

УДК 621.787:539.319

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ 20 ПО ПЕРВОНАЧАЛЬНЫМ ДЕФОРМАЦИЯМ ОБРАЗЦА-СВИДЕТЕЛЯ

© 2014 В. П. Сазанов

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

В статье изучена возможность прогнозирования приращения предела выносливости сплошных и полых цилиндрических деталей из стали 20 с круговыми надрезами полукруглого профиля после опережающего поверхностного пластического деформирования по остаточным напряжениям (первоначальным деформациям) образца-свидетеля, упрочнённого одновременно с деталями. Установлено, что сжимающие остаточные напряжения, рассчитанные в гладких деталях по первоначальным деформациям образца-свидетеля, незначительно (до 6%) отличаются от экспериментально определённых. По известной методике с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений вычислены приращения пределов выносливости упрочнённых деталей с надрезами. Установлено, что расчётные значения приращений пределов выносливости отличаются от экспериментальных не более чем на 15%.

Поверхностное упрочнение, образец-свидетель, остаточные напряжения, первоначальные деформации, деталь с концентратором, предел выносливости.

Известно, что одним из важных вопросов механики остаточных напряжений является установление связи между остаточными напряжениями и сопротивлением деталей усталости. Особую значимость эта задача приобрела в связи с широким применением различных методов поверхностного упрочнения, приводящих к существенному увеличению характеристик сопротивления усталости, особенно в условиях концентрации напряжений.

Многочисленные исследования [1–11], проведённые к настоящему времени, показывают, что для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей необходимо знать распределение сжимающих остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя их опасного сечения.

В настоящее время известно достаточно большое количество методов измерения остаточных деформаций и напряжений. В зависимости от способов воздействия на исследуемую деталь или исследуемый образец они разделяются на механические и физические методы. Механические методы основаны на принципе упругой разгрузки образца или детали при

последующем удалении поверхностных слоёв с остаточными напряжениями. По результатам измерения деформаций, возникающих после разгрузки, по формулам теории упругости вычисляются остаточные напряжения. Физические методы основаны на замерах изменений физических свойств материалов в зависимости от степени упругого деформирования. В отличие от механических методов, они не связаны с обязательным разрушением образцов и деталей. Однако распределение остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя, необходимое для прогнозирования сопротивления многоциклового усталости [4–6, 9], можно получить только механическими методами с разрушением образцов и деталей.

Сохранить исследуемую деталь и получить распределение остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя в любом сечении позволяет расчётно-экспериментальный метод с использованием образцов-свидетелей и применением современных расчётных комплексов, реализующих метод конечных элементов в форме перемещений. При этом измерение остаточных напряжений механиче-

скими методами производится в образце-свидетеле. На практике, при серийном производстве образцы-свидетели уже давно используются для контроля технологических процессов упрочнения деталей различными методами поверхностного пластического деформирования. Такие образцы, имеющие определённую форму и геометрические размеры, проходят весь технологический цикл обработки вместе со штатной деталью.

В основе представленного в данном исследовании расчётно-экспериментального метода лежит известное предположение, что обрабатываемые совместно деталь и образец-свидетель при поверхностном пластическом деформировании получают одинаковые первоначальные деформации. Однако во всех случаях практического применения это предположение требует проведения тщательной экспериментальной и расчётной проверки. Именно с этой целью было проведено исследование результатов испытаний на усталость и экспериментального определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя сплошных и полых цилиндрических деталей (рис. 1) из стали 20 [9].

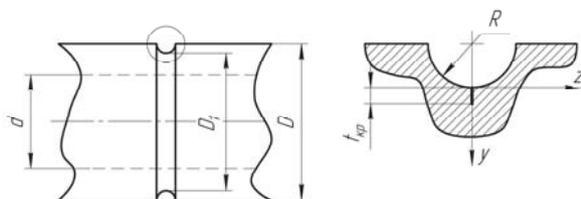


Рис. 1. Цилиндрическая деталь и нераспространяющаяся трещина усталости

Гладкие детали диаметром $D \times d = 10 \times 0$ мм, 25×0 мм, 25×15 мм и образцы-свидетели подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО) дробью диаметром 1,5-2,5 мм при давлении воздуха 0,28 МПа в течение 10 минут. 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 [12].

