

УДК 621.787:539.319

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УПРОЧНЕНИЯ ДРОБЬЮ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ 30ХГСА ПО ПЕРВОНАЧАЛЬНЫМ ДЕФОРМАЦИЯМ ОБРАЗЦА-СВИДЕТЕЛЯ

© 2014 В.П. Сазанов, В.К. Шадрин, А.П. Морозов, Н.Н. Микушев, П.Е. Киселёв

Самарский государственный аэрокосмический университет

Поступила в редакцию 21.11.2014

В исследовании установлена возможность оценки влияния упрочнения дробью на предел выносливости цилиндрических образцов из стали 30ХГСА с круговыми надрезами полукруглого профиля по первоначальным деформациям образца-свидетеля.

Ключевые слова: *гидродробеструйная обработка, образец-свидетель, остаточные напряжения, первоначальные деформации, предел выносливости*

При обработке деталей различными методами поверхностного пластического деформирования (ППД) с целью контроля технологического процесса упрочнения широко применяются образцы-свидетели. Эти образцы определённой формы и размеров проходят весь технологический цикл обработки вместе со штатной деталью. Обрабатываемая деталь, как правило, является дорогостоящим и трудоёмким в изготовлении изделием, поэтому такой способ неразрушающего контроля качества упрочнения перед другими способами имеет неоспоримые преимущества, в первую очередь, с экономической точки зрения, особенно в условиях серийного производства. В основе обоснования использования образцов-свидетелей лежит предположение о том, что обрабатываемые совместно деталь и образец-свидетель при ППД получают одинаковые первоначальные деформации.

Для проверки возможности применения образцов-свидетелей при упрочнении дробью были проведены исследования результатов испытаний на усталость и экспериментального определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя цилиндрических образцов (рис. 1) из стали 30ХГСА диаметром  $D=10$  мм,  $D=15$  мм,  $D/d=15/5$  мм/мм и  $D/d=15/10$  мм/мм, приведенных в работе [1]. Гладкие образцы и образцы-свидетели подвергались гидродробеструйной обработке (ГДО) в

течение 8 минут дробью диаметром 2 мм при давлении масла 0,28 МПа. В качестве образцов-свидетелей использовались втулки с наружным диаметром 51,5 мм и внутренним 45 мм, которые применяются для определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя методом колец и полосок [2]. На рис. 2 приведена эпюра осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине  $a$  поверхностного слоя в образце-свидетеле после ГДО, обработанном одновременно с гладкими образцами.

Расчётная часть исследований выполнена методом конечно-элементного моделирования с использованием комплекса PATRAN / NASTRAN. Конечно-элементные модели в осесимметричном варианте представляли собой четверть сечения детали с наложением соответствующих граничных условий. Для моделирования применялся плоский треугольный элемент типа 2D-Solid с шестью узлами. Моделирование остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя гладких образцов осуществлялось методом термоупругости [3-8]. При проведении расчётов были приняты следующие допущения:

- все гладкие образцы и втулки (образцы-свидетели) при упрочнении получали одинаковые первоначальные деформации;
- первоначальные деформации являлись изотропными;
- деформации сдвига малы и при определении первоначальных деформаций они не учитывались.

Расчёты по определению остаточных напряжений в гладких образцах проводились в следующей последовательности:

- определение первоначальных деформаций в образце-свидетеле (втулка диаметром 51,5/45 мм/мм);

*Сазанов Вячеслав Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов. E-mail: sopromat@ssau.ru*

*Шадрин Валентин Карпович, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов*

