

Машиностроение

УДК 621.787:539.319

ЗАВИСИМОСТЬ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ОБРАЗЦОВ С НАДРЕЗАМИ ОТ РАЗМЕРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

*В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, А.П. Филатов, В.В. Сазанов,
Ю.С. Ларионова*

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

Экспериментально установлено, что с увеличением размеров поперечного сечения образцов при одной и той же упрочняющей обработке сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое увеличиваются с одновременным уменьшением реактивных растягивающих напряжений в сердцевине. Для сохранения эффекта поверхностного упрочнения по сопротивлению многоциклового усталости необходимо увеличивать толщину поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями пропорционально размерам опасного поперечного сечения деталей. Показано, что оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений приводит к незначительному рассеянию соответствующего коэффициента по сравнению с оценкой по критерию остаточных напряжений на поверхности опасного сечения деталей. Поэтому критерий среднеинтегральных остаточных напряжений может быть рекомендован для прогнозирования предела выносливости упрочненных деталей с концентраторами напряжений.

Ключевые слова: *поверхностное упрочнение, предел выносливости, диаметр образца, концентратор напряжений, остаточные напряжения.*

Для исследования влияния на предел выносливости размеров поперечного сечения упрочненных деталей в условиях концентрации напряжений были проведены эксперименты на сплошных цилиндрических упрочненных и неупрочненных образцах различного диаметра из стали 20 с круговыми надрезами полу-круглого профиля. Исследуемая сталь 20 имела следующие механические характеристики: $\sigma_T = 395$ МПа, $\sigma_g = 522$ МПа, $\delta = 26,1$ %, $\psi = 65,9$ %, $S_K = 1416$ МПа.

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

Виктор Алексеевич Кирпичёв (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Сопротивление материалов».

Анатолий Петрович Филатов (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Сопротивление материалов».

Василий Вячеславович Сазанов, аспирант кафедры «Сопротивление материалов».

Юлия Сергеевна Ларионова, аспирант кафедры «Сопротивление материалов».

Гладкие образцы сплошного сечения диаметром $D = 10$ мм, $D = 25$ мм и $D = 50$ мм подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО) дробью диаметром 1,5 – 2,5 мм при давлении воздуха 0,28 МПа в течение 10 минут, а также обкатке роликом диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм при усилии $P = 0,5$ кН (ОР1) и $P = 1,0$ кН (ОР2) с подачей 0,11 мм/об и скоростью вращения образца 400 об/мин. Затем на все упрочненные и неупрочненные гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса $R = 0,5$ мм (рис. 1).

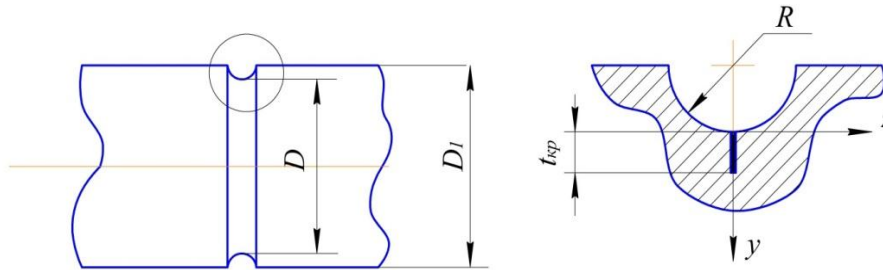


Рис. 1. Образец с надрезом полукруглого профиля и нераспространяющаяся трещина усталости