Расчётная часть исследований выполнена методом конечно-элементного моделирования с использованием комплекса PATRAN/NASTRAN. Моделирование остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя выполнялось методом термоупругости [13–18]. При проведении расчётов были приняты следующие допущения:

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

Расчёты проводились в следующей последовательности:

- определение первоначальных деформаций в образце-свидетеле (втулка диаметром 51,5×45 мм);
- расчёт распределения остаточных напряжений в гладких деталях по полученным значениям первоначальных деформаций образца-свидетеля;
- сравнение расчётных и экспериментальных распределений остаточных напряжений в гладких деталях после ПДО.

При определении первоначальных деформаций в качестве исходных данных использовалось экспериментальное распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a упрочнённого слоя образца-свидетеля (втулки), приведённое на рис. 2. Для получения полного совпадения расчётных и экспериментальных распределений осевых остаточных напряжений образца-свидетеля при принятых допущениях проводилось три итерации.

Следующий этап расчёта выполнялся на конечно-элементных моделях исследуемых гладких деталей диаметрами $D \times d = 10 \times 0$ мм, 25×0 мм, 25×15 мм по первоначальным деформациям образца-свидетеля.

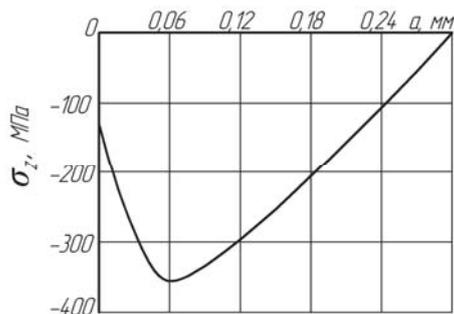


Рис. 2. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образце-свидетеле (штука диаметром $51,5 \times 45$ мм) после ПДО

При оценке приращения предела выносливости определяющими являются осевые σ_z остаточные напряжения [4×11]. Поэтому сравнение расчётных и экспери-

ментальных распределений остаточных напряжений для исследуемых деталей выполнялось по осевой компоненте.

На рис. 3 представлены экспериментальные [9] и расчётные эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a поверхностного слоя гладких деталей. Можно видеть, что расчётные значения остаточных напряжений незначительно (до 6%) отличаются от экспериментальных. Этот результат указывает на то, что, используя первоначальные деформации образца-свидетеля, расчётным методом можно определить остаточные напряжения в детали, упрочнённой одновременно с этим образцом.

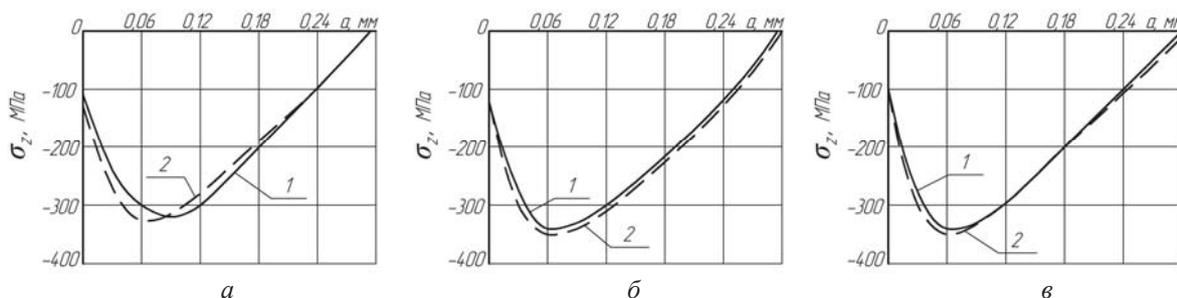


Рис. 3. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений после ПДО, определённых экспериментально (1) и расчётом (2) в гладких деталях диаметром: а – $D = 10$ мм, б – $D = 25$ мм, в – $D \times d = 25 \times 15$ мм

Полученные расчётным методом распределения остаточных напряжений после пневмодробеструйной обработки в гладких деталях использовались для расчёта распределения остаточных напряжений в деталях с круговыми надрезами полукруглого профиля радиусом $R = 0,3$ мм, $R = 0,5$ мм и $R = 1,0$ мм, нанесёнными на гладкие детали после упрочнения ПДО, то есть после опережающего поверхностного пластического деформирования. Остаточные напряжения в деталях с надрезами определялись как сумма дополнительных напряжений, возникающих за счёт перераспределения остаточных усилий гладких деталей при нанесении надрезов, и остаточных напряжений гладких деталей. Дополнительные остаточные напряжения рассчитывались двумя методами: анали-

