

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

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЬНОЙ ДЕТАЛИ НА СКОРОСТЬ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ

При испытаниях на усталость, а также при анализе эксплуатационных разрушений деталей машин, работавших при переменных нагрузках, были отмечены случаи, когда возникшая усталостная трещина останавливалась в своём развитии [1-3]. Это явление, характерное для деталей или образцов с концентраторами напряжений (галтели, бурты, надрезы, неподвижные посадки, резьба и другие виды), получило название нераспространяющихся трещин усталости. Наиболее часто такие случаи были выявлены в деталях с концентраторами напряжений и подвергнутых различным видам поверхностного упрочнения. В связи с этим принято различать пределы выносливости образцов и деталей по трещинообразованию  $\sigma_{-1т}$  и по разрушению  $\sigma_{-1р}$ . 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 в несколько раз. Поэтому установление закономерностей развития и остановки трещины является актуальной задачей.

Известно, что скорость роста усталостной трещины определяется размером коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  согласно уравнению Пэрриса [4]. В исследовании рассматривалась трещина типа «разрыв», когда перемещения берегов трещины перпендикулярны её плоскости (тип I). В среде программного продукта ANSYS был проведён расчёт  $K_I$  при следующих условиях: решалась статическая упругая задача, материал образца принимался изотропным с механическими характеристиками конструкционных сталей. В случае решения задач с упрочнением поверхности моделирование остаточного напряжённого состояния выполнялось методом термоупругости [5] с использованием расчётно-экспериментальных зависимостей осевых остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя [6].

В проведённом исследовании в зависимости от глубины трещины  $t$  изучено изменение коэффициента интенсивности напряжений в цилиндрических образцах

диаметрами  $d = 10$  мм,  $d = 15$  мм,  $d = 25$  мм,  $d = 50$  мм без концентратора и с концентратором в виде полукруглого надреза различного радиуса  $R$ .

На первом этапе было изучено влияние концентратора на коэффициент интенсивности напряжений в зависимости от глубины трещины  $t$ . Установлено, что для образцов рассматриваемых типоразмеров с концентратором напряжений на начальном участке увеличения размера трещины наблюдаются два экстремума коэффициента интенсивности напряжений – максимальное и минимальное значение. Напротив, в зависимостях для образцов без концентратора напряжений при увеличении размера трещины происходит плавное возрастание  $K_I$ . При увеличении глубины трещины зависимость для образцов с концентратором напряжений стремится к зависимости для детали без концентратора. В качестве примера на рис. 1 приведены результаты расчётов зависимостей  $K_I$  для образцов диаметром  $d = 25$  мм с надрезом радиусом  $R = 0,3$  мм и без надреза.

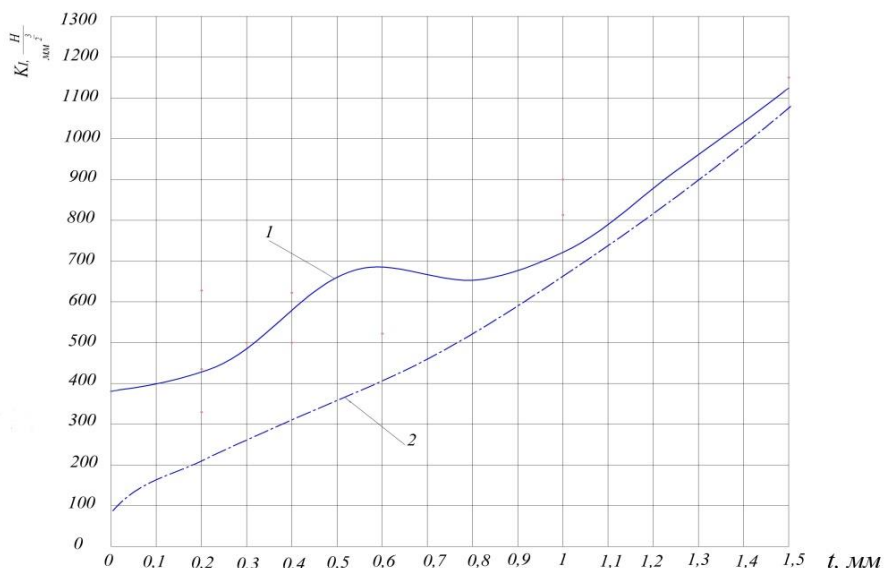


Рис. 1. Изменение коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  при увеличении глубины трещины в образцах диаметром  $d = 25$  мм:  
1 – с надрезом  $R = 0,3$  мм; 2 – без надреза

Максимум коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  для всех исследуемых образцов с надрезом находится на глубине трещины, равной примерно  $0,02D$ , где  $D$  – диаметр в наименьшем сечении образца с концентратором напряжений. При увеличении резкости концентратора разница (размах) между максимальным и минимальным значениями возрастает.

