

УДК 620.186.4

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-60-64

А.В. Лавров¹, В.С. Ерасов¹**К ВОЗМОЖНОСТИ АНАЛИЗА УСТАЛОСТНЫХ ИЗЛОМОВ
ПО ПАРАМЕТРАМ АНСАМБЛЯ ВТОРИЧНЫХ ТРЕЩИН (обзор)**

Рассмотрены механизмы роста усталостной трещины с участием вторичных трещин, образующихся в пластической зоне в вершине усталостной макротрещины при циклическом нагружении. Приводятся данные из различных литературных источников, описывающие закономерности образования вторичных усталостных трещин для различных материалов по результатам исследований как поверхности излома, так и состояния пластических зон под поверхностью излома и перед вершиной макротрещины. Подтверждена возможность использования параметров набора вторичных трещин как выходящих, так и не выходящих на поверхность излома, для исследования эксплуатационных усталостных разрушений.

Ключевые слова: усталостная трещина, усталостный излом, фраттография, металлографический анализ, вторичные трещины.

The mechanisms of fatigue crack growth assisted with secondary cracks formed in the plastic zone at the tip of the fatigue macro-crack under cyclic loading were considered. The data from various literary sources describing the patterns of secondary fatigue cracks for various materials based on studies of the fracture surface and the state of plastic zones under the fracture surface and ahead of the macro-crack tip are given. The possibility to use parameters of the set of secondary cracks both outgoing and not outgoing on the fracture surface for investigation of operational damages was confirmed.

Keywords: fatigue crack, fatigue fracture, fractography, metallographic analysis, secondary cracks.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации
[Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Основные принципы создания современных материалов для сложных технических систем базируются на фундаментальных и фундаментально-ориентированных исследованиях и на постулате о неразрывности материалов, технологий и конструкций [1, 2], включая реализацию полного жизненного цикла – от создания материала до его эксплуатации в конструкции, диагностики, ремонта, продления ресурса и утилизации [3]. Исходя из условий эксплуатации авиационных конструкций, одним из наиболее значимых критериев надежности авиационных материалов является сопротивление усталостному разрушению, в том числе – на стадии распространения усталостных трещин [4–8]. Таким образом, исследование поведения материалов в процессе роста усталостных трещин крайне актуально как для проектирования с учетом характеристик усталости, так и для анализа эксплуатационных разрушений [9–13].

Известно [14–16], что рост усталостной трещины в металлических материалах сопровождается пластической деформацией в ее вершине. Размер пластически деформированной зоны определяется свойствами материала, видом напряженно-деформированного состояния и величиной коэффициента интенсивности напряжений в цикле: максимального – для зоны монотонной пластической деформации и ΔK – для зоны цикличе-

ской пластической деформации [17]. С учетом известной зависимости скорости роста усталостной трещины от ΔK [14, 18, 19], на основании данных о размерах пластической зоны можно сделать вывод о величине действовавших внешних нагрузок, а также о скорости роста усталостной трещины на данном участке излома [16–18].

Материалы и методы

Для оценки размеров пластической зоны разработаны различные методы, такие как:

- электронно-микроскопические исследования шлифов [18, 20];
- послойное стравливание;
- последовательная рентгеновская съемка [17];
- исследование микротвердости [18, 20].

Данные методы предназначены для определения содержания в материале дефектов кристаллической структуры и позволяют установить границы пластической зоны – прилегающей к поверхности излома области с повышенной дислокационной плотностью.

Вместе с тем одним из видов дефектов, встречающихся в пластической зоне, являются вторичные усталостные трещины (далее – вторичные трещины), исследования которых проводились не достаточно широко.

Механизм роста усталостной трещины с образованием в пластической зоне вторичных трещин

описан в работах [12, 18, 20, 21], согласно которым элементарный акт подрастания трещины состоит из стадии образования в пластической зоне субмикро- и микротрещин (в некоторых случаях – пор) и стадии их объединения с основной трещиной путем разрыва перешейков между ними, вследствие чего рост усталостной трещины носит дискретный характер (рис. 1). Авторы работы [19] на примере сталей перлитного класса также представляют рост усталостной трещины как дискретный процесс, в котором приращение длины трещины происходит на величину, равную размеру структурного элемента. При этом элементарный акт подрастания макротрещины состоит из трех стадий:

– зарождение микротрещин по границам и в объеме фрагментированной дислокационной структуры;

– стабильный рост микротрещин;

– нестабильный рост и объединение микротрещин в масштабе структурного элемента.

