

УДК 621.787: 539.319

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ ОПАСНОГО СЕЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ С ГАЛТЕЛЯМИ ПРИ ИЗГИБЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2013 В. С. Вакулук

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

С помощью метода конечно-элементного моделирования проанализированы результаты испытаний неупрочнённых и упрочнённых дробью образцов диаметром 12 мм из стали 20 с галтельными переходами различного радиуса: 0,5 мм; 1 мм; 3 мм и 5 мм. Экспериментально установлено и расчётным методом подтверждено, что с увеличением радиуса галтели опасное сечение, то есть сечение с наибольшей концентрацией напряжений, перемещается в сторону наименьшего сечения образца и в пределе достигает его. Методом конечно-элементного моделирования получены зависимости коэффициента концентрации напряжений в области опасного сечения при изгибе цилиндрических образцов с галтелями различного радиуса.

*Цилиндрический образец, галтель, поверхностное упрочнение, испытания на усталость, изгиб, конечно-элементное моделирование, коэффициент концентрации напряжений.*

Проведённое исследование выполнено как составная часть работы, связанной с анализом результатов испытаний на усталость по определению предела выносливости при изгибе в случае симметричного цикла цилиндрических образцов из стали 20 с галтелями различного радиуса. Испытаниям на усталость подвергались неупрочнённые и упрочнённые образцы диаметром 12 мм в рабочей части с галтелями четырёх радиусов:  $r = 0,5$  мм,  $r = 1$  мм,  $r = 3$  мм,  $r = 5$  мм (рис. 1). Поверхностное упрочнение образцов производилось пневмодробеструйной обработкой стальной дробью диаметром 1,5 – 2,5 мм в течение 10 минут при давлении воздуха 0,28 МПа.

Испытания образцов на усталость при изгибе в случае симметричного цикла проводились на машине МУИ-6000, база испытаний –  $3 \cdot 10^6$  циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости  $S_{-1}$  неупрочнённых и упрочнённых образцов приведены в табл. 1.

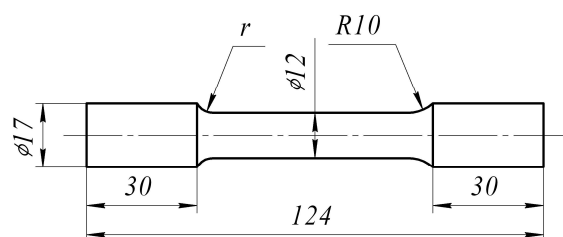


Рис. 1. Образец с галтелью  
для испытаний на усталость

Таблица 1. Результаты определения предела выносливости образцов

Радиус галтели $r$ , мм	Предел выносливости образцов $S_{-1}$ , МПа	
	неупрочнённых	упрочнённых
0,5	127,5	172,5
1	162,5	187,5
3	185	225
5	225	262,5

Из представленных в табл. 1 данных видно, что с увеличением радиуса галтели предел выносливости как неупрочнённых, так и упрочнённых образцов возрастает. Положительный эффект от обработки дробью наблюдается даже при радиусе галтели  $r = 0,5$  мм, когда галтельный переход непосредственно не подвергался упрочнению, так как диаметр дробы со-

ставлял 1,5 – 2,5 мм. Этот эффект объясняется концентрацией в галтели благоприятных сжимающих остаточных напряжений, наведённых за счёт прилегающих к галтельному переходу зон гладких частей образца [1].

При визуальном осмотре, а также при исследовании с помощью микроскопа изломов образцов (упрочнённых и неупрочнённых) было установлено, что зарождение усталостной трещины, как правило, происходило не в наименьшем сечении (зона сопряжения поверхности малого цилиндра и галтели), а в сечении, расположенном под некоторым углом  $q$  к наименьшему сечению (рис. 2).

