

УДК 621.787:539.319

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ
ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ
В ОБЛАСТИ НАИМЕНЬШЕГО СЕЧЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННОЙ ДЕТАЛИ С КОЛЬЦЕВЫМ НАДРЕЗОМ
МЕТОДОМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

© 2012 В. П. Сазанов

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

Методом конечно-элементного моделирования для поверхностно упрочнённой цилиндрической детали диаметром $D = 10$ мм проведены исследования распределения компонентов остаточного напряжённого состояния вдоль поверхности наименьшего сечения кольцевого надреза и зависимости осевых остаточных напряжений в наименьшем сечении от глубины и радиуса надреза.

Остаточные напряжения, поверхностное упрочнение, конечно-элементное моделирование, цилиндрическая деталь, компоненты остаточного напряжённого состояния, кольцевой надрез.

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.

Известным приёмом, когда невозможно подвергнуть поверхностному пластическому деформированию непосредственно концентратор напряжений, является упрочнение исходной гладкой детали. Затем на неё наносится сам концентратор. Такое упрочнение детали называется опережающим поверхностным пластическим деформированием (ОППД). При таком упрочнении наблюдается заметное повышение сопротивления усталости деталей даже в том случае, когда упрочнённый слой гладкой детали при изготовлении концентратора прорезается полностью. Это обусловлено перераспределением остаточных усилий гладкой упрочнённой детали и возникновением дополнительных сжимающих остаточных напряжений [1,2].

Поэтому при прогнозировании приращения предела выносливости упрочнённых деталей, вызванного положительным влиянием сжимающих остаточных напряжений, актуальной задачей является выбор теории прочности и, соответственно, эквивалентно-

го напряжения. Для решения такой задачи необходимо наличие методики расчёта распределения компонент остаточного напряжённого состояния в области опасного сечения детали с концентратором, который представляет собой надрез определённой геометрической формы.

Известные аналитические методы решения подобных задач имеют ограничение по сложности их постановки и не являются универсальным средством для исследования зависимостей остаточных напряжений от различных параметров. Наиболее универсальным в этих случаях является использование конечно-элементного моделирования с применением современных расчётных комплексов типа NASTRAN, ANSYS. Однако это требует определённых методических разработок в каждом конкретном случае. В частности, наиболее важным вопросом независимо от выбранного расчётного комплекса является выбор метода моделирования остаточных напряжений в упрочнённом слое детали, конечного элемента и его размера в месте концентратора.

В данной работе рассматривается задача исследования распределения компонентов остаточного напряжённого состояния в окрестности наименьшего сечения (дна) кольцевого надреза, а также их зависимости от геометрических параметров надреза для цилиндрической детали, представляющей собой стандартный образец из стали диаметром $D = 10$ мм (рис.1).

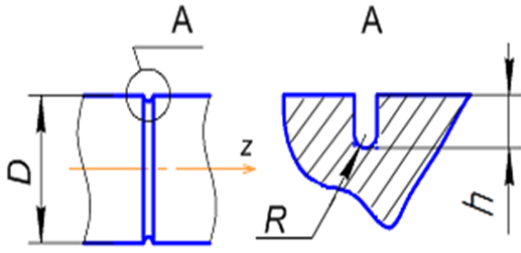


Рис. 1. Расчётная область образца

При решении задачи были приняты следующие условия:

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

- после поверхностного 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 было выполнено методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса NASTRAN/PATRAN, методические основы применения которого для подобных задач подробно рассмотрены в работе [3].

Эскиз расчётной области образца представлен на рис. 1. Конечно-элементная модель исследуемого образца представляет собой осевое сечение его четверти, что позволяет значительно сократить объём решаемой на ЭВМ задачи. В модели был использован плоский осесимметричный элемент 2D-Solid треугольного типа. Моделирование остаточных напряжений при решении задачи выполнено с использованием метода аналогии с термоупругостью материала путём задания соответствующего закона распределения температурного поля по сечению образца. Граничные условия на левом крае по месту опасного сечения соответствуют условию симметрии. Фрагмент сетки конечно-элементной модели в области опасного сечения приведён на рис. 2.

