

**О СВЯЗИ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ  
И СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ПРИ УПРОЧНЕНИИ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ**

В проведѣнном исследовании изучалась зависимость коэффициента интенсивности напряжений (КИН) от максимального напряжения симметричного цикла и размера усталостной трещины при изгибе цилиндрических образцов с концентраторами напряжений. Целью исследования является установление связи между КИН  $K_I$ , размером нераспространяющейся трещины усталости и приращением предела выносливости, получаемого за счёт упрочнения поверхности образца. В качестве исходных данных для расчѣтов использованы результаты экспериментальных исследований и испытаний на усталость цилиндрических образцов диаметром  $D = 10$  мм с полукруглым надрезом радиусом  $R = 0,3$  мм, изготовленных из сталей 30ХГСА и 12Х18Н10Т [1] (рис.1).

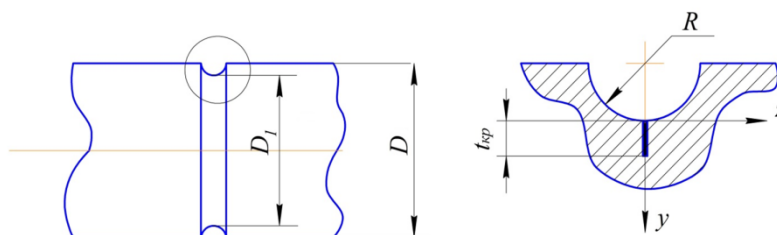


Рис. 1. Цилиндрический образец и нераспространяющаяся трещина усталости

Часть образцов после изготовления подвергалась электрополированию (неупрочнённые образцы), другая – поверхностному упрочнению. Поверхностные слои образцов были подвергнуты воздействию двух методов упрочнения: гидродробеструйной обработке (ГДО) и обкатке роликом (ОР) на режимах, характерных для авиационной промышленности. Следует особо отметить, что при испытаниях на усталость в упрочнённых образцах были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, а в неупрочнённых образцах их не наблюдалось. Это явление является характерным для деталей или образцов с концентраторами напряжений – галтелями, буртами, надрезами, неподвижными посадками, резьбой и рядом других видов [2-4]. Но наиболее ярко нераспространяющиеся трещины усталости проявляются в деталях с концентраторами напряжений и подвергнутых различным видам поверхностного упрочнения. В связи с этим принято различать пределы выносливости образцов и деталей по трещинообразованию и

по разрушению. Для гладких поверхностно упрочнённых и неупрочнённых образцов разница между пределами выносливости по трещинообразованию и по разрушению практически отсутствует. Вместе с тем для упрочнённых деталей и образцов с концентраторами напряжений данные характеристики сопротивления усталости могут различаться до нескольких раз.

Расчёты для получения зависимостей  $K_I = f(\sigma_{max})$  были выполнены методом конечно-элементного моделирования с использованием комплекса ANSYS. Для этого были разработаны конечно-элементные модели образцов с надрезами в осесимметричной постановке с наложением соответствующих граничных условий. Моделирование остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя образцов было выполнено методом термоупругости [5]. При определении первоначальных деформаций [5] в конечно-элементной модели гладкого образца в качестве исходных данных использовалось экспериментальное распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя, определённое методом колец и полосок [6]. Расчёт коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  выполнен для глубины кольцевой трещины в диапазоне от 0,1 мм до 1,0 мм, расположенной в наименьшем сечении образца с надрезом.

Критическая глубина  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости [1] для сплошных цилиндрических образцов и деталей с концентраторами напряжений определяется по формуле  $t_{кр} = 0,0216D_1$ , полученной на основании многочисленных экспериментов, где  $D_1$  – диаметр наименьшего опасного сечения (рис. 1). Размер критической глубины нераспространяющейся трещины усталости  $t_{кр}$  [1] для наименьшего диаметра образца с надрезом  $D_1 = 9,4$  мм составляет примерно 0,20 мм.

Основным параметром, обобщающим условия нагружения материала при вершине трещины, является коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$ , зависящий одновременно от уровня нагружения и размера трещины. Перепад (размах) этого коэффициента  $\Delta K = K_{I_{max}} - K_{I_{min}}$  определяет скорость роста усталостной трещины согласно уравнению, предложенному Пэрисом [7]:

$$dl/dN = C(\Delta K)^n, \quad (1)$$

где  $l$  – размер трещины;  $N$  – число циклов нагружения;  $C$  – константа, зависящая от свойств материала и режима нагружения;  $n$  – показатель степени, изменяющийся в зависимости от свойств материала от 1 до 6.

Ранее исследователями экспериментально было доказано [7], что существует минимальное значение КИН  $K_{th}$ , ниже которого рост трещины невозможен. Значение  $K_{th}$ , соответствующее этому уровню, есть пороговый коэффициент интенсивности напряжений.

По результатам расчётов было установлено, что для неупрочнённых образцов с концентратором напряжений зависимость  $K_I = f(\sigma_{max})$  представляет собой прямую линию, исходящую из начала системы координат. Для упрочнённых образцов данная зависимость есть ломаная линия, состоящая из трёх участков (рис.2):

- первый участок на оси  $\sigma_{max}$  ( $K_I=0$ );
- второй участок является более пологой линией, чем третий участок;
- третий участок представляет собой прямую, параллельную зависимости для образца без упрочнения.

