

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ С НАДРЕЗАМИ ИЗ СТАЛИ 20

© 2011 О. Ю. Семёнова

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

Изучены закономерности распределения остаточных напряжений в гладких цилиндрических образцах и в образцах с надрезами полукруглого профиля после опережающего поверхностного пластического деформирования и их влияние на предел выносливости сплошных и полых образцов из стали 20 в условиях концентрации напряжений.

Остаточные напряжения, поверхностное упрочнение, цилиндрический образец, концентратор напряжений, нераспространяющаяся трещина, предел выносливости.

При внедрении в производство новых упрочняющих технологий необходимо разрабатывать и апробировать научно обоснованные расчётные методы прогнозирования характеристик сопротивления усталости деталей с целью сокращения длительных и дорогостоящих испытаний на усталость. После упрочнения различными методами поверхностного пластического деформирования в поверхностном слое деталей возникают наклёп и сжимающие остаточные напряжения. Известно [1, 2], что основную роль в повышении сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей в условиях концентрации играют сжимающие остаточные напряжения. В работе [3] для прогнозирования приращения предела выносливости упрочнённых деталей с концен-

траторами по остаточным напряжениям был предложен критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ в виде

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

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении детали с концентратором по толщине поверхностного слоя y ; $\xi = y/t_{кр}$ – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали на пределе выносливости (рис. 1).

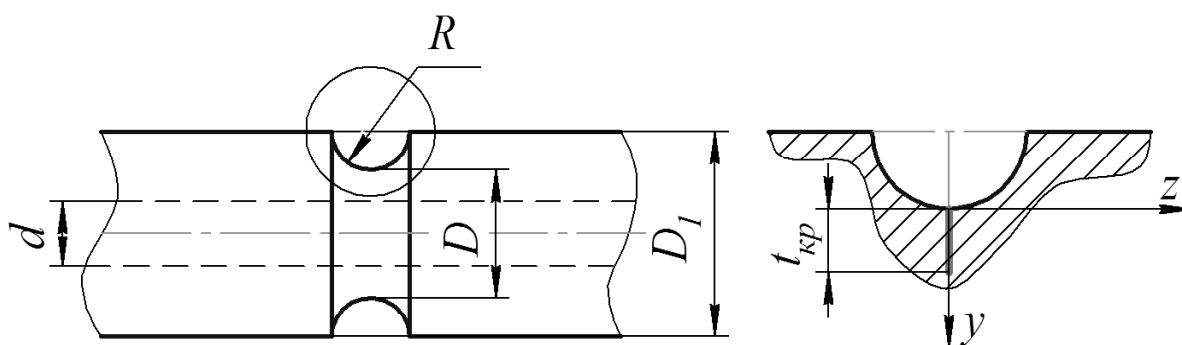


Рис. 1. Цилиндрический образец с надрезом полукруглого профиля

Приращение предела выносливости при изгибе в случае симметричного цикла $\Delta\sigma_{-1}$ упрочнённой детали с использованием критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ можно определить по следующей формуле:

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_\sigma \cdot |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (2)$$

где $\bar{\psi}_\sigma$ – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости по разрушению.

С целью проверки возможности применения критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ для прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей из стали 20 были проведены эксперименты на цилиндрических образцах с круговыми надрезами полукруглого профиля (рис. 1). Исследуемая сталь 20 имела следующие механические характеристики: $\sigma_T = 395$ МПа, $\sigma_\sigma = 522$ МПа, $\delta = 26,1\%$, $\psi = 65,9\%$, $S_k = 1416$ МПа.

Гладкие образцы диаметром $D_1 = 10$ мм и $D_1 = 25$ мм с отверстием $d = 15$ мм подвергались пневмодробеструйной обработке

(ПДО) дробью диаметром 1,5-2 мм при давлении воздуха 0,25 МПа в течение 10 минут, а также обкатке роликом (ОР) диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм при усилии $P = 0,5$ кН и $P = 1,0$ кН с подачей 0,11 мм/об и скоростью вращения образца 400 об/мин. Затем на все упрочнённые и неупрочнённые гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса $R = 0,5$ мм.