На втором этапе было изучено влияние на коэффициент интенсивности напряжений сжимающих остаточных напряжений, создаваемых в результате

технологических операций упрочнения поверхности. Сжимающие остаточные напряжения в упрочнённом слое образцов приводят к падению коэффициента интенсивности напряжений, так как они снижают общее поле растягивающих напряжений вокруг трещины. Положение экстремальных значений для образцов с надрезом остаётся таким же, как и для случаев без упрочнения поверхности. Наличие сжимающих остаточных напряжений также увеличивает разницу (размах) между экстремальными значениями коэффициента интенсивности напряжений. На рис. 2 приведены результаты расчётов зависимостей  $K_I$  для гладких образцов диаметрами  $d = 25$  мм и образцов с надрезами радиусом  $R = 1$  мм с упрочнением и без упрочнения поверхности.

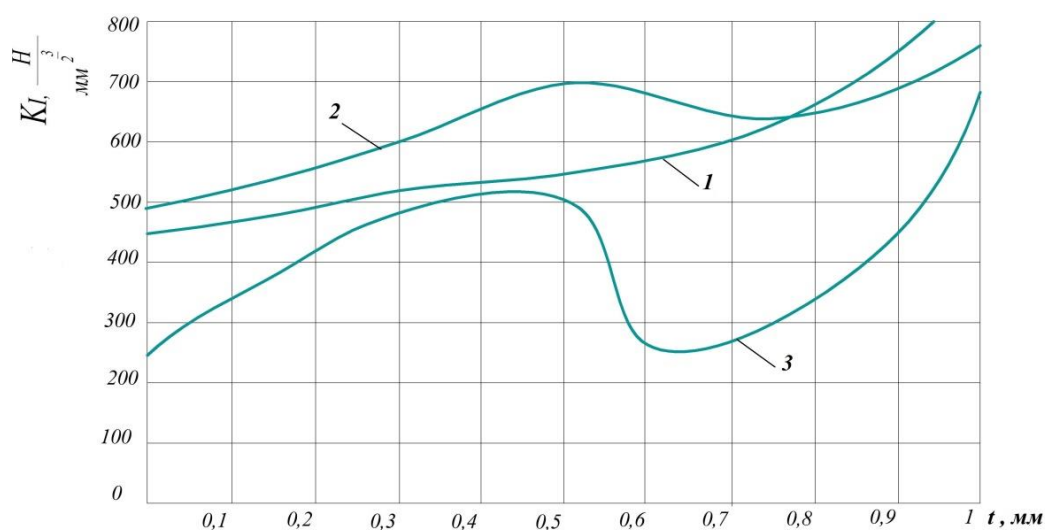


Рис. 2. Изменение коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  при увеличении глубины трещины  $t$  в образцах диаметром  $d = 25$  мм:  
 1 – без надреза; 2 – с надрезом  $R = 1$  мм без упрочнения;  
 3 – с надрезом  $R = 1$  мм и упрочнением поверхности

Обобщая результаты расчётов, отметим следующее. Напряжённое состояние вокруг трещины и соответственно значение коэффициента интенсивности напряжений для образцов с надрезом и с упрочнением поверхности определяется влиянием четырёх факторов:

- концентрацией растягивающих напряжений в концентраторе;
- концентрацией растягивающих напряжений при вершине трещины;
- концентрацией сжимающих остаточных напряжений в концентраторе;
- концентрацией сжимающих остаточных напряжений при вершине трещины.

Все четыре фактора действуют на глубине трещины  $t$  от 0 до  $0,02D$ , но на этом интервале заканчивается влияние надреза и в дальнейшем всё определяется концентрацией напряжений при вершине трещины. При этом влияние сжимающих

остаточных напряжений по-прежнему остаётся высоким, что приводит к достаточно резкому падению коэффициента интенсивности напряжений. Остановка роста трещины возможна в том случае, когда минимальное значение КИН при развитии будет меньше его критического значения  $K_{th}$ . Судя по характеру зависимостей рассмотренных типоразмеров образцов такое возможно только в деталях с концентратором и упрочнённой поверхностью. Именно это подтверждается и результатами испытаний на усталость [6-8].

### Библиографический список

1. Кудрявцев, П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины [Текст] / П.И. Кудрявцев. – М.: Машиностроение, 1982. – 171 с.
2. 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.
3. 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.
4. Трощенко, В.Т. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении [Текст] / В.Т. Трощенко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 256 с.
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. 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.
7. Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором.
8. Сообщение I. Сплошные детали [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 8. – С. 22-25.
9. Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 12. – С. 37-40.