

Сазанов В.П., Сургутанов Н.А., Прохоров А.А., Калакова Е.С., Яхин Р.А.

**О ВЛИЯНИИ РАДИАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ  
ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА КОЭФФИЦИЕНТ  
ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ**

В проведённом исследовании изучалась зависимость коэффициента интенсивности напряжений (КИН) от глубины трещины в упрочнённых цилиндрических образцах различного диаметра с концентраторами напряжений. Целью исследования являлось изучение влияния на КИН первоначальных радиальных деформаций в зависимости от их соотношения с осевыми и окружными компонентами. Расчёты были выполнены с использованием программного комплекса конечно-элементного анализа ANSYS для образцов с концентраторами напряжений в виде полукруглого надреза. На основании результатов исследования установлено, что первоначальные радиальные деформации существенного влияния на КИН не оказывают.

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

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

где  $l$  – 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.

Уравнение (1) является одним из основных при выполнении практических расчётов в линейной механике разрушения.

Как показывают результаты испытаний на усталость, упрочнение поверхности деталей различными методами значительно повышает их предел выносливости при сопротивлении переменным напряжениям. Известными механическими методами [1,2] в цилиндрических деталях можно определить осевые  $\sigma_z$  и окружные  $\sigma_\theta$  остаточные напряжения по толщине упрочнённого слоя. Радиальные остаточные напряжения  $\sigma_r$  можно определить только лишь аналитическим или численным способом, исходя из определённых соотношений между первоначальными деформациями в зависимости от вида упрочняющей обработки [2,3]. Из выше изложенного следует, что оценка влияния

первоначальных радиальных деформаций на распространение усталостной трещины представляет интерес.

В данном исследовании для задания условий упрочнения был использован метод первоначальных деформаций, а моделирование остаточного напряжённо-деформированного состояния выполнено методом термоупругости [4-8]. Сущность метода термоупругости заключается в том, что на основании аналогии задач температурных и первоначальных деформаций последние заменяются соответствующим неравномерным температурным полем по толщине упрочнённого слоя детали. Определение параметров температурного поля и соответствующих им первоначальных деформаций выполняется методом последовательных итераций, исходя из распределений остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя, полученных экспериментально одним из механических способов. Критерием завершения подбора первоначальных деформаций является полная аналогия экспериментальных и расчётных эпюр остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя.

Расчёты коэффициентов интенсивности напряжений  $K_I$  в зависимости от глубины трещины выполнены с применением расчётного комплекса ANSYS. Для сравнения влияния первоначальных радиальных деформаций на коэффициент интенсивности напряжений рассмотрены два варианта их соотношения с осевыми и окружными первоначальными деформациями после упрочнения поверхности.

Вариант 1 принят из условия всестороннего объёмного расширения [3]:

$$\varepsilon_{or} = \varepsilon_{o\theta} = \varepsilon_{oz} = \varepsilon_o.$$

Вариант 2 принят из условия радиального приложения нагрузки, вызывающей поверхностное пластическое деформирование в материале, и неизменности начального объёма (несжимаемости) [3]:

$$\varepsilon_{o\theta} = \varepsilon_{oz} = \varepsilon_o, \quad \varepsilon_{or} = -2\varepsilon_o.$$

Приведённые выше параметры  $\varepsilon_{or}$ ,  $\varepsilon_{o\theta}$ ,  $\varepsilon_{oz}$  – соответственно радиальные, окружные и осевые первоначальные деформации;  $\varepsilon_o$  – параметр первоначальной деформации.

В расчётах были приняты следующие численные значения параметров: модуль продольной упругости  $E = 200000$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ . Первоначальная деформация задана по линейному закону распределения:  $\varepsilon_o = 0,004$  на поверхности цилиндрического образца и  $\varepsilon_o = 0$  на нижней границе упрочнённого слоя, толщина которого составляет 0,4 мм. Данные параметры по максимальным значениям примерно

соответствуют по своему уровню при упрочнении деталей из сталей 45, 40Х методами дробеструйной обработки.

Результаты расчёта зависимостей коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  от глубины трещины  $t$  упрочнённого цилиндрического образца  $D = 10$  мм для вариантов 1, 2 первоначальных деформаций приведены на рис. 1.

