

Сазанов В.П., Вакулюк В.С., Пилипив О.М., Письмаров А.В., Курсова И.Ю.

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ
УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ**

Проведённые эксперименты показали, что прогнозирование приращения предела выносливости упрочнённых деталей можно проводить по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [1] с помощью формулы:

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} |\sigma_{ост}|, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma_{-1}$ – приращение предела выносливости за счёт поверхностного упрочнения; $\bar{\psi}_{\sigma}$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$;

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi; \quad (2)$$

$\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали (образца) с концентратором по толщине поверхностного слоя a ; $\xi = a/t_{кр}$ – расстояние от поверхности опасного сечения детали (образца) до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в упрочнённой детали (образце) с концентратором напряжений при работе на пределе выносливости.

Для расчёта $\Delta\sigma_{-1}$, кроме остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, необходимо знать критическую глубину $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости и коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ влияния остаточных напряжений на предел выносливости.

Анализ результатов измерения $t_{кр}$ показал, что её величина определяется только размерами поперечного сечения детали. Однако, с позиции точности прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей, достаточно проблемным остаётся вопрос определения коэффициента влияния $\bar{\psi}_{\sigma}$, так как справочная информация об их значениях имеется лишь для ограниченного типа концентраторов и материалов. Поэтому весьма

перспективным методом прогнозирования является использование конечно-элементного моделирования развития усталостной трещины с использованием современных расчётных комплексов. Данный метод позволяет на одной модели учесть влияние всех факторов одновременно.

Основным параметром, обобщающим условия нагружения материала детали при вершине трещины, является коэффициент интенсивности напряжений K (КИН), зависящий одновременно от уровня нагружения и глубины трещины. Перепад (размах) этого коэффициента $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ определяет скорость роста усталостной трещины согласно уравнению, предложенному Пэрисом [2]:

$$dt/dN = C(\Delta K)^n, \quad (3)$$

где t – глубина 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.

Экспериментально доказано [2], что существует минимальное значение K , ниже которого рост трещины невозможен. Данное значение, обозначаемое через K_{th} , есть пороговый коэффициент интенсивности напряжений, ниже которого роста усталостной трещины не происходит.

В данном исследовании были выполнены расчёты коэффициента интенсивности напряжений K_I для цилиндрических образцов диаметром $d = 10$ мм с концентратором в виде полукруглого надреза радиусом $R = 0,3$ мм. Рассматривались образцы с упрочнением поверхности и без упрочнения из различных материалов. В среде программного продукта ANSYS был проведён расчёт K_I при следующих условиях:

- решалась статическая упругая задача;
- материал образца принимался изотропным;
- моделирование остаточного напряжённо-деформированного состояния выполнено методом термоупругости [3] с использованием расчётно-экспериментальной зависимости осевых остаточных напряжений σ_z по толщине упрочнённого слоя a [1].

На конечно-элементной модели образца задавалась распределённая нагрузка, соответствующая изгибающему моменту, который создаёт в наименьшем сечении максимальные растягивающие напряжения, соответствующие пределам выносливости σ_{-1} в деталях с упрочнением поверхности и без упрочнения, полученным при испытаниях [1]. Изменение коэффициента интенсивности напряжений K_I при увеличении

глубины трещины t для образцов с упрочнением поверхности и без упрочнения показано на рис. 1-4 для некоторых материалов.

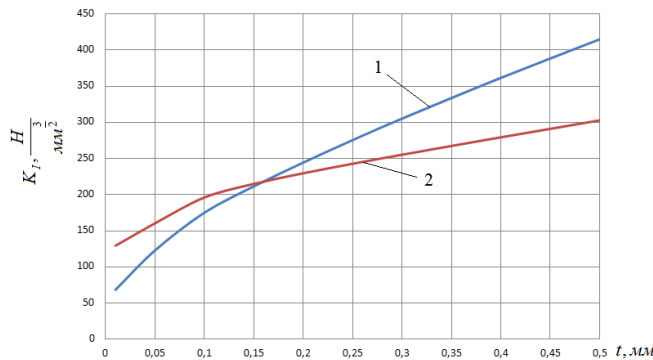


Рис. 1. Изменение коэффициента интенсивности напряжений K_I при увеличении глубины трещины t для образцов из стали 40:
1 – поверхность упрочнена,
2 – поверхность без упрочнения

