

циклическом нагружении на положительном полупериоде был определён пороговый КИН  $\Delta K_{th}$ , соответствующий начальной глубине структурного дефекта  $t_0 = 0,05$  мм.

На рис. 4 представлены графики изменения КИН в зависимости от глубины трещины для случаев без упрочнения и с упрочнением детали с  $D = 10$  мм,  $d = 9$  мм и  $R = 0,5$  мм.

**Вывод.** По результатам исследования было получено значение размаха порогового КИН  $\Delta K_{th} = 247 \frac{H}{\text{мм}^2}$  в упрочнённой цилиндрической детали с концентратором напряжений.

### Библиографический список

1. Kassim, S. Modeling of fatigue crack growth rate in ore-strained 7475-T7351 aluminium alloys / S. Kassim [et al.] // Materials Science and Engineering. – 2008. – Vol. A486. – P. 585–595.

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

3. Сургутанов, Н.А. Моделирование и определение закономерностей развития трещины усталости в поверхностном слое упрочнённых деталей: дисс. канд. техн. наук: 01.02.066: защищена 13.12.2019: утв. 21.10.2020/Сургутанов Николай Андреевич. – С., 2019. – 128 с. – 9 19-5/1700.

УДК 621.787:4

*Сургутанов Н.А., Сургутанова Ю.Н., Матвеева К.Ф., Латыпова А.Р.*

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ГЛУБИНЫ НЕРАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ ТРЕЩИНЫ УСТАЛОСТИ В УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЯХ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

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 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.

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

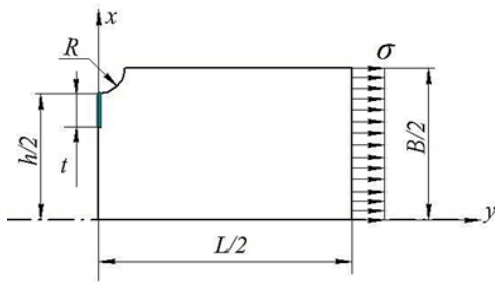


Рис. 1. Четверть плоской детали с надрезом

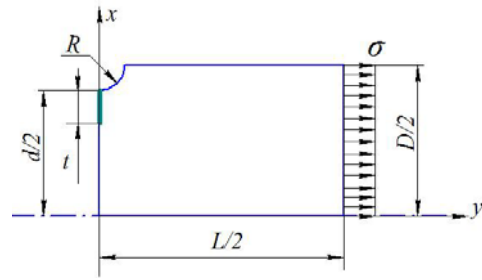


Рис. 2. Четверть цилиндрической детали с надрезом

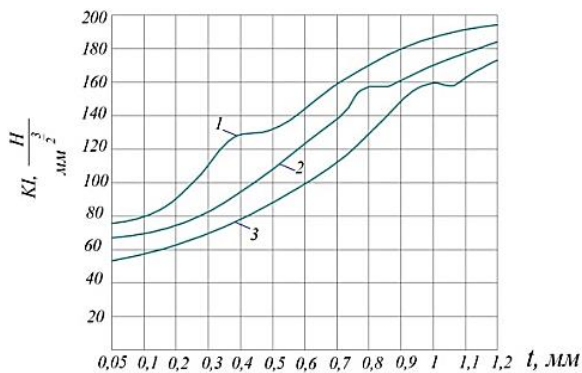


Рис. 3. Изменение КИН при увеличении глубины трещины  $t$  в плоских деталях с надрезом полукруглого профиля шириной: 1 –  $B = 20$  мм; 2 –  $B = 40$  мм; 3 –  $B = 50$  мм

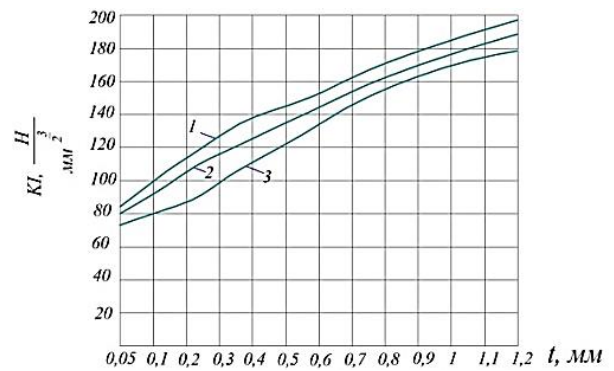


Рис. 4. Изменение КИН при увеличении глубины трещины  $t$  в плоских деталях шириной: 1 –  $B = 20$  мм; 2 –  $B = 40$  мм; 3 –  $B = 50$  мм

