

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СХЕМЫ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ С ГАЛТЕЛЯМИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОПАСНОМ СЕЧЕНИИ

В. С. ВАКУЛЮК<sup>1</sup>, В. П. САЗАНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>mail9999777@yandex.ru, <sup>2</sup>sazanow@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)» (СГАУ)

Поступила в редакцию 16.11.2013

**Аннотация.** 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.

**Ключевые слова:** испытания на усталость; изгиб; галтель; поверхностное упрочнение; конечно-элементное моделирование; цилиндрический образец; коэффициент концентрации напряжений.

Установление связи между остаточными напряжениями и сопротивлением усталости является одним из важных вопросов механики остаточных напряжений. Несомненно, 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. Выявление зависимости сопротивления усталости от остаточных напряжений для деталей с концентраторами наиболее актуально, так как разрушение этих деталей, как правило, происходит в местах нарушения призматической формы.

Решение вышеуказанной задачи подробно рассмотрено в работах [1] и [2], однако для практического определения приращения предела выносливости применительно к конкретному типу деталей необходимо решить ряд частных задач: определение положения опасного сечения в зоне концентратора напряжений, определение распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения. Кроме того, достаточно часто возникает необходимость в исследовании влияния на распределение остаточных напряжений различных конструктивных и технологических факторов.

В работе приведены результаты исследования по определению влияния схемы поверхно-

стного упрочнения деталей с галтелями на распределение осевых остаточных напряжений в опасном сечении галтельного перехода. Исследование выполнено на основании результатов испытаний на усталость по определению предела выносливости  $\sigma_{-1}$  при изгибе цилиндрических образцов с галтелями из стали 20. Образцы диаметром 12 мм в рабочей части с галтелями радиуса  $r = 0,5$  мм,  $r = 1$  мм,  $r = 3$  мм,  $r = 5$  мм (рис. 1) подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО) стальной дробью диаметром 1,5–2,5 мм в течение 10 минут при давлении воздуха 0,25 МПа.

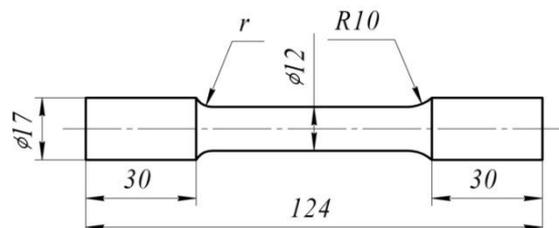


Рис. 1. Образец с галтелью для испытаний на усталость

Испытания образцов с галтелями на усталость при изгибе в случае симметричного цикла проводились на машине МУИ-6000, база испытаний –  $3 \cdot 10^6$  циклов нагружения. Результаты испытаний на усталость по определению предела выносливости  $\sigma_{-1}$  представлены в табл. 1. Из данных табл. 1 можно видеть, что пневмодробе-

струйная обработка образцов приводит к повышению предела выносливости, причем наибольшее приращение предела выносливости наблюдается при радиусе галтели  $r = 0,5$  мм. В образцах, прошедших базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, средняя глубина  $t_{кр}$  которых составляла 0,26 мм (рис. 2). Эта глубина трещины соответствует данным работы [2], в которой установлена зависимость критической глубины нераспространяющейся трещины усталости от размеров опасного сечения поверхностно упрочнённой детали.

Таблица 1  
Результаты испытаний образцов на усталость

Радиус галтели $r$ , мм	Предел выносливости $\sigma_{-1}$ , МПа	
	неупрочнённые образцы	упрочнённые образцы
0,5	127,5	172,5
1	162,5	187,5
3	185	225
5	225	262,5

Для определения коэффициента концентрации напряжений при изгибе образцов и положения опасного сечения были выполнены расчёты методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса NASTRAN/PATRAN.