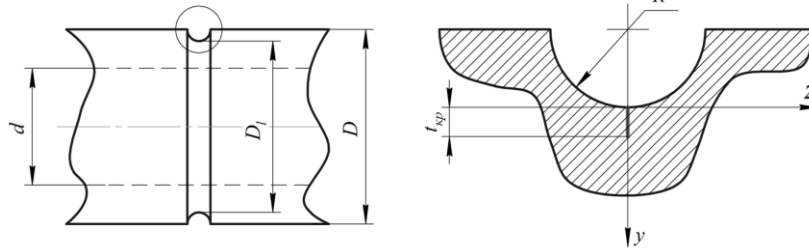
*Морозов Андрей Павлович, аспирант*

*Микушев Николай Николаевич, аспирант*

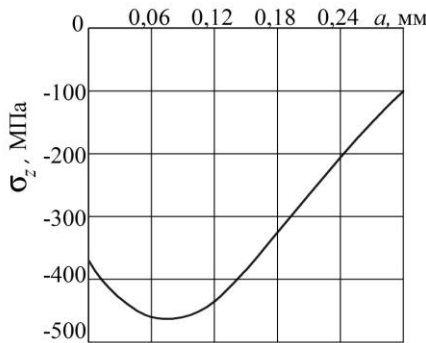
*Киселёв Павел Евгеньевич, студент*

– расчёт распределения остаточных напряжений в гладких образцах по полученным значениям первоначальных деформаций образца-свидетеля;

– сравнение расчётных распределений остаточных напряжений в гладких образцах с их экспериментальными распределениями, приведёнными в работе [1].



**Рис. 1.** Цилиндрический образец с надрезом и нераспространяющаяся трещина усталости

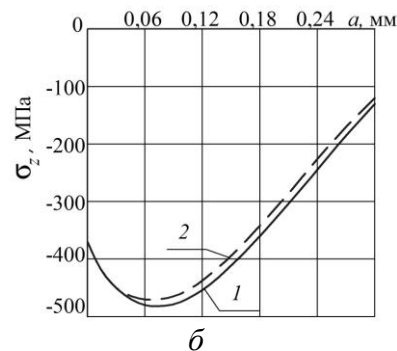
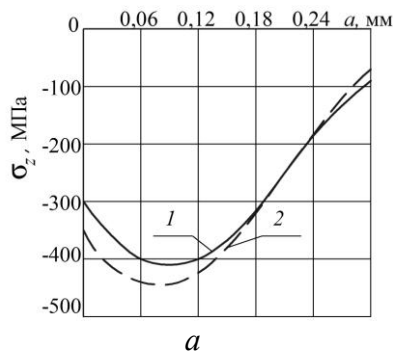


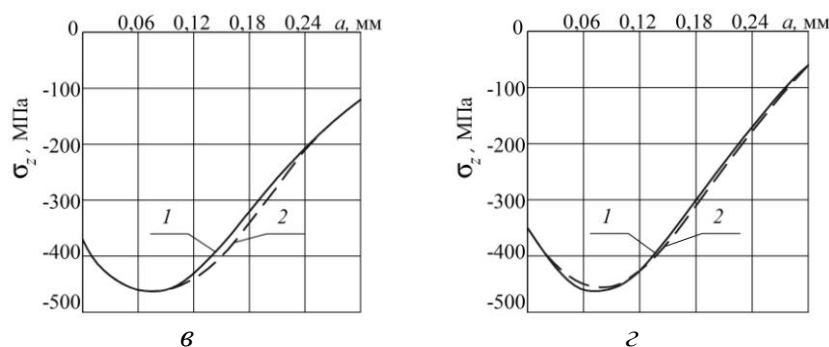
**Рис. 2.** Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений в образце-свидетеле (штулка диаметром 51,5x45 мм) после ГДО

При определении первоначальных деформаций в качестве исходных данных использовалось экспериментальное распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя образца-свидетеля (штулки), приведенное на рис. 2. Установлено, что при принятых допущениях для получения совпадения распределения вычисленных по первоначальным деформациям и экспериментальных значений осевых остаточных напряжений в образце-свидетеле достаточно проведения трёх итераций.

Следующий этап расчётов выполнялся на конечно-элементных моделях исследуемых гладких образцов диаметром  $D=10$  мм,  $D=15$  мм,  $D/d=15/5$  мм/мм и  $D/d=15/10$  мм/мм по первоначальным деформациям образца-свидетеля. При оценке приращения предела выносливости определяющими в соответствии с третьей теорией предельных напряжённых состояний являются осевые  $\sigma_z$  остаточные напряжения [1, 9, 10], поэтому сравнение расчётных и экспериментальных распределений остаточных напряжений для исследуемых образцов было выполнено по осевой компоненте.

