

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТ ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ В ОБЛАСТИ НАИМЕНЬШЕГО СЕЧЕ- НИЯ КОЛЬЦЕВОГО НАДРЕЗА ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ СПЛОШНОГО И ПОЛОГО СЕЧЕНИЙ

Сазанов В.П.

*Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика
С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), Самара*

Одним из важных вопросов механики остаточных напряжений является установление связи между остаточными напряжениями и сопротивлением деталей усталости. Особую значимость эта задача приобрела в связи с широким применением на практике различных методов поверхностного упрочнения, приводящих к существенному увеличению характеристик сопротивления усталости, особенно в условиях концентрации напряжений. В связи с вышеизложенным, при прогнозировании приращения предела выносливости, вызванного влиянием остаточных напряжений, актуальной задачей является выбор теории прочности и эквивалентного напряжения. Соответственно для решения такой задачи необходимо наличие методики расчёта распределения компонент остаточного напряжённого состояния в области опасного сечения концентратора, представляющего собой надрез определённой геометрической формы.

В данной работе рассматривается задача по определению распределения компонент остаточного напряжённого состояния в окрестности наименьшего сечения (дна) кольцевого надреза, а также их зависимости от геометрических параметров надреза для цилиндрических деталей. Данные детали представляют собой стандартные стальные образцы: один сплошного сечения диаметром $D = 10$ мм и два полого сечения с размерами наружного и внутреннего диаметров $D/d = 25/15$ мм и $D/d = 50/40$ мм.

При проведении расчётов и последующих исследований задача о влиянии закона распределения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя детали не ставилась, поэтому были приняты упрощённые условия:

1) поверхностный слой детали упрочнён на глубину $a = 0,5$ мм по линейному закону распределения осевых остаточных напряжений (максимальное значение на поверхности, минимальное на глубине $a = 0,5$ мм);

2) после упрочнения на деталь нанесён концентратор в виде кольцевого надреза глубиной h и радиусом R на его дне (рис. 1), в результате чего в окрестности концентратора происходит перераспределение остаточных напряжений.

Решение и исследование выполнено методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса NASTRAN/PATRAN, методические основы использования которого для подобных задач подробно рассмотрены в работе [1].

1. Результаты исследования для детали сплошного сечения диаметром $D = 10$ мм. Эскиз расчётной области детали сплошного сечения приведён на рис.1.

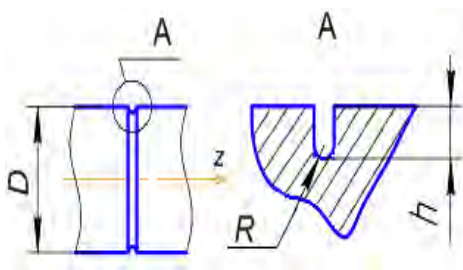


Рисунок 1 – Расчётная область детали сплошного сечения

Фрагмент сетки конечно-элементной модели в области опасного сечения приведён на рис. 2.

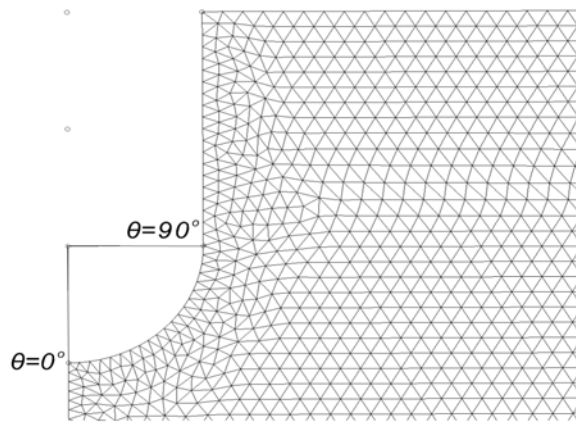


Рисунок 2 – Фрагмент сетки конечно-элементной модели в окрестности дна надреза

На рис. 3 для варианта расчёта $h = R = 0,05$ мм приведены графики зависимостей четырёх компонент остаточного напряжённого состояния вдоль полукруглой поверхности дна надреза по угловой координате в диапазоне от 0 градусов (точка наименьшего сечения) до 90 градусов (точка перехода линии окружности в прямую линию).

