

УДК 621.787: 539.319

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ НА УСТАЛОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ С ГАЛТЕЛЯМИ МЕТОДОМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

©2013 В. С. Вакулюк

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

Методом конечно-элементного моделирования проведены исследования результатов испытаний на усталость по определению пределов выносливости при изгибе цилиндрических образцов с галтелями различного радиуса с учётом особенностей технологического процесса поверхностного упрочнения.

Испытания на усталость, цилиндрический образец, изгиб, галтель, поверхностное упрочнение, конечно-элементное моделирование, коэффициент концентрации напряжений.

Предметом настоящих исследований явились результаты испытаний на усталость по определению предела выносливости неупрочнённых и упрочнённых цилиндрических образцов с галтельными переходами из стали 20. Цилиндрические образцы диаметром 12 мм с галтельными переходами радиуса $r=0,5$ мм, $r=1$ мм, $r=3$ мм и $r=5$ мм (рис. 1) подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО) стальной дробью диаметром 1,5 – 2,5 мм при давлении воздуха 0,25 МПа в течение 10 минут.

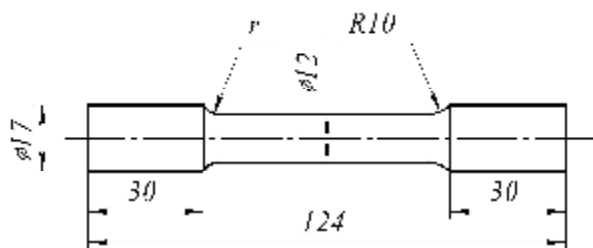


Рис. 1. Образец с галтелью для испытаний на усталость

Испытания на усталость при изгибе по определению предела выносливости S_{-1} проводились на машине МУИ-6000, база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. В табл. 1 приведены результаты испытаний образцов на усталость.

Таблица 1. Результаты испытаний образцов на усталость

Радиус галтели, мм	S_{-1} , МПа		Ds_{-1} , МПа
	неупрочнённые	упрочнённые	
0,5	127,5	172,5	45
1,0	162,5	187,5	25
3,0	185	225	40
5,0	225	262,5	37,5

Очевидно, что наибольший практический интерес представляют методические разработки по определению влияния поверхностного упрочнения на повышение предела выносливости образцов и последующее использование полученных результатов при прогнозировании этой механической характеристики для деталей сложной формы.

Первым этапом исследования с использованием метода конечно-элементного моделирования и применением расчётного комплекса NASTRAN/PATRAN явилось выявление закономерностей изменения напряжений при изгибе образцов вдоль поверхности галтели и определение положения опасного сечения. Расчёты были выполнены на объёмных конечно-элементных моделях, представляющих собой симметричную при изгибе часть образца, отсечённую проходящей через продольную ось плоскостью, с наложением соответствующих

граничных условий по перемещениям. По результатам расчётов построены графики зависимостей отношения $S_{гал} / S_{ном}$ от угла q , определяющего положение точки на галтельном переходе (рис. 2), где $S_{гал}$ – напряжение на поверхности галтели, $S_{ном}$ – номинальное напряжение в наименьшем сечении образца. Отсчёт угла q осуществлялся от точки перехода поверхности малого цилиндра к поверхности галтели в сторону поверхности большого цилиндра.

Из данных рис. 2 видно, что опасное сечение образца с галтельным переходом (сечение с наибольшей концентрацией напряжений) не совпадает с наименьшим сечением, а находится под некоторым углом $q_{он}$ к нему.

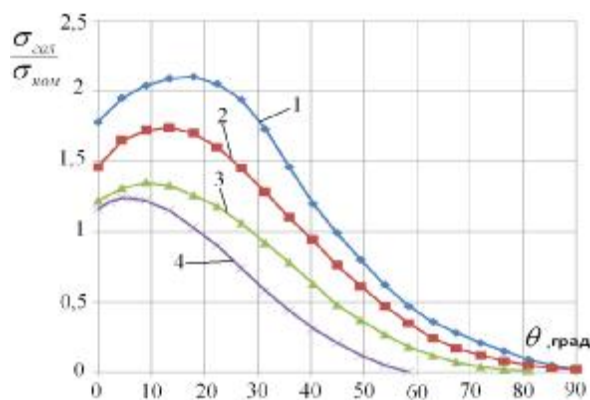


Рис. 2. Графики зависимостей отношения напряжений при изгибе на поверхности галтели к номинальным для радиусов: 1 – $r = 0,5$ мм; 2 – $r = 1$ мм; 3 – $r = 3$ мм; 4 – $r = 5$ мм

Положение опасного сечения, определяемое углом $q_{он}$, зависит от радиуса галтели r и составляет при $r = 0,5$ мм $q_{он} = 18^\circ$, при $r = 1$ мм $q_{он} = 14^\circ$, при $r = 3$ мм $q_{он} = 9^\circ$, при $r = 5$ мм $q_{он} = 5^\circ$. Эту закономерность следует учитывать при прогнозировании предела выносливости по-

верхностно упрочнённых деталей с галтельными переходами.