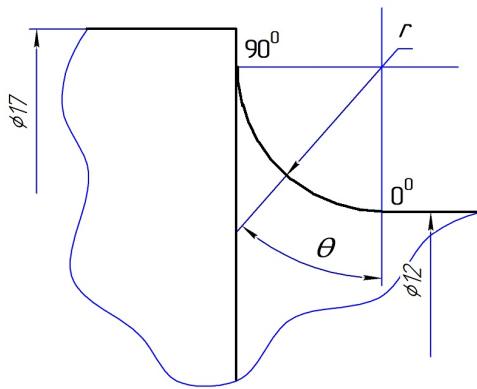
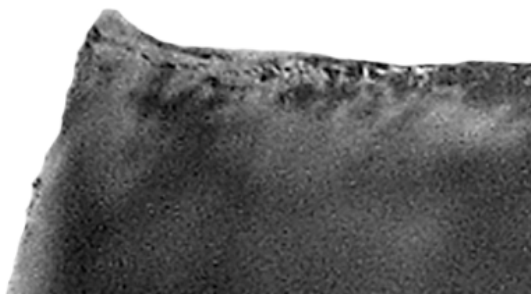


Рис. 2. Направление отсчёта угла  $q$ , определяющего положение точки на галтельном переходе образца

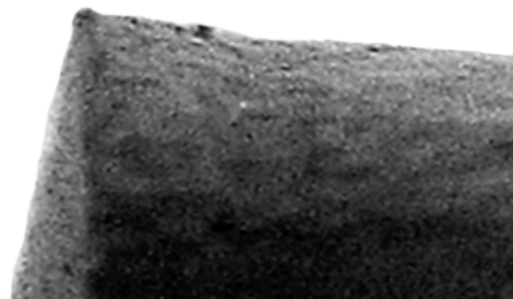
При прогнозировании влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей с концентраторами по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений [2-7] нужно иметь распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения деталей. Поэтому необходимо знать положение опасного сечения с тем, чтобы произвести оценку влияния упрочнения на сопротивление многоциклового усталости деталей в условиях концентрации напряжений.

На рис. 3 представлены фотографии изломов, сделанные с помощью микроскопа для образцов с галтелями  $r = 0,5$  мм и  $r = 1$  мм. На приведённых фотографиях видно, что сечение усталостного излома образцов проходит не по наименьшему сечению, а под некоторым углом к нему.

В справочной литературе [8, 9] для подобных испытуемым образцам типов деталей приводятся значения коэффициентов концентрации напряжений при соответствующих видах напряжённого состояния (изгиб, растяжение, кручение). На практике принято считать, что опасным является наименьшее по площади и моментам сопротивления сечение в зоне перехода малого цилиндра в галтель и это вполне оправдано при проектировании в «запас прочности».



а



б

Рис. 3. Фотографии изломов образцов с галтелью после испытаний на усталость: а –  $r = 0,5$  мм; б –  $r = 1$  мм

Для определения причин характера образования изломов, полученных при испытаниях образцов с галтелями, были выполнены расчёты методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса NASTRAN/PATRAN [10]. Разработанные для четырёх радиусов галтелей объёмные конечно-элементные модели образцов представляют собой симметричную при изгибе часть, отсечённую проходящей через продольную ось образца плоскостью, с наложением соответствующих граничных условий по перемещениям (рис. 4).

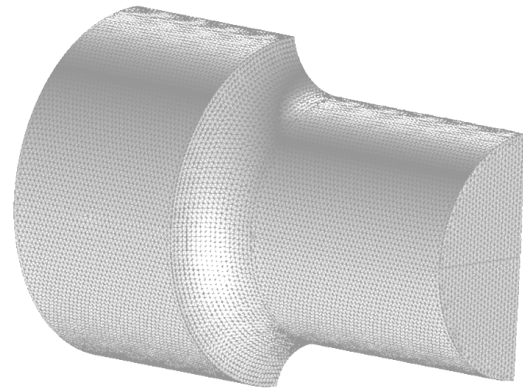


Рис. 4. Конечно-элементная модель образца при расчёте на изгиб (радиус галтели  $r = 3$  мм)

Изгибающий момент приложен к торцевым сечениям в виде распределённых по линейному закону осевых напряжений в плоскости, содержащей продольную ось образца.