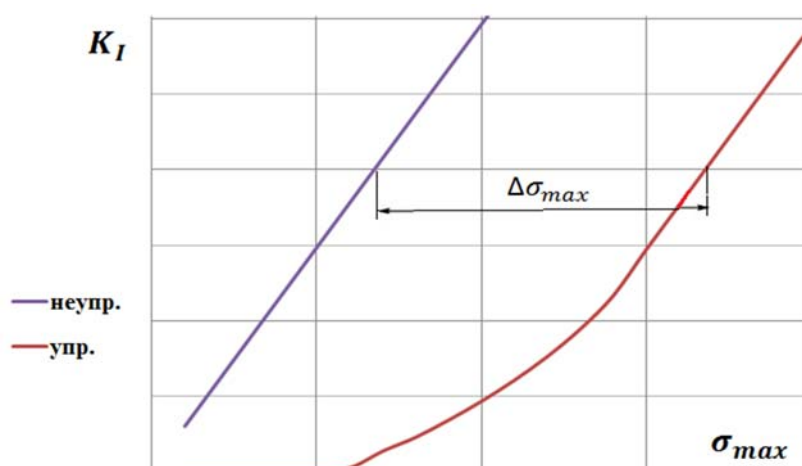


Рис. 2. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  от максимального напряжения цикла  $\sigma_{max}$

Это означает в свою очередь, что третий участок представляется как прямая линия для образца без упрочнения, смещённую на некоторую величину  $\Delta\sigma_{max}$  вправо. Следует отметить, что наличие сжимающих остаточных напряжений в упрочнённом слое образцов с концентратором приводит к значительному снижению коэффициента интенсивности напряжений и скорости роста усталостной трещины. При глубине трещины, большей, чем  $t_{кр}$ , первый участок практически отсутствует.

Причина такого характера зависимости КИН от размера трещины для образцов с концентратором объясняется следующим образом. Исходное поле напряжений оказывает влияние только на напряжение, необходимые для возникновения трещины. В начальный период развития трещина вследствие очень высокого градиента напряжений у её вершины оказывает незначительное влияние на исходное поле напряжений в зоне концентратора.

Однако, начиная с некоторой глубины, при которой влияние концентратора ослабевает, а размер трещины становится значительным, определять дальнейшее развитие трещины начинает концентрация напряжений у её вершины. Необходимым условием развития трещины является наличие в образце к этому моменту напряжений, величина которых полностью определяется трещиной как концентратором напряжений. В этот момент образцы с любыми концентраторами напряжений превращаются в образцы с одинаковым и предельно резким концентратором напряжений – трещиной.

В табл. 1 представлены пределы выносливости  $\sigma_{-1}$  неупрочнённых и упрочнённых образцов при изгибе. Анализ результатов проведённых расчётов показал, что значения экспериментального приращения  $\Delta\sigma_{-1}^{\text{эксп}}$  предела выносливости упрочнённых образцов достаточно точно совпадают со смещениями  $\Delta\sigma_{max} = \Delta\sigma_{-1}^{\text{расч}}$  прямых линий зависимости  $K_I = f(\sigma_{max})$  на третьем участке относительно зависимости для неупрочнённого образца при глубине усталостной трещины, равной 0,20 мм. Результаты приведены в табл.1. Следует отметить, что данная глубина соответствует размеру критической глубины  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости при  $D_1 = 9,4$  мм.

Таблица 1. Результаты определения экспериментальных и расчётных приращений пределов выносливости  $\Delta\sigma_{-1}$  упрочнённых образцов

Материал	Неупрочнённые образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы				
		упрочняющая обработка	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\Delta\sigma_{-1}^{\text{эксп}}$ , МПа	$\Delta\sigma_{-1}^{\text{расч}}$ , МПа	Погрешн., %
30ХГСА	180	ГДО	270	90	87	3,3
		ОР	400	220	241	9,5
12Х18Н10Т	175	ГДО	220	45	49	11,1
		ОР	280	105	101	3,8

Проведённое исследование зависимости коэффициента интенсивности напряжений от максимального напряжения цикла и глубины усталостной трещины в опасном сечении детали позволяет использовать данный метод для расчётного определения приращения предела выносливости  $\Delta\sigma_{-1}$  поверхностно упрочнённых образцов и деталей с

концентраторами напряжений, получаемого за счёт сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое.

### Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст]/ В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулук. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.

2. Кудрявцев, П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины [Текст] / П.И. Кудрявцев. – М.: Машиностроение, 1982. – 171 с.

3. Кудрявцев, П.И. Развитие усталостных трещин в сталях в связи с поверхностным наклёпом [Текст] / П.И. Кудрявцев, Т.И. Морозова // Исследования по упрочнению деталей машин. М.: Машиностроение. – 1972. – С. 194-200.

4. Кудрявцев, П.И. Некоторые особенности строения трещин усталости в низкоуглеродистой стали [Текст] / П.И. Кудрявцев // Повышение прочности и долговечности деталей машин. Кн. ЦНИИТМАШ, М.: Машиностроение. – 1969. – №110. – С. 105-113.

5. Сазанов, В.П. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании [Текст] / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов, Ю.С. Ларионова // Вестник СГАУ. – 2011. – №3(27). – Ч. 3. – С. 171-174.

6. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок [Текст]/ С.И. Иванов // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 53. – С. 32-42.

7. Трощенко, В.Т. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении [Текст] / В.Т. Трощенко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 256 с.