

УДК 620.178.2(045)

С.В. Щепак, Д.Н. Костенюк, Г.С. Сейдаметова, М.В. Лисовская

Национальный авиационный университет, Украина

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЖИВУЧЕСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПО ПАРАМЕТРАМ ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА У КОНЦЕНТРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ

Проведено исследование особенностей зарождения и развития трещин усталости в конструкционном алюминиевом сплаве Д16АТ. Показано, что усталостная трещина формируется в лакирующем слое. Поврежденность материала вблизи концентратора напряжений оценивается по насыщенности деформационного рельефа поверхности лакирующего слоя. Для количественной оценки деформационного рельефа и соответствующей поврежденности используется компьютеризированный оптический метод. Показана зависимость начальной скорости развития трещины от состояния материала у концентратора напряжений к моменту ее старта.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, усталость, лакирующий слой, усталостная трещина, деформационный рельеф.

Введение

Известно, что скорость развития усталостной трещины зависит от напряженного состояния в кончике трещины и характеристик материала.

Свойства материала изменяются в процессе циклического нагружения. В ряде случаев эти изменения можно наблюдать и количественно оценивать по состоянию деформационного рельефа поверхности. Деформационный рельеф представляет собой систему экстрезий, интрузий, полос скольжения.

К материалам, на поверхности которых можно наблюдать деформационный рельеф, относятся лакированные алюминиевые сплавы: Д16АТ, В95, 2024Т3, 7075Т6.

Ранее было показано, что по параметрам деформационного рельефа можно прогнозировать момент формирования трещины.

В представленной работе показана связь длительности развития трещины с параметрами деформационного рельефа, сформировавшегося у концентратора напряжений к моменту ее появления.

1. Формирование трещины в лакирующем слое

Несмотря на применение новых композиционных материалов, алюминиевый сплав Д16АТ остается одним из наиболее широко применяемых материалов в авиационных конструкциях. На самолетах зарубежного производства широкое применение получил сплав 2024 Т3, который по составу и по механическим характеристикам аналогичен сплаву Д16АТ.

Для защиты от коррозии листовой сплав Д16АТ лакируется алюминием, толщина кото-

рого составляет 5-7% от толщины листа. На лакирующем слое под действием циклического нагружения формируется деформационный рельеф, являющийся индикатором накопленного усталостного повреждения.

При напряжениях, соответствующих эксплуатационному уровню нагрузок, действующих на конструкцию самолета, деформационный рельеф можно наблюдать с помощью оптического металлографического микроскопа после первых нескольких тысяч циклов нагружения (рис. 1).

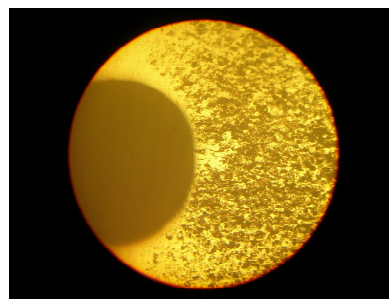


Рис. 1. Деформационный рельеф у концентратора напряжений, увеличение $\times 50$; максимальное напряжение цикла – 180,0 МПа; R = 0; N = 200000 циклов

Для количественной оценки накопленного повреждения был предложен параметр повреждения D, который определяется как отношение площади поверхности с признаками рельефа к общей наблюдаемой площади поверхности у концентратора напряжений. [1].

Оценка поврежденности производится по цифровым фотографиям рельефа при увеличении $\times 150 - \times 350$.

Был предложен также дополнительный параметр – фрактальная размерность кластеров деформационного рельефа [2].

Предложенные параметры деформационного рельефа позволяют прогнозировать достижение критического состояния. В проведенных ранее исследованиях критическим состоянием считалось появление усталостной трещины.

В представленной работе исследовались образцы, испытанные при 60,0 МПа; 70,0 МПа; 80,0 МПа. Число циклов до формирования усталостной трещины длиной 1,0 мм составляло от 37000 до 322200 для образцов, испытанных при 60,0 МПа; от 40000 до 170400 для образцов, испытанных при 70,0 МПа; от 8800 до 66000 для образцов, испытанных при 80,0 МПа.