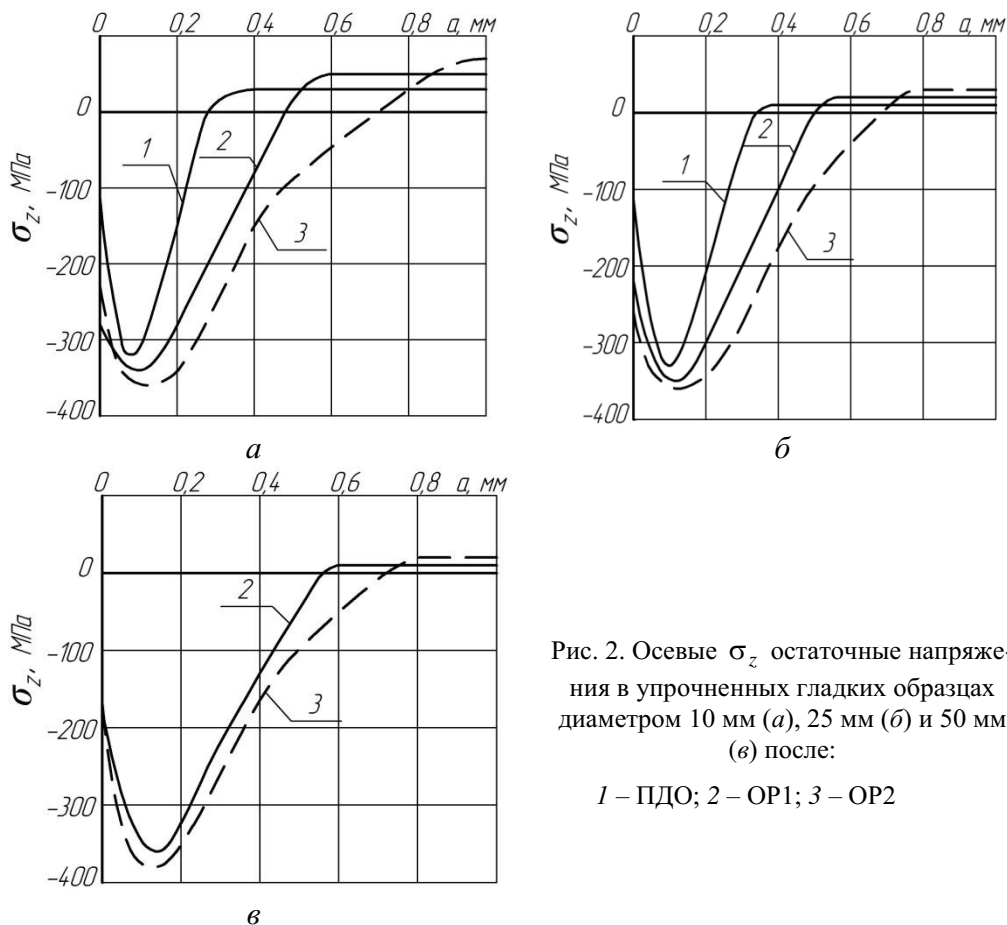


Рис. 2. Осевые σ_z остаточные напряжения в упрочненных гладких образцах диаметром 10 мм (а), 25 мм (б) и 50 мм (в) после:

1 – ПДО; 2 – ОР1; 3 – ОР2

Остаточные напряжения в гладких образцах определялись экспериментально методом колец и полосок [1]. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений

по толщине поверхностного слоя a гладких образцов представлено на рис. 2. Можно видеть, что сжимающие остаточные напряжения и глубина их залегания при одной и той же упрочняющей обработке с увеличением диаметра образцов увеличиваются, что объясняется повышением жесткости образцов с увеличением размеров их поперечного сечения. При этом реактивные (растягивающие) остаточные напряжения в сердцевине образцов с увеличением диаметра уменьшаются.

Остаточные напряжения в образцах с надрезами определялись расчетным путем – суммированием дополнительных остаточных напряжений за счет перераспределения остаточных усилий после опережающего поверхностного пластического деформирования и остаточных напряжений гладких образцов. При этом дополнительные остаточные напряжения вычислялись как аналитическим [2], так и численным методами с использованием программного комплекса Nas-tran/Patran [3]. Следует отметить, что результаты определения дополнительных остаточных напряжений двумя методами имели хорошее совпадение.