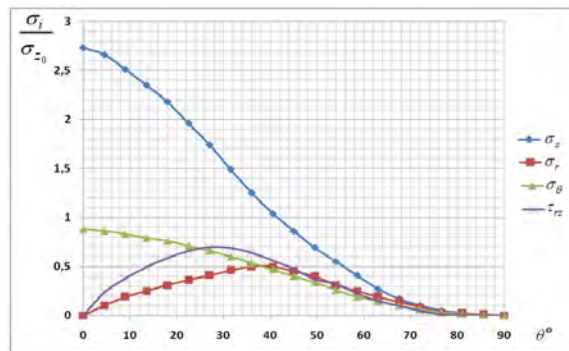


Рисунок 3 – Зависимости компонент остаточного напряжённого состояния вдоль поверхности полукруглого надреза для $h = R = 0,05$ мм

На рис. 4 и 5 приведены аналогичные графики для вариантов расчета $h = 0,108$ мм (промежуточное значение) и $h = 0,216$ мм (данная величина h соответствует глубине неразвивающейся трещины [2], [3]). На графиках рис. 3 – 5 напряжения приведены в относительных величинах к максимальным значениям осевых остаточных напряжений для гладкого образца детали без надреза.

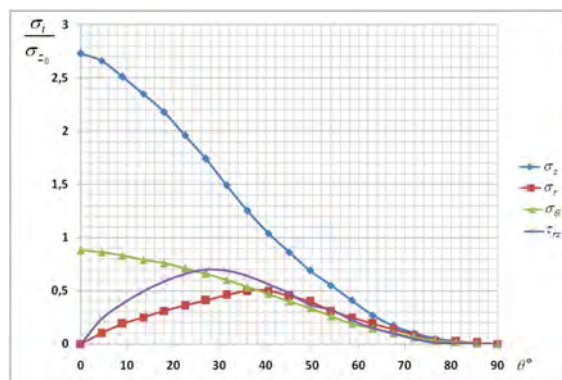


Рисунок 4 – Зависимости компонент остаточного напряжённого состояния вдоль поверхности полукруглого надреза для $h = 0,108$ мм

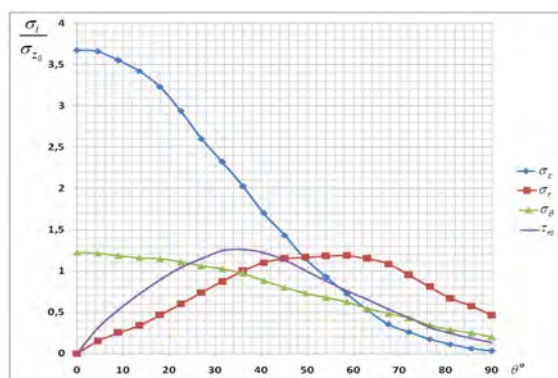


Рисунок 5 – Зависимости компонент остаточного напряжённого состояния вдоль поверхности полукруглого надреза для $h = 0,216$ мм

На рис. 3 – 5 приняты следующие обозначения компонент напряжённого состояния:

- осевое остаточное напряжение σ_z ;
- радиальное остаточное напряжение σ_r ;
- окружное остаточное напряжение σ_θ ;
- касательное остаточное напряжение τ_{rz} .

