

УДК 539.385

В.И. Куренко, Ю.Л. Тарасов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН НА ОСНОВЕ РАВНОВЕСНОЙ ДИАГРАММЫ РАСТЯЖЕНИЯ

Проектирование конструкций летательных аппаратов "повышенной живучести" ставит задачу оценки свойств материалов и расчета их прочности на стадии развития усталостных трещин. На этой стадии долговечность конструкции можно определить, зная скорость роста усталостной трещины и ее зависимость от силовых и геометрических факторов. Основным способом получения таких зависимостей в настоящее время является усталостный эксперимент. Известны также теоретические подходы к определению скорости развития трещины усталости [1, 2], однако для нахождения некоторых коэффициентов в таких зависимостях все равно необходимы усталостные испытания. Поэтому желательно найти такую зависимость скорости роста усталостной трещины, в которой присутствовали бы только механические характеристики материала и не было ни одного параметра, для определения которого необходим усталостный эксперимент. Для этого рассмотрим распределение напряжений и деформаций в вершине трещины раскрывающейся по типу I.

Согласно теориям Ирвина, Орована, Дагдейла либо напряжений либо деформации около кончика трещины стремятся к бесконечности. Это следует из того, что все эти теории принимают зависимость для диаграммы растяжения $\sigma(\epsilon)$ как неубывающую функцию вплоть до момента разрушения (речь идет о номинальных напряжениях). Действительно, такие диаграммы имеют место при испытании образцов на разрывных машинах с малой жесткостью нагружающего устройства обнаруживается вторая, равновесная ветвь диаграммы — спадающая [3-6, 7].

С.Д. Волков [3-6], рассматривая напряженное состояние у вершины

трещины, предположил, что оно соответствует равновесной диаграмме, имеющей максимум и спадающей вплоть до нуля. Это положение иллюстрируется на рис. I, где в правой части изображена равновесная диаграмма растяжения, а слева распределение напряжений вблизи вершины трещины. Напряжения и деформации в точках X_a , X_b и X_c соответствуют напряжениям и деформациям в точках a , b и c диаграммы растяжения. В точке X_0 напряжение σ равно нулю, а деформация $\epsilon = \epsilon_R$, где ϵ_R - максимальная деформация, которую допускает материал.

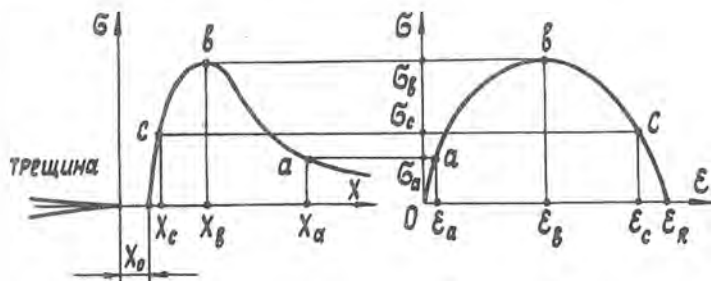


Рис. I

Координата X_0 является величиной равновесного подрастания трещины. Оно тем больше, чем выше значение прикладываемой нагрузки.

Таким образом, распределение напряжений в вершине трещины можно связать с равновесной диаграммой растяжения. Это устраняет одну из главных неопределенностей теории трещин: бесконечность напряжений или деформаций вблизи кончика трещины.

Если внешняя нагрузка постоянна, то распределение напряжений остается неизменным, и трещина больше не растет. В процессе циклического нагружения возможно дальнейшее подрастание трещины.

Для подтверждения предположения о подрастании трещины при каждом цикле нагружения были проведены усталостные и фратографические³⁸ исследования. На образцах из листового материала АМг6БМ толщиной 5 мм изучалось соответствие между шагом усталостных бороздок на поверхности излома и скоростью роста трещины при

³⁸ Фратографические исследования на электронном микроскопе были проведены С. Н. Анучиным.

пульсирующем цикле нагружения. Результаты представлены на рис. 2. Треугольниками обозначены экспериментальные значения скорости роста трещины $d\ell/dN$ (ℓ - длина трещины, N - количество циклов нагружения, а крестиками - шаг между усталостными бороздками S в зависимости от размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK_I . Видно, что шаг между бороздками удовлетворительно коррелирует со скоростью роста усталостной трещины. Этот результат качественно согласуется с данными работ [8, 9].