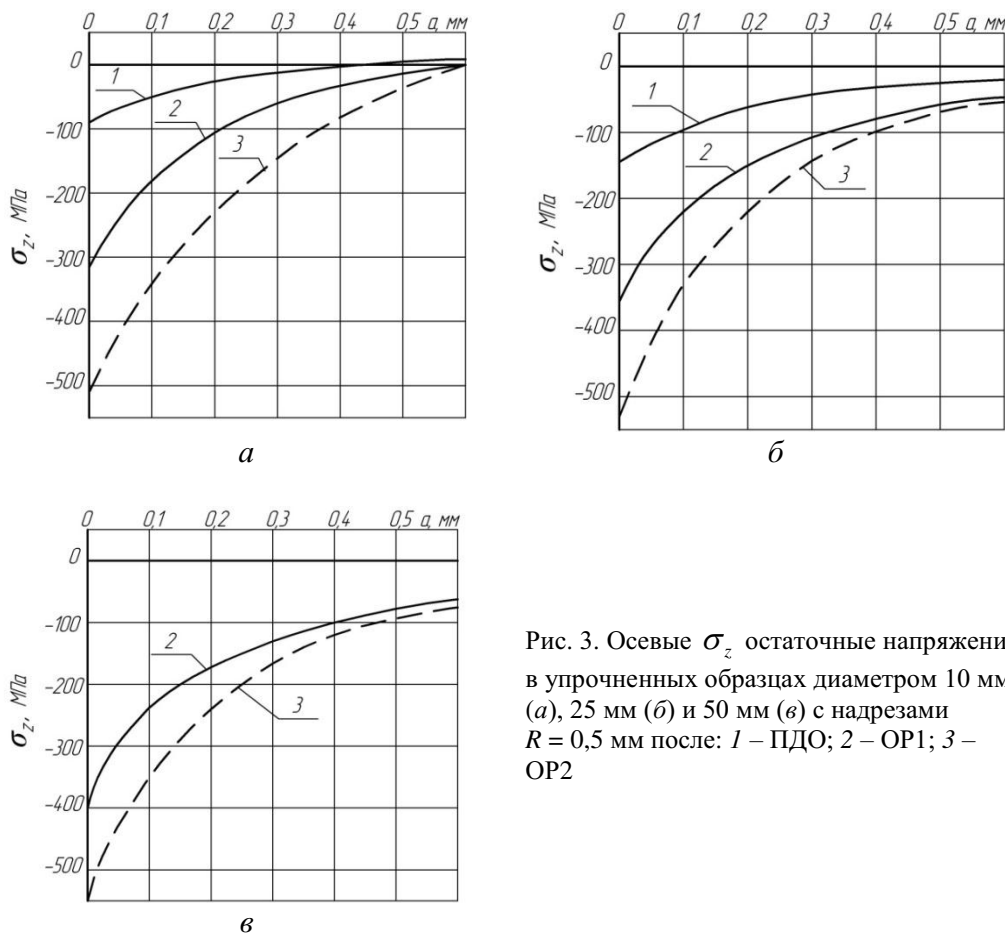


Рис. 3. Осевые σ_z остаточные напряжения в упрочненных образцах диаметром 10 мм (а), 25 мм (б) и 50 мм (в) с надрезами $R = 0,5$ мм после: 1 – ПДО; 2 – ОР1; 3 – ОР2

Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a в наименьшем сечении образцов с надрезом $R = 0,5$ мм приведено на рис. 3, а значения остаточных напряжений на поверхности дна надрезов $\sigma_z^{\text{пов}}$ представлены в таблице. Можно видеть, что при одной и той же упрочняющей

обработке сжимающие остаточные напряжения на поверхности надреза $\sigma_z^{нов}$ с увеличением диаметра образца увеличиваются. Этот факт объясняется увеличением сжимающих остаточных напряжений и глубины их залегания в упрочненных гладких образцах с увеличением их диаметра.

