

Исследования развития усталостных трещин в образцах из титановых сплавов

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Установлено, что скорости развития усталостных трещин в сплаве ВТ8 обладают большим рассеиванием независимо от структурного состояния сплава. Различие в структуре сплава ВТ8 (глобулярная мелкозернистая или пластинчатая крупнозернистая) не оказывает статистически значимого влияния на средние значения и дисперсию скоростей развития усталостных трещин.

Ключевые слова: усталостная трещина, испытания на усталость, поверхностно-пластическое деформирование

Введение

Анализ литературных источников указывает на многообразие факторов, оказывающих неблагоприятное влияние на выносливость лопаток компрессора.

Так технологические микродефекты, даже микроскопического порядка, оказывают существенное влияние на сопротивление усталости, повышают вероятность зарождения усталостных трещин [1].

Основные факторы, способствующие процессу зарождения и развития усталостных трещин на пере лопаток компрессора (особенно на кромках), возникают на финишных этапах изготовления и в эксплуатационных условиях.

Разрушение деталей под воздействием знакопеременных нагрузок при напряжениях, близких к пределу выносливости, представляет собой довольно длительный процесс зарождения и развития усталостных трещин. Однако изменения на атомном и субструктурном уровнях, вызванные технологическими концентраторами напряжений в поверхностном слое детали, появляются на ранних стадиях процесса усталостного разрушения [2]. Кроме того, существенным фактором следует считать структуру материала, формирующуюся в процессе изготовления лопаток. Исследованиям в этом направлении посвящена работа [3].

На сегодня отсутствуют системные исследования по оценке влияния методов поверхностного деформационного упрочнения, которые формируют структуру и характеристики поверхностного слоя, оказывающие влияние на процесс зарождения и развития усталостных трещин в лопатках ГТД.

Постановка задачи и цель исследования

Целью данной статьи является изучение влияния структуры материала на кинематику развития усталостных трещин в образцах из титановых сплавов.

Для достижения поставленной цели проведены исследования влияния глобулярной и пластинчатой структуры сплава ВТ8 на кинетику развития усталостных трещин.

Результаты исследования

Исследование влияния глобулярной и пластинчатой структуры (рис. 1) на кинетику развития усталостных трещин в сплаве ВТ8 выполнялось на образцах, вырезанных из прутков Ø25мм и подвергнутых термической обработке по следующим режимам:

1. Для создания мелкокристаллической глобулярной структуры – нагрев до 920°C, выдержка при этой температуре в печи в течение 1 часа, затем перенос в печь с температурой 650°C, выдержка в этой печи в течение 2-х часов и охлаждение на воздухе.

2. Для создания крупнокристаллической пластинчатой структуры – нагрев до 1050°C, выдержка 1 час и охлаждение на воздухе до 20°C. Затем повторный нагрев до 650°C, выдержка при этой температуре 2 часа и охлаждение на воздухе.

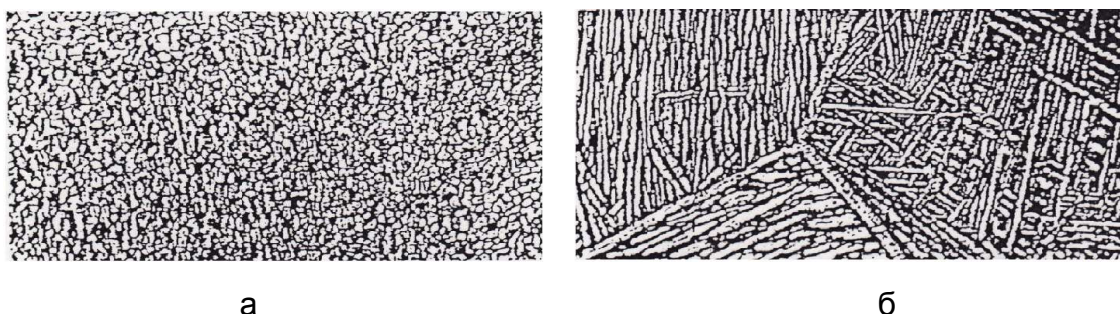


Рис. 1. Структура сплава ВТ8: а – глобулярная (мелкокристаллическая); б – пластинчатая (крупнокристаллическая).

Чертеж образца для исследования кинетики развития трещин приведен на рис. 2. Рабочая поверхность образца полировалась, затем наносился концентратор напряжений в виде отверстия $\varnothing 0,8$ мм и глубиной 0,5 ... 0,7мм.

