

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
КОМПОНЕНТОВ ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ
В ОКРЕСТНОСТИ НАИМЕНЬШЕГО СЕЧЕНИЯ УПРОЧНЁННОЙ ПОЛОЙ
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИ С КОЛЬЦЕВЫМ НАДРЕЗОМ**

© 2012 В. П. Сазанов, Ю. С. Ларионова, С. А. Колычев

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

Приведены результаты исследования закономерностей распределения компонентов остаточного напряжённого состояния вдоль поверхности наименьшего сечения кольцевого надреза поверхностно упрочнённой полой цилиндрической детали и результаты исследования зависимости осевых остаточных напряжений в наименьшем сечении от геометрических параметров концентратора.

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

Практический опыт поверхностного упрочнения деталей в машиностроении [1,2] показывает, что среди множества факторов на повышение их сопротивления усталости существенное влияние оказывают геометрические размеры. С одной стороны, экспериментально установлено, что с увеличением абсолютных размеров деталей их сопротивление усталости снижается (масштабный эффект). Это объясняется статистической теорией разрушения, в соответствии с которой при увеличении абсолютных размеров возрастает вероятность попадания дефектных зёрен материала в зону повышенных напряжений. Существуют и другие причины, способствующие проявлению масштабного эффекта, например, меньшая неоднородность материала в деталях больших размеров, трудность обеспечения стабильности технологического процесса, условий контроля. С другой стороны, геометрические размеры, определяющие жёсткостные характеристики детали, существенным образом влияют на перераспределение остаточных напряжений в области концентратора, нанесённых после опережающего поверхностного пластического деформирования. В свою очередь, именно это распределение в опасном сечении в зоне концентратора играет главную роль в повышении сопротивления усталости по сравнению с неупрочнённой деталью.

Учёт масштабного фактора, оказывающего влияние на предел выносливости деталей относительно стандартного образца, требует проведения большого количества испы-

таний на усталость образцов увеличенных размеров, в том числе и полых цилиндрических образцов. При распространении результатов этих испытаний на другие типоразмеры актуальной является задача об определении закономерностей перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых деталях с концентраторами напряжений определённой формы, нанесёнными после опережающего поверхностного пластического деформирования. По результатам таких исследований проводится обоснование выбора теории прочности и, соответственно, определение эквивалентного напряжения при установлении связи между сжимающими остаточными напряжениями и приращением предела выносливости поверхностно упрочнённой детали, а также вводятся поправочные масштабные коэффициенты по сравнению с малоразмерными образцами.

Получение решения таких задач аналитическим способом затруднительно, а в большинстве практических случаев невозможно. Возможность их решения упрощается при использовании современных расчётных комплексов, реализующих метод конечных элементов в форме перемещений.

Приведённые в работе результаты исследования были выполнены на стальных полых цилиндрических образцах с определёнными размерами наружного и внутреннего диаметра методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса NASTRAN/PATRAN [3]. На рис. 1 приведён эскиз расчётной части образца.

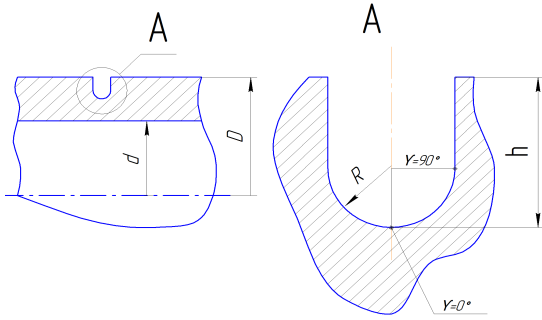


Рис. 1. Расчётная область образца

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

- 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);

- после упрочнения на деталь нанесён концентратор в виде кольцевого надреза глубиной h и радиусом R , в результате чего в окрестности концентратора происходит перераспределение остаточных напряжений.

На рис. 2 приведены графики зависимостей осевых σ_z , радиальных σ_r , окружных σ_θ и касательных τ_{rz} остаточных напряжений вдоль полукруглой поверхности дна кольцевого надреза по угловой координате γ (рис. 1) в диапазоне от 0 градусов (точка поверхности наименьшего сечения) до 90 градусов (точка перехода линии окружности в прямую линию) для образца с размерами наружного D и внутреннего d диаметров $D/d = 25/15$ мм/мм и для варианта расчёта при $h = R = 0,05$ мм.

