



**Тихомиров Виктор Михайлович** родился 27 ноября 1954 г. в г. Барнауле. В 1977 г. окончил самолетостроительный факультет Новосибирского электротехнического института по специальности «Динамика и прочность летательных аппаратов» и был направлен по распределению на работу инженером в НИЛ прочности НИИЖТа.

Общий научно-педагогический стаж В.М. Тихомирова составляет 28 лет. В 1984 г. он окончил заочную аспирантуру при кафедре «Строительная механика».

В.М. Тихомиров принимал участие в работе над 17 научно-исследовательскими темами. Научная деятельность Виктора Михайловича в основном связана с совершенствованием экспериментальных методов механики твердого деформируемого тела. С 1993 г. он является руководителем НИЛ прочности. В 1995 г. защитил кандидатскую диссертацию. Решением ВАК от 1997 г. В.М. Тихомирову присвоено звание доцента. В 2004 г. он защитил докторскую диссертацию.

По результатам исследований В.М. Тихомировым опубликовано более 70 научно-методических трудов.

УДК 620.178.311.6

В.М. ТИХОМИРОВ

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В МОНОЛИТНОЙ ПАНЕЛИ С РЕБРАМИ

В работе представлено исследование развития усталостной трещины в панели с ребрами при ее циклическом нагружении. Зафиксирована скорость роста трещины и форма ее фронта на каждом этапе испытаний вплоть до разрушения.

Разработана методика расчета коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) для трещин с криволинейным фронтом. Создана численная модель панели с растущей трещиной, граничные условия в которой определялись на основе экспериментально измеренных перемещений берега усталостной трещины.

Проведен анализ скорости роста трещины при ее развитии через ребро панели. Определены значения КИН в характерных точках фронта трещины на каждом этапе ее продвижения. Построена диаграмма разрушения в виде зависимости скорости роста трещины от размаха КИН.

Во всех известных исследованиях предполагается, что для материалов с высоким уровнем прочности (сталь, алюминиевые и титановые сплавы) скорость роста трещины не зависит от вида напряженного состояния. Однако даже при однородном растяжении тонких пластин фронт усталостной трещины не прямолинейный из-за различной степени стеснения деформаций по ширине пластины, от плоского напряженного состояния на поверхности до плоской деформации во внутренних точках. В таких переходных зонах развитие усталостных трещин не изучено. Мало исследовано влияние на скорость роста и геометрию трещин подкрепляющих элементов типа ребер, а также поля остаточных напряжений, вызванных технологией изготовления и режимом эксплуатации элементов конструкций.

В данной работе проведено экспериментально-расчетное исследование развития усталостной трещины в монолитной панели с двумя ребрами при ее циклическом растяжении.

### Циклические испытания панели

В конструкции летательных аппаратов широко применяются монолитные оребренные панели. Расчет долговечности таких элементов с учетом развития магистральных усталостных трещин — достаточно сложная проблема. В основном рассматриваются бесконечные панели с ребрами малой величины, где отсутствует влияние границ, а разрушенный подкрепляющий элемент моделируется с помощью двух ребер, выходящих на кромки разреза [1]. На рис. 1 представлена геометрия поперечного сечения панели, которая изготовлена из алюминиевого сплава Д16Т со следующими механическими характеристиками: модуль продольной упругости  $E = 70000$  МПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ; условный предел текучести  $\sigma_{0,2} = 240$  МПа; предел прочности  $\sigma_B = 480$  МПа.

