

*Сургутанов Н.А., Сургутанова Ю.Н., Денискина Е.А.,  
Михалкина С.А., Вязовик В.С.*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ГЛУБИНЫ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В УПРОЧЁННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЯХ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ**

В деталях, подверженных циклическому нагружению, в процессе эксплуатации накапливаются дефекты, которые приводят к образованию трещин и последующему нарушению их работоспособности. Необходимо анализировать рост трещины и не допускать достижения ею критического размера, при котором возможно разрушение конструкции. Для определения критической глубины трещины используется такая характеристика повреждённой нагруженной конструкции, как коэффициент интенсивности напряжений (КИН) [1].

Для реальной конструкции определение КИН – довольно трудоёмкая задача. КИН является величиной, непрерывно изменяющейся в процессе роста трещины. Он зависит от множества параметров, таких как длина трещины, взаимное расположение трещин, геометрия рассматриваемой детали, удалённость трещины от края и др.

В работе [2] КИН  $K_I$  (индекс I обозначает тип разрушения – отрыв) определялся при помощи МКЭ-пакета ANSYS. Были исследованы изменения КИН в плоских и цилиндрических деталях с концентраторами и в гладких образцах при различных размерах поперечного сечения и взаимосвязь максимального значения КИН от

размера наименьшего сечения детали с концентратором напряжений.

Решалась статическая упругая задача, при этом для плоских деталей напряжённое состояние принималось плоским, для цилиндрических деталей – осесимметричным. Материал считался изотропным со следующими механическими характеристиками: модуль продольной упругости –  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент поперечной деформации –  $\mu = 0,33$ .

При решении задачи в силу симметрии детали и напряжённого состояния для уменьшения вычислительных затрат моделировалась не вся деталь, а лишь её четверть. На рис.1 показана четверть пластины с полукруглым надрезом, где  $L$  – длина детали,  $B$  – ширина,  $h$  – ширина в наименьшем сечении,  $R$  – радиус полукруглого надреза,  $t$  – глубина трещины.

Четверть цилиндрической детали представлена на рис. 2, где  $L$  – длина детали,  $D$  – диаметр,  $d$  – диаметр в наименьшем сечении,  $R$  – радиус полукруглого надреза,  $t$  – глубина трещины.

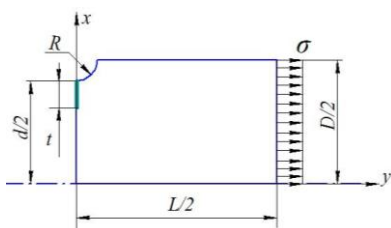


Рис. 1. Четверть плоской детали с надрезом

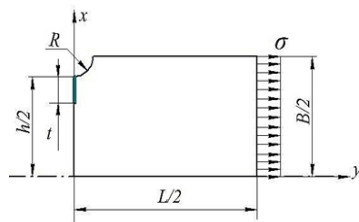


Рис. 2. Четверть цилиндрической детали с надрезом

По результатам исследования изменения КИН с увеличением глубины трещины  $t$  в пластинах и цилиндрических деталях с концентраторами и в гладких образцах для различных размеров поперечного сечения построены графики, приведённые на рис. 3–5.

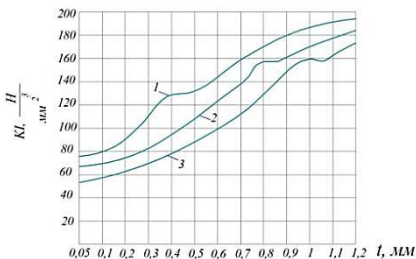


Рис. 3. Изменение КИН при увеличении глубины трещины  $t$  в плоских деталях с надрезом полукруглого профиля шириной: 1 –  $B = 20$  мм; 2 –  $B = 40$  мм; 3 –  $B = 50$  мм

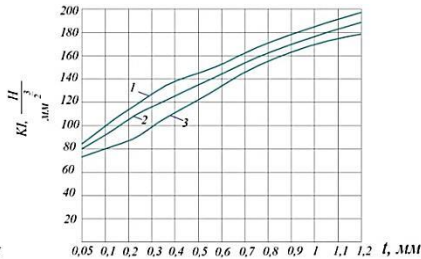


Рис. 4. Изменение КИН при увеличении глубины трещины  $t$  в плоских деталях шириной: 1 –  $B = 20$  мм; 2 –  $B = 40$  мм; 3 –  $B = 50$  мм

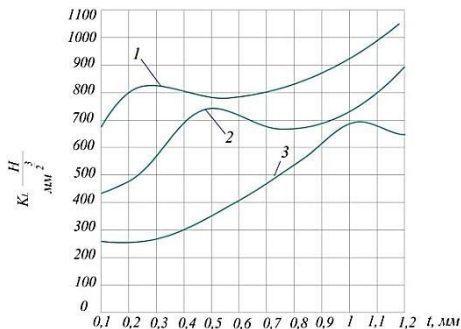


Рис. 5. Изменение КИН при увеличении глубины трещины  $t$  в цилиндрических деталях с надрезом полукруглого профиля: 1 –  $D = 10$  мм; 2 –  $D = 25$  мм; 3 –  $D = 50$  мм

Экспериментально установлено, что величина критической глубины нераспространяющейся трещины усталости  $t_{кр}$  определяется только размерами поперечного сечения детали и не зависит от вида надреза, материала и вида внешней нагрузки. Зависимость  $t_{кр}$

от наименьшего диаметра цилиндрической детали  $d$  описывалась эмпирической линейной функцией

$$t_{кр} = 0,0216d . \quad (1)$$

На рис. 6 представлена фотография излома упрочнённого пневмодробеструйной обработкой образца из стали 20 с параметрами  $D = 10$  мм,  $d = 9$  мм с круговым надрезом полукруглого профиля радиуса  $R = 0,5$  мм.