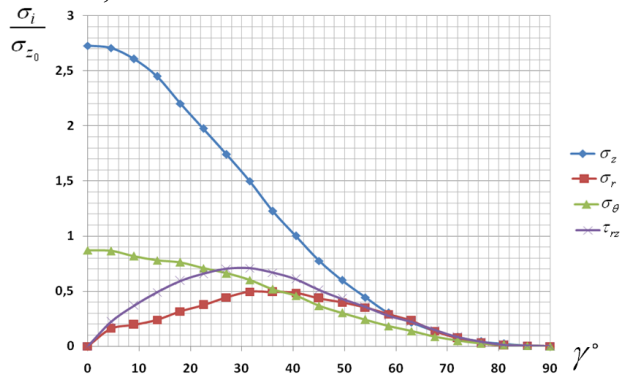


Рис. 2. Зависимости компонентов остаточного напряжённого состояния вдоль поверхности полукруглого надреза при $h = R = 0,05$ мм

На рис. 3, 4 представлены аналогичные графики для вариантов расчёта при $h = 0,235$ мм (промежуточное значение) и $h = 0,469$ мм (данная величина h соответствует критической глубине нераспространяющейся трещины усталости [4, 5]).

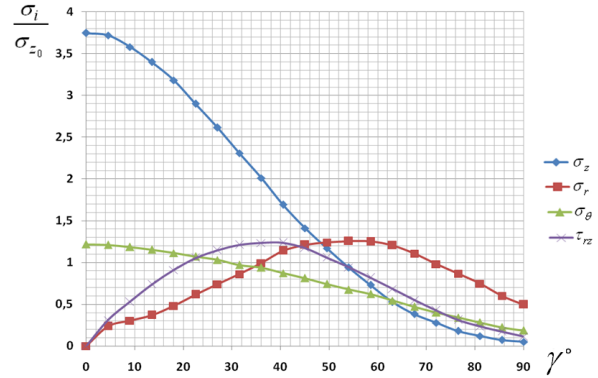


Рис. 3. Зависимости компонентов остаточного напряжённого состояния вдоль поверхности полукруглого надреза при $h = 0,235$ мм

На рис. 2 – 4 компоненты остаточных напряжений σ_i приведены в относительных величинах к максимальным значениям осевых σ_{z_0} остаточных напряжений гладкого образца без надреза.

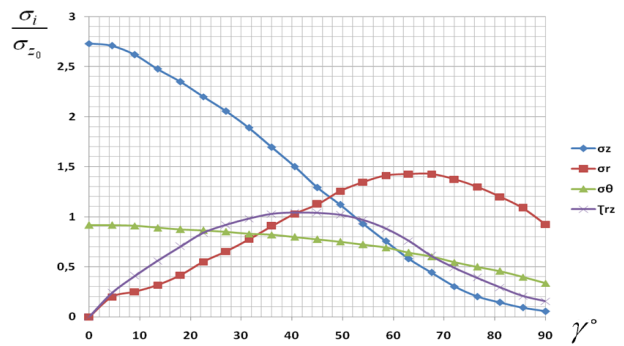


Рис. 4. Зависимости компонентов остаточного напряжённого состояния вдоль поверхности полукруглого надреза при $h = 0,469$ мм

Из приведённых на рис. 2 – 4 графиков зависимостей видно, что осевые σ_z остаточные напряжения в наименьшем сечении по своей величине значительно превосходят остальные компоненты напряжённого состояния. Это подтверждает правильность выбора на практике при прогнозировании приращеня предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей теории наибольших касательных напряжений, а в качестве эквивалентных напряжений – использование осевых σ_z остаточных напряжений в наименьшем сечении детали с концентратором [4, 5].

Компоненты радиальных σ_r и касательных τ_{rz} остаточных напряжений в рассмотренном диапазоне изменения угловой координаты γ имеют зависимость в виде функции с одним экстремальным значением (максимумом). При увеличении глубины надреза точка максимума напряжений смещается в сторону сопряжения криволинейной и прямолинейной частей профиля надреза.