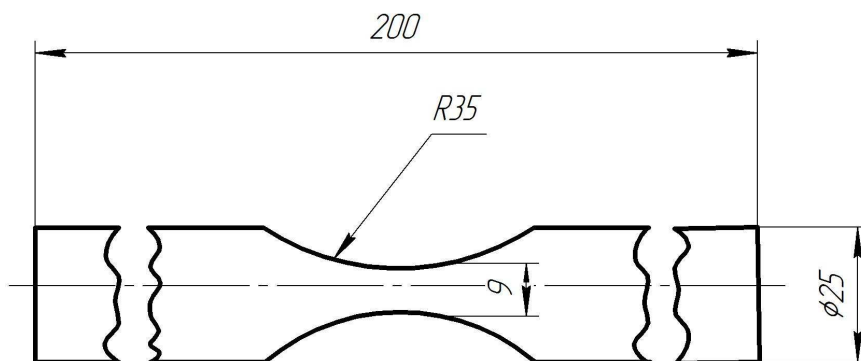


Рис. 2. Чертеж образца для исследования кинетики развития трещин

Испытания проводились на установке с электромагнитным возбуждением колебаний, обеспечивающей жесткий режим нагружения при знакопеременном изгибе с частотой 50Гц. Схема установки приведена на рис. 3.

Колебательная система «образец-якорь» настраивалась в резонанс с колебаниями магнитного поля электромагнитов ($f_{рез} = 50Гц$) путем изменения массы якоря. В процессе испытаний амплитуда колебаний якоря поддерживалась постоянной. Измерение размеров усталостной трещины проводилось на поверхности образца при помощи оптического микроскопа.

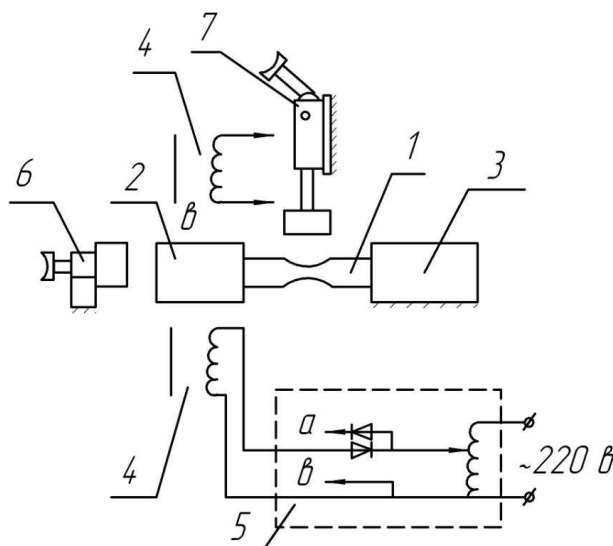


Рис. 3. Схема установки для испытания на усталость:
 1 – испытываемый образец; 2 – якорь; 3 – захват образца; 4 – электромагнит; 5 – система питания машины; 6 – микроскоп контроля амплитуды колебаний образца; 7 – микроскоп для наблюдения за ростом усталостной трещины

Колебательная система «образец-якорь» настраивалась в резонанс с колебаниями магнитного поля электромагнитов ($f_{рез} = 50 Гц$) путем изменения массы якоря. В процессе испытаний амплитуда колебаний якоря поддерживалась постоянной. Измерение размеров усталостной трещины проводилось на поверхности образца при помощи оптического микроскопа.

С этой целью, через 30000 циклов установка выключалась, производился осмотр образца и замер длины трещины. По мере роста усталостной трещины интервал между осмотрами сокращался до 10000 циклов.

Схема положения усталостной трещины в поперечном сечении образца приведена на рис. 4.

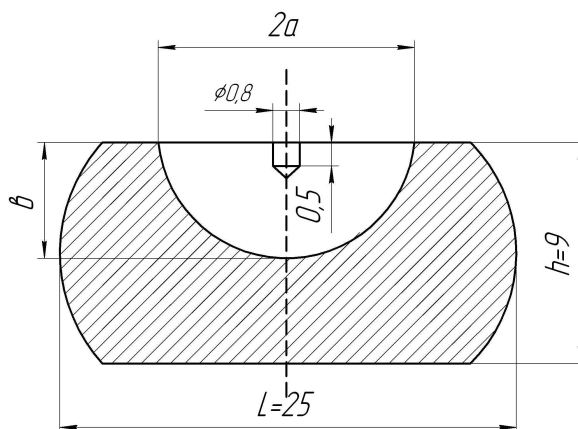


Рис. 4. Схема положения усталостной трещины

Для определения соотношении между глубиной « b » и длиной « $2a$ » усталостной трещины были исследованы изломы образцов крупнозернистой и мелкозернистой структур при различных длинах усталостных трещин. Результаты исследований изломов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Размеры усталостной трещины для мелкозернистой и крупнозернистой структур

Структура мелкозернистая		Структура крупнозернистая	
$2a$	b	$2a$	b
11,2	3,5	24,0	4,1
11,9	3,6	10,6	2,7
12,6	3,5	8,8	2,9
10,3	3,3	5,7	2,4
14,7	3,6	9,0	3,0
11,8	3,3	17,9	4,2
25	5,0	9,5	2,8

При анализе этих данных было установлено, что связь между длиной по поверхности $2a$ и глубиной b можно аппроксимировать уравнением $2a = b^2$ независимо от структуры сплава.

