

УДК 621.787:539.319

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГИДРОДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ НА МНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВА Д16Т ПО ПЕРВОНАЧАЛЬНЫМ ДЕФОРМАЦИЯМ ОБРАЗЦА-СВИДЕТЕЛЯ

В.С. Вакулюк, В.П. Сазанов, В.Ф. Павлов, В.К. Шадрин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)
Россия, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34

E-mail: sopromat@ssau.ru

Изучена возможность оценки влияния опережающего поверхностного пластического деформирования гидродробеструйной обработкой на предел выносливости цилиндрических деталей различного диаметра (10-40 мм) из сплава Д16Т с круговыми надрезами полукруглого профиля по результатам определения остаточных напряжений (первоначальных деформаций) образца-свидетеля. Установлено, что наибольшие сжимающие остаточные напряжения в гладких деталях, полученные расчетом, отличаются от экспериментально определенных не более чем на 7 %, а в деталях с надрезами – на 8 %. С использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений расчетным методом определены приращения предела выносливости деталей с надрезами за счет поверхностного упрочнения. Расхождение между экспериментальными и расчетными значениями приращения предела выносливости упрочненных деталей с концентраторами не превышает 17 %.

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

Для контроля технологического процесса упрочнения деталей различными методами поверхностного пластического деформирования (ППД) широко применяются образцы-свидетели. Такие образцы, имеющие определенную форму и размеры, проходят весь технологический цикл обработки вместе со штатной деталью. Как правило, обрабатываемая деталь является дорогостоящим и трудоемким в изготовлении изделием и поэтому такой способ неразрушающего контроля качества упрочнения имеет перед другими способами неоспоримые преимущества в первую очередь с экономической точки зрения, особенно в условиях серийного производства.

В основе использования образцов-свидетелей лежит предположение о том, что обрабатываемые совместно деталь и образец-свидетель при ППД получают одинаковые первоначальные деформации. Были проведены исследования результатов испытаний на усталость и результатов экспериментального определе-

Владимир Степанович Вакулюк (к.т.н.), доцент кафедры «Сопротивление материалов».

Вячеслав Петрович Сазанов (к.т.н.), доцент кафедры «Сопротивление материалов».

Валентин Фёдорович Павлов (д.т.н., проф.), зав. кафедрой «Сопротивление материалов».

Валентин Карпович Шадрин (к.т.н.), доцент кафедры «Сопротивление материалов».

ния остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя цилиндрических деталей из алюминиевого сплава Д16Т диаметром $D = 10$ мм, $D = 15$ мм, $D = 25$ мм и $D = 40$ мм, приведенных в работе [1].

Гладкие детали 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 упрочненного поверхностного слоя методом колец и полосок [2]. На рис. 1 приведена эпюра осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a в образце-свидетеле после ГДО, обработанном одновременно с гладкими деталями различного диаметра.

Расчетная 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.

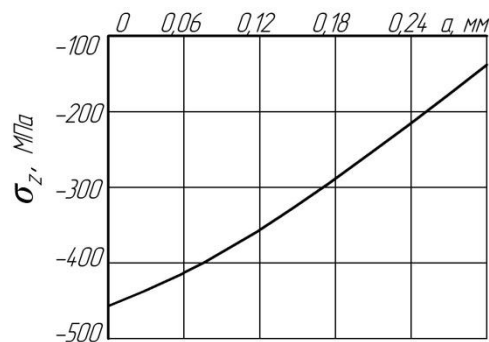


Рис. 1. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образце-свидетеле (втулка диаметром 51,5×45 мм) после ГДО

Моделирование остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя осуществлялось методом термоупругости [3-8]. При проведении расчетов были приняты следующие допущения:

- все детали 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.

Расчеты проводились в следующей последовательности:

- определение первоначальных деформаций в образце-свидетеле (втулка диаметром 51,5×45 мм);
- расчет распределения остаточных напряжений в гладких деталях по полученным значениям первоначальных деформаций образца-свидетеля;
- сравнение расчетных распределений остаточных напряжений в деталях с их экспериментальными распределениями.

При определении первоначальных деформаций в качестве исходных данных использовалось экспериментальное распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя образца-свидетеля

(втулки), приведенное на рис. 1. Установлено, что при принятых допущениях для получения совпадения распределения расчетных по первоначальным деформациям и экспериментальных значений осевых остаточных напряжений в образце-свидетеле достаточно проведения трех итераций.