Одной из первых работ, в которой наблюдалось распространение усталостной трещины по механизму, качественно аналогичному приведенному на рис. 1, является работа В.И. Шабалина [22]. Автор по результатам исследований образцов из стали 30ХГСА и сплава Д16-Т предлагает следующую последовательность развития усталостных трещин в данных материалах. В момент появления у концентратора первого участка усталостной трещины у ее вершины появляется пластически деформированная область, хотя другие объемы рабочей части образца все еще нагружены в пределах упругой деформации. Через некоторое время в пластической области образуются вторичные трещины, которые увеличиваются в размерах с ростом числа циклов. Затем происходит разрыв перемычки между вершиной макротрещины и ближайшей, получившей достаточное развитие микротрещиной, после чего в новой вершине макротрещины образуется пластическая зона и весь

процесс повторяется. С помощью метода оптической микроскопии автор работы [22] показал, что вблизи поверхности усталостного излома наблюдается большое число микротрещин, возникших в зоне пластических деформаций и не получивших дальнейшего развития.

В ряде работ отмечается, что образование вторичных микротрещин в процессе роста магистральной усталостной трещины характерно для материалов с пониженными характеристиками пластичности, в изломах которых отсутствуют усталостные бороздки [23, 24], либо при наличии факторов, способствующих охрупчиванию, – таких как воздействие активных сред [25] или наложение высокочастотной малоамплитудной вибрации на низкочастотный основной цикл [26]. Так, автор работы [23] отмечает образование ветвящихся хрупких микротрещин перед магистральной трещиной на стадии ее стабильного роста у квазихрупких трещин при циклическом нагружении материалов. Авторы работы [24] также наблюдали образование вторичных (сепаратных) трещин межзеренного скола в зоне предразрушения магистральной усталостной трещины в низкоотпущенной стали 45ХН2МФА на всех стадиях кинетической диаграммы усталостного разрушения (при больших значениях ΔK вместо трещин межзеренного скола происходило образование пустот).

Вместе с тем вторичные трещины обнаружены у широкой гаммы металлических материалов, в том числе имеющих достаточно высокие значения характеристик пластичности. Так, авторы работы [20] приводят данные о распространении усталостных трещин в тонких плоских образцах из высокочистого алюминия и алюминия технической чистоты. В обоих случаях с помощью метода оптической микроскопии обнаружено, что в процессе роста магистральной трещины происходило образование несплошностей (пор) в зоне пластической деформации в вершине трещины; маги-

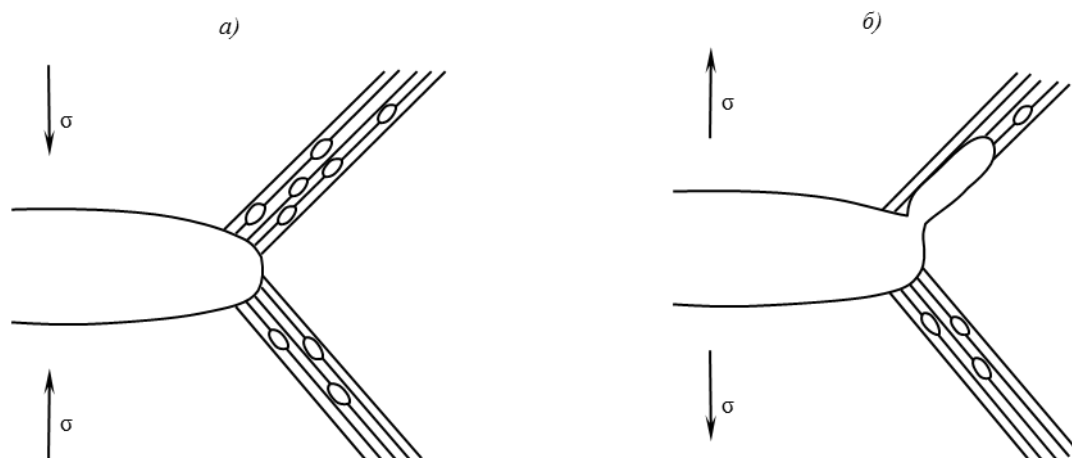


Рис. 1. Механизм роста усталостной трещины на участке стационарного роста [21]:

а – образование несплошностей (вторичных трещин) в пластической зоне в полуцикле сжатия; б – разрыв перемычек и объединение вторичных трещин с основной трещиной в полуцикле растяжения

стральная трещина распространялась в результате разрыва перемычки между ее вершиной и порой. Автор работы [18] упоминает об образовании вторичных усталостных трещин в циркониевом сплаве и поликристаллическом цинке, в различных сталях, титановых сплавах, латунях и алюминиевых сплавах. В работе [26] описаны вторичные усталостные трещины в жаропрочных сплавах для двигателей. Так, С.И. Кишкина наблюдала вторичные трещины на поверхности изломов образцов из алюминиевых сплавов на различных стадиях роста усталостной трещины [15, 27].

Можно выделить два направления исследований вторичных усталостных трещин:

- при фрактографическом анализе изломов [12, 18, 19, 27, 28];
- при металлографическом исследовании материала перед вершиной усталостной трещины [16, 18, 20, 22, 29].

Следует отметить важность обоих направлений и их тесную взаимосвязь, поскольку значительная часть вторичных трещин образуется в зоне циклического проскальзывания и выходит на поверхность излома. Таким образом, для изучения механизмов образования и роста вторичных трещин в процессе роста магистральной усталостной трещины необходимо проведение комплексных исследований с применением как фрактографического метода, так и металлографического анализа материала вблизи поверхности излома.

Исследование вторичных трещин в пластической зоне магистральной усталостной трещины проводилось автором работы [18], который указывает на взаимосвязь характера развития вторичных трещин и строения пластических зон. Так, в образцах из сплава Ti–1,5Al–1,0Mn в пластической зоне перед вершиной магистральной трещины наблюдались множественные вторичные трещины, направление которых, как правило, совпадало с направлением максимальных касательных напряжений. При этом имели место как вторичные трещины, которые являлись ответвлением магистральной, так и трещины, которые не были соединены с магистральной трещиной и располагались от нее на значительном расстоянии. Вторичные трещины были «рассеяны» вокруг вершины магистральной трещины, «образовывали сетки трещин, расслоения или скола разной ориентации» [18].

Закономерности распределения вторичных трещин в пластической зоне изучались Л.Р. Ботвиной с коллегами, которые исследовали кинетику развития пластической зоны усталостной трещины и распределение в ней вторичных трещин в образцах из стали 20 при коэффициенте асимметрии цикла $R=0,1$ [16]. Распределение вторичных трещин оценивалось на стадии их ускоренного роста для получения достаточного количества вторичных трещин. При этом было показано, что в области, удаленной от вершины магистральной

трещины, кривые распределения накопленного числа вторичных трещин с длиной, большей или равной текущей длине L , описываются экспоненциальной функцией $N \approx \exp(-cL)$, а вблизи ее вершины – степенной функцией $N \approx L^{-b}$ (рис. 2).

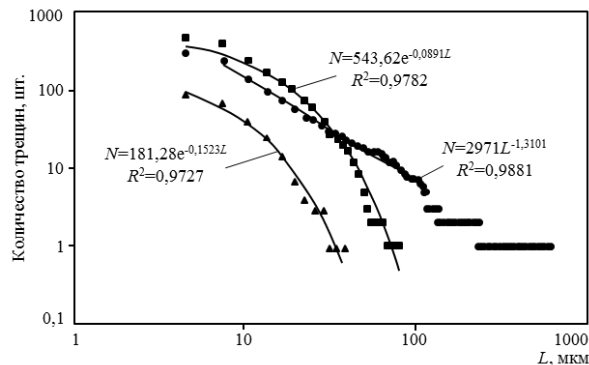


Рис. 2. Кумулятивные кривые распределения вторичных трещин в пластической зоне магистральной трещины на различных расстояниях (0,77 (●); 2,31 (■); 5,39 мм (▲)) от ее вершины в образцах из стали 20 [16]