Из приведённых графиков на рис. 3 – 5 видно, что в наименьшем (опасном) сечении наибольшей по величине является компонента осевого остаточного напряжения и, следовательно, она будет оказывать наибольшее влияние на приращение предела выносливости, вызванное поверхностным пластическим упрочнением детали. Действительно, на практике при прогнозировании приращения предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей чаще всего применяется теория наибольших касательных напряжений, а в качестве эквивалентных напряжений используется компонента осевых остаточных напряжений. Компоненты радиального и касательного остаточных напряжений относительно друг друга имеют подобный характер зависимостей: при изменении угловой координаты θ от 0 до 90 градусов (рис. 2) сначала растут, а затем, достигнув максимума, падают. Причём в рассмотренных пределах глубины надреза точка максимального значения указанных компонент при возрастании параметра h смещается в сторону 90 градусов угловой координаты θ .

В связи с большим влиянием осевых остаточных напряжений на приращение предела выносливости проведено исследование их зависимости от геометрических параметров кольцевого надреза. Результаты расчёта осевых остаточных напряжений на дне надреза в зависимости от глубины h и радиусов $R = 0,1$ мм, $0,05$ мм и $0,025$ мм для детали диаметром $D = 10$ мм в виде графиков приведены на рис.6. Значения напряжений приведены в относительных величинах к максимальным осевым остаточным напряжениям на поверхности образца (детали) без надреза.

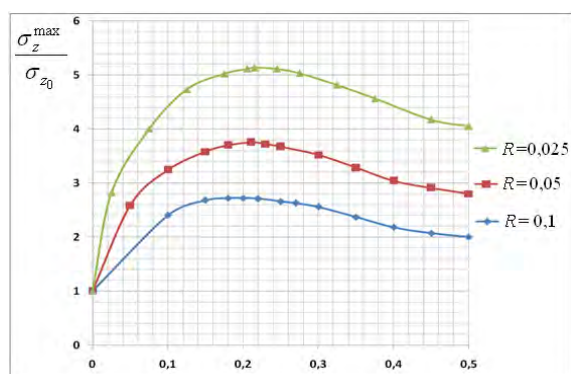


Рисунок 6 – Зависимости осевых σ_z остаточных напряжений на дне надреза от его глубины h и радиуса R для детали диаметром $D = 10$ мм

Из приведённых графиков видно, что при уменьшении радиуса надреза R значения осевых остаточных напряжений в наименьшем сечении возрастают. Для различных радиусов надреза зави-

симости указанных напряжений носят подобный характер: с увеличением глубины надреза h они сначала растут, а затем, достигнув максимума, падают, при этом градиенты возрастания напряжений по абсолютной величине значительно превосходят их значения на участке падения.

2. Результаты исследования для образцов полого сечения. На рис. 7 приведён эскиз расчётной области детали полого сечения.

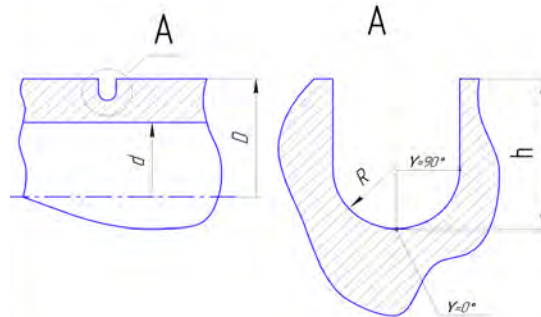


Рисунок 7 – Расчётная часть детали полого сечения

На рис. 8 приведены графики зависимостей компонент остаточного напряжённого состояния вдоль полукруглой поверхности дна кольцевого надреза по угловой координате γ (см. рис. 6) в диапазоне значений от 0 градусов (точка наименьшего сечения) до 90 градусов (точка перехода линии окружности в прямую линию) для детали с размерами $D/d = 25/15$ мм и варианта расчёта $h = R = 0,05$ мм.