Следующий этап расчетов выполнялся на конечно-элементных моделях исследуемых гладких деталей диаметром $D = 10$ мм, $D = 15$ мм, $D = 25$ мм и $D = 40$ мм по первоначальным деформациям образца-свидетеля. При оценке приращения предела выносливости определяющими являются осевые остаточные напряжения [1, 9, 10], поэтому сравнение расчетных и экспериментальных распределений остаточных напряжений для исследуемых деталей было выполнено по осевой компоненте.

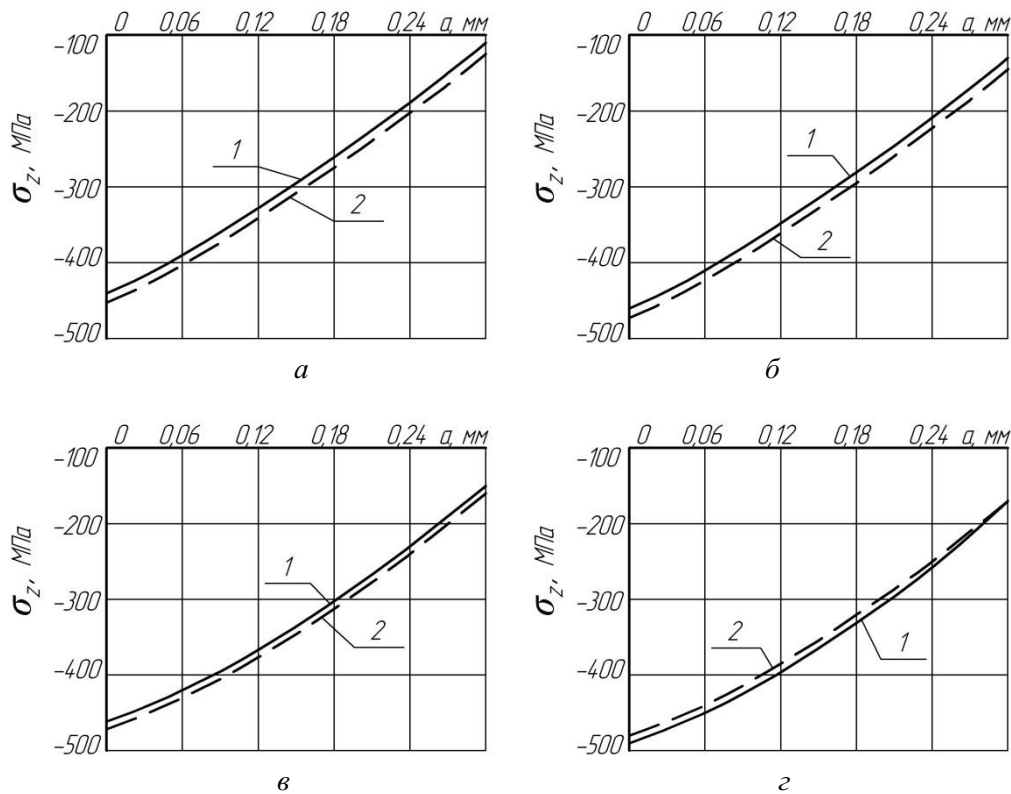


Рис. 2. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений после ГДО, определенных экспериментально (1) и расчетом (2) в гладких деталях диаметром: $a - D = 10$ мм, $б - D = 15$ мм, $в - D = 25$ мм, $г - D = 40$ мм

На рис. 2 представлены экспериментальные [1] и расчетные эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a поверхностного слоя гладких деталей. Можно видеть, что расчетные значения остаточных напряжений незначительно (до 7 %) отличаются от экспериментальных. Поэтому представляется возможным, используя первоначальные деформации образца-свидетеля, расчетным методом определить остаточные напряжения в детали, упрочненной одновременно с этим образцом.

Полученные расчетом распределения остаточных напряжений после гидродробеструйной обработки в гладких деталях использовались для расчета распре-

деления остаточных напряжений в деталях с круговым надрезом полукруглого профиля радиуса $R = 0,3$ мм, нанесенным на гладкую деталь после упрочнения ГДО, то есть после опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД). Остаточные напряжения в деталях с надрезом рассчитывались двумя методами: аналитическим [11] и численным с использованием программного комплекса PATRAN/NASTRAN [5]. Следует отметить, что остаточные напряжения, определенные двумя методами, имели хорошее совпадение.

На рис. 3 приведены экспериментальные [1] и расчетные эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a поверхностного слоя опасного сечения деталей с надрезами после ОППД. Можно видеть, что распределения остаточных напряжений, полученные по экспериментальным и расчетным эпюрам гладких деталей, отличаются по наибольшим значениям не более 8 % (рис. 3, $a - D = 10$ мм).