Число циклов до разрушения находилось в диапазоне от 76700 до 340000 для образцов, испытанных при 60,0 МПа; от 81600 до 215600 для образцов, испытанных при 70,0 МПа; от 20500 до 73200 для образцов, испытанных при 80,0 МПа.

Фрактографические исследования были проведены для определения роли плакирующего слоя в процессе усталостного повреждения и разрушения. Кроме того, проведенное исследование позволило получить данные о характере разрушения конструкционного алюминиевого сплава Д16АТ при режимах нагружения, близких к эксплуатационным.

Известно, что физико-механические свойства плакирующего слоя существенно отличаются от свойств основного материала.

Сплав Д16АТ имеет границу прочности 405 МПа, границу текучести 270 МПа, максимальное относительное удлинение 13%, модуль упругости 71 МПа [3]. Кроме алюминия этот сплав содержит: медь – 3,8 – 4,9%, магний – 1,2 – 1,8%, марганец – 0,3 – 0,9%.

Для плакирования листов сплава Д-16 используется алюминий марки АД-1 (А5). Прочность плакирующего слоя значительно ниже прочности матрицы.

Механические свойства технического алюминия в отожженном состоянии [3]: $\sigma_B = 80$ МПа; $\sigma_{0,2} = 30$ МПа; $\delta = 13\%$; $\psi = 80\%$; $E = 71 \cdot 10^4$ МПа; $G = 27 \cdot 10^3$ МПа; $\sigma_{-1} = 40$ МПа (на базе $5 \cdot 10^8$ циклов); $\mu = 0$.

Технический алюминий АД-1 содержит примеси, не более: 0,3% Fe; 0,3% Si; 0,05% Cu; 0,025% Mn; 0,1% Zn; 0,15% Ti; 0,05% Mg.

Сканирующая электронная микроскопия (микроскоп СЕМ-515 фирмы «Philips») показала, что во всех рассмотренных случаях усталостная трещина формировалась в плакирующем слое.

Это указывает на связь состояния плакирующего слоя с процессом разрушения, т.е. как с продолжительностью инкубационной стадии, так и стадии распространения трещины.

На рис. 2 показана поверхность разрушения одного из испытанных образцов. Исследованиями очага разрушения установлено, что трещина возникла от участка размером порядка 50 мкм, локальный концентратор зарождения трещины – ослабление границы зерен. Магистральное разрушение развивалось внутризеренно, радиально распространяясь от очага. Характер разрушения – транскристаллитное хрупкое в сочетании с квазихрупким.

Участок, где направление фронта трещины в центральной области излома соответствует общему направлению разрушения, находится на расстоянии порядка 2 мм от концентратора.

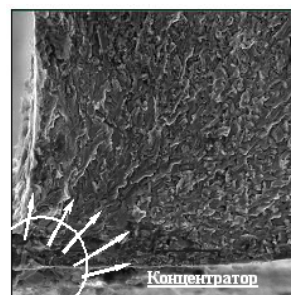


Рис. 2. Очаг разрушения. Стрелками показано начальное направление распространения трещины, увеличение $\times 300$

2. Критическое значение параметра повреждения D

Значение параметра повреждения D, при котором возникает трещина можно назвать критическим. Очевидно, что в случае отсутствия иных факторов, инициирующих старт трещины, критический параметр повреждения должен быть константой материала, характеризующей предельную локальную поврежденность.

Однако наличие включений, микроконцентраторов напряжений, кристаллографическая анизотропия могут привести к такому локальному повреждению, которое не находит отражения в значении параметра повреждения. Проведенные исследования показывают, что различие в значениях критического параметра повреждения при некоторых режимах нагружения может достигать 25% (рис. 3).

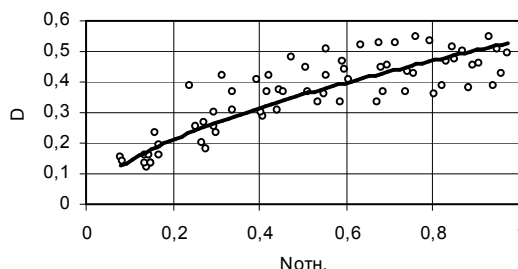


Рис. 3. Изменение параметра повреждения D в процессе циклического нагружения, $\sigma_{max} = 120,2$ МПа

На рис. 3 относительное количество циклов нагружения $N_{отн.}$ определяется как отношение поточного количества циклов нагружения N_i к числу циклов, которое соответствует достижению критического состояния $N_{крит.}$

Приведенные данные говорят о наличии разброса характеристик материала, в котором происходит формирование и начальное развитие трещины и о возможном влиянии критического значения параметра повреждения на начальную скорость развития трещины.