На рис. 3 представлены экспериментальные [1] и расчётные распределения осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине  $a$  поверхностного слоя гладких образцов. Из приведенных на рис. 3 данных видно, что максимальное расхождение между расчётными и экспериментальными значениями наибольших сжимающих остаточных напряжений составляет 10% при  $D=10$  мм, в остальных случаях расхождение не превышает 2%. Поэтому представляется возможным, используя первоначальные деформации образца-свидетеля, расчётным методом определить остаточные напряжения в детали, упрочнённой одновременно с этим образцом.



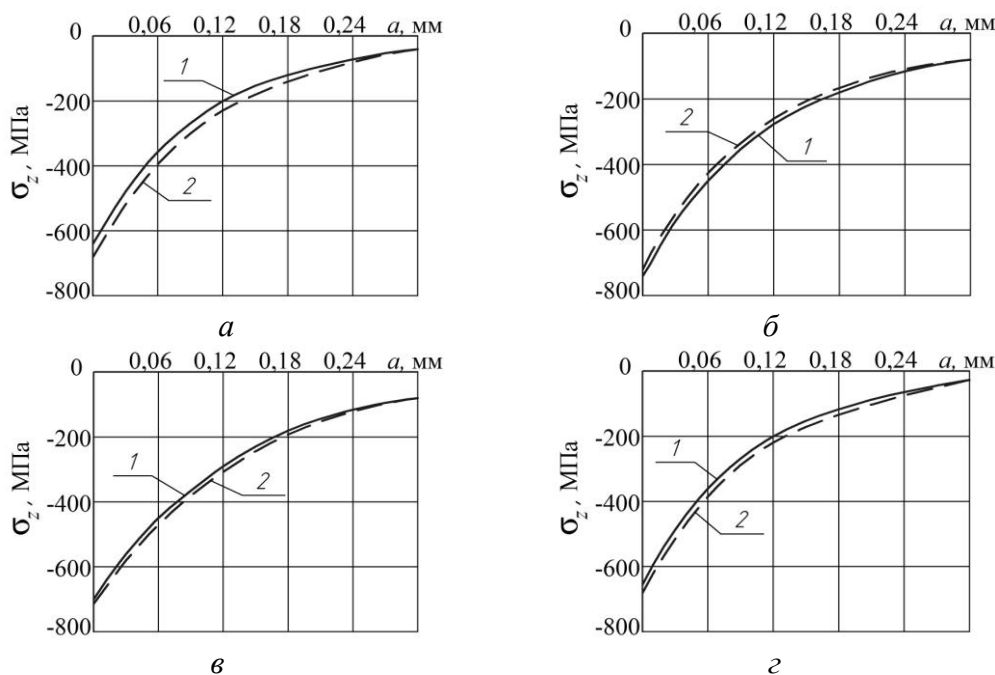


**Рис. 3.** Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений после ГДО, определённых экспериментально (1) и расчётом (2) в гладких образцах диаметром:  $a - D=10$  мм,  $b - D=15$  мм,  $z - D/d=15/5$ ,  $z - D=D/d=15/10$

Полученные расчётные распределения остаточных напряжений после ГДО в гладких образцах использовались для расчёта распределения остаточных напряжений в образцах с круговыми надрезами полукруглого профиля радиуса  $R=0,3$  мм, нанесёнными на гладкие образцы после упрочнения ГДО, то есть после опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД). Остаточные напряжения в образцах с надрезами вычислялись двумя методами: аналитическим [11] и численным с использованием программного комплекса PATRAN / NASTRAN [5]. Следует отметить, что остаточные

напряжения, определённые двумя методами, имели хорошее совпадение.

На рис. 4 приведены экспериментальные [1] и расчётные распределения осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине  $a$  поверхностного слоя опасного сечения образцов с надрезами  $R=0,3$  мм после ОППД. Можно видеть, что распределения остаточных напряжений, полученные по экспериментальным и расчётным эпюрам гладких образцов, отличаются по наибольшим значениям не более, чем на 6% (рис. 4,  $a - D=10$  мм).