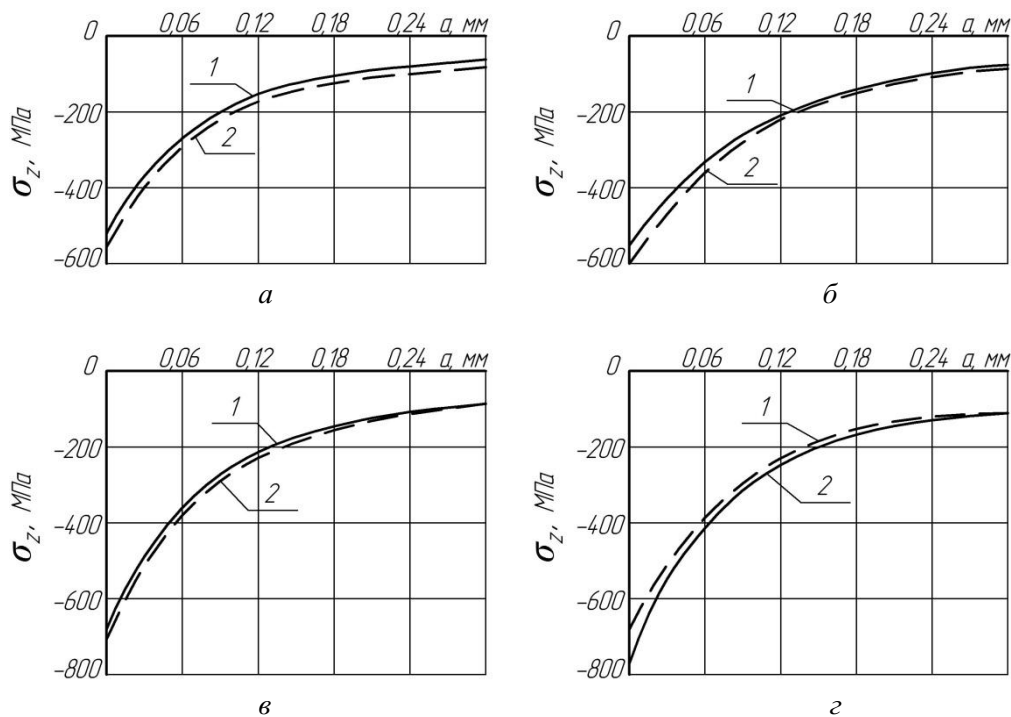


Рис. 3. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в деталях с надрезом $R = 0,3$ мм, вычисленных по экспериментальным (1) и расчетным (2) данным:
 $a - D = 10$ мм, $б - D = 15$ мм, $в - D = 25$ мм, $г - D = 40$ мм

Прогнозирование влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости деталей с надрезами при изгибе в случае симметричного цикла $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ производилось по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [1, 9]

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

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 детали с концентратором по толщине поверхностного слоя a ;

$\xi = a/t_{кр}$ – расстояние от поверхности опасного сечения детали до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$;

$t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в упрочненной 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],

$$t_{кр} = 0,0216D_1, \quad (3)$$

где D_1 – диаметр опасного сечения детали с концентратором напряжений.

Значения критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ вычислялись по формуле (2) по толщине поверхностного слоя опасного сечения деталей, равной $t_{кр}$, с использованием расчетных распределений остаточных напряжений, приведенных на рис. 3, и содержатся в таблице. Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ рассчитывался по зависимости, установленной в работе [13]:

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

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений, который определялся по графикам справочника [14] и представлен в таблице.

| D , мм | D_1 , мм | $t_{кр}$, мм | $\bar{\sigma}_{ост}$, МПа | α_σ | $\bar{\psi}_\sigma$ | $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$, МПа | $(\Delta\sigma_{-1})_{он}$, МПа | Расхождение, % |
|----------|------------|---------------|----------------------------|-----------------|---------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------|
| 10 | 9,4 | 0,203 | -208 | 2,7 | 0,393 | 81,6 | 70 | 17 |
| 15 | 14,4 | 0,311 | -166 | 2,8 | 0,385 | 63,8 | 57,5 | 11 |
| 25 | 24,4 | 0,527 | -123 | 2,9 | 0,377 | 46,4 | 45 | 3 |
| 40 | 39,4 | 0,851 | -78 | 3,1 | 0,361 | 28,2 | 30 | 6 |

Далее по формуле (1) вычислялись расчетные значения приращений предела выносливости $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ упрочненных ГДО деталей с надрезами (см. таблицу) и сравнивались с опытными значениями $(\Delta\sigma_{-1})_{он}$, приведенными в работе [1].