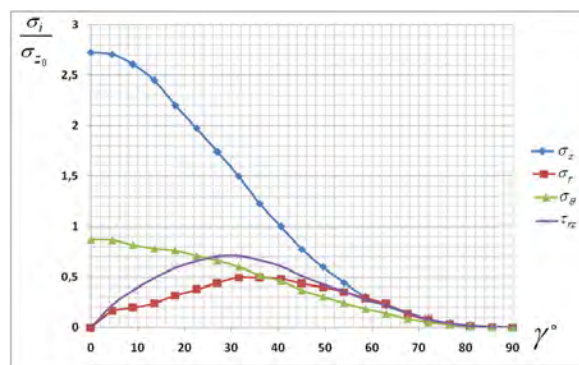


Рисунок 8 – Зависимости компонент остаточного напряжённого состояния вдоль поверхности полукруглого надреза для $h = R = 0,05$ мм ($D/d = 25/15$ мм)

На рис. 9 и 10 приведены аналогичные графики для вариантов расчёта $h = 0,235$ мм (промежуточное значение) и $h = 0,469$ мм (данная величина h соответствует глубине нераспространяющейся трещины [3], [4]). На рис. 8 – 10 компоненты остаточных напряжений приведены в относительных величинах к максимальным значениям осевых остаточных напряжений для гладкого образца детали без надреза.

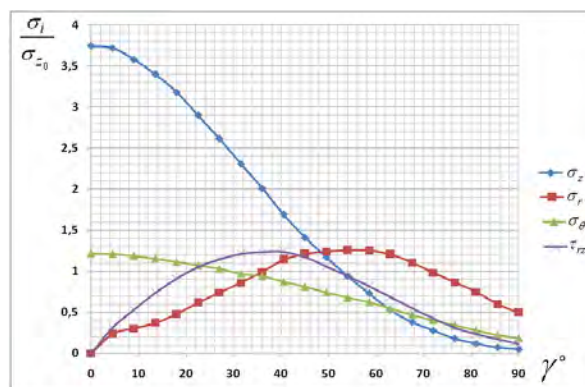


Рисунок 9 – Зависимости компонент остаточного напряжённого состояния вдоль поверхности полукруглого надреза для $h = 0,235$ мм ($D/d = 25/15$ мм)

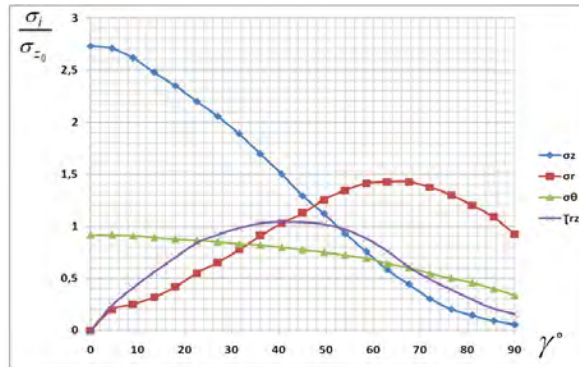


Рисунок 10 – Зависимости компонент остаточного напряжённого состояния вдоль поверхности полукруглого надреза для $h = 0,469$ мм ($D/d = 25/15$ мм)

На рис. 8 – 10 обозначения компонент напряжённого состояния приняты аналогично обозначениям для сплошного сечения.

Как и для детали сплошного сечения, рассмотренного выше, было проведено исследование влияния геометрических размеров кольцевого надреза R и h на величину осевых остаточных напряжений в наименьшем (опасном) сечении. Данные результаты для полых цилиндрических образцов (деталей) с размерами $D/d = 25/15$ мм, $D/d = 50/40$ мм и радиусов надреза $R = 0,05$ мм и $R = 0,1$ мм приведены на рис. 11 и 12. Значения напряжений также приведены в относительных величинах к максимальным осевым остаточным напряжениям на поверхности образца (детали) без надреза.