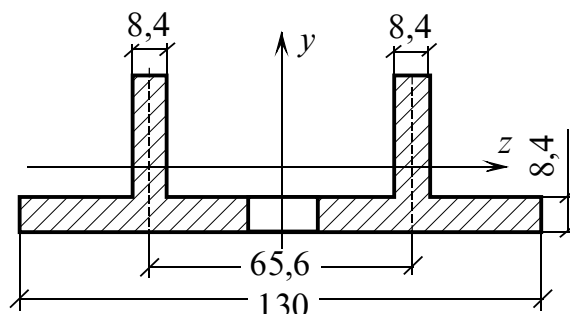


Рис. 1. Геометрия поперечного сечения панели

В процессе циклического растяжения в панели из острого центрального надреза длиной 20 мм зародилась и развивалась усталостная трещина. Параметры циклического нагружения поддерживались гидравлическим пульсатором ГРМ-1:  $P_{\max} = 50$  кН;  $P_{\min} = 10$  кН; частота нагружений — 600 цикл/мин (10 Гц). Для того чтобы зафиксировать поэтапное изменение геометрии фронта трещины при распространении ее через тело панели, применялся способ перегрузки. Для этого максимальная нагрузка на некоторое время повышалась на 20 % (до  $P_{\max} = 60$  кН). Таким образом, было зафиксировано на разных стадиях испытаний восемнадцать положений усталостной трещины (рис. 2). Перегрузка в момент достижения трещины положения № 18 вызвала разрушение панели.

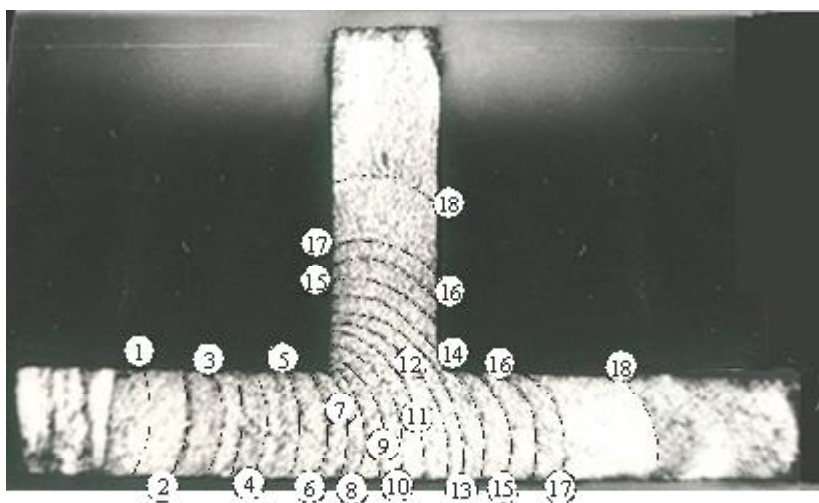


Рис. 2. Вид излома панели с зафиксированными фронтами усталостной трещины на восемнадцати этапах испытаний

Усилие на панель передавалось через шарнирные захваты. Однако в сечении, где распространялась усталостная трещина, наблюдалось внецентренное (относительно оси  $z$ , см. рис. 1) растяжение, параметры которого контролировались четырьмя симметрично расположенными тензорезисторами.

На каждом этапе испытаний после перегрузки испытательная машина останавливалась и при статическом нагружении, используя метод голографического муара, проводили измерения перемещений берегов усталостной трещины. Для этого на исследуемую поверхность панели наносился металлизированный растр с частотой  $f = 850$  линий/мм. В коллимированном пучке монохроматического света на фотопластинке, прикрепленной непосредственно на образец (рис. 3), регистрировалась голограмма. Источником света являлся гелий-неоновый лазер с длиной волны излучения  $\lambda = 632,8$  нм.

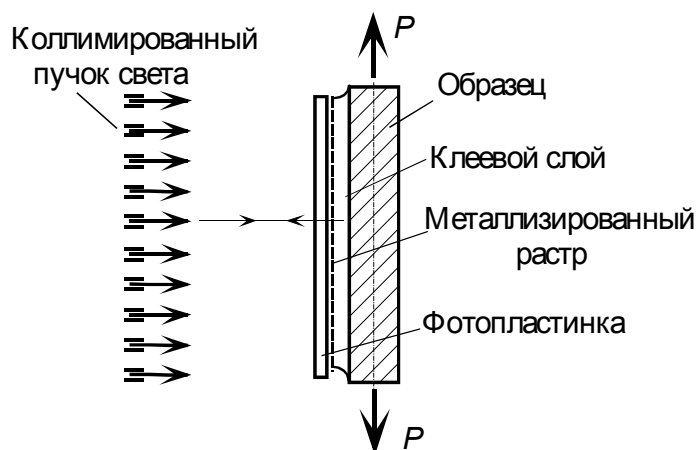


Рис. 3. Схема записи голограмм

Величина перемещения  $v$  в направлении, перпендикулярном плоскости трещины, определялась по следующей зависимости [2]:

$$v = \frac{1}{2f}(n_1 - n_2), \quad (1)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  — порядки полос, зафиксированные на картине полос интерференции (рис. 4, б) при восстановлении голограммы с двух симметричных направлений  $\pm\alpha$ , которые соответствуют первому дифракционному порядку. Здесь вершина трещины находится в начале координат  $(v, r)$ . В этой точке начинается темная полоса интерференции нулевого порядка ( $n = 0$ ).

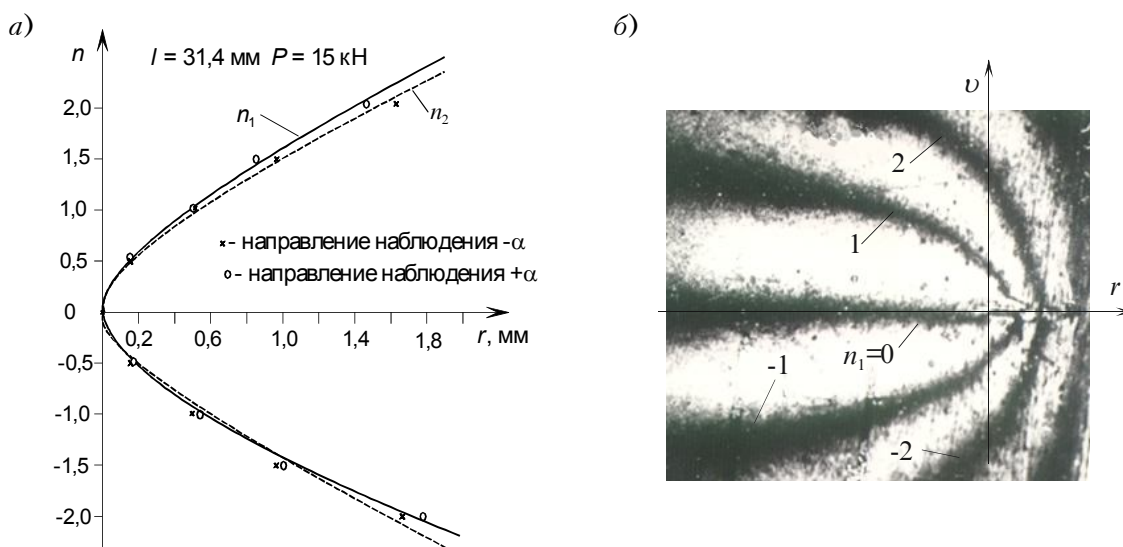


Рис. 4. Распределение порядка муаровых полос у вершины трещины

На рис. 4, а представлено распределение порядков полос интерференции, зафиксированных на восьмом этапе испытаний при статической нагрузке  $P = 15$  кН.

### Определение коэффициента интенсивности напряжений по криволинейному фронту трещины

По перемещениям берега трещины в работе [2] определяется коэффициент интенсивности напряжений (КИН)  $K_I$  в образцах из тонких листов. Для этого используются известные соотношения перемещений при растяжении пластины с центральной трещиной:

— при плоском напряженном состоянии, которое всегда реализуется на поверхности образца,

$$u(r) = \frac{2K_I}{E\sqrt{\pi c}} \sqrt{2rc - r^2}; \quad (2)$$

— при плоском деформированном состоянии

$$u(r) = \frac{2K_I(1-\nu^2)}{E\sqrt{\pi c}} \sqrt{2rc - r^2}, \quad (3)$$

где  $c$  — полудлина трещины;  $r$  — расстояние до вершины трещины;  $E$ ,  $\nu$  — модуль упругости и коэффициент Пуассона материала.