тическим [19] и численным с использованием программного комплекса PATRAN/NASTRAN [15]. Следует отметить, что остаточные напряжения, определённые двумя методами, были практически одинаковыми. На рис. 4–6 приведены экспериментальные [9] и расчётные эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a поверхностного слоя опасного сечения деталей с надрезами после опережающего поверхностного пластического деформирования. Можно видеть, что распределения остаточных напряжений, полученные по экспериментальным и расчётным эпюрам гладких деталей, отличаются по наибольшим значениям не более 7% (рис. 5, б – $D = 25$ мм, $R = 0,5$ мм).

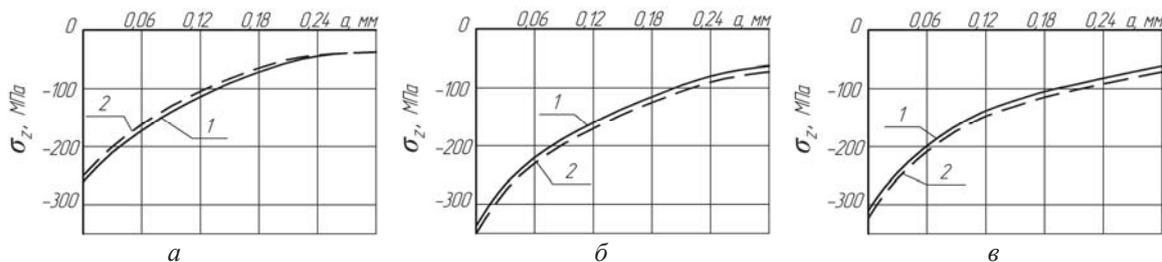


Рис. 4. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в деталях с надрезами $R = 0,3$ мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным: а – $D = 10$ мм, б – $D = 25$ мм, в – $D \times d = 25 \times 15$ мм

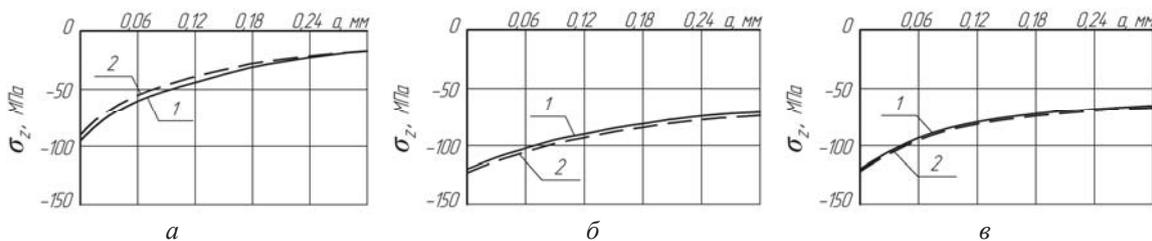


Рис. 5. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в деталях с надрезами $R = 0,5$ мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным: а – $D = 10$ мм, б – $D = 25$ мм, в – $D \times d = 25 \times 15$ мм

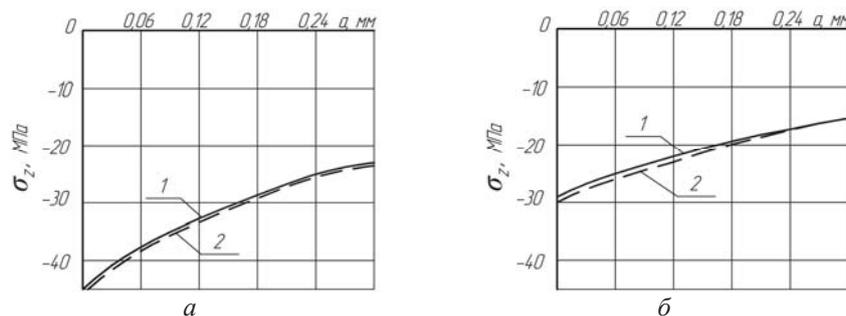


Рис. 6. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в деталях с надрезами $R = 1,0$ мм, вычисленных по экспериментальным (1) и по расчётным (2) данным: а – $D = 25$ мм, б – $D \times d = 25 \times 15$ мм

Оценка влияния пневмодробеструйной обработки на приращение пределов выносливости деталей с надрезами различного радиуса при изгибе в случае симметричного цикла $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ производилась по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [4–6]:

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

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

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

$\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали с надрезом 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 упрочнённой детали с концентратором напряжений при работе на пределе выносливости.

Критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости, приведённая в табл. 1, определялась по зависимости, установленной на основании многочисленных экспериментов в работах [6, 9]:

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

где D_I – диаметр опасного сечения 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 деталей с использованием расчётных распределений остаточных напряжений, приведённых на рис. 4–6, и представлены в табл.1.

Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ рассчитывался по зависимости, установленной в работе [20]:

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

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений, который определялся по графикам справочника [21] и представлен в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчётного и экспериментального определения пределов выносливости

D , мм	d , мм	D_I , мм	R , 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	0	9,4	0,3	0,203	-122	2,7	0,393	48	45	6
		9,0	0,5	0,194	-46	2,6	0,401	16,6	17,5	5
25	0	24,4	0,3	0,527	-89	2,9	0,377	33,6	30	11
		24,0	0,5	0,512	-54	2,8	0,385	20,6	17,5	15
		23,0	1,0	0,497	-22	2,7	0,393	8,6	7,5	13
25	15	24,4	0,3	0,453	-91	3,0	0,369	33,5	32,5	3
		24,0	0,5	0,436	-48	2,9	0,377	18,1	17,5	3
		23,0	1,0	0,413	-15	2,8	0,385	5,8	5	14

Далее по формуле (1) вычислялись расчётные значения приращений пределов выносливости $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ упрочнённых ГДО деталей с надрезами (табл. 1) и сравнивались с опытными значениями $(\Delta\sigma_{-1})_{он}$, приведёнными в работе [9].

Из данных табл. 1 видно, что расхождение между расчётными и опытными значениями приращений пределов выносливости не превышает 15%. Поэтому, используя результаты определения остаточных напряжений в образцах-свидетелях, возможно прогнозировать предел выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений с достаточной для многоциклового усталости точностью.

Выводы

1. Апробированный в настоящем исследовании метод расчёта остаточных напряжений в цилиндрических деталях диаметром 10–25 мм из стали 20 после пневмодробеструйной обработки по первоначальному деформациям образца-свидетеля показал, что расхождение между расчётными и экспериментальными значениями остаточных напряжений в гладких деталях не превышает 6%, в деталях с концентраторами – 7%.

2. Оценка влияния упрочнения пневмодробеструйной обработкой на многоцикловую усталость при изгибе деталей из стали 20 с концентраторами показала, что использование рассчитанных по первоначальному деформациям образца-

свидетеля распределений остаточных напряжений позволяет прогнозировать приращение предела выносливости с точностью до 15%.

3. Для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённой детали с концентратором напряжений вначале определяются первоначальные деформации образца-свидетеля, обработанного одновременно с упрочняемой деталью. По первоначальным деформациям образца-свидетеля производится расчёт остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения дета-

ли. Критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости вычисляется согласно (3), критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ – согласно (2), коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ влияния упрочнения на предел выносливости – согласно (4). После определения значений $t_{кр}$, $\bar{\sigma}_{ост}$, $\bar{\psi}_{\sigma}$ по формуле (1) рассчитывается приращение предела выносливости поверхностно упрочнённой детали с концентратором напряжений.

Библиографический список

1. Смагленко Ф.П. Влияние распределения остаточных напряжений на усталостную прочность твёрдого сплава ВК15 // Проблемы прочности. 1980. № 8. С. 35-38.

2. Торбило В.М., Маркус Л.И. Остаточные напряжения в поверхностном слое закалённых сталей после алмазного выглаживания // Вестник машиностроения. 1969. № 6. С. 44-45.

3. Туровский М.Л., Новик Р.А. Упрочняющая обкатка роликами азотированных стальных деталей // Вестник машиностроения. 1970. № 1. С. 39-42.

4. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. 1986. № 8. С. 29-32.

5. 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.

6. 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.

7. Иванов С.И., Павлов В.Ф., Коновалов Г.В., Минин Б.В. Технологические остаточные напряжения и сопротивление

усталости авиационных резьбовых деталей. М.: Отраслевая библиотека «Технический прогресс и повышение квалификации» МАП, 1992. 192 с.

8. Радченко В.П., Афанасьева О.С. Методика расчёта предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурных выдержках в условиях ползучести // Вестн. СамГТУ. Сер. Физ.-мат. науки. 2009. № 2(19). С. 264-268.

9. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. Самара: Изд-во Самар. науч. центра РАН, 2012. 125 с.

10. Вакулюк В.С. Сопротивление усталости детали в зависимости от толщины упрочнённого слоя при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2012. №3 (34). Ч. 3. С. 172-176.

11. Кирпичёв В.А., Саушкин М.Н., Сазанов В.П., Семёнова О.Ю. Остаточные напряжения и сопротивление усталости образцов с V-образными надрезами из стали ВНС40 // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2012. № 5(36). Ч. 1. С. 95-99.

12. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. Куйбышев: КуАИ. 1971. Вып. 53. С. 32-42.

13. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.

14. Стружанов В.В. Об остаточных напряжениях после прокатки и расслоении двухслойных полос // Вестн. СамГТУ. Сер. Физ.-мат. науки. 2010. № 5(21). С. 55-63.

15. Чирков А.В., Сазанов В.П., Самойлов В.А., Ларионова Ю.С. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2011. № 3(27). Ч. 3. С. 171-174.

16. 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 Самар. науч. центра РАН, 2008. 124 с.

17. Вакулюк В.С. Исследование влияния толщины упрочнённого слоя на остаточные напряжения во впадине концентратора методом первоначальных деформаций // Вестн. СамГТУ. Сер. Физ.-мат. науки. 2010. № 1(20). С. 222-225.

18. Саушкин М.Н., Радченко В.П., Павлов В.Ф. Метод расчёта полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учётом анизотропии процесса поверхностного упрочнения // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52, № 2. С. 173-182.

19. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: межвуз. сб. Куйбышев: КуАИ, 1974. Вып. 3. С. 88-95.

20. Кирпичёв В.А., Филатов А.П., Каранаева О.В., Чирков А.В., Семёнова О.Ю. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений // Прочность материалов и элементов конструкций: труды МНТК. Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАНУ, 2011. С. 678-685.

21. Петерсон Р.Е. Коэффициенты концентрации напряжений. М.: Мир, 1977. 304 с.

Информация об авторе

Сазанов Вячеслав Петрович, 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.

FORECASTING THE ENDURANCE LIMIT OF SURFACE- HARDENED CYLINDRICAL PARTS MADE OF STEEL 20 BY THE INITIAL DEFORMATIONS OF REFERENCE SPECIMEN

© 2014 V. P. Sazanov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The possibility of forecasting the increment of endurance limit for solid and hollow cylindrical parts made of steel 20 with semicircular notches after outstripping superficial plastic deforming has been analyzed using the residual stresses (initial deformations) of a reference specimen hardened simultaneously with the part. It is established that the compressive residual stresses calculated in smooth parts by the initial deformations of the reference specimen differ insignificantly (less than 6%) from those found experimentally. The increments of endurance limits of hardened notched parts have been calculated by a well-known method using the average integral

residual stresses criterion. It's established that the design values of endurance limit increments differ from the experimentally found ones by no more than 15%.

Surface hardening, reference specimen, residual stresses, initial deformations, part with a concentrator endurance limit.