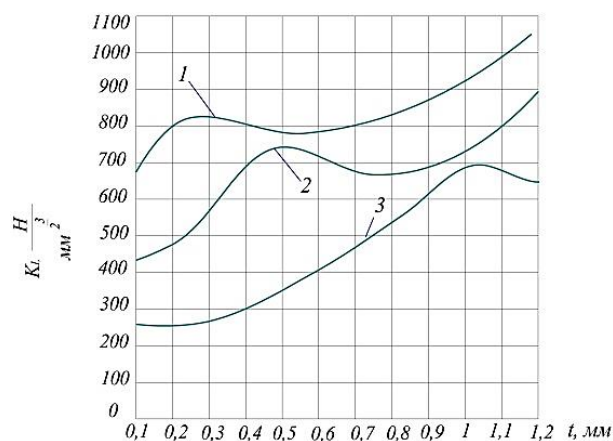


Рис. 5. Изменение КИН при увеличении глубины трещины  $t$  в цилиндрических деталях с надрезом полукруглого профиля: 1 –  $D = 10$  мм; 2 –  $D = 25$  мм; 3 –  $D = 50$  мм

На кафедре сопротивления материалов Самарского университета ранее было экспериментально установлено, что величина критической глубины нераспространяющейся трещины усталости  $t_{кр}$  определяется только размерами поперечно-

го 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.

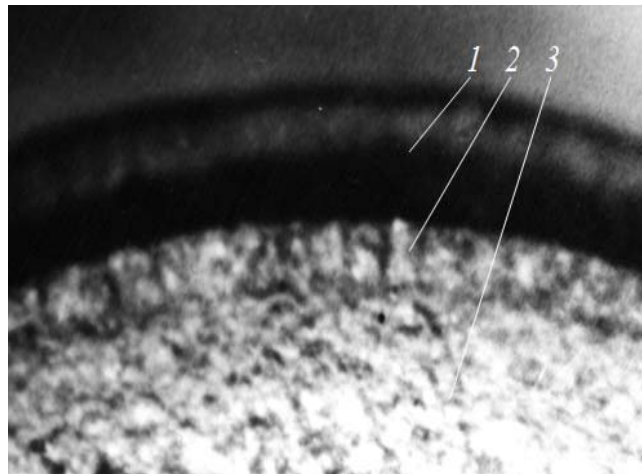


Рис.6. Фрагмент излома упрочнённого дробью детали с  $D = 10$  мм,  $d = 9$  мм с  $R = 0,5$  мм из стали 20: 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

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,  $d =$  мм и  $R = 0,5$  мм.

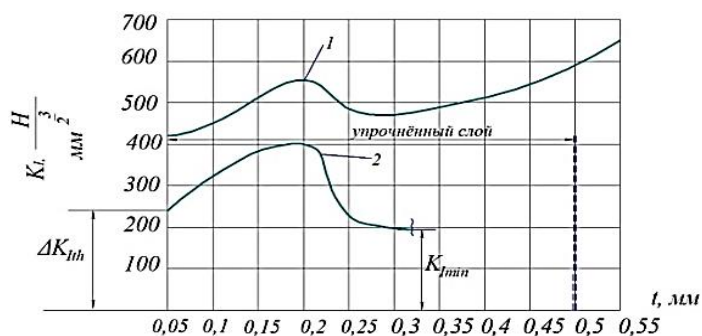


Рис. 7 – Изменение  $K_I(t)$  в деталях с  $D = 10$  мм,  $d = 9$  мм,  $R = 0,5$  мм:  
1 – без упрочнения; 2 – с упрочнением

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 КИН  $\Delta K_{th}$  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. – Т. 16. – №1. – Самара, 2017. – С. 176–185.
3. Вакулук, В.С. Применение метода термоупругости при конечно-элементом моделировании остаточного напряжённого состояния в поверхностно упрочнённых деталях / В.С. Вакулук, В.П. Сазанов, В.К. Шадрин, Н.Н. Микушев, А.С. Злобин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, Т.16, №4. – Самара: Изд-во СГАУ, 2014. – С.168–174.