Для определения величины равновесного подрастания трещины $\chi_0 = d\ell/dN$ необходимо решить упруго-пластическую задачу с учетом истории нагружения. Эта задача чрезвычайно сложна, и в настоящее время еще не найдено удовлетворительного ее решения. Поэтому задачу предлагается решить приближенно.

Примем в первом приближении, что деформации вблизи вершины трещины определяются на основании упругого решения для случая плоской деформации [10]:

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{E\sqrt{2\pi x}} K_I, \quad (1)$$

где ϵ_x и ϵ_y - деформации по линии движения трещины (в этом случае они совпадают с главными деформациями ϵ_1 и ϵ_2 ; μ - коэффициент Пуассона; E - модуль упругости материала; K_I - коэффициент интенсивности напряжений.

Будем считать, что локальное разрушение наступает в том случае, когда интенсивность деформаций ϵ_i принимает критическое значение ϵ_i^* , т.е. $\epsilon_i = \epsilon_i^*$, где [11]

$$\epsilon_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2}. \quad (2)$$

Критическое значение интенсивности деформаций найдем из экспериментов для одноосного растяжения образцов. В момент разрушения $\epsilon_1 = \epsilon_R$, $\epsilon_2 = \epsilon_3 = 0,5 \epsilon_R$, тогда

$$\epsilon_i^* = \frac{\epsilon_R}{\sqrt{3}}. \quad (3)$$

Напомним, что деформация ϵ_R соответствует $\chi = \chi_0$. Тогда на основании (1)-(3) получаем