При моделировании использован объёмный конечный элемент в виде 10-узлового тетраэдра. На рис. 5 приведено напряжённое состояние одного из образцов с галтелью радиуса  $r = 3$  мм.

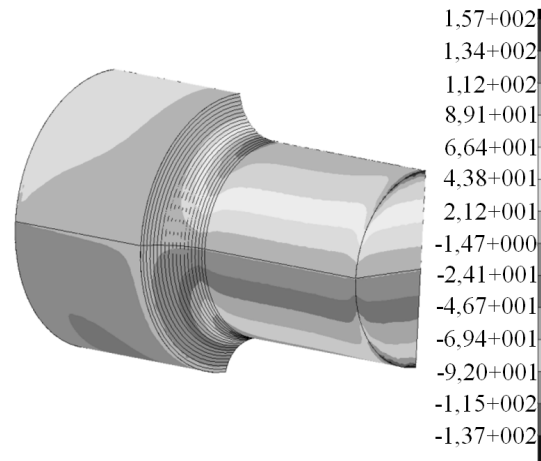


Рис. 5. Напряжённое состояние образца с галтелью радиуса  $r = 3$  мм при изгибе

По результатам расчётов были построены графики зависимостей отношения напряжений на поверхности галтели  $S_{гал}$  к номинальным напряжениям  $S_{ном}$  в наименьшем сечении образца при изгибе от угла  $q$ , определяющего положение точки на поверхности галтельного перехода (рис. 6).

Анализ приведённых на рис. 6 графиков показывает, что положение точки на поверхности галтельного перехода с наибольшими напряжениями  $S_{гал}^{наиб}$  зависит от радиуса галтели  $r$ . При увеличении радиуса  $r$  точка с  $S_{гал}^{наиб}$  смещается к наименьшему сечению образца с галтелью. Следовательно, положение опасного сечения детали с галтельным переходом, определяемое углом  $q_{оп}$ , зависит от радиуса галтели, что необходимо учитывать в расчётах на прочность.

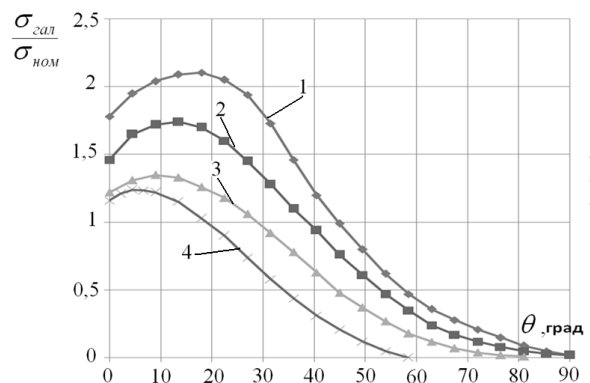


Рис. 6. Графики зависимостей отношения напряжений при изгибе на поверхности галтели к номинальным для радиусов:

1 –  $r = 0,5$  мм, 2 –  $r = 1$  мм,  
3 –  $r = 3$  мм, 4 –  $r = 5$  мм

По результатам проведённых расчётов были определены значения теоретического коэффициента концентрации напряжений  $a_s$  при изгибе по формуле  $a_s = S_{гал}^{наиб} / S_{ном}$ , которые представлены в табл. 2. В этой же таблице содержатся значения  $a_s$ , приведённые в работе [8]. Можно видеть, что расхождение между значениями коэффициентов  $a_s$ , полученными в настоящем исследовании и приведёнными в работе [8], не превышает одного процента. Это сравнение указывает на достаточно высокую точность проведённых расчётов.

В табл. 2 представлены также опытные и расчётные значения угла  $q_{on}$ , который определяет положение опасного сечения детали с галтельным переходом. Из данных табл. 2 следует, что опытные и расчётные значения  $q_{on}$  различаются незначительно, то есть проведённые эксперименты подтверждают результаты расчёта. Опытные и расчётные данные также показывают, что с увеличением радиуса галтели опасное сечение детали с галтельным переходом приближается к наименьшему сечению и в пределе достигает его.

