

УДК 621.787: 539.319

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИУСА И ГЛУБИНЫ НАДРЕЗА НА ХАРАКТЕР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В НАИМЕНЬШЕМ СЕЧЕНИИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННОЙ ДЕТАЛИ**

© 2012 В. П. Сазанов, Ю. С. Ларионова

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

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.

*Остаточные напряжения, опережающее поверхностное пластическое деформирование, конечно-элементное моделирование, цилиндрическая деталь, полукруглый кольцевой надрез.*

Большой практический интерес при прогнозировании предела выносливости представляет решение задачи о перераспределении остаточных напряжений в деталях с концентраторами, нанесёнными после опережающего поверхностного пластического деформирования. В связи с этим актуальным является исследование влияния геометрических параметров детали и концентратора на величину и распределение осевых остаточных напряжений в наиболее опасном сечении детали, так как в соответствии с третьей теорией прочности именно осевые  $\sigma_z$  остаточные напряжения являются ответственными за повышение предела выносливости поверхностно упрочнённой детали с концентратором [1].

Проведённое исследование выполнено по результатам расчётов методом конечно-элементного моделирования на сплошных образцах из стали 20 диаметром  $D = 10$  мм,  $D = 15$  мм и  $D = 25$  мм с использованием расчётного комплекса NASTRAN \ PATRAN. Теоретические основы метода расчёта остаточных напряжений в деталях с концентраторами по первоначальным деформациям изложены в [2-4]. Моделирование остаточного напряжённого состояния поверхностно упрочнённых деталей применительно к указанному расчётному комплексу подробно рассмотрены в [5].

Расчётная область образца представлена на рис.1. В рассматриваемой

задаче поверхностный слой гладкого образца упрочнён на глубину  $a = 0,5$  мм по линейному закону распределения осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений. При этом их максимальное значение находится на поверхности образца, а нулевое – на глубине  $a = 0,5$  мм.

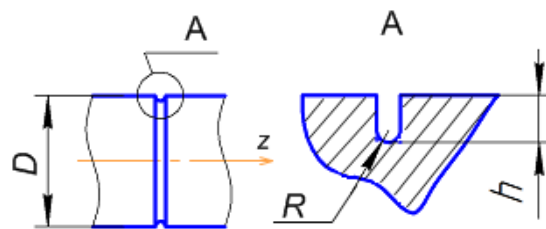


Рис. 1. Расчётная область образца

После поверхностного упрочнения на гладкий образец нанесён концентратор глубиной  $h$  в виде кольцевого надреза с радиусом  $R$  на его дне. В результате нанесения надреза в окрестности концентратора упрочнённого образца происходит перераспределение остаточных напряжений.

В разработанных для проведения расчётов и исследований конечно-элементных моделях цилиндрических образцов использован треугольный осесимметричный элемент типа 2D-Solid. Моделирование осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений в упрочнённом слое выполнено методом замены эквивалентным им температурным полем. Фрагмент сетки конечно-элементной модели в окрестности

концентратора напряжений приведён на рис.2.

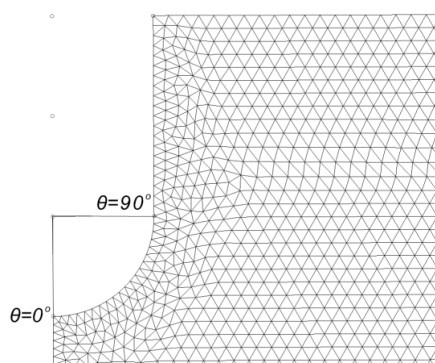


Рис. 2. Фрагмент сетки конечно-элементной модели образца

На рис. 3 для одного из вариантов расчёта ( $D = 10$  мм,  $h = 0,3$  мм,  $R = 0,1$  мм) приведён типовой график зависимости осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений на полукруглой поверхности дна надреза по угловой координате  $\theta$  в диапазоне от 0 градусов (точка наименьшего сечения) до 90 градусов (точка перехода линии окружности в прямую линию).