Однако на рис. 2 видно, что фронт усталостной трещины не прямолинейный. Поэтому для проверки зависимостей (2) и (3) методом конечных элементов был проведен расчет напряженно-деформированного состояния пластины с центральной трещиной, имеющей криволинейный фронт (рис 5). Фронт трещины имел форму дуги окружности радиусом 10 мм, таким же, как на первых четырех этапах испытаний панели. Размеры конечных элементов вблизи вершины трещины были выбраны следующие  $0,25 \times 0,25 \times 0,5$  мм. На рис. 6 приведены результаты расчета перемещений берега трещины в срединной плоскости и на краю пластины. Кривая 1 соответствует перемещениям берега трещины, определенным по формуле (2); кривая 3 — по формуле (3); кривая 2 показывает перемещение точек, лежащих на поверхности пластины; кривая 4 соответствует перемещениям точек берега трещины в срединной плоскости пластины. По данным метода конечных элементов была определена величина КИН  $K_I$  в соответствии с методикой, изложенной в работе [3].

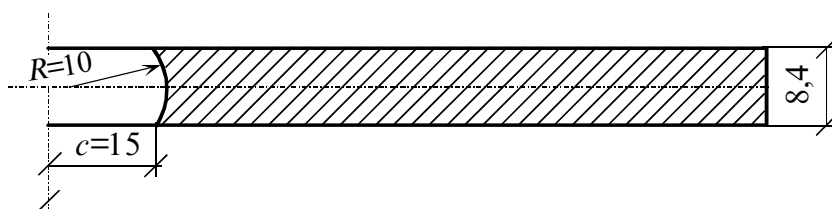


Рис. 5. Среднее сечение пластины при численном моделировании

Значение КИН, рассчитанное в точке фронта, выходящей на свободную поверхность, на 20 % превысило теоретическую величину КИН для бесконечной пластины с центральной трещиной ( $K_I = \sigma\sqrt{\pi c}$ ). Погрешность расчета для средней точки, в которой реализуется плоская деформация, составила менее 1 %.

Для восемнадцати вариантов геометрии трещины (см. рис. 2) был проведен численный анализ напряженно-деформированного состояния конечноэлемент-

ной модели исследуемой панели. С учетом результатов проведенных исследований КИН определялся в точках фронта трещины, лежащих по середине панели или по середине ребра, где реализуется плоское деформированное состояние.

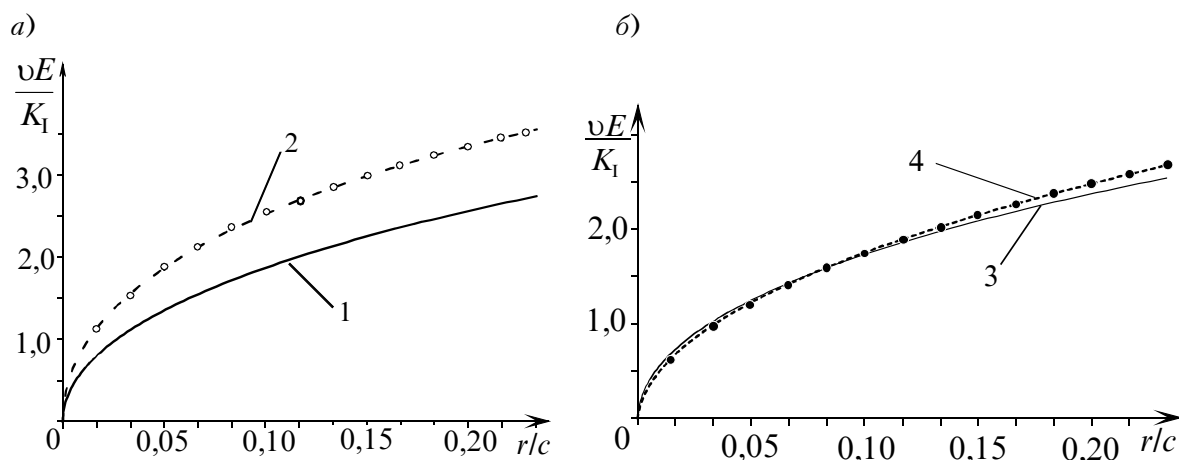


Рис. 6. Перемещение берега трещины:  
а — плоское напряженное состояние; б — плоская деформация