Испытания образцов проводились при следующих уровнях номинальных напряжений $\sigma = 340$ МПа и $\sigma = 240$ МПа.

По результатам испытаний каждого образца строились зависимости между числом пройденных циклов N и длиной $2a$ усталостной трещины.

Графическим дифференцированием этих зависимостей были получены значения скоростей развития трещин dl/dN в зависимости от коэффициента интенсивности напряжений (КИН) K_I .

Полученные таким образом значения dl/dN и K_I позволили построить кинетическую диаграмму разрушения, которая приведена на рис. 5.

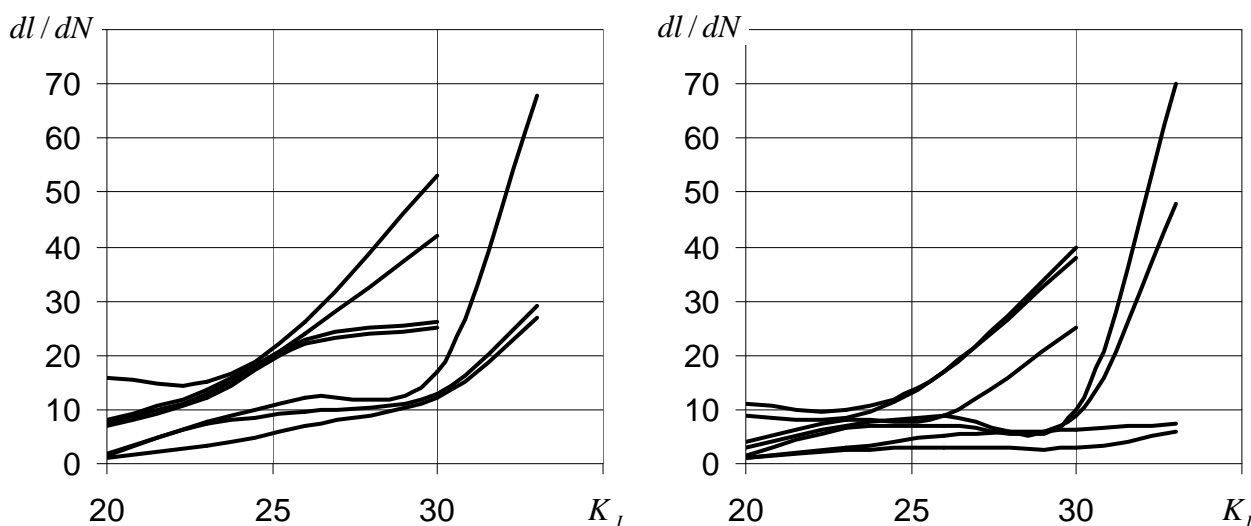


Рис. 5. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения:
1 – мелкозернистая структура; 2 – крупнозернистая структура

Графический анализ приведенных на диаграмме результатов показывает, что скорости развития усталостных трещин в сплаве ВТ8 обладают большим рассеиванием независимо от структурного состояния сплава.

Для выявления количественного влияния структуры на кинетику трещин экспериментальные данные были подвергнуты статистическому анализу [4-7].

Равенство дисперсий логарифмов скоростей развития трещины в крупнозернистой и мелкозернистой структурах $\lg(dl/dN)$ для нескольких уровней K_I проверялось по критерию Фишера « F » с уровнем значимости $\alpha = 0,05$. Результаты проверки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения средних квадратических отклонений логарифмов скоростей развития трещин $S_{\lg(dl/dN)}$ для крупнозернистой структуры «К» и мелкозернистой структуры «М» по уровням размаха коэффициента интенсивности напряжений K_I , значения дисперсионного отношения « F », полученные из экспериментальных данных, и табличное значение критерия $F_1 - \alpha/2$ для $\alpha = 0,05$

$K_I MH / M^{3/2}$	20	23	26	30	33
$S_{\lg(dl/dN)}$ для «К»	0,392	0,273	0,314	0,425	0,548
$S_{\lg(dl/dN)}$ для «М»	0,435	0,258	0,248	0,241	0,223
« F »	1,231	1,119	1,603	3,109	6,039
$F_1 - \alpha/2$	4,28	3,39	3,68	4,28	19,16

В соответствии с теорией математической статистики гипотеза о равенстве дисперсий принимается, если выполняется условие

$$F \leq F_1 - \alpha/2.$$

Как видно из данных табл. 2 условие $F \leq F_1 - \alpha/2$ соблюдается для всех уровней K_I и, следовательно, дисперсии логарифмов скоростей развития трещины равны как для крупнозернистой, так и мелкозернистой структуры.