Анализ технологического процесса ПДО показал, что размеры использованной стальной дроби не позволяют проводить обработку поверхности галтели при $r = 0,5$ мм, позволяют проводить частичную обработку галтели при $r = 1$ мм и полную обработку галтели при $r = 3$ мм и $r = 5$ мм. Поэтому вторым этапом исследования явилась разработка конечно-элементных моделей упрочнённых образцов с учётом особенностей технологического процесса. Расчёты выполнялись на конечно-элементных моделях с использованием комплекса NASTRAN/PATRAN при моделировании упрочнённого слоя методом термоупругости [1, 2].

При проведении расчётов в качестве исходных данных были использованы результаты определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя гладких образцов, найденных методом снятия части поверхности [3], а также методом колец и полосок [4]. Распределение осевых S_z остаточных напряжений по продольному сечению образца в зоне галтельного перехода приведено на рис. 3.

Эпюры осевых S_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a опасного сечения образцов с галтельными переходами приведены на рис. 4. Здесь же для сравнения представлены эпюры осевых S_z остаточных напряжений гладких образцов.

Из приведённых на рис. 3 и 4 данных видно, что при радиусе галтели $r = 0,5$ мм, даже без непосредственного упрочнения галтельного перехода, в опасном сечении образца за счёт концентрации [1] при упрочнении прилегающих зон наводятся сжимающие остаточные напряжения, наибольшая величина которых на поверхности достигает -212 МПа.

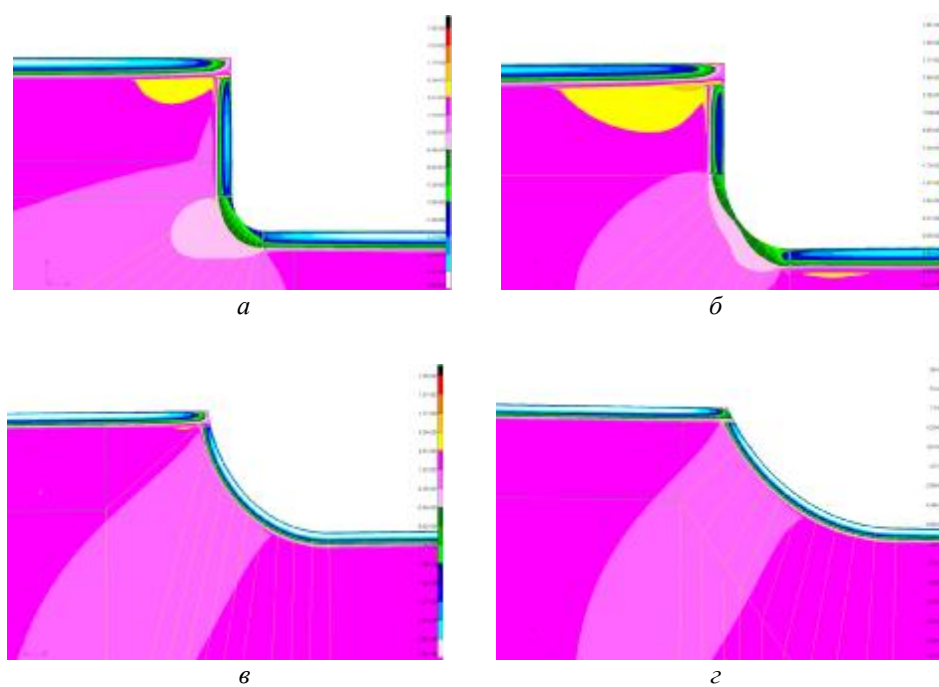


Рис. 3. Распределение осевых S_z остаточных напряжений:
 а – $r = 0,5$ мм с неупрочнённой поверхностью галтели;
 б – $r = 1$ мм с частично упрочнённой поверхностью галтели;
 в – $r = 3$ мм с полностью упрочнённой поверхностью галтели;
 г – $r = 5$ мм с полностью упрочнённой поверхностью галтели