Остаточные напряжения в гладких образцах диаметром $D_1 = 10$ мм определялись экспериментально методом колец и полосок [4], а также методом удаления части цилиндрической поверхности [5]. Остаточные напряжения в гладких образцах диаметром $D_1 = 25$ мм с отверстием $d = 15$ мм определялись методом колец и полосок [4]. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a в гладких образцах представлено на рис. 2. Необходимо отметить, что остаточные напряжения в гладких образцах диаметром $D_1 = 10$ мм и $D_1 = 25$ мм с отверстием $d = 15$ мм практически не различаются при одной и той же упрочняющей обработке, причём это различие при пневмодробеструйной обработке

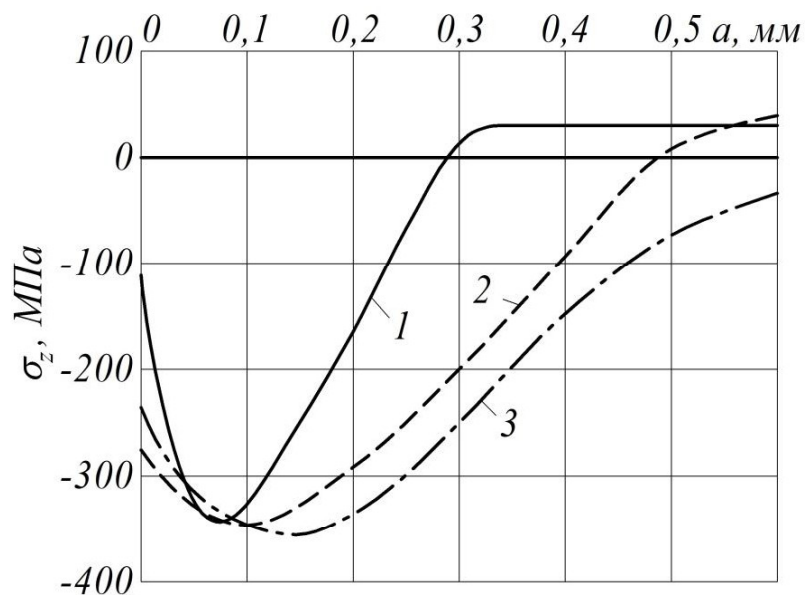


Рис. 2. Осевые остаточные напряжения σ_z в упрочнённых гладких образцах из стали 20 после:

1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

значительно меньше, чем при обкатке роликом. Такое совпадение распределений сжимающих остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя для цилиндрических сплошных образцов (деталей) и образцов различного диаметра с отверстием в случае, когда удвоенная толщина стенки равна диаметру гладкого образца, было описано в работах [6, 7].

В гладких образцах после пневмодробеструйной обработки сжимающие остаточные напряжения имеют существенный спад до -110 МПа к поверхности образца, достигают максимума -340 МПа на глубине $0,07$ мм и меняют знак на глубине $0,28$ мм. После обкатки роликом при усилии $P = 0,5$ кН спад сжимающих остаточных напряжений к поверхности ($\sigma_z = -280$ МПа) значительно меньше, чем после ПДО, максимум составляет -345 МПа на глубине $0,1$ мм; смена знака происходит на глубине $0,48$ мм. После обкатки роликом при усилии $P = 1,0$ кН спад сжимающих остаточных напряжений к поверхности ($\sigma_z = -230$ МПа) несколько больше, чем при $P = 0,5$ кН; максимум составляет -360 МПа на глубине $0,15$ мм и смена знака напряжений происходит на глубине $0,71$ мм. Следовательно, с увеличением усилия обкатки роликом максимум сжимающих остаточных напряжений смещается вглубь от поверхности образца и увеличивается толщина поверхностного слоя с

сжимающими остаточными напряжениями. Эти закономерности распределения остаточных напряжений в гладких упрочнённых образцах (деталях) оказывают значительное влияние на сопротивление усталости при опережающем поверхностном пластическом деформировании [8].

Остаточные напряжения в образцах с надрезом определялись расчётным путём – суммированием дополнительных остаточных напряжений за счёт перераспределения остаточных усилий после опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД) и остаточных напряжений гладких образцов. При этом дополнительные остаточные напряжения вычислялись как аналитическим методом по методике работы [9], так и численным методом по первоначальным деформациям с использованием программного комплекса MSC.Nastran\ MSC.Patran. Следует отметить, что результаты определения дополнительных остаточных напряжений двумя методами имели хорошее совпадение. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a наименьшего сечения образцов с надрезом $R = 0,5$ мм приведено на рис. 3.