На рис. 7 представлена зависимость приведенного КИН  $k$  от характерного размера трещины. Здесь длина трещины  $l$  измерялась от оси симметрии панели до расчетной точки фронта усталостной трещины. Приведенная величина КИН  $k$  составила:

$$k = \frac{K_I}{\sigma_n}, \quad (4)$$

где  $\sigma_n = P/A$  — номинальное напряжение;  $A$  — площадь поперечного сечения панели.

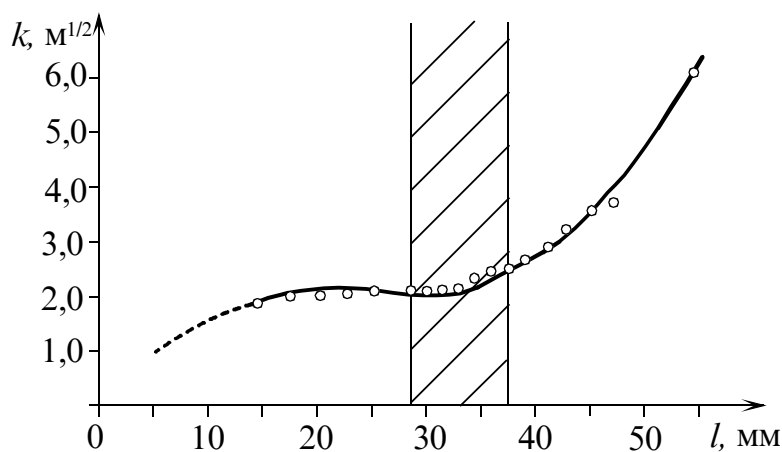


Рис. 7. Результаты численного определения КИН

Заштрихованная область на графике соответствует положению ребра.

Для контроля правильности выбранных граничных условий на каждом этапе нагружения перемещения берега трещины, полученные экспериментально (метод голографической интерферометрии), сравнивались с результатами метода конечных элементов. На рис. 8 сплошной линией показаны данные численного расчета на восьмом этапе испытаний, точками — экспериментально полученные

значения перемещений поверхности усталостной трещины. Максимальное расхождение результатов по всем этапам испытаний составило не более 12 %. Это свидетельствует о правильности выбора граничных условий при проведении конечноэлементных расчетов.

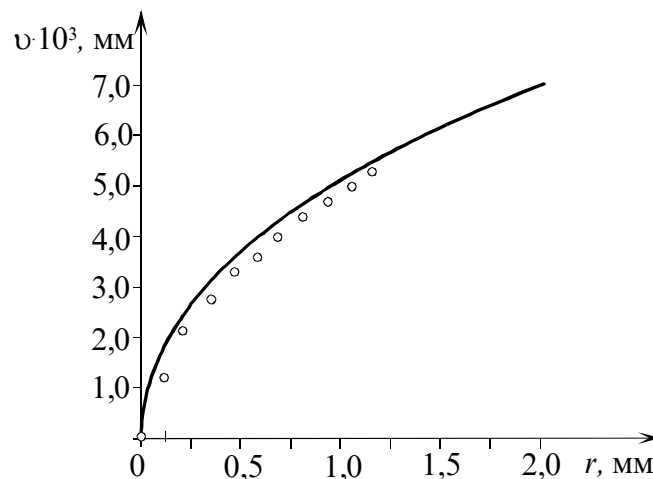


Рис. 8. Зависимость перемещений берега трещины от  $r$

#### Анализ экспериментальных результатов

В момент разрушения панели, когда  $P_{\max} = 60$  кН, размер трещины составил 54,7 мм. Эти данные позволили определить критический коэффициент интенсивности напряжений при усталостном разрушении данного элемента конструкции. С учетом результатов расчета КИН (см. рис. 7) было определено его критическое значение:  $K_{fc} = 23,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ .

По поверхности излома была изучена геометрия усталостной трещины. На всех стадиях испытаний форма фронта трещины мало отличается от дуги окружности. Только в области угла, при переходе трещины в ребро, кривизна трещины увеличивается. Минимальное значение радиуса 7,25 мм имеет фронт трещины перед разрушением панели, максимальное — 12 мм, в зоне соединения панели с ребром. Радиус кривизны фронта, очевидно, зависит от неравномерности поля напряжений, в котором растет трещина.

Анализ поверхности излома панели позволил рассчитать скорость роста усталостной трещины на каждом этапе испытаний (таблица).

Зависимость скорости роста трещины от величины КИН аппроксимируют различными соотношениями [4]. Для сравнения с известными экспериментальными результатами была использована формула Пэриса

$$\frac{\Delta l}{\Delta N} = C(\Delta K_I)^m, \quad (5)$$

здесь  $N$  — число циклов нагружения;  $C$  и  $m$  — постоянные коэффициенты.

Обработка экспериментальных данных по методу наименьших квадратов (исключая результаты на последнем этапе испытаний) позволила вычислить постоянные  $C$  и  $m$ :  $C = 4,78 \cdot 10^{-8}$ ,  $m = 3,97$ .

## Результаты анализа геометрии трещины и расчета КИН

| Номер<br>этапа | Положение<br>точки | Размер<br>трещины<br>$l$ , мм | Радиус<br>кривизны<br>фронта<br>трещины,<br>мм | $\Delta N$ ,<br>цикл | $\frac{\Delta l}{\Delta N}$ ,<br>мм/цикл | $K_I$ ,<br>МПа $\sqrt{м}$ | Приведенный<br>КИН $k$ , $\sqrt{м}$ |
|----------------|--------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| 1              | в панели           | 14,2                          | —                                              | —                    | —                                        | 4,77                      | 1,85                                |
| 2              | в панели           | 17,2                          | 10,55                                          | —                    | —                                        | 5,16                      | 2,00                                |
| 3              | в панели           | 20,0                          | 10,55                                          | 100000               | $2,80 \cdot 10^{-5}$                     | 5,15                      | 2,00                                |
| 4              | в панели           | 22,6                          | 9,96                                           | 85000                | $3,06 \cdot 10^{-5}$                     | 5,25                      | 2,04                                |
| 5              | в панели           | 24,8                          | 9,68                                           | 70000                | $3,14 \cdot 10^{-5}$                     | 5,38                      | 2,09                                |
| 6              | в панели           | 28,5                          | 8,11                                           | 65000                | $3,23 \cdot 10^{-5}$                     | 5,50                      | 2,14                                |
| 7              | в панели           | 30,0                          | 8,06                                           | 39000                | $3,84 \cdot 10^{-5}$                     | 5,38                      | 2,09                                |
| 8              | в панели           | 31,4                          | 8,06                                           | 39000                | $3,59 \cdot 10^{-5}$                     | 5,42                      | 2,11                                |
| 9              | в панели           | 32,9                          | 8,52                                           | 33000                | $4,54 \cdot 10^{-5}$                     | 5,60                      | 2,18                                |
| 10             | в панели           | 34,4                          | 9,27                                           | 24000                | $6,25 \cdot 10^{-5}$                     | 5,92                      | 2,30                                |
| 11             | в панели           | 35,7                          | 10,23                                          | 22000                | $6,52 \cdot 10^{-5}$                     | 6,46                      | 2,51                                |
|                | в ребре            |                               | 10,23                                          | 22000                | $5,91 \cdot 10^{-5}$                     | 5,92                      | 2,30                                |
| 12             | в панели           | 37,7                          | 10,77                                          | 18000                | $1,00 \cdot 10^{-4}$                     | 6,38                      | 2,48                                |
|                | в ребре            |                               | 10,85                                          | 18000                | $7,22 \cdot 10^{-4}$                     | 6,22                      | 2,42                                |
| 13             | в панели           | 39,0                          | 12,00                                          | 12000                | $1,08 \cdot 10^{-4}$                     | 6,74                      | 2,62                                |
|                | в ребре            |                               | 11,95                                          | 12000                | $1,02 \cdot 10^{-4}$                     | 6,31                      | 2,45                                |
| 14             | в панели           | 40,9                          | 10,87                                          | 11000                | $1,55 \cdot 10^{-4}$                     | 7,46                      | 2,90                                |
|                | в ребре            |                               | 9,70                                           | 11000                | $1,27 \cdot 10^{-4}$                     | 7,74                      | 3,01                                |
| 15             | в панели           | 43,0                          | 8,48                                           | 9000                 | $2,33 \cdot 10^{-4}$                     | 8,29                      | 3,22                                |
|                | в ребре            |                               | 8,60                                           | 9000                 | $1,67 \cdot 10^{-4}$                     | 8,29                      | 3,22                                |
| 16             | в панели           | 45,2                          | 7,50                                           | 8000                 | $2,50 \cdot 10^{-4}$                     | 9,20                      | 3,57                                |
|                | в ребре            |                               | 7,55                                           | 8000                 | $2,25 \cdot 10^{-4}$                     | 9,06                      | 3,52                                |
| 17             | в панели           | 47,4                          | 7,35                                           | 5000                 | $4,40 \cdot 10^{-4}$                     | 9,54                      | 3,71                                |
|                | в ребре            |                               | 7,25                                           | 5000                 | $3,20 \cdot 10^{-4}$                     | 9,62                      | 3,74                                |
| 18             | в панели           | 54,7                          | 7,25                                           | 3500                 | $20,86 \cdot 10^{-4}$                    | 15,66                     | 6,09                                |
|                | в ребре            |                               | 7,25                                           | 3500                 | $15,14 \cdot 10^{-4}$                    | 13,95                     | 5,42                                |