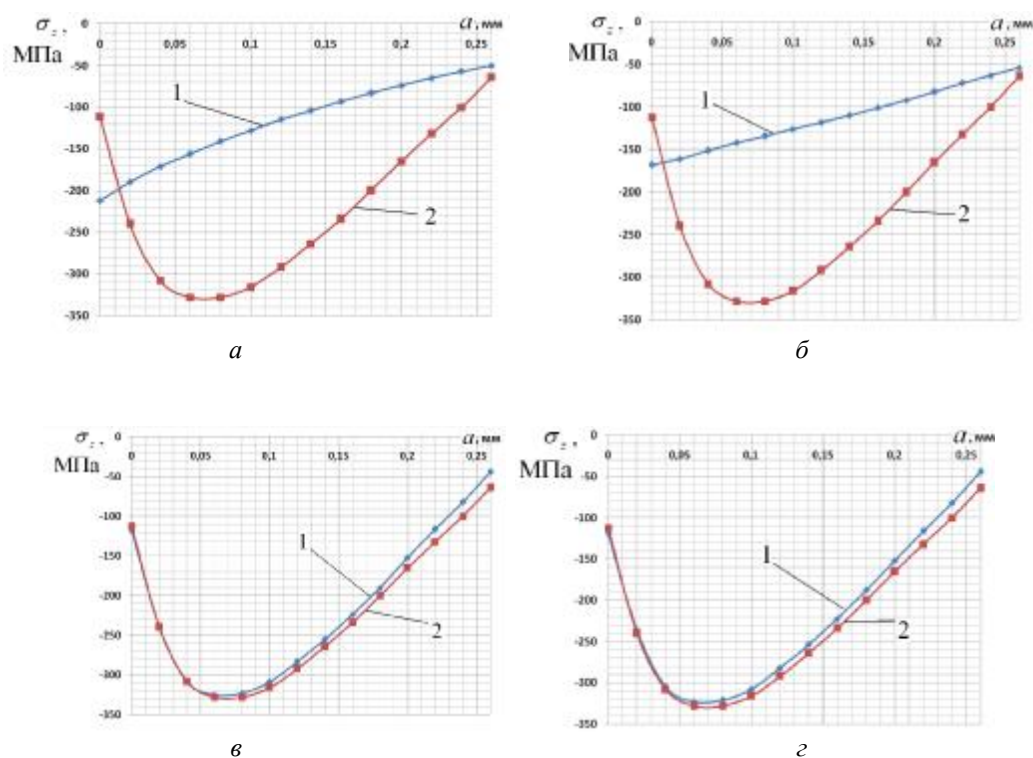


Рис. 4. Распределение осевых S_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения образцов с галтельными переходами (1) и гладких образцов (2):
 а – $r = 0,5$ мм; б – $r = 1$ мм; в – $r = 3$ мм; г – $r = 5$ мм

За счёт сжимающих остаточных напряжений приращение предела выносливости ΔS_{-1} этих образцов составило 45 МПа (табл. 1). При радиусе галтели $r = 1$ мм с частичным упрочнением поверхности галтельного перехода наибольшие сжимающие остаточные напряжения достигают меньшей, чем при $r = 0,5$ мм, величины (-167 МПа), что объясняется меньшей концентрацией остаточных напряжений [1]. В результате приращение предела выносливости ΔS_{-1} образцов при $r = 1$ мм составило только 25 МПа (табл. 1). Распределение остаточных напряжений в опасном сечении образцов при радиусе галтели $r = 3$ мм и $r = 5$ мм незначительно отличается от распределения остаточных напряжений гладких образцов.

Оценка влияния остаточных напряжений на приращение предела выносливости ΔS_{-1} упрочнённых образцов проводилась по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{S}_{ост}$ [5], вычисляемых в опасном сечении по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости:

$$\bar{S}_{ост} = \frac{2}{p} \cdot \int_0^1 \frac{s_z(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx, \quad (1)$$

где $s_z(x)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении образца; $x = a/t_{кр}$ – расстояние от поверхности опасного сечения образца до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в усталостном образце при напряжении, равном пределу выносливости.

Для обнаружения нераспространяющихся трещин усталости упрочнённые образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при больших напряжениях. На изломах этих образцов наблюдались нераспространяющиеся трещины (рис. 5), средняя глубина $t_{кр}$

которых составляла 0,26 мм. Это значение $t_{кр}$ использовалось при вычислении среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{S}_{ост}$ по формуле (1).