Равенство средних значений логарифмов скоростей развития трещины в крупнозернистой и мелкозернистой структуре $\lg(dl/dN)$ для нескольких уровней K_I проверялось с помощью критерия Стьюдента, « t » - критерий для уровня доверительной вероятности $P = 1 - \alpha = 0,95$. Результаты проверки приведены в табл. 3.

Гипотеза о равенстве средних значений принимается в том случае, когда $t \leq t_{a,k}$.

Приведенные в табл. 3 результаты показывают, что условие $t \leq t_{a,k}$ соблюдается для всех K_I и, следовательно, средние значения скорости развития усталостной трещины для мелкозернистой и крупнозернистой структур равны.

Таким образом, различие в структуре сплава ВТ8 (глобулярная мелкозернистая или крупнозернистая пластинчатая) не оказывает статистически значимого влияния на средние значения и дисперсию скоростей развития усталостных трещин.

Таблица 3

Средние значения логарифма скорости развития трещины $\lg(dl/dN)$ в мелкозернистой «М» и крупнозернистой «К» структурах для нескольких уровней K_I , значения « t »-критерия, полученные из экспериментальных данных, и табличные значения $t_{a,k}$ критерия для $P=0,95$

$K_I, МН / м^{3/2}$	20	23	26	30	33
$\lg(dl/dN)$ для «К»	-4,508	-4,112	-3,955	-3,887	-3,705
$\lg(dl/dN)$ для «М»	-4,376	-3,953	-3,752	-3,629	-3,427
« t »	0,596	1,301	1,491	1,399	0,814
$t_{a,k}$	2,179	2,110	2,120	2,179	2,571

Выводы

Скорости развития усталостных трещин в сплаве ВТ8 обладают большим рассеиванием независимо от структурного состояния сплава.

Различие в структуре сплава ВТ8 (глобулярная мелкозернистая или пластинчатая крупнозернистая) не оказывает статистически значимого влияния на средние значения и дисперсию скоростей развития усталостных трещин.

Список литературы

1. Трощенко, В. Т. Соппротивление усталости металлов и сплавов: справочник. Ч. 1 / В. Т. Трощенко, Л. В. Сосновский. – К. : Наук. думка, 1987. – 505 с.
2. Прокопенко, А. В. Поверхностные свойства и предел выносливости металла. Сообщ. 1. Зависимость предела текучести от глубины слоя / А. В. Прокопенко, В. Н. Торгов // Проблемы прочности. – 1986. – № 4. – С. 28–33.
3. Ткаченко, В. В. Исследование влияния структуры (глобулярной и пластинчатой) на кинетику развития усталостных трещин в образцах из сплава ВТ-8 / В. В. Ткаченко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2000. – Вып. 22 (5). – С. 108–117.
4. Аулер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Аулер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
5. Ковик, Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Ковик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение, 1980. – 304 с.
6. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – М. : Статистика, 1974. – 192 с.
7. Степнов, М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник / М. Н. Степнов. – М. : Машиностроение, 1985. – 231 с.

Рецензент: д.т.н., профессор Долматов А.И., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков, Украина

Поступила в редакцию 19.10.11

Дослідження розвитку втомлених тріщин у зразках із титанових сплавів

Встановлено, що швидкості розвитку втомлених тріщин в сплаві VT8 мають велике розсіюванням незалежно від структурного стану сплаву. Різниця в структурі сплаву VT8 (глобулярна дрібнозерниста або пластинчаста крупнозерниста) не роблять статистично вагомому впливу на середні значення і дисперсію швидкостей розвитку тріщин від утомленості.

Ключові слова: втомлена тріщина, випробування на втому, поверхнево-пластичне деформування.

Investigation of the fatigue crack propagation in specimen made of titanium alloys

It is established that the rate of fatigue crack propagation in the VT8 alloy have a large dispersion regardless of the structural state of the alloy. The difference in the VT8 alloy structure (globular fine-grained or lamellar coarse-grained) has no statistically significant effect on mean values and the rate dispersion of fatigue crack propagation.

Keywords: fatigue crack, fatigue test, surface plastic deformation.