В работе [5] предложено полные кинетические диаграммы усталостного разрушения алюминиевых сплавов и сталей от порогового КИН  $K_{th}$  до критического  $K_{fc}$  описывать следующей зависимостью:

$$\frac{\Delta l}{\Delta N} = C \left( \frac{K_{\max} - K_{th}}{K_{fc} - K_{\max}} \right)^m. \quad (6)$$

При этом показатель степени  $m$  для разных материалов изменяется незначительно и имеет среднее значение  $1,65 (\pm 5 \%)$ . Также был введен параметр  $a$ , который непосредственно связан со значением степени  $m$ :

$$a = m \frac{p+1}{p-1} \lg p \left( p = \sqrt{\frac{K_{fc}}{K_{th}}} \right). \quad (7)$$

Для различных металлов он оказался практически постоянным  $a \cong 1,61$ . Обработка данных для исследуемой панели показала, что при  $\Delta K_{th} = 2,27 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ,  $\Delta K_{fc} = 16,0 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  имеем  $C = 4,56 \cdot 10^{-4}$ ;  $m = 1,71$ ;  $a = 1,58$ , что согласуется с показателями, приведенными в работе [5].

На рис. 9 представлена кинетическая диаграмма усталостного разрушения сплава Д16Т, построенная по результатам эксперимента. Прямая 1 соответствует обработке экспериментальных данных по формуле (5), кривая 2 — аппроксимация с помощью зависимости (6). Черными точками отмечены данные, соответствующие распространению усталостной трещины через ребро.

По результатам проведенного расчетно-экспериментального анализа развития усталостной трещины в монолитной панели при ее циклическом растяжении можно сделать следующие выводы:

1. Геометрия фронта трещины хорошо может быть спрогнозирована только во внутренних точках трехмерного тела, так как известные способы не дают точного значения КИН в точках фронта трещины, которые близко лежат к поверхности тела.