Из данных таблицы видно, что расхождение между расчетными и опытными значениями приращения предела выносливости не превышает 17 %, поэтому,

используя результаты определения остаточных напряжений в образцах-свидетелях, представляется возможным прогнозировать предел выносливости поверхностно упрочненных деталей в условиях концентрации напряжений с приемлемой для многоциклового усталости точностью.

Выводы

1. Апробированный в настоящем исследовании метод расчета остаточных напряжений в цилиндрических деталях диаметром 10-40 мм из сплава Д16Т после гидродробеструйной обработки по первоначальным деформациям образца-свидетеля показал, что расхождение между расчетными и экспериментальными значениями остаточных напряжений в гладких деталях не превышает 7 %, в деталях с концентраторами – 8 %.

2. При оценке влияния упрочнения гидродробеструйной обработкой на многоцикловую усталость при изгибе деталей из сплава Д16Т с концентраторами установлено, что использование рассчитанных по первоначальным деформациям образца-свидетеля распределений остаточных напряжений позволяет прогнозировать приращение предела выносливости с точностью до 17 %.

3. Для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненной детали с концентратором напряжений вначале необходимо определить первоначальные деформации образца-свидетеля, обработанного одновременно с упрочняемой деталью. По первоначальным деформациям образца-свидетеля производится расчет остаточных напряжений в опасном сечении 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 $t_{кр}$, $\bar{\sigma}_{ост}$, $\bar{\psi}_{\sigma}$ по формуле (1) рассчитывается приращение предела выносливости поверхностно упрочненной детали с концентратором напряжений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям. – 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. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
4. Стружанов В.В. Об остаточных напряжениях после прокатки и расслоении двухслойных полос // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физ.-мат. науки. – 2010. – № 5(21). – С. 55-63.
5. Сазанов В.П., Чирков А.В., Самойлов В.А., Ларионова Ю.С. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочненных цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 3(27). Ч. 3. – С. 171-174.
6. Павлов В.Ф., Столяров А.К., Вакулюк В.С., Кирпичёв В.А. Расчет остаточных в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 124 с.
7. Вакулюк В.С. Исследование влияния толщины упрочненного слоя на остаточные напряжения во впадине концентратора методом первоначальных деформаций // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физ.-мат. науки. – 2010. – № 1 (20). – С. 222-225.
8. Саушкин М.Н., Радченко В.П., Павлов В.Ф. Метод расчета полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учетом анизотропии поверхностного

- упрочнения // 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., Афанасьева О.С. Методика расчета предела выносливости упрочненных цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурных выдержках в условиях ползучести // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физ.-мат. науки. – 2009. – № 2 (19). – С. 264-268.
 11. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // 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 I. Сплошные детали // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 8. – С. 22-26.
 13. Кирпичёв В.А., Филатов А.П., Каранаева О.В., Чирков А.В., Семёнова О.Ю. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных деталей при различной степени концентрации напряжений // 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. – М.: Мир, 1977. – 304 с.

Статья поступила в редакцию 6 марта 2014 г.

HYDROBLASTING INFLUENCE ON POLYCYCLIC FATIGUE OF CYLINDRICAL PARTS MADE OF D16T ALLOY USING REFERENCE SPECIMEN INITIAL DEFORMATIONS EVALUATION

V.S. Vakuljuk, V.P. Sazanov, V.F. Pavlov, V.K. Shadrin

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation

The possibility of outstripping superficial plastic deforming by hydroblasting influence on cylindrical parts of various diameters (10-40 mm) made of D16T alloy with circular cuts endurance limit evaluation using residual stresses (initial deformations) of reference specimen determination results has been examined. It's established that the maximum calculated compressive residual stresses in smooth parts differ from the experimentally found ones less than 7%, in cut parts this difference is 8%. Endurance limit increments for parts with cuts have been defined using the average integral residual stresses criterion by calculation method. The difference between experimental and calculated values of hardened parts with concentrators endurance limit increase doesn't exceed 17%.

Keywords: hydroblasting, reference specimen, residual stresses, initial deformations, endurance limit.

*Vladimir S. Vakuljuk (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Vyacheslav P. Sazanov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Valentin F. Pavlov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Valentin K. Shadrin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*