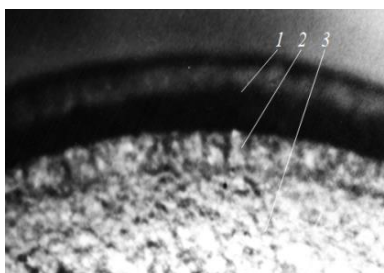


Рис. 6. Фрагмент излома упрочнённого дробью детали с  $D = 10$  мм,  $d = 9$  мм,  $R = 0,5$  мм из стали 20: 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

Для упрочнённых цилиндрических деталей с надрезами, для которых глубина  $t_{кр}$  была определена экспериментально, в данной работе задача определения глубины  $t_{кр}$  была решена численным методом в среде программного комплекса ANSYS. В конечно-элементную модель цилиндрической детали были введены остаточные напряжения с помощью метода термоупругости [3].

В качестве порогового коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K_{th}$  для упрочнённой детали принимался КИН, соответствующий начальной глубине структурного дефекта  $t_0 = 0,05$  мм. Задавалась нагрузка, равная пределу выносливости для упрочнённых деталей.

На рис. 7 представлены графики изменения КИН в зависимости от глубины трещины для случаев без упрочнения и с упрочнением детали при  $D = 10$  мм,  $d = 9$  мм и  $R = 0,5$  мм.

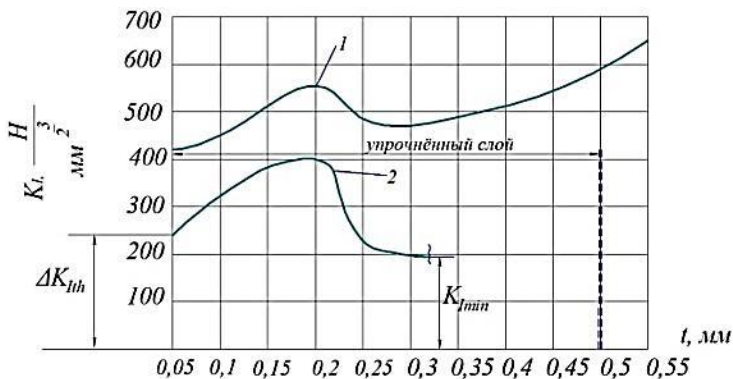


Рис. 7. Изменение  $K_I(t)$  в деталях с

$D = 10$  мм,  $d = 9$  мм,  $R = 0,5$  мм: 1 – без упрочнения; 2 – с упрочнением

Резкое возрастание и последующее резкое падение КИН в окрестности  $t_{кр}$  свидетельствует о том, что трещина в детали, в поверхностном слое которой действуют сжимающие остаточные напряжения, достигнув глубины  $t_{кр}$ , остановится и станет нераспространяющейся.

Полученные результаты расчёта соответствуют экспериментальным данным по величине глубины нераспространяющейся трещины усталости  $t_{кр}$ , определяемой с помощью эмпирической зависимости (1).

### Вывод

Установлено, что в упрочнённых деталях, подверженных циклическому нагружению, падение КИН  $K_I$  ниже величины порогового значения  $\Delta K_{th}$  наблюдается при глубине трещины усталости, равной  $t_{кр}$ , что означает остановку в развитии трещины за счёт влияния сжимающих остаточных напряжений.

### *Библиографический список*

1. Трощенко, В. Т. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении / В.Т. Трощенко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 253 с.

2. Сургутанов, Н.А. Исследование влияния глубины трещины на коэффициент интенсивности напряжений в надрезанных и гладких пластинах / Н.А. Сургутанов // Вестник Самарского Университета. – 2017. – Т. 16. – №1. – С. 176–185.

3. Вакулюк, В.С. Применение метода термоупругости при конечно-элементном моделировании остаточного напряжённого состояния в поверхностно упрочнённых деталях / В.С. Вакулюк, В.П. Сазанов, В.К. Шадрин, Н.Н. Микушев, А.С. Злобин // Известия СНЦ РАН. – 2014. – Т.16. – № 4. –С.168 -174.

*УДК 621.787:539.319*

*Злобин А.С., Сургутанов Н.А., Зотов Е.В.,  
Матвеева К.Ф., Федоров Д.Г.*

### **ВЫЧИСЛЕНИЕ КИН В ЗОНЕ ФРОНТА КОЛЬЦЕВЫХ ТРЕЩИН С УЧЁТОМ СРЕДНЕИНТЕГРАЛЬНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**

На сегодняшний день линейная механика разрушения остаётся одной из основных методологий определения характеристик сопротивления усталости деталей авиационной техники. При этом в таких деталях практически всегда присутствуют остаточные напряжения, вызванные конструктивными, технологическими и эксплуатационными факторами, оказывающими существенное влияние на усталостную прочность. Особенно это влияние проявляется в эле-