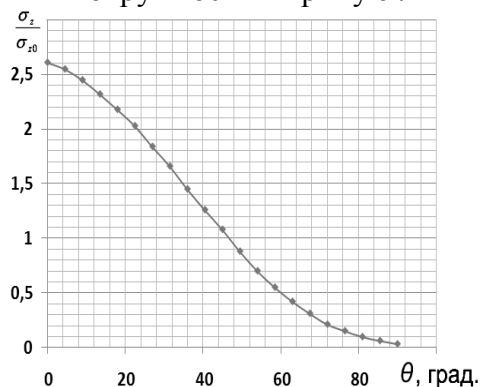


Рис. 3. Зависимость осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений вдоль поверхности полукруглого надреза

На рис. 4 для того же варианта расчёта приведён график зависимости осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$  наименьшего сечения образца. На графиках напряжения приведены в относительных величинах к максимальным значениям осевых  $\sigma_{z0}$  остаточных напряжений гладкого образца (без надреза).

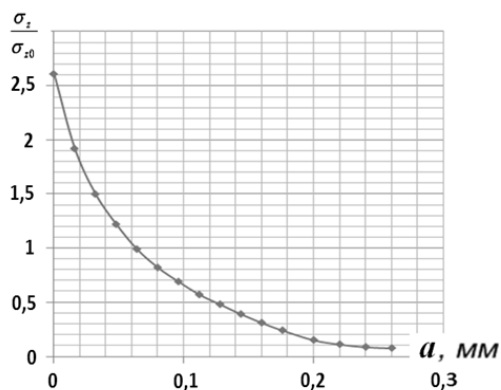


Рис. 4. Зависимость осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по глубине наименьшего сечения образца

Из графиков видно, что в обоих случаях в представленных диапазонах оси абсцисс (от 0 до 90 градусов в первом и от 0 до 0,3 мм во втором) осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении образца снижаются практически на два порядка от максимального до минимального значения на границах указанных интервалов.

Зависимости значений максимальных осевых  $\sigma_z^{\max}$  остаточных напряжений от глубины  $h$  на дне надреза для радиусов  $R = 0,1$  мм,  $R = 0,05$  мм и  $R = 0,025$  мм и диаметров образцов  $D = 10$  мм,  $D = 15$  мм и  $D = 25$  мм в виде графиков приведены на рис. 5 – 7. Значения напряжений также представлены в относительных величинах к максимальным осевым  $\sigma_{z0}$  остаточным напряжениям на поверхности образца без надреза.

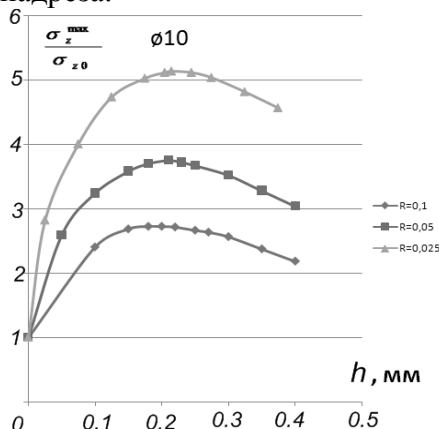


Рис. 5. Зависимости осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений на дне надреза от его глубины и радиуса при  $D = 10$  мм

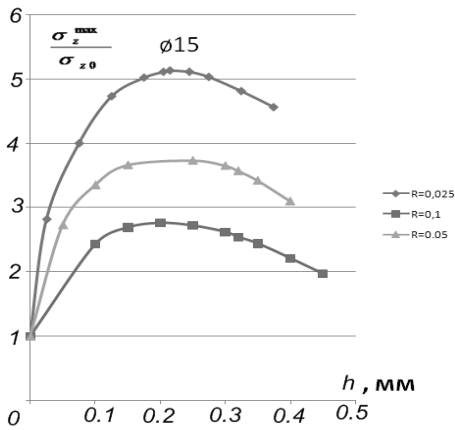


Рис. 6. Зависимости осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений на дне надреза от его глубины и радиуса при  $D = 15$  мм