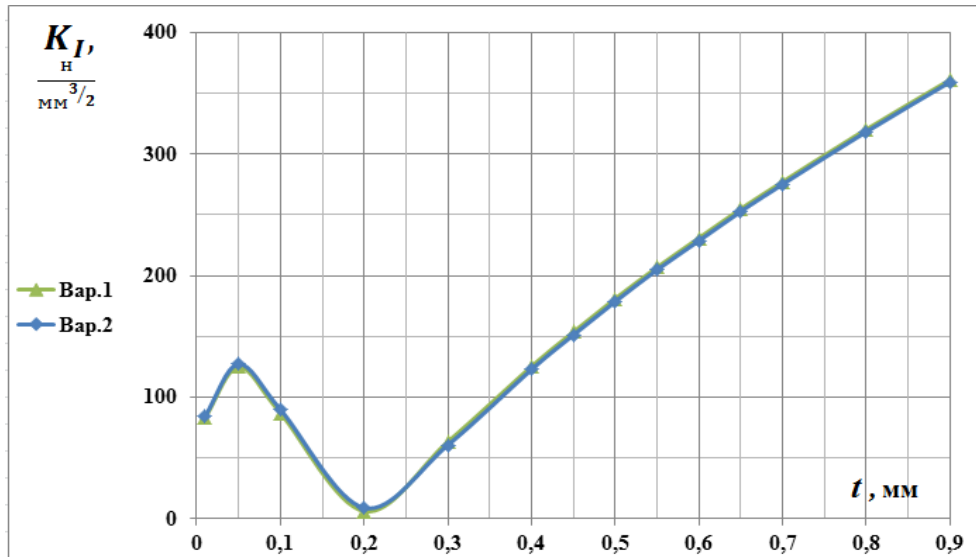


Рис. 1. Изменение коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  в зависимости от глубины трещины  $t$  упрочнённого цилиндрического образца  $D = 10$  мм; первоначальные деформации заданы по вариантам 1 и 2

Рассмотренный в данном исследовании диапазон изменения первоначальных радиальных деформаций от  $\varepsilon_{or} = -2\varepsilon_o$  до  $\varepsilon_{or} = \varepsilon_o$  относительно первоначальной осевой деформации  $\varepsilon_{oz} = \varepsilon_o$  охватывает их соотношения практически для всех остальных видов поверхностного упрочнения деталей. Поэтому из вышеизложенного следует, что используемые в расчётах по прогнозированию предела выносливости варианты задания первоначальных радиальных деформаций не оказывают существенного влияния на закономерности изменения коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  от глубины трещины  $t$ , а также и на скорость развития трещины в упрочнённых цилиндрических образцах.

### Библиографический список

1. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок. Остаточные напряжения [Текст] / С.И. Иванов // Куйбышев: КуАИ. 1971. – Вып. 53. – С. 32-42.
2. 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.
3. Биргер, И.А. Остаточные напряжения [Текст] / И.А. Биргер. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
4. 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. Вакулук, В.Ф. Павлов // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19. – №2 (68). – С. 35-40.
5. Сазанов, В.П. Исследование распределения компонентов остаточного напряжённого состояния в области наименьшего сечения поверхностно упрочнённой детали с кольцевым надрезом методом конечно-элементного моделирования [Текст] / В.П. Сазанов // Вестник СГАУ. – 2012. – № 3(34). – С. 158-161.
6. Сазанов, В.П. Моделирование остаточного напряжённого состояния детали в условиях концентрации напряжений с использованием программного комплекса PATRAN / NASTRAN [Текст] / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, О.Ю. Семёнова, А.В. Иванова // Вестник СамГТУ. Сер.: Технич. науки. – 2012. – №1 (33). – С. 106-114.
7. Павлов, В.Ф. Влияние поверхностного упрочнения на предел выносливости цилиндрических деталей различного диаметра [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулук, В.П. Сазанов // Известия вузов. Авиационная техника. – 2014. – №3. – С. 324-326.
8. Тимошенко, С.П. Теория упругости [Текст] / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, 1979. – 341 с.