$$\chi_0 = \varphi^2 \left(\frac{K_I}{E \cdot \epsilon_R} \right)^2, \quad (4)$$

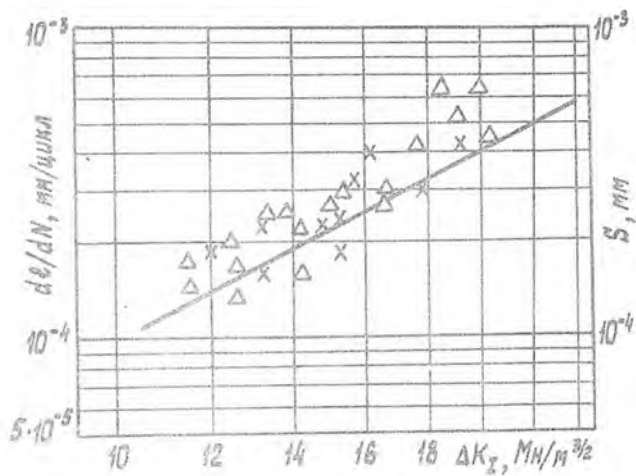


Рис. 2

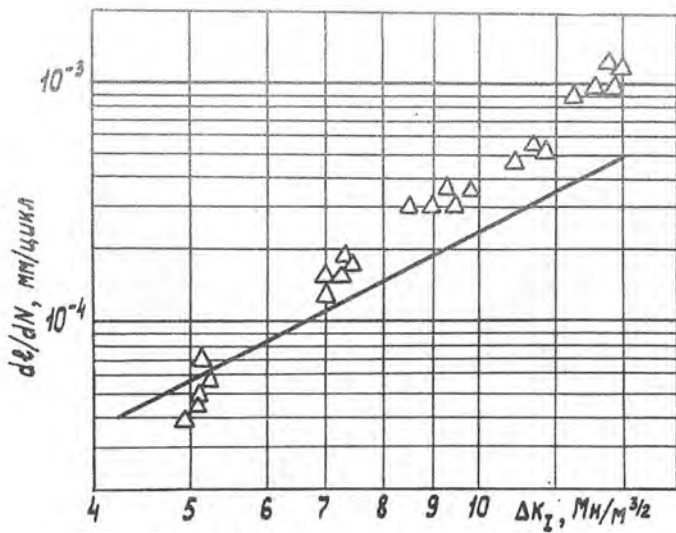


Рис. 3

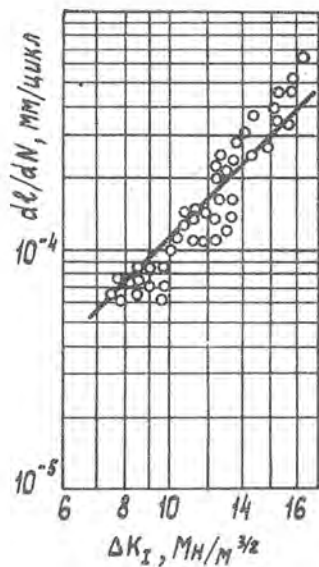


Рис. 4

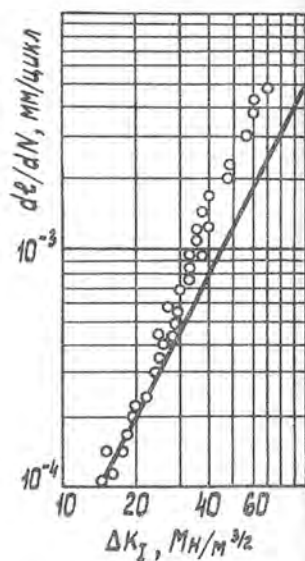


Рис. 5

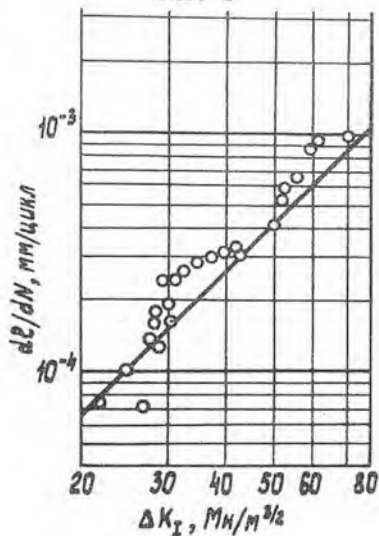


Рис. 6

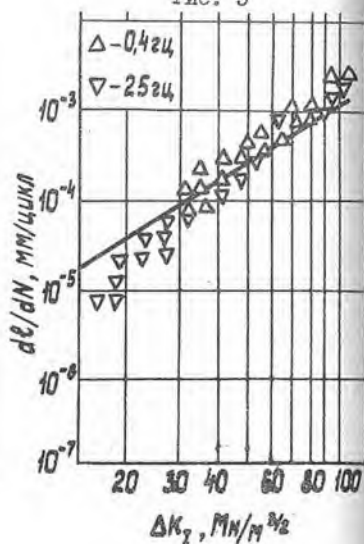


Рис. 7

$$\varphi = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{\sqrt{2\pi}}$$

При $\mu = 0,3$ имеем $\varphi = 0,415$.

Таким образом, мы получили формулу для определения скорости роста усталостной трещины в зависимости от коэффициента интенсивности напряжений при пульсирующем цикле нагружения. В ней имеется лишь одна величина, подлежащая экспериментальному определению — это предельная деформация материала при разрушении ϵ_R . Ее можно определить по равновесной диаграмме растяжения. Однако на гладком образце равновесная диаграмма может реализоваться не всегда. Авторы пытались получить равновесную диаграмму на материале АМг6БМ. При увеличении жесткости нагружающего устройства действительно появляется ниспадающая ветвь диаграммы, хотя до нуля она не дошла. Это можно объяснить тем, что жесткость машины еще недостаточна. С.Д.Волков [6] для некоторых материалов сумел получить равновесные диаграммы.

По нашим и литературным данным было замечено, что ниспадающая ветвь диаграммы довольно крутая и предельная деформация равновесной диаграммы ϵ_R незначительно превышает относительное удлинение после разрыва δ обычной диаграммы. Поэтому приближенно можно принять $\epsilon_R \approx \delta$.

Для проверки формулы (4) были проведены эксперименты по определению скорости роста усталостных трещин в алюминиевом АМг6БМ и магниеволитиевом ВМД5 сплавах. Испытания проводились на установках, созданных в Куйбышевском авиационном институте на кафедре прочности летательных аппаратов. Результаты экспериментов для материала АМг6БМ представлены на рис. 2, а для материала ВМД5 на рис. 3 треугольниками. Там же сплошной линией показаны расчетные значения скорости роста трещины, подсчитанные по формуле (4). (Исходные данные для расчета см. в таблице I). Как видно из рисунков, значения скорости удовлетворительно соответствуют экспериментальным данным.