Учитывая важность влияния осевых σ_z остаточных напряжений на предел выносливости поверхностно упрочнённых деталей, было проведено исследование влияния геометрических размеров кольцевого надреза R и h на величину этих напряжений в наименьшем (опасном) сечении образца (детали) с концентратором. Результаты расчётов для полых цилиндрических образцов с размерами $D/d = 25/15$ мм/мм, $D/d = 50/40$ мм/мм, радиусов надреза $R = 0,05$ мм и $R = 0,1$ мм представлены на рис. 5, 6. Значения напряжений также приведены в относительных величинах к максимальным осевым σ_{z_0} остаточным напряжениям на поверхности образца без надреза.

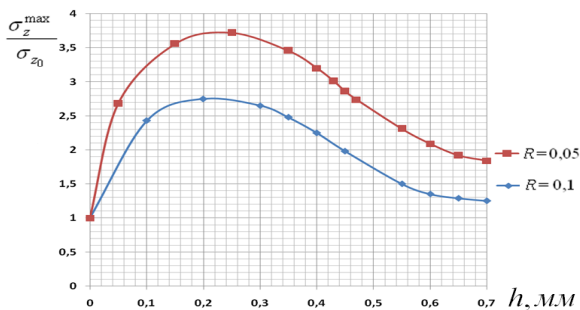


Рис. 5. Зависимости осевых σ_z остаточных напряжений на дне надреза от его глубины и радиуса для образца $D/d = 25 \times 15$ мм

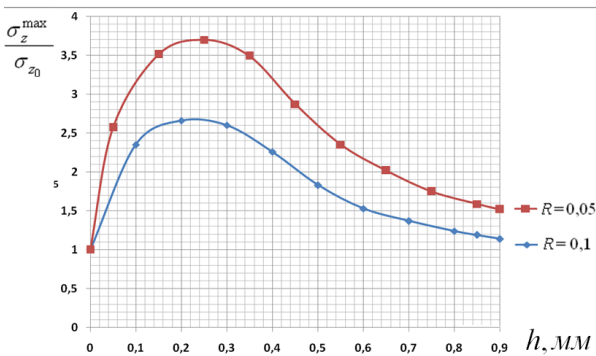


Рис. 6. Зависимости осевых σ_z остаточных напряжений на дне надреза от его глубины и радиуса для образца $D/d = 50 \times 40$ мм

Анализ результатов расчётов, приведённых на рис. 5, 6 показывает, что при уменьшении радиуса надреза R осевые σ_z остаточные напряжения в наименьшем сечении образца (детали) возрастают. Для различных радиусов надреза с увеличением его глубины h осевые остаточные напряжения вначале возрастают, а затем, достигнув максимума, уменьшаются.

Выводы

1. Исследования закономерностей распределения компонент остаточных напряжений в области наименьшего сечения поверхностно упрочнённых полых цилиндрических образцов (деталей) с кольцевым надрезом подтверждают определяющее влияние осевых σ_z остаточных напряжений на приращение предела выносливости.

2. Проведённые исследования зависимости осевых σ_z остаточных напряжений от геометрических параметров кольцевого надреза в полых цилиндрических образцах (деталей) показали, что эта зависимость может быть описана функцией с одной точкой экстремума (максимума).

Библиографический список

1. Биргер, И.А. Остаточные напряжения [Текст] / И.А. Биргер. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
2. 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.
3. 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. [и др.] // Вестн. СГАУ. – Самара: Изд-во СГАУ, 2011. – №3 (27). Ч. 3. – С. 171-174.
2. 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.
3. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов // Изв. вузов.–М.: Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.

**RESIDUAL STRESSES DISTRIBUTION REGULARITIES IN THE
SMALLEST SECTION OF HARDENED HOLLOW CYLINDRICAL DETAIL
WITH CIRCULAR CUT**

© 2012 V. P. Sazanov, Y. S. Larionova, S. A. Kolychev

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

The results of the residual strained state components distribution along the smallest section of superficial hardened hollow cylindrical part are given. The dependence of axial residual stresses in the smallest section on concentrator geometric parameters have been examined.

Residual stresses, fatigue resistance, superficial hardening, finite element modeling, hollow cylindrical part, stress 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.

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

Колычев Сергей Александрович, магистрант, 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.

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

Kolychev Sergey Alexandrovich, graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: residual stresses mechanics.