Разработанные для четырех радиусов галтелей объёмные конечно-элементные модели образцов представляют собой симметричные при изгибе части, отсечённые проходящей через продольную ось образца плоскостью, с наложением соответствующих граничных условий по перемещениям. При моделировании использован объёмный конечный элемент в виде 10-узлового тетраэдра.

По результатам расчётов были построены графики зависимостей отношения напряжений на поверхности галтели  $\sigma_{гал}$  к номинальным напряжениям  $\sigma_{ном}$  в наименьшем сечении образца при изгибе от угла  $\theta$ , определяющего положение точки на поверхности галтельного перехода (рис. 3).

Угол  $\theta$  отсчитывался от точки перехода поверхности малого цилиндра в поверхность галтели в сторону поверхности большого цилиндра.

По результатам проведённых расчётов были определены значения теоретического коэффициента концентрации напряжений  $\alpha_{\sigma}$  при изгибе

по формуле  $\alpha_{\sigma} = \sigma_{гал}^{наиб} / \sigma_{ном}$ , которые представлены в табл. 2. В этой же таблице содержатся значения  $\alpha_{\sigma}$ , приведённые в работах [3, 4]. Можно видеть, что расхождение между значениями коэффициентов  $\alpha_{\sigma}$ , вычисленными в настоящем исследовании и приведёнными в работах [3, 4] не превышает одного процента. Это сравнение указывает на достаточно высокую точность проведённых расчётов.

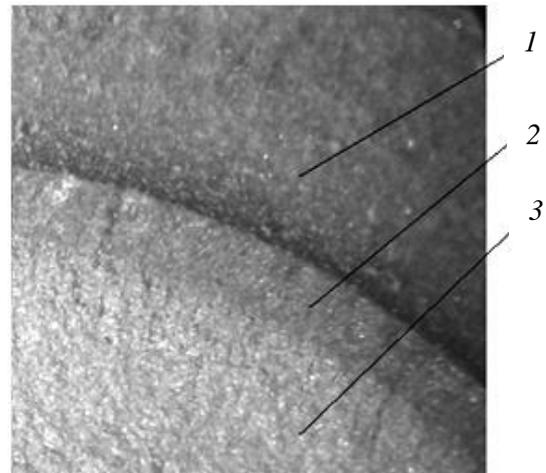


Рис. 2. Фрагмент излома упрочнённого ПДО образца с галтелью радиуса  $r = 0,5$  мм: 1 – галтель, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

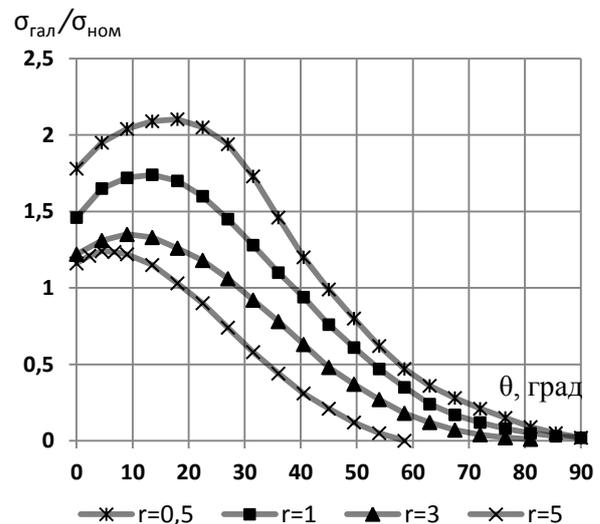


Рис. 3. Графики зависимостей отношения напряжений при изгибе на поверхности галтели к номинальным для радиусов  $r = 0,5, 1, 3, 5$  мм

В табл. 2 представлены также опытные и расчётные значения угла  $\theta_{оп}$ , который определя-

ет положение опасного сечения детали с галтельным переходом. Из данных табл. 2 следует, что опытные и расчётные значения  $\theta_{оп}$  различаются незначительно, то есть проведенные эксперименты подтверждают результаты расчетов.