References

1. Smaglenko F.P. The influence of residual stresses distribution on the fatigue strength of solid alloy BK15 // *Strength problems*. 1980. №8. P. 35-38. (In Russ.)
2. Torbilo V.M., Markus L.I. Residual stresses in the hardened steel surface layer after diamond smoothing // *Vestnik mashinostroeniya*. 1969. №6. P. 44-45. (In Russ.)
3. Turovskiy M.L., Novik R.A. Hardening rolling of nitrated steel parts // *Vestnik mashinostroeniya*. 1970. №1. P. 39-42. (In Russ.)
4. Pavlov V.F. Connection between residual stresses and endurance limit under bending under stresses concentration conditions // *Izvestiya vusov. Mashinostroenie*. 1986. №8. P. 29-32.
5. Pavlov V.F. The influence of the value and distribution of residual stresses in a the surface layer of a part with a concentrator on the endurance limit. Report 1. Solid parts // *Izvestiya vusov. Mashinostroenie*. 1988. №8. P. 22-26. (In Russ.)
6. Pavlov V.F. The influence of the value and distribution of residual stresses in a the surface layer of a part with a concentrator on the endurance limit. Report 2. Hollow parts // *Izvestiya vusov. Mashinostroenie*. 1988. №12. P. 37-40. (In Russ.)
7. Ivanov S.I., Pavlov V.F., Konovalov G.V., Minin V.B. *Tekhnologicheskie ostatochnye napryazheniya i soprotivlenie ustalosti aviatsionnykh rezbovykh detaley* [Technological residual stresses and fatigue resistance of aircraft thread pieces]. Moscow: Sectoral library "Technical progress and qualification improvement" MAP, 1992. 192 p.
8. Radchenko V.P., Afanaseva O.S. Calculation procedure of a fatigue point for strengthened cylindrical specimen with pressure concentrators at temperature endurance in the creep conditions // *Vestnik SamGTU. Ser. fiz.-mat. nauki*. 2009. №2 (19). P. 264-268. (In Russ.)
9. Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Vakulyuk V.S. *Prognozirovaniye soprotivleniya ustalosti poverkhnostno uprochnennykh detaley po ostatochnym napryazheniyam* [Forecasting the fatigue resistance of surface-hardened parts by residual stresses]. Samara: SNC RAN Publ., 2012. 125 p.
10. Vakulyuk V.S. The dependence of detail fatigue resistance on the thickness of hardening layer under outstripping superficial plastic deforming // *Vestnik SGAU*. 2012. № 3(34). Part 3. P. 172-176. (In Russ.)
11. Kirpichev V.A., Saushkin M.N., Sazanov V.P., Semenova O.Yu. Residual stresses and endurance strength in the specimens with v-shaped notches made of vnc40 steel // *Vestnik SGAU*. 2012. №5 (36). Part 1. P. 95-99. (In Russ.)
12. Ivanov S.I. Determination of residual stresses in a cylinder by the rings-and-stripes method // *Ostatochnye napryazheniya*. Kuibyshev: KuAI Publ., 1971. Issue 53. P. 32-42. (In Russ.)
13. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow: Mashgiz Publ., 1963. 232 p.
14. Struzhanov V.V. About residual stresses after rolling and exfoliation of two-ply stripe // *Vestnik SamGTU. Ser. fiz.-mat. nauki*. 2010. №5(21). P. 55-63. (In Russ.)
15. Chirkov A.V., Sazanov V.P., Samoylov V.A., Larionova Yu.S. Modeling of redistribution of residual stresses in the cylindrical specimens after advancing surface plastic forming // *Vestnik SGAU*. 2011. №3(27). Part 3. P. 171-174. (In Russ.)
16. Pavlov V.F., Stolyarov A.K., Vakulyuk V.S., Kirpichev V.A. *Raschet ostatochnykh napryazheniy v detalyakh s kontsentratorami napryazheniy po pervonachalnym deformatsiyam*. [Calculation of residual stresses in parts with stress concen-

trators by initial deformations]. Samara: SNC RAN Publ., 2008. 124 p.

17. Vakulyuk V.S. Investigation of influence of thickness hardened layer on the residual stresses in basin concentrator using initial strain // *Vestnik SamGTU. Ser. fiz.-mat. nauki.* 2010. №1(20). P. 222-225. (In Russ.)

18. Saushkin M.N., Radchenko V.P., Pavlov V.F. Method of calculating the fields of residual stresses and plastic strains in cylindrical specimens with allowance for surface hardening anisotropy // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics.* 2011. V. 52, №2. P. 303-310.

19. Ivanov S.I., Shatunov M.P., Pavlov V.F. The influence of residual stresses on the endurance of notched specimens // *Voprosy*

prochnosti elementov aviatsionnykh konstruksiy. Kuibyshev: KuAI Publ., 1974. Issue 3. P. 88-95. (In Russ.)

20. Kirpichev V.A., Filatov A.P., Karanaeva O.V., Chirkov A.V., Semenova O.Yu. Forecasting the endurance limit of surface-hardened parts with concentration of various degree // *International Scientific Technical Conference Transactions "Strength of materials and structural elements"*. Kiev: the G.S. Pisarenko Strength Problems Institute of the Ukraine Academy of Sciences, 2011. P. 678-685. (In Russ.)

21. Peterson R.E. *Koeffitsienty kontsentratsii napryazheniy* [Stress concentration coefficients]. Moscow: Publishing House «MIR», 1977. 304 p.

About the author

Sazanov Vyacheslav Petrovich, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Strength of Materials, Samara State Aerospace University.

E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: residual stresses mechanics.