Следует обратить внимание на то, что при упрочняющей обработке на одних и тех же режимах образцов диаметром 10 мм и $25/15$ мм с надрезом $R = 0,5$ мм остаточные

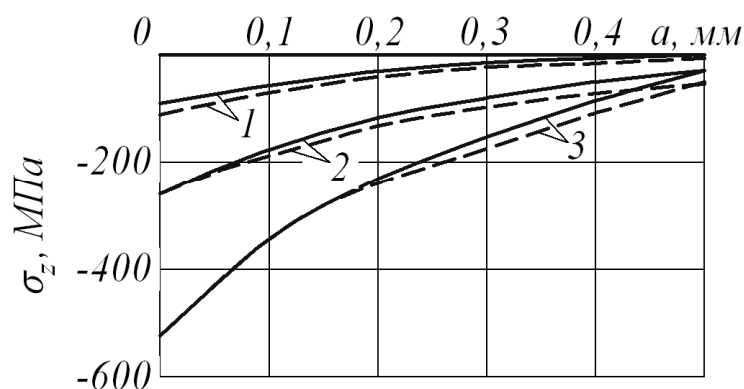


Рис. 3. Осевые остаточные напряжения σ_z в упрочнённых образцах из стали 20 с надрезом $R = 0,5$ мм после: 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН (— — $D_1 = 10$ мм; - - - - $D_1 = 25$ мм, $d = 15$ мм)

напряжения несколько различаются, причём на поверхности надрезов в образцах после обкатки роликом напряжения одинаковы. В образцах после ПДО остаточные напряжения различаются и на поверхности надреза. Наблюдаемое различие в распределении остаточных напряжений в образцах с надрезом после ОППД при одинаковом распределении напряжений в гладких образцах объясняется тем, что с увеличением диаметра полого цилиндра при неизменной толщине стенки уменьшается величина растягивающих остаточных напряжений под упрочнённым поверхностным слоем. В результате при одинаковых дополнительных напряжениях после ОППД суммарные остаточные напряжения с увеличением диаметра образца с отверстием будут увеличиваться, что и наблюдалось в настоящем исследовании.

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых образцов диаметром $D_1 = 10$ мм проводились на машине МУИ-6000, диаметром $D_1 = 25$ мм с отверстием $d = 15$ мм – на машине УММ - 01 [10], база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости σ_{-1} представлены в табл. 1. Упрочнённые образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжениях, равных пределу выносливости, были доведены до разрушения при большей нагрузке. На изломах этих образцов были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, глубина $t_{кр}$ которых в среднем при $D_1 = 10$ мм составляла 0,197 мм,

при $D_1 = 25$ мм и $d = 15$ мм – 0,442 мм, что соответствует зависимости $t_{кр}$ от размеров поперечного сечения детали (образца), установленной экспериментально в работе [11]:

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

На рис. 4 представлена фотография излома одного из упрочнённых дробью образцов диаметром $D_1 = 10$ мм, а на рис. 5 – диаметром $D_1 = 25$ мм с $d = 15$ мм. На фотографиях чётко видны нераспространяющиеся трещины усталости 2, причём для образцов с $D_1 = 10$ мм нераспространяющаяся трещина имеет концентрическую форму, так как эти образцы испытывались на усталость при чистом изгибе с вращением. Для образцов диаметром $D_1 = 25$ мм с отверстием диаметром $d = 15$ мм трещина имеет серповидную форму, так как испытания на усталость этих образцов проводились при поперечном изгибе в одной плоскости.

Используя распределение осевых остаточных напряжений σ_z в образцах с надрезом $R = 0,5$ мм (рис. 3), по толщине поверхностного слоя, равной $t_{кр}$, по формуле (1) вычислялись среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$, значения которых представлены в табл. 1. Затем по формуле (2) рассчитывался коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости $\bar{\psi}_\sigma$, значения которого также приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты испытаний на усталость

D/d , мм/мм	Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы			
		обработка	σ_{-1} , МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
10/0	120	ПДО	137,5	-48	0,365
		ОР, $P = 0,5$ кН	187,5	-178	0,379
		ОР, $P = 1,0$ кН	250	-333	0,390
25/15	110	ПДО	127,5	-47	0,372
		ОР, $P = 0,5$ кН	152,5	-128	0,332
		ОР, $P = 1,0$ кН	182,5	-218	0,333