Автор работы [29], развивая направление, представленное в работе [16], изучал закономерности накопления повреждений (вторичных трещин) на разных стадиях циклического нагружения образцов из сталей 20 и Э76Ф как в исходном состоянии, так и после длительного хранения и эксплуатации. Оценка длины и числа микротрещин вдоль траектории усталостной макротрещины осуществлялась путем компьютерной обработки полученных на оптическом микроскопе снимков силиконовых реплик с поверхности образцов. По результатам измерений автором работы [29] построены кумулятивные кривые распределения микротрещин по длине и вычислены тангенс угла наклона кумулятивных кривых распределения микротрещин b_c , а также концентрационный критерий Журкова–Куксенко в форме $k=1/(L_{cp} \cdot n^{0,5})$, где L_{cp} – средняя длина микротрещин; n – плотность микротрещин в пластической зоне. Параметры b_c и k автор работы [29] рекомендует использовать в качестве диагностических признаков изменения состояния материала в процессе эксплуатации.

В ряде работ установлено, что параметры ансамбля вторичных трещин зависят от длины магистральной трещины и (или) величины K .

Так, в работе [18] отмечено, что в образцах из титановых сплавов BT1-00 и OT4-1, испытанных при $R=0$, по мере удаления от очага разрушения возрастает количество вторичных трещин, в том числе идущих по границам зерен. Кроме того, в сплаве BT1-00 с удалением от очага разрушения отмечается увеличение частоты появления вторичных трещин большого размера [18].

Авторы работы [12] сообщают, что для алюминиевых сплавов Д1-Т, Д16-Т, АМг6М и АМг6Н наблюдается образование вторичных трещин, в

том числе в корне усталостных бороздок, при переходе от стадии квазиупругого к стадии упруго-пластического роста трещины. Для сплава АМгб отмечено, что при увеличении значений K наблюдается увеличение количества вторичных трещин в изломе.

Для стали К22МА (жесткое нагружение с амплитудой деформации $\pm 0,022$ [18]) вторичные трещины наблюдали не только на стадии стационарного роста, но и на стадии ускоренного роста усталостной трещины. Причем вторичные трещины, появившиеся на стадии ускоренного роста, были более глубокие и широкие, чем на стационарной стадии.

Авторы работы [19] для сталей перлитного класса приводят степенную зависимость длины вторичной усталостной трещины от размаха деформации растяжения в цикле (величины ΔK).

Характер распределения вторичных трещин по длине магистральной трещины для различных материалов имеет ряд особенностей, определяемых свойствами данного материала. Так, в работе [28] приводятся данные по строению усталостных изломов теплоустойчивых корпусных сталей 15Х2МФА и 15Х2НМФА при комнатной температуре. Для этих сталей в диапазоне значений K_{\max} – от 11 до 130 МПа $\sqrt{м}$ наблюдается следующая последовательность смены микрорельефа излома: строчечность, межзеренное разрушение, усталостные бороздки, ямки, вторичные трещины. Напротив, для алюминиевых сплавов Д1-Т, Д16-Т, АМг6М, АМг6Н, у которых на стадии упругопластического роста усталостной трещины отмечалось наличие вторичных трещин, при переходе к третьей стадии роста усталостной трещины отмечено уменьшение количества вторичных трещин на поверхности излома и полное вытеснение их ямками, образующимися по механизму роста пор [12].

Результаты

Проведенный анализ показывает, что образование вторичных усталостных трещин установлено для широкой гаммы материалов как образующих, так и не образующих усталостные бороздки при нагружении в воздушной среде. В ряде работ приводятся результаты исследований, направленных на получение зависимостей, связывающих характеристики набора вторичных трещин с условиями усталостного нагружения. Так, автором работ [18, 30] в 1969 г. для углеродистой стали была установлена связь между параметрами наблюдаемых на поверхности излома вторичных трещин и скоростью роста магистральной трещины и предложено использовать параметры ансамбля вторичных трещин для определения скорости роста трещины усталости. При этом автор работ [18, 30] утверждает, что, учитывая размеры и количество вторичных трещин на поверхности излома, можно с достаточной достоверностью судить о протекании процесса усталостного разрушения. Тот же вывод можно сделать и о вторичных трещинах, расположенных под поверхностью излома, поскольку для их исследования и построения кумулятивных кривых авторами работ [16, 29] использовался оптический микроскоп.