Таблица 2  
Результаты определения коэффициента концентрации напряжений

Радиус галтели $r$ , мм	Коэффициент концентрации $\alpha_\sigma$		Расхождение, %	Угол $\theta_{оп}$ , град.	
	расчёт	данные работ [3, 4]		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

На практике конструктивные и технологические особенности определяют ту или иную схему поверхностного упрочнения детали. В частности, анализ технологического процесса ПДО показал, что размеры 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.

Для определения влияния схемы упрочнения на распределение остаточных напряжений в опасном сечении был выполнен необходимый объём расчётов. Расчёты проведены на конечно-элементных моделях с использованием комплекса NASTRAN/PATRAN моделированием упрочнённого слоя по методу термоупругости [5].

В качестве исходных были использованы данные о распределении остаточных напряжений по толщине упрочненного слоя, полученные для гладких образцов. Рассмотрены следующие схемы упрочнения:

- упрочнение цилиндрических поверхностей диаметром 17 мм (S1);
- упрочнение цилиндрической поверхности диаметром 12 мм (S2);
- упрочнение поверхности галтели (S3);
- упрочнение кольцевой поверхности в месте перехода галтели к диаметру 17 мм (S4 для  $r = 0,5$  мм и  $r = 1$  мм);
- полное упрочнение всех поверхностей.

По результатам расчётов были получены распределения осевых  $\sigma_z$  остаточных напряже-

ний по толщине поверхностно слоя  $a$  опасного сечения образцов с галтелями, которые приведены на рис. 4–7.

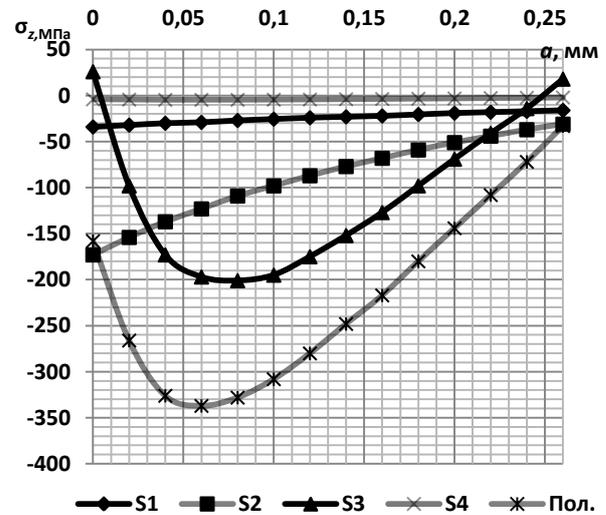


Рис. 4. Распределение  $\sigma_z$  осевых остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$  опасного сечения образцов с галтелями  $r = 0,5$  мм

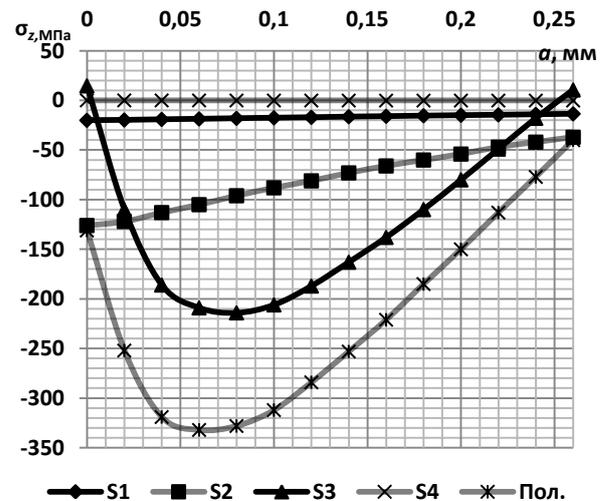


Рис. 5. Распределение  $\sigma_z$  осевых остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$  опасного сечения образцов с галтелями  $r = 1$  мм