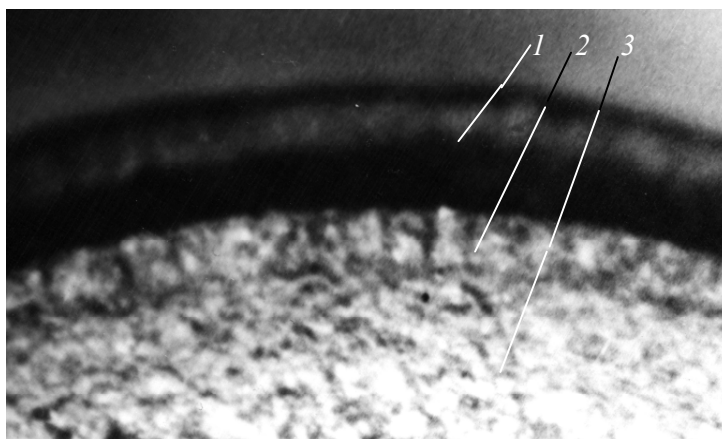


Рис. 4. Фрагмент излома упрочнённого дробью образца диаметром $D_1 = 10$ мм с надрезом $R = 0,5$ мм из стали 20:1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

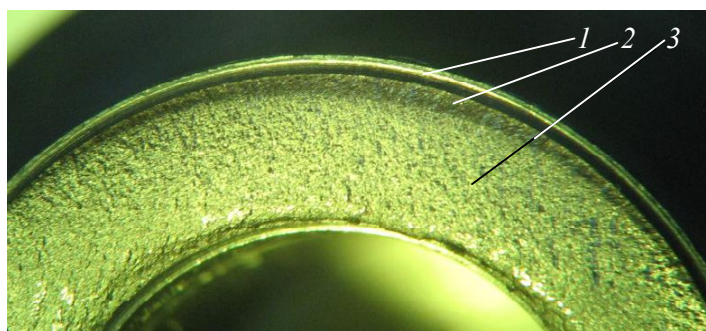


Рис. 5. Фрагмент излома упрочнённого роликом при $P = 1,0$ кН образца диаметром $D_1 = 25$ мм с отверстием диаметром $d = 15$ мм и надрезом $R = 0,5$ мм из стали 20: 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

Из представленных в табл. 1 данных видно, что для цилиндрических сплошных и полых упрочнённых образцов с надрезом $R = 0,5$ мм из стали 20 значение коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ при изгибе в случае симметричного цикла составляет в среднем 0,362, что практически совпадает со значением $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$ для образцов и деталей из сталей других марок, алюминиевых сплавов и сплавов на основе никеля с такой же концентрацией напряжений [8].

Выводы

1. После упрочнения пневмодробеструйной обработкой и обкаткой роликом в гладких образцах диаметром $D_1 = 10$ мм и диаметром $D_1 = 25$ мм с отверстием

$d = 15$ мм из стали 20 формируются по толщине поверхностного слоя одинаковые по величине и распределению сжимающие остаточные напряжения. В образцах с надрезом $R = 0,5$ мм после опережающего поверхностного пластического деформирования распределение сжимающих остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя несколько различается из-за различия величины растягивающих остаточных напряжений в сердцевине образцов.

2. Подтверждена зависимость (3) глубины нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ от размеров поперечного сечения полых детали на примере упрочнённых пневмодробеструйной обработкой и обкаткой роликом образцов из стали 20.

3. Установлено, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ может быть использован для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений из стали 20.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.1/13944).

Библиографический список

1. Биргер, И. А. Остаточные напряжения [Текст]/ И. А. Биргер - М.: Машгиз, 1963. – 232 с.

2. Иванов, С. И. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность [Текст]/ С. И. Иванов, В. Ф. Павлов // Проблемы прочности. – 1976. – №5. – С. 25-27.

3. 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.

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. 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.

6. Павлов, В. Ф. Закономерности распределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических деталях с отверстием различного диаметра [Текст]/ В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичёв, В. Б. Иванов [Текст] // Тр. IV Всеросс. науч. конф. с междунар. участием. – Самара: СамГТУ, 2007. – Ч. 1: Математическое моделирование и краевые задачи. – С. 171-174.

7. Павлов, В.Ф. Особенности распределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических деталях после дробеструйной обработки [Текст]/ В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичёв, О.Ю. Семёнова [Текст] //

Тр. V Всеросс. научн. конф. с междунар. участием. – Самара: СамГТУ, 2008. – Ч. 1: Математическое моделирование и краевые задачи. – С. 229-232.

8. Павлов, В. Ф. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений [Текст]/ В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичёв, В. Б. Иванов. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 64 с.