Результаты испытаний образцов на усталость и определения остаточных напряжений

D_1 , мм	D , мм	Неупрочненные образцы σ_{-1} , МПа	Упрочненные образцы						
			Обработка	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	Ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\Psi}_\sigma$
10	9	120	ПДО	137,5	-90	0,194	0,196	-48	0,365
			ОР1	187,5	-311	0,217	0,202	-178	0,379
			ОР2	250	-517	0,251	0,192	-333	0,390
25	24	112,5	ПДО	130	-142	0,123	0,525	-52	0,337
			ОР1	150	-349	0,107	0,530	-111	0,338
			ОР2	172,5	-525	0,114	0,520	-169	0,355
50	49	92,5	ОР1	122,5	-396	0,078	1,077	-82	0,366
			ОР2	132,5	-547	0,073	1,024	-112	0,357

Обращает на себя внимание значение наибольших сжимающих остаточных напряжений на поверхности надреза, достигающее -547 МПа (ОР2) при $D_1 = 50$ мм и превышающее не только предел текучести, но и предел прочности материала образцов. Наблюдаемому явлению было дано объяснение в работе [4], в которой показано, что наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений в упрочненном поверхностном слое детали при плоском напряженном состоянии может превышать даже сопротивление разрыву S_K материала детали на 15 %. Этот предел в исследуемом случае ($S_K = 1416$ МПа) не достигнут.

Испытания на многоцикловую усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочненных и упрочненных образцов диаметром 10 мм в гладкой части проводились на машине МУИ-6000, диаметром 25 мм – на машине УММ-01 [5], диаметром 50 мм – на машине УМП-02 [5]; база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения.

Результаты определения предела выносливости σ_{-1} представлены в таблице. Упрочненные образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при больших напряжениях. На изломах этих образцов были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, глубина $t_{кр}$ которых приведена в таблице. Нераспространяющиеся трещины в образцах диаметром 10 мм имели концентрическую форму, так как эти образцы испытывались на усталость при чистом изгибе с вращением, а в образцах диаметром 25 мм и 50 мм – серповидную форму, так как они испытывались при поперечном изгибе в одной плоскости. На рис. 4 приведена фотография излома образца диаметром 10 мм после ПДО, а на рис. 5 – диаметром 25 мм после обкатки роликом (ОР2). На фотографиях четко просматриваются нераспространяющиеся трещины усталости 2.

Критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости, измеренная в настоящем исследовании, незначительно (3,2 %) отличается от величины $t_{кр}$, вычисленной по зависимости, предложенной в работах [6, 7] на основании анализа большого числа экспериментов:

$$t_{кр} = 0,0216D, \quad (1)$$

где D – диаметр опасного сечения детали (образца).

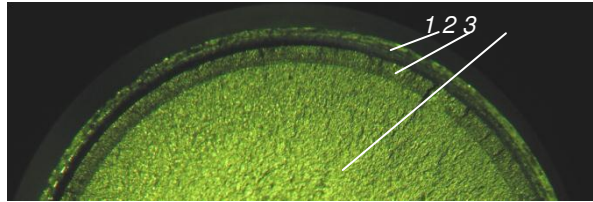


Рис. 4. Фотография излома упрочненного дробью образца диаметром

$$D_1 = 10 \text{ мм с надрезом } R = 0,5 \text{ мм:}$$

1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина,
3 – зона долома

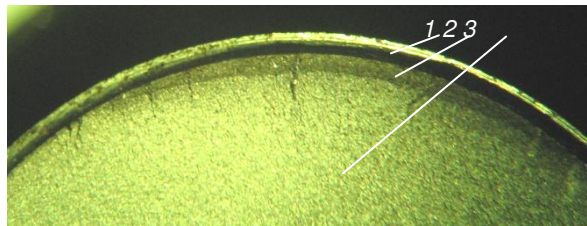


Рис. 5. Фотография излома упрочненного роликом образца диаметром

$$D_1 = 25 \text{ мм с надрезом } R = 0,5 \text{ мм:}$$

1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина,
3 – зона долома

Из представленных в таблице данных видно, что опережающее поверхностное пластическое деформирование пневмодробеструйной обработкой и обкаткой роликом приводит к повышению предела выносливости образцов с надрезом. Наиболее эффективна для исследованных образцов обкатка роликом, причем с увеличением усилия обкатки с $P = 0,5 \text{ кН}$ до $P = 1,0 \text{ кН}$ предел выносливости возрастает. Наблюдаемое явление объясняется большей глубиной залегания сжимающих остаточных напряжений в гладких упрочненных образцах при увеличении усилия обкатки (рис. 2), результатом чего явилось повышение остаточных напряжений в образцах с надрезом (рис. 3).

