющих на ресурс изделий – логарифма долговечности и предела выносливости объектов машиностроения на примере лопасти винта вертолета. По итогам обработки полученных в ходе экспериментальных работ данных было определено, что при базе испытаний $N_0 = 1,6 \cdot 10^7$ циклов и амплитуде напряжений, меньшей или равной $\sigma_{max} = 76,94 \pm 2,32$ МПа, трещины в образце не будут достигать критической длины.

Однако в процессе эксплуатации не всегда возможно проконтролировать уровень напряжений, возникающих в конструкции, поэтому возникает вопрос: если трещина в конструкции все же возникла, то в течение какого срока скорость ее роста остается стабильной и относительно невысокой, что позволяет безопасно эксплуатировать изделие с уже имеющейся трещиной?

С целью ответа на поставленный вопрос были проведены видеосъемки процесса подрастания трещин в образцах лопастей во время ресурсных натуральных испытаний. В процессе испытаний после появления макротрещины длиной 0,5-1 мм на поверхности образца установка размещается так, чтобы камера оказалась над трещиной, и происходит съемка развития трещины под действием знакопеременной нагрузки вплоть до разрушения образца (рис. . 2).

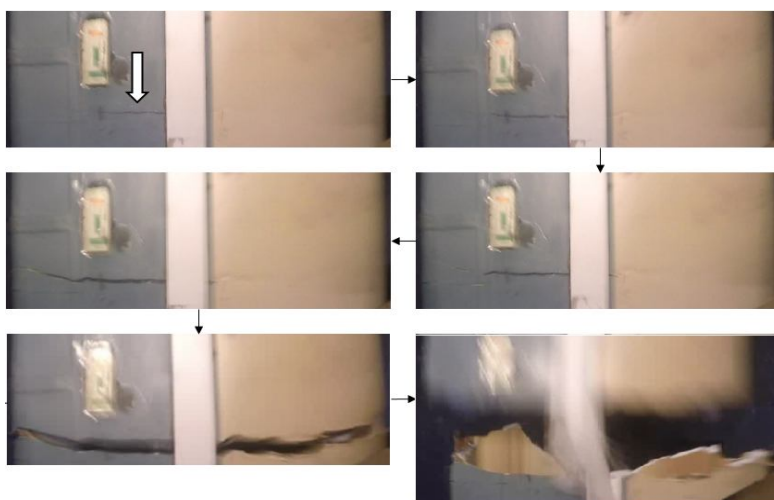


Рис. 2. Кадры из видеозаписи подрастания трещины

Для определения параметров трещин и скорости их подрастания проводится обработка видеозаписи эксперимента с помощью специально разработанной программы. Запись разделяется на отдельные кадры. После обработки всей видеозаписи с помощью созданного программного обеспечения получена информация о всех найденных трещинах, их характеристиках и динамике изменения их характеристик. Эта информация отображена визуально в виде графиков (рис. 3). На полученных графиках заметна немонотонность прироста габарита на отдельных интервалах, что свидетельствует о наличии погрешностей при обнаружении трещин. Погрешности обусловлены тем, что часть конца трещины слабо выражена на видеозаписи и может не распознаваться на некоторых кадрах.

По итогам работы могут быть сделаны следующие выводы:

- средняя скорость роста трещин в образцах лопастей винта вертолета на этапе их медленного устойчивого роста составляет порядка 0,2-0,4 мм/ч, на этапе их ускоренного роста (правый конец графика) – 25-30 мм/ч, что создает опасность эксплуатации лопастей на данном этапе;
- среднее время устойчивого медленного роста трещины составляет порядка 85-90% общего времени ее роста (порядка 165 ч) и может быть включено в ресурс конструкции.



График прироста длины трещины
(координаты «расстояние – время»)

График прироста ширины трещины
(координаты «расстояние – время»)

Рис. 3. Графики прироста габаритов трещины

Таким образом, ресурс лопастей вертолета может быть увеличен на 165 ч путем включения времени постепенного подрастания трещины в ресурс конструкции. Данный вывод имеет большое практическое значение, так как позволяет увеличить срок службы лопастей вертолета, что влечет за собой экономию средств. Полученные результаты планируется внедрить в производство на ОАО «Улан-Удэнский авиационный завод».

Литература

1. Бохоева Л. А., Курохтин В. Ю., Филиппова К. А. Испытание изделий авиационной техники с применением нового программного обеспечения для сбора, обработки данных и построения текущего состояния деформированного изделия // Вестник ВСГУТУ. – 2015. – № 4 (55). – С. 20-25.
2. ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. – Введен 01.01.81. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 36 с.
3. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. – М: Машиностроение, 1985. – 223 с.
4. Бохоева Л. А., Перевалов А. В., Чермошенцева А. С., Курохтин В. Ю., Лыгденов Б. Д., Рогов В. Е. Экспериментальное определение характеристик сопротивления усталости изделий авиационной техники // Вестник ВСГУТУ. – 2013. – № 5 (44). – С. 46-53.
5. Курохтин В. Ю. Определение усталостных прочностных характеристик авиационных изделий на основе ресурсных испытаний // Механики XXI века. – Братск, 2015. – № 14. – С. 22-28.
6. Бохоева Л. А., Рогов В. Е., Курохтин В. Ю., Перевалов А. В., Чермошенцева А. С. Определение ресурсных характеристик изделий авиационной техники на основе стендовых испытаний с использованием компьютерных технологий на примере лопасти винта вертолета // Системы. Методы. Технологии. – Братск, 2015. – № 4 (28). – С. 36-42.
7. Бохоева Л. А., Перевалов А. В., Чермошенцева А. С., Ергонов В. П., Рогов В. Е. Разработка стендов для ресурсных испытаний изделий авиационной и другой техники // Вестник ВСГУТУ. – 2013. – № 6 (45). – С. 24-29.
8. Бохоева Л. А., Пнев А. Г., Филиппова К. А. Разработка алгоритма автоматической обработки результатов эксперимента образцов из композиционных материалов с дефектами // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. – 2010. – № 4. – С. 10-16.

Бохоева Л.А., доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Россия, Улан-Удэ, E-mail: bohoeva@yandex.ru.

Курохтин В.Ю., ассистент, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Россия, Улан-Удэ, E-mail: kurokhtin91@gmail.com

Рогов В.Е., доктор технических наук, профессор, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, старший научный сотрудник, Байкальский институт природопользования СО РАН, 670000, Россия, Улан-Удэ, ул. 1-я Университетская д. 20, E-mail: rogov54v@mail.ru

Bokhoeva L.A., Doctor of Technical Science Engineering, Professor, Head of department, East Siberia state university of technology and management, h. 35, apt. 151, Gerdeva St., Ulan-Ude, Russia, E-mail: bohoeva@yandex.ru.

Kurokhtin V.Yu., assistant, East Siberia state university of technology and management, Ulan-Ude, Russia, E-mail: kurokhtin91@gmail.com

Rogov V.E., Doctor of Technical Sciences, Professor, East Siberia state university of technology and management, Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russia, E-mail: rogov54v@mail.ru.