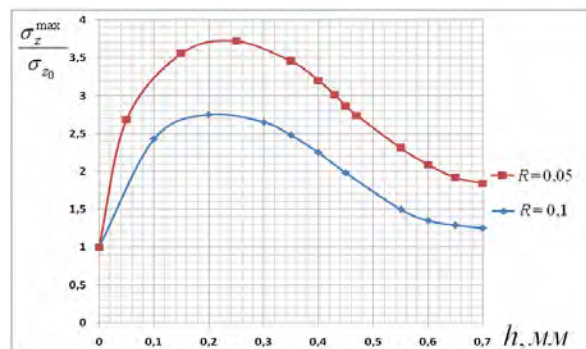


Рисунок 11 – Зависимости осевых остаточных напряжений на дне надреза от его глубины и радиуса для образца размером $D/d = 25/15$ мм

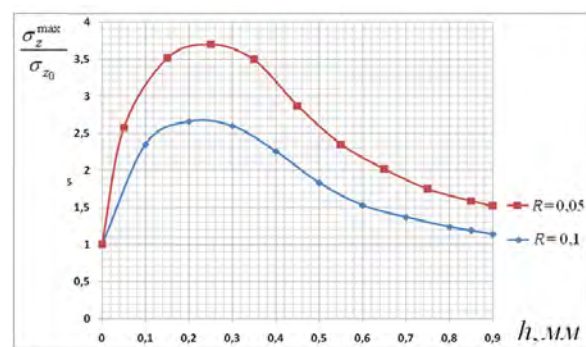


Рисунок 12 – Зависимости осевых остаточных напряжений на дне надреза от его глубины и радиуса для образца размером $D/d = 50/40$ мм

Анализ графиков на рис. 8 – 12 показывает, что установленные ранее закономерности для компонент остаточного напряжённого состояния образца (детали) сплошного сечения (рис. 3 – 6), приведённые в предыдущем разделе, полностью распространяются на аналогичные зависимости для детали полого сечения. Также и в этом случае компонента осевых остаточных напряжений является определяющей по своей величине по отношению к остальным составляющим напряжённого состояния.

Данные обстоятельства позволяют сделать весьма важное заключение об общем подходе при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей различного размера, а также распространить результаты испытаний на усталость цилиндрических образцов малого диаметра, на крупногабаритные детали с учётом масштабного фактора.

Выводы.

1. По результатам исследования закономерностей распределения компонент остаточных напряжений в области наименьшего сечения кольцевого надреза в цилиндрических деталях после нанесения концентратора на упрочнённую поверхность установлено, что компонента осевых остаточных напряжений имеет наибольшее значение и, следовательно, должна оказывать наибольшее влияние на приращение предела выносливости.

2. Предложенный метод исследования и расчёта перераспределения остаточных напряжений в области концентраторов любой геометрической формы позволяет найти главные напряжения в любой точке сечения упрочнённой цилиндрической детали и, следовательно, определить эквивалентные напряжения для выбранной теории прочности при прогнозировании приращения предела выносливости.

Резюме

Методом конечно-элементного моделирования для поверхностно упрочнённых цилиндрических деталей различного диаметра проведено исследование влияния радиуса и глубины надреза на значения осевых остаточных напряжений в наименьшем сечении.

Литература

1. Сазанов, В.П. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов, Ю.С. Ларионова // Вестник СГАУ. – Самара: СГАУ, 2011. – №3 (27). Часть 3. – С. 171-174.
2. Павлов, В.Ф. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям / В.Ф. Павлов, А.К. Столяров, В.С. Вакулюк, В.А. Кирпичёв // . – Самара: Издательство СНИЦ РАН, 2008. – 124 с.
3. Павлов, В.Ф. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.Б. Иванов. – Самара: Издательство СНИЦ РАН, 2008. – 64 с.
4. П.И.Кудрявцев. Нераспространяющиеся усталостные трещины // М.: Машиностроение, 1982. – 171с.

Summary

By FEM modeling the axial residual stresses distribution regularity of surface treatment cylindrical details of various diameters at infliction of different radius and depth notches is researched. It is shown that with diameter rising of treatment detail stratification depth of residual stresses maximum is moving deep.

Поступила в редакцию 13.10.2012