Оценка влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ образцов с надрезом проводилась по двум критериям: осевым остаточным напряжениям на поверхности надреза $\sigma_z^{ног}$ [8-15] и среднеинтегральным остаточным напряжениям $\bar{\sigma}_{осм}$ [7, 16-18]:

$$\Delta\sigma_{-1} = \psi_{\sigma} \left| \sigma_z^{ног} \right|, \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} \left| \sigma_{осм} \right|, \quad (3)$$

где ψ_σ и $\bar{\psi}_\sigma$ – коэффициенты влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критериям σ_z^{nos} и $\bar{\sigma}_{ocm}$ соответственно;

$$\bar{\sigma}_{ocm} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi; \quad (4)$$

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

С увеличением диаметра образцов от 10 до 50 мм приращение предела выносливости при одних и тех же режимах упрочняющей обработки уменьшается. Это связано с тем, что толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями при увеличении диаметра возрастает незначительно по сравнению с толщиной поверхностного слоя образцов, ответственной за повышение многоциклового усталости и равной критической глубине t_{kp} нераспространяющейся трещины усталости. Поэтому для сохранения эффекта упрочнения с увеличением диаметра детали следует в соответствии с формулами (1) и (4) увеличивать толщину упрочненного поверхностного слоя (толщину слоя со сжимающими остаточными напряжениями) пропорционально критической глубине t_{kp} нераспространяющейся трещины усталости.

Из анализа приведенных в таблице данных видно, что оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов в условиях концентрации напряжений по критерию σ_z^{nos} – остаточным напряжениям на поверхности концентратора – приводит к значительному рассеянию соответствующего коэффициента ψ_σ . Этот коэффициент в проведенном исследовании изменяется в широких пределах: от 0,073 до 0,251, то есть изменяется почти в 3,5 раза, что неприемлемо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных деталей.

Оценка влияния поверхностного упрочнения по критерию $\bar{\sigma}_{ocm}$ – среднеинтегральным остаточным напряжениям – приводит к существенно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$. Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ в проведенном исследовании изменяется от 0,337 до 0,390, составляя в среднем 0,361, и практически не отличается от значения $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$, установленного в работе [7] для упрочненных образцов и деталей с аналогичной концентрацией напряжений.

Выводы

1. При одной и той же поверхностной упрочняющей обработке с увеличением размеров поперечного сечения гладких образцов сжимающие остаточные напряжения и глубина их залегания возрастают с одновременным уменьшением растягивающих (реактивных) остаточных напряжений в сердцевине образцов.
2. Критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, выявленная в настоящем исследовании для упрочненных пневмодробеструйной

обработкой и обкаткой роликом образцов различного диаметра (10 – 50 мм) из стали 20, соответствует установленной ранее зависимости для деталей и образцов из других сталей и сплавов.

3. Оценка влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости образцов (деталей) различного диаметра в условиях концентрации по остаточным напряжениям на поверхности опасного сечения приводит к существенному рассеянию соответствующего коэффициента ψ_σ , что неприемлемо для прогнозирования предела выносливости упрочненных деталей на практике.

4. Оценка влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости образцов (деталей) различного диаметра по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений приводит к незначительному рассеянию соответствующего коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$, и поэтому этот критерий может быть рекомендован для прогнозирования предела выносливости упрочненных деталей с концентраторами напряжений.