Из рис. 4–7 следует, что упрочнение поверхности большого цилиндра диаметром 17 мм и кольцевой поверхности (при  $r = 0,5$  мм и  $r = 1$  мм) практически не оказывают влияния на распределение остаточных напряжений в опасном сечении образцов с галтелями. Наибольшее влияние на величину и характер распределения сжимающих остаточных напряжений в опасном сечении галтельного перехода оказывает упрочнение поверхности галтели и поверхности мало-

го цилиндра диаметром 12 мм, прилегающей к галтели. С увеличением радиуса галтели возрастает роль упрочнения ее поверхности по отношению к упрочнению поверхности малого цилиндра.

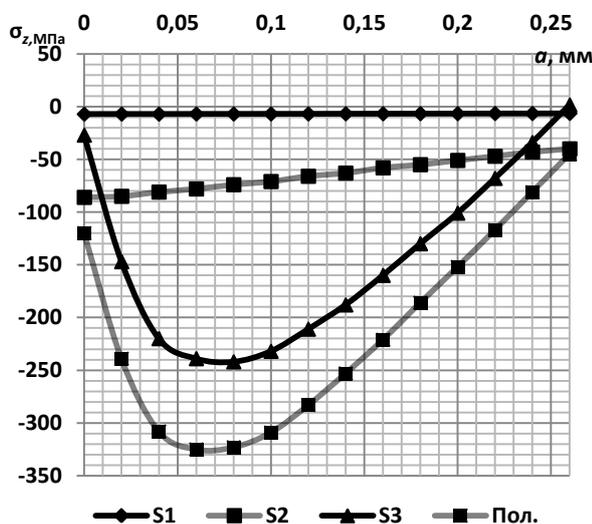


Рис. 6. Распределение  $\sigma_z$  осевых остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$  опасного сечения образцов с галтелями  $r = 3$  мм

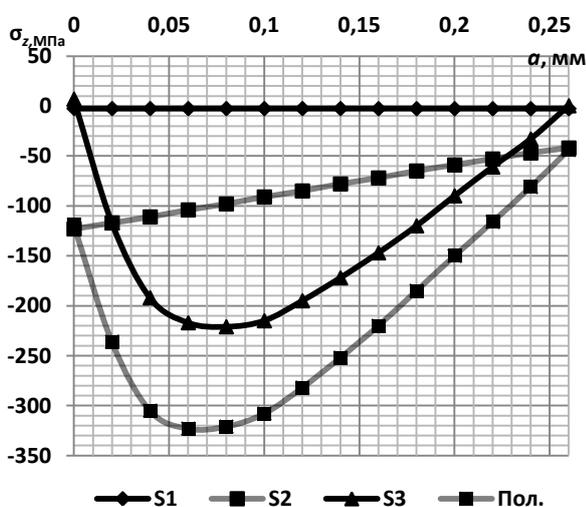


Рис. 7. Распределение  $\sigma_z$  осевых остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$  опасного сечения образцов с галтелями  $r = 5$  мм

Данные рис. 4 и 5 объясняют результаты испытаний на усталость образцов с галтелями при  $r = 0,5$  мм и  $r = 1$  мм. Бóльшее приращение предела выносливости образцов с  $r = 0,5$  мм при неупрочнённой поверхности галтели по сравнению с образцами при  $r = 1$  мм при частично упрочнённой поверхности галтели объясняется бóльшей величиной и более полным распреде-

лением сжимающих остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости.

## ВЫВОДЫ

1. Упрочнение поверхностей большого цилиндра образцов с галтелями оказывает незначительное влияние на распределение осевых остаточных напряжений в опасном сечении галтельного перехода, и это влияние ослабевает по мере увеличения радиуса галтели.

2. Упрочнение кольцевой поверхности (при  $r = 0,5$  мм и  $r = 1$  мм) практически не влияет на распределение осевых остаточных напряжений в области опасного сечения образцов с галтелями.