На рис. 3 для варианта расчёта $h = R = 0,05$ мм представлены графики зависимостей осевых σ_z , радиальных σ_r , окружных σ_θ и касательных τ_{rz} остаточных напряжений вдоль полукруглой поверхности дна надреза по угловой координате θ в диапазо-

не от 0 градусов (точка наименьшего сечения) до 90 градусов (точка перехода линии окружности в прямую линию).

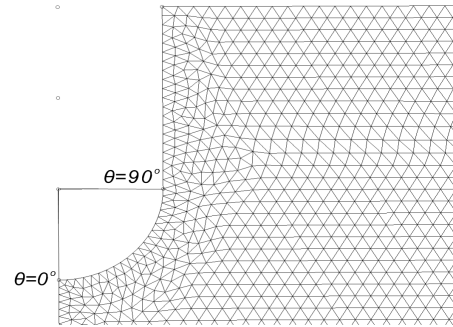


Рис. 2. Фрагмент сетки конечно-элементной модели в окрестности дна надреза

На рис. 4, 5 приведены аналогичные графики для вариантов расчёта $h = 0,108$ мм (промежуточное значение) и $h = 0,216$ мм (данная величина h соответствует критической глубине нераспространяющейся трещины усталости [4, 5]). На рис. 3 – 5 напряжения σ_i представлены в относительных величинах к максимальным значениям осевых σ_{z_0} остаточных напряжений для гладкого образца без надреза.

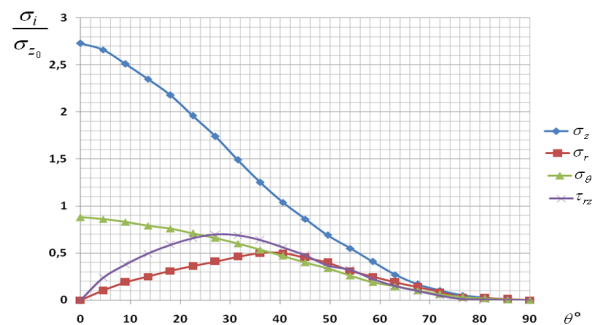


Рис. 3. Зависимости компонентов остаточного напряжённого состояния вдоль поверхности полукруглого надреза при $h = R = 0,05$ мм

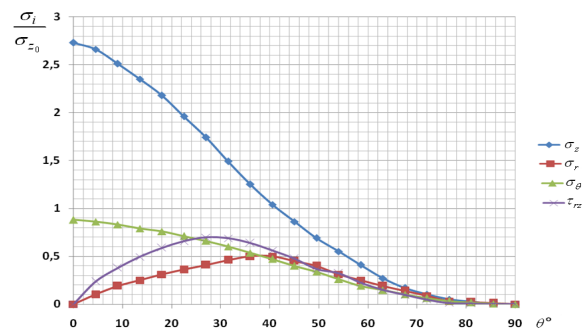


Рис. 4. Зависимости компонентов остаточного напряжённого состояния вдоль поверхности полукруглого надреза при $h = 0,108$ мм

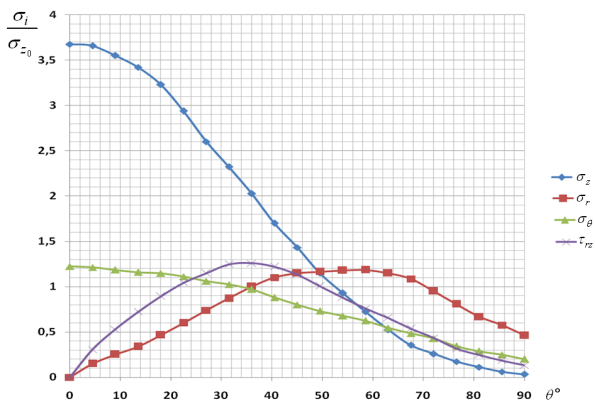


Рис.5. Зависимости компонент остаточного напряжённого состояния вдоль поверхности полукруглого надреза при $h = 0,216$ мм

Из приведённых на рис. 3 – 5 данных видно, что в наименьшем (опасном) сечении образца наибольшими по величине являются осевые σ_z остаточные напряжения. Поэтому они будут оказывать наибольшее влияние на приращение предела выносливости за счёт поверхностного пластического деформирования детали. Действительно, на практике при прогнозировании приращения предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей чаще всего применяется теория наибольших касательных напряжений, а в качестве эквивалентных напряжений используются осевые σ_z остаточные напряжения [3]. Радиальные σ_r и касательные τ_{rz} остаточные напряжения относительно друг друга имеют подобный характер зависимостей: при изменении угловой координаты θ от 0 до 90 градусов они вначале возрастают, а затем, достигнув максимума, уменьшаются. Следует отметить, что в рассмотренных пределах изменения глубины надреза точка максимального значения указанных компонентов при возрастании параметра h смещается в сторону сопряжения криволинейной части надреза с прямолинейной.