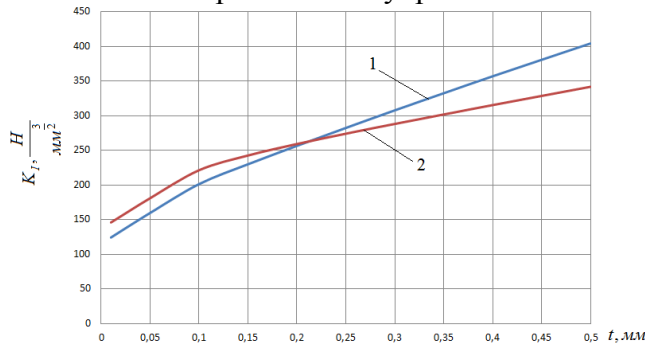


Рис. 3. Изменение коэффициента интенсивности напряжений K_I при увеличении глубины трещины t для образцов из стали 12X18H10T:
1 – поверхность упрочнена,
2 – поверхность без упрочнения

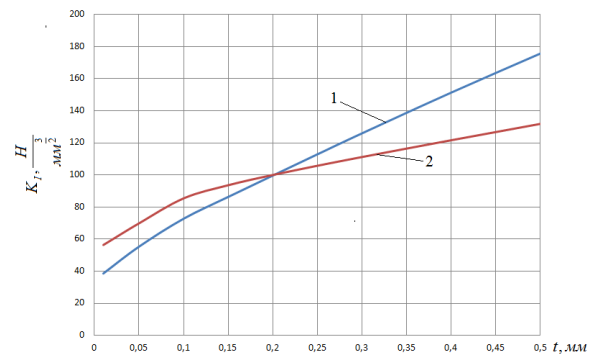


Рис. 2. Изменение коэффициента интенсивности напряжений K_I при увеличении глубины трещины t для образцов из сплава В93:
1 – поверхность упрочнена,
2 – поверхность без упрочнения

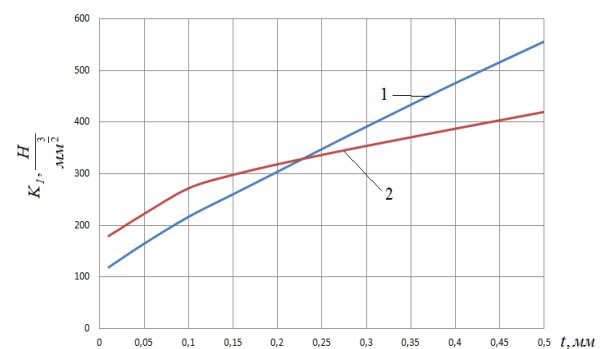


Рис. 4. Изменение коэффициента интенсивности напряжений K_I при увеличении глубины трещины t для образцов из сплава ЭИ437Б:
1 – поверхность упрочнена,
2 – поверхность без упрочнения

Использование при прогнозировании предела выносливости метода конечно-элементного моделирования развития усталостной трещины требует установления глубины трещины, на котором необходимо выполнять сравнение K_I неупрочнённой и упрочнённой детали. При этом следует учитывать, что данная величина K_I неупрочнённой детали принимается за пороговое значение K_{th} . Например, в ряде отраслей промышленности в расчётах за начальную глубину трещины принята $t = 0,05$ мм. Расчёты предела выносливости для цилиндрических образцов из рассмотренных материалов при размере трещины 0,05 мм дали погрешность в пределах 5-10%.

Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
2. Трощенко, В.Т. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении [Текст] / В.Т. Трощенко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 256 с.
3. Сазанов, В.П. Определение первоначальных деформаций в упрочнённом слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса PATRAN/NASTRAN [Текст] / В.П. Сазанов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк, В.Ф. Павлов // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19. – №2 (68). – С. 35-40.