5. С увеличением размеров поперечного сечения деталей в условиях концентрации напряжений для сохранения эффекта поверхностного упрочнения по сопротивлению многоциклового усталости необходимо увеличивать толщину поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями пропорционально размерам опасного поперечного сечения деталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Иванов С.И.* К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 53. – С. 32-42.
2. *Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф.* Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – Вып. 1. – С. 88-95.
3. *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 СГАУ. – Самара: СГАУ, 2011. – № 3 (27). Ч. 3. – С. 171-174.
4. *Радченко В.П., Павлов В.Ф.* Наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений при поверхностном упрочнении деталей // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАНУ, 2011. – С. 354-357.
5. *Филатов Э.Я., Павловский В.Э.* Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 92 с.
6. *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.
7. *Павлов В.Ф., Киртичѳв В.А., Вакулѳк В.С.* Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
8. *Свешников Д.А., Кудрявцев И.В., Гуляева Н.А.* Сопротивление усталости цементированных и цианированных сталей применительно к зубчатым колесам. – М.: ВНИИТМАШ, ОНТИ, 1966. – С. 48-55.
9. *Кравченко Б.А., Митряев К.Ф.* Обработка и выносливость высокопрочных материалов. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1968. – 131 с.
10. *Серенсен С.В., Борисов С.П., Бородин Н.А.* К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочненных образцов с учетом кинетики остаточной напряженности // Проблемы прочности. – 1969. – № 2. – С. 3-7.
11. *Туровский М.Л., Шифрин Н.М.* Концентрация напряжений в поверхностном слое цементированной стали // Вестник машиностроения. – 1970. – № 11. – С. 37-40.
12. *Туровский М.Л.* Остаточные напряжения во впадинах зубьев цементованных шестерен // Вестник машиностроения. – 1971. – № 9. – С. 38-40.
13. *Митряев К.Ф., Егоров В.И., Мальков Г.Ф., Уланов Б.Н., Степанов В.В.* Повышение

- усталостной прочности жаропрочных материалов алмазным выглаживанием поверхности деталей // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 53. – С. 150-159.
14. *Иванов С.И., Павлов В.Ф.* Влияние остаточных напряжений и наклепа на усталостную прочность // Проблемы прочности. – 1976. – № 5. – С. 25-27.
 15. *Иванов С.И., Павлов В.Ф., Прохоров А.А.* Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости при кручении в условиях концентрации напряжений // Проблемы прочности. – 1988. – № 5. – С. 31-33.
 16. *Павлов В.Ф.* О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – № 8. – С. 29-32.
 17. *Павлов В.Ф., Прохоров А.А.* Связь остаточных напряжений и предела выносливости при кручении в условиях концентрации напряжений // Проблемы прочности. – 1991. – № 5. – С. 43-46.
 18. *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. Физико-математические науки. – 2009. – № 2 (19). – С. 264-268.

Статья поступила в редакцию 25 января 2014 г.

SURFACE HARDENED SPECIMENS WITH CUTS ENDURANCE LIMIT DEPENDENCE ON CROSS-SECTION SIZES

V.F. Pavlov, V.A. Kirpichev, A.P. Filatov, V.V. Sazanov, Yu.S. Larionova

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University)
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086

It's experimentally established that hardened specimens cross-section sizes increase leads to the increase of compressive residual stresses in the surface layer and the decrease of reactive tensile stresses in the core under the same type of hardening. It's necessary to increase the thickness of surface hardened layer with compressive residual stresses proportionally to the parts dangerous cross-section sizes for hardening effect preservation. It's been shown that surface hardening influence on the parts endurance limit evaluation using the average integral residual stresses criterion leads to the slight dispersion of the stresses concentration coefficient versus the same evaluation using the dangerous section surface residual stresses criterion. So the average integral residual stresses criterion can be recommended for the hardened parts with stresses concentrators endurance limit forecasting.

Keywords: *surface hardening, endurance limit, specimen's diameter, stresses concentrator, residual stresses.*

*Valentin F. Pavlov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Victor A. Kirpichev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Anatoly P. Filatov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Vasily V. Sazanov, Postgraduate Student.
Yulia S. Yarionova, Postgraduate Student.*