2. Усталостная трещина, очевидно, стремится занять такое положение, которое максимально выравнивает поле напряжений, что согласуется с гипотезой Черепанова [6]. Однако не всегда по фронту усталостной трещины реализуются равные условия нагружения, так называемый равновесный фронт (КИН  $K_I = \text{const}$ ). При распространении трещины в монолитной панели (см. рис. 2) видно, что при приближении к ребру жесткости скорость роста трещины имеет разную величину в каждой точке фронта. После прорастания трещины через точку сопряжения ребра с плоскостью панели скорости точек фронта выравниваются, и равновесный фронт имеет место вплоть до разрушения панели.

3. Кинетические диаграммы, построенные по данным испытаний элементов конструкций, хорошо согласуются с результатами известных испытаний стандартных образцов, а также учитывают влияние остаточных напряжений, которые всегда имеются при изготовлении и меняются в процессе эксплуатации конструкции.

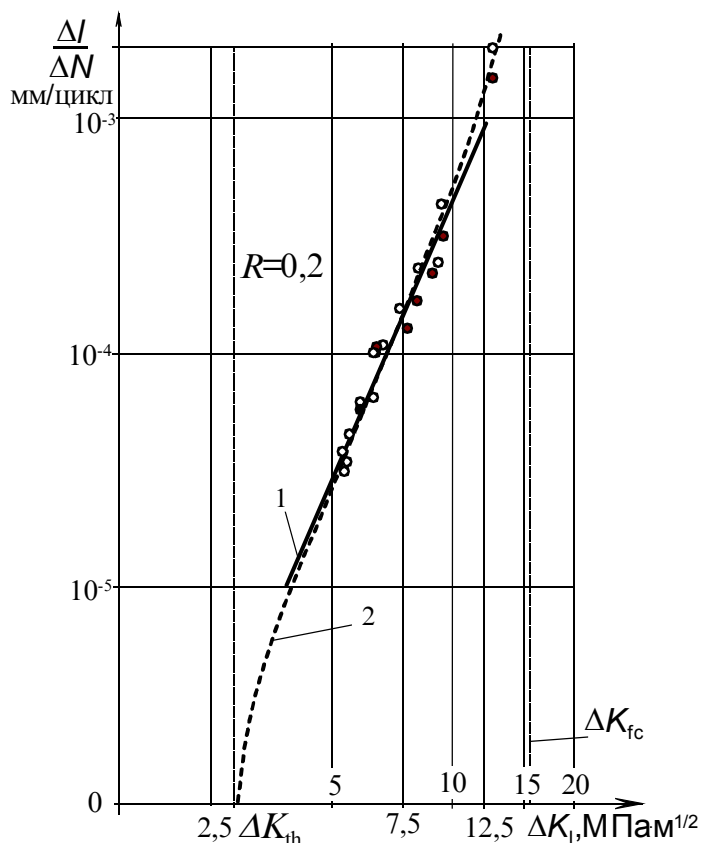


Рис. 9. Кинетическая диаграмма для сплава Д16Т

### Литература

1. Максименко В.Н., Цендровский А.В. Оценка усталостной прочности в оробренных панелях // Динамика и прочность элементов авиационных конструкций. Новосибирск: Изд-во НЭТИ, 1987. С. 113–118.
2. Тырин В.П. Применение метода голографической интерферометрии для определения коэффициента интенсивности напряжений // ПМТФ. 1990. Т. 30. № 1. С. 155–158.
3. Тихомиров В.М. Аналитические зависимости для определения перемещений поверхности разреза в плоских и трехмерных телах // Экспериментально-расчетные методы исследования задач прочности: Сб. науч. тр. СГУПС. Новосибирск, 2003. С. 9–33.
4. Гуревич С.Е., Едидович Л.Д. О скорости распространения трещины и пороговых значениях КИН в процессе усталостного разрушения // Усталость и вязкость разрушения металлов. М.: Наука, 1978. С. 36–79.
5. Ярема С.М. Исследование роста усталостных трещин и кинетические диаграммы усталостного разрушения // ФХММ. 1977. Т. 13. № 4. С. 3–23.
6. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.