3. Распределение осевых остаточных напряжений в опасном сечении галтельного перехода определяется в основном упрочнением поверхности малого цилиндра и поверхности галтели, причем с увеличением радиуса галтели возрастает роль упрочнения ее поверхности по отношению к упрочнению поверхности малого цилиндра.

4. Величина осевых сжимающих остаточных напряжений на поверхности опасного сечения галтели определяется упрочнением поверхности малого цилиндра, так как составляющая от упрочнения поверхности галтели близка к нулевому значению.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов В. Ф., Столяров А. К., Вакулюк В. С., Кирпичёв В. А. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. 124 с. [V. F. Pavlov, A. K. Stolyarov, V. S. Vakulyuk, V. A. Kirpichyov, *Residual stresses in details with stresses concentrators calculation on initial deformations*. Samara: Izdatelstvo SNC RAN, 2008. ]

2. Павлов В. Ф., Кирпичёв В. А., Вакулюк В. С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2012. 125 с. [V. F. Pavlov, V. A. Kirpichyov, V. S. Vakulyuk, *Fatigue strength forecasting of surface hardened parts on residual stresses*. Samara: Izdatelstvo SNC RAN, 2012. ]

3. Петерсон Р. Е. Коэффициенты концентрации напряжений. М.: Мир, 1977. 304 с. [R. E. Peterson, *Stresses concentration coefficients*. Moscow: Mir, 1977. ]

4. Савин Г. Н., Тутьчий В. И. Справочник по концентрации напряжений. Киев: Вища школа, 1976. 412 с. [G. N. Savin, V. I. Tulchiy, *Hand book of stresses concentration*. Kiev: Vishcha shkola, 1976. ]

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 дефор-

мировании // Вестник СГАУ. 2011. № 3 (27). Ч. 3. С. 171–174. [V. P. Sazanov, A. V. Chirkov, V. A. Samoylov, Yu. S. Larionova, “Residual stresses redistribution modeling in hardened cylindrical specimens under outstripping superficial plastic deforming,” (in Russian), *Vestnik SGAU*, no. 3 (27), part 3, pp. 171-174, 2011. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**ВАКУЛЮК Владимир Степанович**, доц. каф. сопротивления материалов. Дипл. инж.-мех. (КуАИ, 1974). Канд. техн. наук (МИИГА, 1983). Иссл. в обл. механики остаточных напряжений.

**САЗАНОВ Вячеслав Петрович**, доц. каф. сопротивления материалов. Дипл. инж.-мех. (КуАИ, 1978). Канд. техн. наук (СГАУ, 2010). Иссл. в обл. механики остаточных напряжений.

#### METADATA

**Title:** Surface hardening scheme influence on residual stresses distribution in the dangerous section of specimens with the fillets analysis

**Authors:** V. S. Vakulyuk<sup>1</sup>, V. P. Sazanov<sup>2</sup>

**Affiliation:** Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University) (SSAU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> mail9999777@yandex.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** *Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 1 (62), pp. 48-52, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The fatigue tests of cylindrical specimens with fillets of various radiuses for endurance limits under the bending determination results have been examined by Finite Elements modeling method. The peculiarities of surface hardening technological process have been taken into account.

**Key words:** fatigue tests; bending; fillet; surface hardening; Finite Elements modeling; cylindrical specimen; stresses concentration coefficient.

#### About authors:

**VAKULYUK, Vladimir Stepanovich**, Associate professor of Strength of Materials Department. Dipl. mechanical engineer (Kuibyshev Aviation Institute, 1974). Cand. of Tech. Sci. (MIIGA, 1983).

**SAZANOV, Vyacheslav Petrovich**, Associate professor of Strength of Materials Department. Dipl. mechanical engineer (Kuibyshev Aviation Institute, 1978). Cand. of Tech. Sci. (SSAU, 1983).