9. Иванов, С. И. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом [Текст]/ С. И. Иванов, М. П. Шатунов, В. Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – Вып.1. – С. 88-95.

10. Филатов, Э. Я. Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость [Текст]/ Э. Я. Филатов, В.Э. Павловский. – Киев: Наук. думка, 1985. – 92 с.

11. Павлов, В. Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали [Текст]/ В. Ф. Павлов. // Изв. вузов. Машиностроение. – 1988. – №12. – С. 37-40.

References

1. Birger, I. A. Residual stresses [Text] / I. A. Birger. - Moscow: Mashgiz, 1963. - 232 p.

2. Ivanov, S. I. Influence of residual stresses and cold-work hardening on fatigue strength [Text] /S. I. Ivanov, V. F. Pavlov // Problems of strength. - 1976. - №5. - PP. 25-27.

3. Pavlov, V. F. Connection between residual stresses and endurance limit under bending in stress concentration conditions [Text] /V. F. Pavlov // Izvestiya vusov (Universities' News). Mashinostroeniye (Mechanical Engineering). - 1986. - №8. - PP. 29-32.

4. Ivanov, S. I. Determination of residual stresses in a cylinder by rings-and-stripes method [Text] / S. I. Ivanov // Residual stresses. - Kuibyshev: KuAI (Kuibyshev Aviation Institute). - 1971. - Issue 53. - PP. 32-42.

5. Ivanov, S. I. Determination of residual stresses in a cylinder by the method of part of surface removal [Text] / S.I. Ivanov, I.V. Grigorieva // Problems of strength of aircraft

structure elements. - Kuibyshev: KuAI (Kuibyshev Aviation Institute). - 1971. - Issue 48. - PP. 179-183.

6. Pavlov, V. F. Regularities of residual stress distribution in hardened cylindrical parts with holes of different diameters [Text] / V.F. Pavlov, V.A. Kirpichev, V.B. Ivanov, O.Yu. Semyonova, Ye.A. Deniskina // Transactions of the Fourth All-Russian scientific conference with international participation. - Samara: SamGTU (Samara State Technical University), 2007. - Part 1: Mathematical modelling and boundary - value problems. - PP. 171-174.

7. Pavlov, V.F. Peculiarities of residual stress distribution in hardened cylindrical parts after shot blasting [Text] / V.F. Pavlov, V.A. Kirpichev, O.Yu. Semyonova, V.B. Ivanov // Transactions of the Fifth All-Russian scientific conference with international participation. - Samara: SamGTU (Samara State Technical University), 2008. - Part 1: Mathematical modelling and boundary - value problems. - PP.

229-232.

8. Pavlov, V.F. Residual stresses and endurance strength of hardened parts with stress concentrators [Text] / V.F. Pavlov, V.A. Kirpichev, V.B. Ivanov. - Samara: Publishing House of Samara Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 2008. - 64 p.

9. Ivanov, S.I. Influence of residual stresses on notched specimen endurance [Text] / S.I. Ivanov, M.P. Shatunov, V.F. Pavlov // Problems of strength of aircraft structure elements. - Kuibyshev: KuAI (Kuibyshev Aviation Institute), 1974. - Issue 1. - PP. 88-95.

10. Filatov, E.Ya. Universal complex of machines for fatigue tests of materials and constructions [Text] / E.Ya. Filatov, V.E. Pavlovsky. - Kiev: Naukova Dumka, 1985. - 92 p.

11. Pavlov, V.F. Influence of residual stress value and distribution on the endurance limit in a part with concentrator superficial layer [Text] / V.F. Pavlov // Izvestiya vusov (Universities News). Mashinostroeniye (Mechanical Engineering). - 1988. - №12. - PP. 37-40.

RESIDUAL STRESSES AND FATIGUE RESISTANCE OF SURFACE-HARDENED NOTCHED CYLINDRICAL SPECIMENS MADE OF STEEL 20

© 2011 O. Yu. Semyonova

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

Regularities of residual stresses in smooth cylindrical specimens and specimens with semicircular profile notches after outstripping superficial plastic deforming and their influence on the endurance limit of solid and hollow specimens made of steel 20 under stress concentration have been analysed.

Residual stresses, surface hardening, cylindrical specimen, stress concentrator, non-propagating crack, endurance limit.

Информация об авторе

Семёнова Ольга Юрьевна, старший преподаватель кафедры высшей математики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Semyonova Olga Yourievna, senior lecturer of higher mathematics department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of research: residual stress mechanics.