**Рис. 4.** Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений в образцах с надрезом  $R=0,3$  мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным:  $a - D=10$  мм,  $b - D=15$  мм,  $v - D/d=15/5$ ,  $z - D = D/d=15/10$

Оценка влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости образцов с надрезами при изгибе в случае симметричного цикла  $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$  производилась по кри-

терию среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{осм}$  [1, 9]

$$(\Delta\sigma_{-1})_{расч} = \bar{\psi}_\sigma |\bar{\sigma}_{осм}|, \quad (1)$$

где  $\bar{\psi}_\sigma$  – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию  $\bar{\sigma}_{ост}$ ;

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi ; \quad (2)$$

$\sigma_z(\xi)$  – осевые остаточные напряжения в опасном сечении образца (детали) с концентратором по толщине поверхностного слоя  $a$ ;  $\xi = a/t_{кр}$  – расстояние от поверхности опасного сечения образца (детали) до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{кр}$ ;  $t_{кр}$  – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в упрочнённом образце (детали) с концентратором напряжений при работе на пределе выносливости.

Критическая глубина  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости, приведенная в табл. 1, определялась по зависимости, установленной на основании многочисленных экспериментов в работах [1, 12]:

$$t_{кр} = 0,0216D_1 \left[ 1 - 0,04 \left( \frac{d}{D_1} \right)^2 - 0,54 \left( \frac{d}{D_1} \right)^3 \right], \quad (3)$$

где  $D_1$  – диаметр опасного сечения образца (детали) с концентратором напряжений,  $d$  – диаметр отверстия.

Значения критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  вычислялись по формуле (2) по толщине поверхностного слоя опасного сечения образцов, равной  $t_{кр}$ , с использованием расчётных распределений остаточных напряжений, приведённых на рис. 4, и содержащихся в табл. 1. Коэффициент  $\bar{\psi}_\sigma$  влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию  $\bar{\sigma}_{ост}$  вычислялся по зависимости, установленной в работе [13]

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,612 - 0,081\alpha_\sigma, \quad (4)$$

где  $\alpha_\sigma$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений, который определялся по графикам справочника [14] и представлен в табл. 1.

**Таблица 1.** Расчётные и опытные значения пределов выносливости образцов с надрезами

$D$ , мм	$d$ , мм	$D_1$ , мм	$\alpha_\sigma$	$\bar{\psi}_\sigma$	$t_{кр}$ , мм	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ , МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{он}$ , МПа	Расхождение, %
10	0	9,4	2,7	0,393	0,203	-240	94	90	5
15	0	14,4	2,8	0,385	0,311	-196	75,5	77,5	3
15	5	14,4	2,8	0,385	0,303	-211	81,3	77,5	5
15	10	14,4	2,9	0,377	0,249	-218	82,1	80	3

Далее по формуле (1) вычислялись расчётные значения приращений предела выносливости  $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$  упрочнённых гидродробеструйной обработкой образцов с надрезами (табл. 1) и сравнивались с опытными значениями  $(\Delta\sigma_{-1})_{он}$ , приведенными в работе [1]. Из табл. 1 видно, что расхождение между расчётными и опытными значениями приращения предела выносливости не превышает 5%, поэтому, используя результаты определения остаточных напряжений в образцах-свидетелях, представляется возможным прогнозировать предел выносливости поверхностно упрочнённых деталей в условиях концентрации напряжений с приемлемой для многоциклового усталости точностью.

**Выводы:**

1. Апробированный в настоящем исследовании метод расчёта остаточных напряжений в цилиндрических образцах из стали 30ХГСА после ГДО первоначальным деформациям образца-свидетеля показал, что расхождение между расчётными и опытными значениями остаточных

напряжений в гладких образцах не превышает 10%, в образцах с надрезами – 6%.