Таблица 2. Результаты определения коэффициента концентрации напряжений и положения опасного сечения

Радиус галтели $r$ , мм	Коэффициент концентрации $a_s$		Расхождение, %	Угол $q_{on}$ , град.	
	расчёт	данные работы [8]		опыт	расчёт
0,5	2,11	2,10	0,48	20	18
1	1,75	1,74	0,57	13	14
3	1,35	1,34	0,75	8	9
5	1,25	1,25	0,0	4	5

### Выводы

1. Положение опасного сечения в образце с галтельным переходом зависит от радиуса галтели – с увеличением радиуса галтели опасное сечение перемещается в сторону наименьшего сечения образца (детали). Это обстоятельство необходимо учитывать при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с галтельными переходами.

2. Теоретический коэффициент концентрации напряжений  $a_s$  при изгибе, определённый в настоящем исследовании для различных радиусов галтельных переходов, практически совпадает со значениями  $a_s$  по справочным данным.

3. Положение опасного сечения образцов с галтельными переходами, определённое на основании проведённых экспериментов, незначительно отличается от расчётного.

### Библиографический список

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

2. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2012. – 125 с.

3. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.

4. Радченко, В.П. Методика расчёта предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурных выдержках в условиях ползучести [Текст] / В.П. Радченко, О.С. Афанасьева // Вестн.

СамГТУ. Сер. Физ.-мат. науки. – 2009. – №2 (19). – С. 264-268.

5. Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали [Текст] / В.Ф. Павлов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1988. – №8. – С. 22-26.

6. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов с концентраторами напряжений [Текст] / В.С. Вакулук, В.А. Кирпичёв, В.Ф. Павлов [и др.] // Вестн. УГАТУ. – 2013. – Т.17. – №1(54). – С. 45-49.

7. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых цилиндрических образцов различного диаметра [Текст] / В.А. Кирпичёв, В.Ф. Пав-

лов, А.В. Чирков [и др.] // Вестн. СГАУ. – 2012. – №5(36). – Ч. 1. – С. 100-107.

8. Петерсон, Р.Е. Коэффициенты концентрации напряжений [Текст] / Р.Е. Петерсон. – М.: Изд-во «МИР», 1977. – 304 с.

9. Савин, Г.Н. Справочник по концентрации напряжений [Текст] / Г.Н. Савин, В.И. Тульчий. – Киев: Издательское объединение «Вища школа», 1976. – 412 с.

10. 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.] // Вестн. СГАУ. – 2011. – №3 (27). – Ч. 3. – С. 171-174.

## ANALYSIS OF STRESS DISTRIBUTION IN THE DANGEROUS SECTION AREA OF SPECIMENS WITH FILLETS UNDER BENDING USING THE FINITE-ELEMENT MODELING METHOD

© 2013 V. S. Vakuljuk

Samara State Aerospace University

The results of testing specimens with the diameter of 12 mm made of steel 20 with fillets of various radii (0,5mm, 1mm, 3 mm and 5mm) both non-hardened and hardened by peening have been analyzed by the finite-element modeling method. It is experimentally established that the fillet radius increase results in the dangerous section moving to the specimen's smallest section and reaching it at the extreme. This fact is confirmed by the calculation method. The dependences of the stress concentration coefficient in the dangerous section area of cylindrical specimens with fillets of various radii under bending regularities have been obtained out by the finite-element modeling method.

*Cylindrical specimen, fillet, surface hardening, fatigue tests, bending, finite- element modeling, stress concentration coefficient.*

### Информация об авторе

**Вакулук Владимир Степанович**, 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.

**Vakuljuk Vladimir Stepanovich**, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Strength of Materials Department, Samara State Aerospace University. E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru). Area of research: residual stresses mechanics.