В связи с большим влиянием осевых σ_z остаточных напряжений на приращение предела выносливости было проведено исследование зависимости этих напряжений от геометрических параметров кольцевого надреза. Результаты расчёта осевых остаточных напряжений на дне надреза в зависимости от глубины h и радиуса $R = 0,1$ мм, $R = 0,05$ мм и $R=0,025$ мм для образца диаметром $D = 10$ мм в виде графиков представлены на рис. 6.

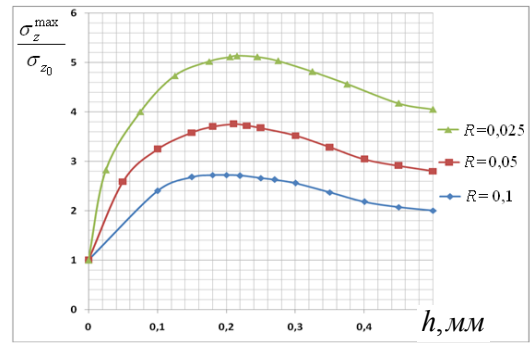


Рис. 6. Зависимости осевых σ_z остаточных напряжений на дне надреза от его глубины h и радиуса R при $D = 10$ мм

Значения напряжений приведены в относительных величинах к максимальным осевым σ_{z0} остаточным напряжениям на поверхности образца без надреза.

Из приведённых на рис. 6 графиков видно, что при уменьшении радиуса надреза R значения осевых σ_z остаточных напряжений в наименьшем сечении возрастают. Для различных радиусов надреза зависимости осевых напряжений носят подобный характер: с увеличением глубины надреза h они вначале возрастают, а затем, достигнув максимума, уменьшаются. Следует отметить, что при этом градиент возрастания осевых остаточных напряжений по абсолютной величине значительно превосходит градиент падения.

Выводы

1. По результатам исследования закономерностей распределения компонент остаточного напряжённого состояния в области наименьшего сечения цилиндрических образцов с кольцевым надрезом после нанесения концентратора на упрочнённую поверхность установлено, что осевые остаточные напряжения имеют наибольшее значение и, следовательно, оказывают 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 предела выносливости.

Библиографический список

1. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность [Текст] / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов // Проблемы прочности. – 1976. – №5. – С. 25–27.
2. Павлов, В.Ф. Влияние характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя детали на сопротивление усталости [Текст] / В.Ф. Павлов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1987. – №7. – С. 3–6.
3. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем

поверхностном пластическом деформировании [Текст] / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов [и др.] // Вестник СГАУ. – Самара: Изд-во СГАУ, 2011. – №3 (27). – Ч. 3. – С. 171-174.

2. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям [Текст] / В.Ф. Павлов, А.К. Столяров, В.С. Вакулук [и др.]. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 124 с.

3. Павлов, В.Ф. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.Б. Иванов. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 64 с.

STUDY OF RESIDUAL STRAINED STATE COMPONENTS DISTRIBUTION IN THE SMALLEST SECTION OF SUPERFICIAL HARDENED PART WITH A CIRCULAR CUT BY FINITE-ELEMENTS MODELING METHOD

© 2012 V. P. Sazanov

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

Residual strained state components distribution along the smallest section of surface hardened cylindrical part diameter $D = 10$ mm with a circular cut and the dependence of axial residual stresses in the smallest section on the depth and radius of the cut have been examined using finite-element modeling.

Residual stresses, superficial hardening, finite element modeling, cylindrical part, residual strained state components, circular cut.

Информация об авторах

Сазанов Вячеслав Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Sazanov Vyacheslav Petrovich, candidate of technical sciences, associate professor of strength of materials department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: residual stresses mechanics.