2. При оценке влияния упрочнения ГДО на многоцикловую усталость при изгибе исследованных образцов из стали 30ХГСА с надрезами установлено, что использование вычисленных по первоначальным деформациям образца-свидетеля распределений остаточных напряжений позволяет прогнозировать приращение предела выносливости с точностью до 5%.

3. Для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённой детали с концентратором напряжений вначале необходимо определить первоначальные деформации образца-свидетеля, обработанного одновременно с упрочняемой деталью. По первоначальным деформациям образца-свидетеля производится расчёт остаточных напряжений в опасном сечении упрочнённой детали. Критическая глубина  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости вычисляется по формуле (3), критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  – по

формуле (2), коэффициент  $\bar{\Psi}_\sigma$  влияния упрочнения на предел выносливости – по зависимости (4). После определения  $t_{кр}$ ,  $\bar{\sigma}_{ост}$  и  $\bar{\Psi}_\sigma$  по формуле (1) рассчитывается приращение предела выносливости поверхностно упрочнённой детали с концентратором напряжений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям: монография / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. 125 с.
2. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. Вып. 53. С. 32-42.
3. Биргер, И.А. Остаточные напряжения: монография. – М.: Машгиз, 1963. 232 с.
4. Стружанов, В.В. Об остаточных напряжениях после прокатки и расслоении двухслойных полос // Вестник СамГТУ. Сер.: физ.-мат. науки, 2010. №5(21). С. 55-63.
5. Сазанов, В.П. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов, Ю.С. Ларионова // Вестник СГАУ. 2011. №3(27). Ч. 3. С. 171-174.
6. Павлов, В.Ф. Расчёт остаточных в деталях с концентраторами напряжений по первоначальному деформациям: монография / В.Ф. Павлов, А.К. Столяров, В.С. Вакулюк, В.А. Кирпичёв. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. 124 с.
7. Вакулюк, В.С. Исследование влияния толщины упрочнённого слоя на остаточные напряжения во впадине концентратора методом первоначальных деформаций // Вестник СамГТУ. Сер.: физ.-мат. науки. 2010. №1 (20). С. 222-225.
8. Саушкин, М.Н. Метод расчёта полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учётом анизотропии поверхностного упрочнения / М.Н. Саушкин, В.П. Радченко, В.Ф. Павлов // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52, №2. С. 173-182.
9. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. 1986. №8. С. 29-32.
10. Радченко, В.П. Методика расчёта предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурных выдержках в условиях ползучести / В.П. Радченко, О.С. Афанасьева // Вестник СамГТУ. Сер.: физ.-мат. науки. 2009. №2 (19). С. 264-268.
11. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: Межвузовский сборник. – Куйбышев: КуАИ, 1974. Вып. 3. С. 88-95.
12. Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали // Известия вузов. Машиностроение. 1988. №12. С. 37-40.
13. Кирпичёв, В.А. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений / В.А. Кирпичёв, А.П. Филатов, О.В. Каранаева и др. // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАНУ, 2011. С. 678-685.
14. Петерсон, Р.Е. Коэффициенты концентрации напряжений: монография. – М.: Мир, 1977. 304 с.

## ESTIMATION THE SHOT BLASTING INFLUENCE ON THE PARTS MADE FROM STEEL 30XГСА ON ENDURANCE LIMIT BY THE INITIAL DEFORMATIONS OF THE REFERENCE SPECIMEN

© 2014 V.P. Sazanov, V.K. Shadrin, A.P. Morozov, N.N. Mikushev, P.E. Kiselyov

Samara State Aerospace University

The possibility of hydroblasting influence on cylindrical parts made from steel 30XГСА with circular cuts endurance limit estimation using initial deformations of reference specimen has been established.

Key words: hydroblasting, reference specimen, residual stresses, initial deformations, endurance limit

Vyacheslav Sazanov, Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor at the Materials Resistance Department.

E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru)

Valentin Shadrin, Candidate of Technical Sciences, Associate  
Professor at the Materials Resistance Department

Andrey Morozov, Post-graduate Student

Nikolay Mikushev, Post-graduate Student

Pavel Kiselyov, Student