Методически оптимальным является способ определения критического параметра D , основывающийся на мониторинге параметра повреждения в процессе циклического нагружения. Рис. 4 иллюстрирует указанную процедуру. Максимальное значение параметра повреждения, соответствующее появлению трещины составляет 0,101. Испытание проводилось при максимальном напряжении цикла $\sigma_{max}=70,0$ МПа.

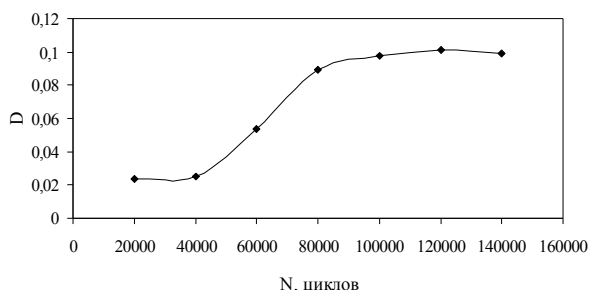


Рис. 4. График изменения параметра повреждения D в ходе циклического нагружения

3. Исследование связи между критическим параметром повреждения и живучестью

Исследовались образцы алюминиевого сплава Д16АТ размером $300 \times 80 \times 1,5$ мм с боковым надрезом. Для исследования связи между критическим параметром повреждения и живучестью проведено три серии усталостных испытаний при максимальных напряжениях цикла: 1) 60,0 МПа; 2) 70,0 МПа; 3) 80,0 МПа. Коэффициент асимметрии $R=0$, частота нагружения 11,0 Гц.

Для каждого образца было зафиксировано максимальное (критическое) значение параметра повреждения. Максимальное отклонение критического параметра ($D_{крит.}$) от его среднего значения ($D_{крит.ср.}$) составляет:

- для образцов, испытанных при 60,0 МПа – 9%;
- для образцов, испытанных при 70,0 МПа – 13%;
- для образцов, испытанных при 80,0 МПа – 15%.

В ходе эксперимента фиксировалось количество циклов $N_{трещ.}$ при котором трещина дос-

тигала длины 1,0 мм, количество циклов, при котором образец разрушался $N_{разр.}$ и определялась живучесть образца $N_{жив.}$, как разность между количеством циклов, при котором образец разрушился и количеством циклов, при котором появилась трещина длиной 1,0 мм.

Таким образом:

$$N_{жив.} = N_{разр.} - N_{трещ.}$$

Выбор длины начальной трещины 1,0 мм обусловлен возможностями оптического контроля. Трещина длиной 1,0 мм определяется достаточно надежно и с точностью не менее 0,05 мм.

На рис. 5 представлен график зависимости живучести образцов алюминиевого сплава от критического параметра повреждения. Испытания проведены при напряжении 80,0 МПа.

Представленный график отражает связь локальной поврежденности материала в зоне формирования трещины со скоростью развития усталостной трещины. Как видно из графика, увеличение поврежденности, характеризуемое критическим значением параметра повреждения, приводит к увеличению скорости распространения трещины.

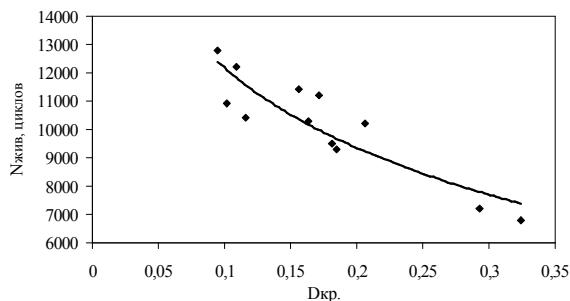


Рис. 5. График зависимости живучести алюминиевого сплава от критического параметра повреждения. Величина коэффициента детерминации $R^2 = 0,7892$

Размер зоны у концентратора напряжений, в которой на инкубационной стадии усталости формируется деформационный рельеф зависит от формы концентратора, материала и напряженного состояния. В проведенных исследованиях эта зона составляла 3-4 мм. В связи с этим, важно выяснить в какой степени величина критического параметра повреждения D у концентратора влияет на различные этапы распространения трещины.