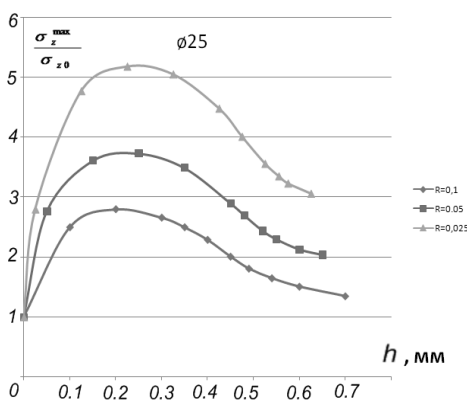


Рис. 7. Зависимости осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений на дне надреза от его глубины и радиуса при  $D = 25$  мм

Из приведённых на рис. 5 – 7 данных видно, что для всех рассмотренных в исследовании типоразмеров образцов и геометрических параметров надреза значения осевых остаточных напряжений в наименьшем сечении имеют подобный характер изменения. Функции зависимостей могут быть представлены некоторым полиномом, имеющим один участок подъёма, один участок падения и соответственно одну точку максимума.

#### Выводы

1. По результатам исследования закономерностей перераспределения осевых остаточных напряжений в цилиндрических образцах после нанесения концентратора на упрочнённую поверхность выявлена их высокая концентрация на дне надреза и значительное снижение по угловой и радиальной координатам.

2. Для всех рассмотренных типоразмеров образцов при уменьшении

радиуса дна надреза остаточные напряжения в наименьшем сечении возрастают.

3. При увеличении глубины надреза остаточные напряжения в наименьшем сечении образца сначала возрастают, а после достижения максимального значения снижаются, при этом градиент изменения зависимости на участке подъёма значительно выше, чем на участке падения.

4. Предложенный метод использования современных расчётных комплексов типа NASTRAN \ PATRAN, ANSYS при исследовании перераспределения осевых остаточных напряжений после нанесения концентратора на упрочнённую поверхность цилиндрических образцов позволяет определить закономерности их изменения от формы, геометрических размеров концентратора и самой детали, а также учитывать полученные результаты при прогнозировании предела выносливости.

#### Библиографический список

1. Павлов В.Ф., Курпичёв В.А., Иванов В.Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 64 с.
2. Павлов В.Ф., Столяров А.К., Вакулюк В.С., Курпичёв В.А. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 124 с.
3. Павлов В.Ф. Влияние характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя детали на сопротивление усталости // Известия вузов. Машиностроение. – 1987. – №7. – С. 3-6.
4. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Определение дополнительных остаточных напряжений в надрезах на цилиндрических деталях // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1973. – Вып. 60. – С. 160-170.
5. Сазанов В.П., Чирков А.В., Самойлов В.А., Ларионова Ю.С. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном

пластическом деформировании // Вестник Часть 3. – С. 171-174.  
СГАУ. – Самара: СГАУ, 2011. – №3 (27).

**RESEARCH OF NOTCH RADIUS AND DEPTH INFLUENCE ON RESIDUAL STRESSES  
DISTRIBUTION CHARACTER IN THE SMALLEST CROSS-SECTION OF SURFACE  
HARDENED DETAIL**

© 2012 V. P. Sazanov, Yu. S. Larionova

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

Notch radius and depth influence on axial residual stresses in the smallest cross-section for surface hardened cylindrical parts of different diameters is studied using FEM modeling.

*Residual stresses, outstripping superficial plastic deforming, FEM modeling, cylindrical detail, semicircular annular notch.*

**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](mailto:sopromat@ssau.ru). Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

**Ларионова Юлия Сергеевна**, аспирант кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru). Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

**Sazanov Vacheslav 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](mailto:sopromat@ssau.ru). Area of research: residual stresses mechanics.

**Larionova Yulia Sergeevna**, post-graduate student of strength of materials department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru). Area of research: residual stresses mechanics.