На рис. 4-7 сплошной линией показаны значения скорости распространения трещины, подсчитанные по формуле (4), и экспериментальные данные (кружочки, треугольники), взятые из работ [12-15]. На этих рисунках также видно удовлетворительное соответствие расчетных значений эксперименту для различных материалов.

Некоторое отклонение при высоких уровнях ΔK_I можно объяснить тем, что пластическая зона увеличивается, и напряженное состояние

отличается от плоской деформации. Однако учесть это расчетным путем чрезвычайно трудно. Отклонения при низких значениях ΔK_T можно объяснить смыканием усталостной трещины.

Таблица I

Механические свойства материалов,
принятые в расчетах, и источник информации

Рисунок	Материал	E МПа	δ	Литературный источник
2	АМг6БМ	70000	0,20	-
3	ВМД5	45000	0,21	-
4	2024-Т3	70000	0,175	[12]
5	Тл -5Ал -2,55%	119000	0,17	[13]
6	сталь	210000	0,155	[14]
7	15х2НМФА	210000	0,23	[15]

Несмотря на указанные отклонения, для проектных расчетов формулой (4) пользоваться можно. При низких значениях ΔK_T расчет пойдет в запас прочности, а слишком высокие значения ΔK_T в эксплуатации не встречаются, так как при соответствующем нагружении возможно быстрое разрушение. Лучшего согласования расчета и эксперимента следует ожидать при решении упруго-пластической задачи о распределении деформаций у вершины трещины с учетом истории нагружения.

Л и т е р а т у р а

1. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. - М.: Наука, 1974, 640 с.
2. Мостовой А.С. Определение долговечности образца на основе некоторых представлений о механизме усталостного разрушения. - В кн.: Вопросы прочности элементов авиационных конструкций, вып.39, изд. КуАИ, 1968, с. 108-119.
3. Волков С.Д., Дубровина Г.И. О неустойчивости деформаций в задачах механики хрупкого разрушения. - Проблемы прочности, 1977, № 5, с. 8-12.

4. Волков С.Д. и др. О краевой задаче механики хрупкого разрушения. - Проблемы прочности, 1978, № I, с. 3-7.
5. Волков С.Д. и др. К теории устойчивости разрушения технических материалов. - Проблемы прочности, 1978, № 2, с. 3-7.
6. Волков С.Д. и др. Экспериментальные функции сопротивления легированной стали при растяжении и кручении. - Проблемы прочности, 1979, № I, с. 3-7.
7. Пашков П.О. Кириенко А.М. Особенности деформации и разрушения стали в конструкциях различной жесткости. - Проблемы прочности, 1980, № I, с. 52-55.
8. Такео Екобори. Научные основы прочности и разрушения материалов. Перевод с японского. - Киев, Наукова думка, 1978, - 352 с.
9. Иванова В.С., Разрушение металлов. - М.: Металлургия, 1979. - 168 с.
10. Махутов Н.А. Сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению. - М.: Машиностроение, 1973, - 200 с.
11. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. - М.: Наука, 1974. - 312 с.
12. Гуревич С.Е., Едидович Л.Д. О скорости распространения трещины и пороговых значениях интенсивности напряжений в процессе усталостного разрушения. - В кн.: Усталость и вязкость разрушения металлов. - М.: Наука, 1974, с. 36-78.
13. *Wanhill R.J.H. Environmental Fatigue Crack Propagation in Medium Strength Titanium Sheet Alloys. Engineering Fracture Mechanics, 1974, vol. 6, pp. 681-697.*
14. Толбер, Рид, Шрамм. Механические свойства, усталость и трещиностойкость отожженной на твердый раствор мартенситно-старееющей стали с 18% никеля при криогенных температурах. - Теоретические основы инженерных расчетов. Перевод с английского, - 1978, № 2, с. 82-88.
15. Ясный П.В. Методика и некоторые результаты исследования закономерностей развития усталостных трещин при плоском изгибе в условиях низких и высоких температур. - Проблемы прочности, 1980, № 5, с. 78-81.