Обсуждение и заключения

Таким образом, всесторонние исследования параметров ансамбля усталостных трещин, как выходящих, так и не выходящих на поверхность излома, являются в настоящее время весьма актуальными и позволят в дальнейшем использовать параметры ансамбля вторичных усталостных трещин для разработки методики исследования эксплуатационных изломов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники //Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
2. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад //Наука и жизнь. 2010. № 4. С. 2–7.
3. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
4. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сенник В.Я., Коновалов В.В., Трунин Ю.П., Нестеренко Г.И. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 14–16.
5. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.
6. Ерасов В.С. Физико-механические характеристики как основные интегральные показатели качества авиационных конструкционных материалов: Методическое пособие. М.: ВИАМ. 2011. 16 с.
7. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Антипов В.В., Каримова С.А., Рудаков А.Г., Оглодков М.С. Влияние коррозионной среды на скорость роста трещины усталости в алюминиевых сплавах //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 16–20.
8. Каблов Е.Н., Гриневич А.В., Ерасов В.С. Характеристики прочности металлических авиационных материалов и их расчетные значения /В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. М.: ВИАМ. 2007. С. 370–379.
9. Гриневич А.В., Луценко А.Н., Каримова С.А. Расчетные характеристики металлических материалов с учетом влажности //Труды ВИАМ. 2014. №7. Ст.10 (viam-works.ru).
10. Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микро-

- скопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 06 (viam-works.ru).
11. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневич А.В., Терехин А.Л. Трещиностойкость авиационных материалов в процессе испытания на усталость //Труды ВИАМ. 2013. №10. Ст. 06 (viam-works.ru).
 12. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография. Усталостное разрушение. Челябинск. Металлургия. 1988. 400 с.
 13. Каблов Е.Н., Гращенко Д.В., Ерасов В.С., Анчевский И.Э., Ильин В.В., Вальтер Р.С. Стенд для испытания на климатической станции ГЦКИ крупногабаритных конструкций из ПКМ /В сб. докл. IX Международ. науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2012». 2012. С. 122–123.
 14. Ирвин Дж., Пэрис П. Основы теории роста трещин и разрушения /В кн. Разрушение. Т. 3. М.: Мир. 1976. С. 17–67.
 15. Кишкина С.И. Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов. М.: Металлургия. 1981. 280 с.
 16. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. М.: Наука. 2008. 334 с.
 17. Клевцов Г.В. и др. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. М.: МИСиС. 2007. 264 с.
 18. Коцаньда С. Усталостное растрескивание металлов. М.: Металлургия. 1990. 623 с.
 19. Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. СПб.: Политехника. 1993. 391 с.
 20. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. М.: Металлургия. 1975. 456 с.
 21. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. М.: Металлургия. 1984. 280 с.
 22. Шабалин В.И. Исследование усталости металлов при напряжениях выше предела текучести: Автореф. дис. д.т.н. М.: ВИАМ. 1970. 55 с.
 23. Иванова В.С. Разрушение металлов. М.: Металлургия. 1979. 168 с.
 24. Вольдемаров А.В., Зима Ю.В., Романив О.В. Микрофрактографические аспекты циклической трещиностойкости стали 45ХН2МФА /В сб.: Циклическая трещиностойкость металлических материалов и элементов конструкций транспортных средств и сооружений. М.: Транспорт. 1984. 136 с.
 25. Коррозионная усталость металлов: Труды I советско-английского семинара /Под ред. Я.М. Колотыркина. Киев: Наукова думка. 1982. 372 с.
 26. Определение методами фрактографии признаков малоциклового усталости на образцах и деталях ГТД из титановых сплавов ВТ3-1, ВТ9, ВТ10 и жаропрочных сплавов ЭИ698 и ЖС6У. М.: ЦИАМ. 1987. 79 с.
 27. Кишкина С.И. и др. Разрушение алюминиевых сплавов. Атлас фрактограмм. М.: ВИАМ. 1988. 168 с.
 28. Степаненко В.А. Фрактография и кинетика усталости конструкционных материалов /В сб.: Стандартизация фрактографического метода оценки скорости усталостного разрушения металлов. Вып. 5. М.: Изд-во стандартов. 1984. С. 73–85.
 29. Демина Ю.А. Влияние длительной эксплуатации и хранения на механические свойства и механизмы разрушения конструкционных материалов: Автореф. дис. к.т.н. М.: ИМЕТ им. А.А. Байкова. 2014. 26 с.
 30. Kocanda S. Biuletyn WAT. 1969. №6. P. 43–57.