Рассмотрены данные о влиянии критического параметра D на скорость распространения трещины при изменении ее длины от 1,0 до 3,0 и от 9,0 до 12,0 мм соответственно. Испытания проводились при максимальном напряжении цикла 80 МПа.

В обоих случаях установлена линейная зависимость между указанными характеристиками. При распространении трещины в зоне начального формирования деформационного рельефа у концентратора теснота связи характеризуется коэффициентом детерминации $R^2 = 0,8627$; при распространении трещины вдали от концентратора коэффициент детерминации зависимости скорости трещины от критического параметра повреждения $R^2 = 0,5995$.

Полученный результат говорит о том, что на продолжительность стадии живучести в целом, значительно влияет начальная скорость развития трещины, т.е. стадия ее распространения в зоне деформационного рельефа, сформировавшегося у концентратора.

Заключение

Усталостные трещины в плакированных алюминиевых сплавах зарождаются в плакирующем слое у концентратора напряжений. Интенсивность деформационного рельефа, сформировавшегося у концентратора напряжений и характеризую-

щего локальную поврежденность материала оказывает влияние на скорость распространения усталостной трещины.

Перечень ссылок

1. Игнатович С.Р. Эволюция поврежденности сплава Д16АТ у концентратора на стадии до зарождения усталостной трещины / С.Р. Игнатович, М.В. Карускевич, О.М. Карускевич // Авиационно-космическая техника и технология. Науч.-технич. Журнал Нац.аэрокосм.ун-та им.Н.Е.Жуковского. ХАИ – 2004. – № 4 (12). – С. 29-32.

2. Оценка накопленного усталостного повреждения по насыщенности и фрактальной размерности деформационного рельефа / М. В. Карускевич, Е. Ю. Корчук, Т. П. Маслак [и др.] // Проблемы прочности – 2008. – № 6 (396). – С. 128–135.

3. Лужникова Л.П. Материалы в машиностроении : книга в 2 т. / Л. П. Лужникова. – М.: Машиностроение, 1967 – Том.1: Цветные металлы и сплавы.–1967. – 304 с.

Поступила в редакцию 01.06.2011

С.В. Щепак, Д.М. Костенюк, Г.С. Сейдаметова, М.В. Лісовська. Прогнозування живучості алюмінієвого сплаву по параметрам деформаційного рельєфу біля концентратора напружень

Проведено дослідження особливостей зародження і розвитку втомних тріщин в конструкційному алюмінієвому сплаві Д16АТ. Показано, що втомна тріщина формується в плакуючому шарі. Пошкоджуваність матеріала поблизу концентратора оцінюється по насиченості деформаційного рельєфу поверхні плакуючого шару. Для кількісної оцінки деформаційного рельєфу і відповідної пошкоджуваності використовується комп'ютеризований оптичний метод. Показана залежність початкової швидкості розвитку втомної тріщини від стану матеріалу поблизу концентратора напружень в момент її старта.

Ключові слова: алюмінієві сплави, втома, плакуючий шар, втомна тріщина, деформаційний рельєф.

S.V. Shchepak, D.M.Kosteniuk, G.S.Seidametova, M.V.Lisovska. Fatigue crack propagation prediction by the parameters of the deformation relief near the stress concentrator

Investigation of the fatigue crack nucleation and propagation in constructional aluminium alloy D16AT has been carried out. It was shown that fatigue crack is nucleating in the clad layer. Material damage near the stress concentrator can be estimated by the intensity of the clad layer surface deformation relief. For the quantitative estimation of the deformation relief and correspondent damage the computer aided optical method is used. The dependence of the fatigue crack initial rate on the material state near the stress concentrator at the moment of the crack start is shown.

Key words: aluminium alloys, fatigue, clad layer, fatigue crack, deformation relief.