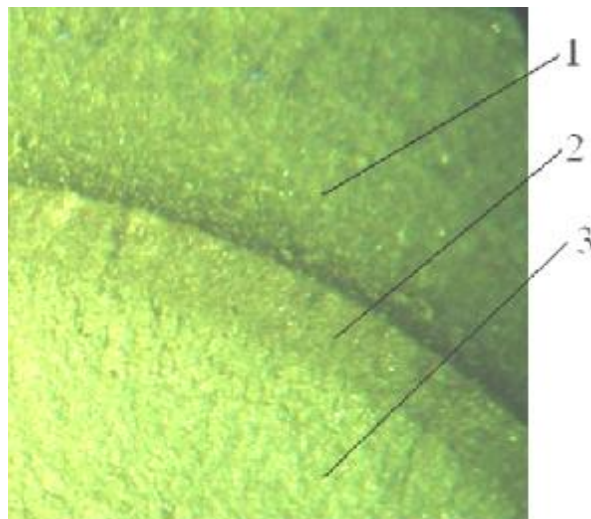


Рис. 5. Фрагмент излома упрочнённого ПДО образца с галтелью радиуса $r = 0,5$ мм:
1 – галтель, 2 – нераспространяющаяся трещина,
3 – зона долома

Приращение предела выносливости ΔS_{-1} упрочнённых образцов с галтелями определялось по зависимости

$$\Delta S_{-1} = \bar{y}_s \cdot |\bar{S}_{ост}|, \quad (2)$$

где \bar{y}_s – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости при изгибе по критерию $\bar{S}_{ост}$.

Результаты расчёта критерия $\bar{S}_{ост}$ и коэффициента \bar{y}_s приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты определения коэффициента \bar{y}_s

Радиус галтели, мм	ΔS_{-1} , МПа	$\bar{S}_{ост}$, МПа	\bar{y}_s
0,5	45	-106	0,425
1,0	25	-55,3	0,452
3,0	40	-182	0,220
5,0	37,5	-174	0,216

Для образцов с $r = 0,5$ мм и $r = 1$ мм коэффициент \bar{Y}_s незначительно отличается от значений \bar{Y}_s в случае образцов и деталей с аналогичной степенью концентрации напряжений [6, 7]. Для образцов с $r = 3$ мм и $r = 5$ мм значения коэффициента \bar{Y}_s существенно ниже, чем приведённые в работах [6, 7], что объясняется, очевидно, уменьшением сжимающих остаточных напряжений под действием переменных нагрузок при испытаниях на усталость [8]. Косвенным подтверждением этого объяснения является уменьшение микротвёрдости поверхности упрочнённых образцов с галтелями радиуса $r = 3$ мм и $r = 5$ мм после испытаний на усталость.

Выводы

1. Полученные результаты расчёта с использованием метода конечно-элементного моделирования имеют достаточно высокую сходимость с результатами испытаний на усталость по определению предела выносливости упрочнённых и неупрочнённых цилиндрических образцов с галтелями различного радиуса, а также хорошо согласовываются с результатами ранее проведённых исследований.

2. Апробированная в данном исследовании методика моделирования может быть использована при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с галтельными переходами.

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: СНЦ РАН, 2008. – 124 с.

2. 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. – Самара: СГАУ, 2011. №3(27). Ч.3. – С. 171-174.

3. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом снятия части поверхности [Текст] / С.И. Иванов, И.В. Григорьева // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1971. Вып. 48. – С. 179-183.

4. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок [Текст] / С.И. Иванов // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. Вып. 53. – С. 32-42.

5. 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.

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

7. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений [Текст] / В.А. Кирпичёв, А.С. Букатый, А.П. Филатов [и др.]. // Вестн. УГАТУ. – 2011. – Т.15. – №4 (№44). – С. 81-85.

8. Павлов, В.Ф. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность гладких образцов из стали 45 [Текст] / В.Ф. Павлов, М.А. Сагитов // Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1977. Вып. 3. – С. 88-92.

ANALYSIS OF THE RESULTS OF FATIGUE TESTS OF CYLINDRICAL SPECIMENS WITH FILLETS USING THE METHOD OF FINITE ELEMENT MODELING

© 2013 V. S. Vakulyuk

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

The results of fatigue tests of cylindrical specimens with fillets of different radii to determine their fatigue limit under bending are analyzed using the method of finite element modeling. The peculiarities of surface hardening technological process have been taken into account.

Fatigue tests, cylindrical specimen, bending, fillet, surface hardening, finite element modeling, stress concentration factor.

Информация об авторе

Вакулюк 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. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Vakulyuk Vladimir Stepanovich, candidate of technical science, associate professor of the department of strength of materials, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: residual stress mechanics.