

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

Materials mechanics: strength, durability, safety

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-8-44-49

ЗАВИСИМОСТЬ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ОБРАЗЦОВ С НАДРЕЗАМИ ОТ ГЛУБИНЫ УПРОЧНЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

© **Владимир Степанович Вакулюк, Валентин Карпович Шадрин,
Николай Андреевич Сургутанов**

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева (Самарский университет),
г. Самара, Россия; e-mail: sopromat@ssau.ru

Статья поступила 7 июля 2017 г.

Проведенное исследование показало, что при опережающем поверхностном пластическом деформировании гладких образцов увеличение глубины слоя со сжимающими остаточными напряжениями приводит к повышению предела выносливости образцов с надрезами за счет увеличения сжимающих остаточных напряжений в их опасном сечении. Исследования проводили на образцах диаметрами D , равными 10, 25 мм, а также диаметром $D = 25$ мм с отверстием $d = 15$ мм, которые подвергали пневмодробеструйной обработке и обкатке роликом. Остаточные напряжения в гладких образцах определяли механическим методом. На упрочненные гладкие образцы фасонным резцом наносились круговые надрезы радиусом R , равным 0,3 и 0,5 мм. Остаточные напряжения в образцах с надрезами находили численным методом путем расчета перераспределения остаточных напряжений при нанесении надреза. С увеличением диаметра образцов при одной и той же упрочняющей поверхностной обработке глубина слоя со сжимающими остаточными напряжениями возрастает за счет повышения жесткости образцов. Оценку влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов с надрезами проводили по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений, который учитывает как их величину, так и полноту эпюры остаточных напряжений. Данный критерий вычисляли по глубине нераспространяющейся трещины усталости, которая возникает в поверхностном слое опасного сечения образца при испытании на усталость на пределе выносливости. Испытания на усталость проводили в случае симметричного цикла, база испытаний — $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Оценка приращения предела выносливости поверхностно-упрочненных цилиндрических образцов с круговыми надрезами полукруглого профиля дала приемлемые для практики результаты. Использование предложенного способа позволит значительно сократить длительные и дорогостоящие испытания на усталость.

Ключевые слова: детали различного диаметра; поверхностное упрочнение; предел выносливости; критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

DEPENDENCE OF THE LIMIT ENDURANCE OF SPECIMENS WITH NOTCHES FROM THE DEPTH OF HARDENED SURFACE LAYER

© **Vladimir S. Vakulyuk, Valentin K. Shadrin, Nikolay A. Surgutanov**

Samara National Research University (Samara University), Samara, Russia; e-mail: sopromat@ssau.ru

Submitted July 7, 2017.

It is shown that, growth of the layer with compressive residual stresses at advanced surface plastic deformation of smooth samples leads to an increase in the endurance limit of the notched specimens due to an increase in the compressive residual stresses in their dangerous section. The study was conducted on the specimens with outer diameter D equal to 10 and 25 mm and on a 25 mm specimen with inner diameter $d = 15$ mm which were subjected to air shot blasting and roll-in. Residual stresses in smooth specimens were determined by the mechanical method. Circular incisions ($R = 0.3$ and 0.5 mm) were applied on hardened smooth samples with a shaped cutter. Residual stresses in notched specimens were determined by a numerical method calculating the redistribution of the residual stresses upon the incision. As the diameter of the samples increases with the same strengthening surface treatment,

the depth of the layer with the compressive residual stresses increases due to an increase in the rigidity of the samples. The effect of surface hardening on the endurance limit of notched specimens was evaluated according to the criterion of the average integral residual stresses, which takes into account both the magnitude and completeness of the residual stresses. This criterion was calculated from the depth of the non-propagating fatigue crack that occurs in the surface layer in the dangerous section of the specimen during the fatigue test at the limit endurance. Fatigue tests are carried out in symmetrical cycle, the test base being 3×10^6 cycles of loading. Estimation of the increment of the limit endurance of surface-hardened cylindrical specimens with semicircular notches gave the results acceptable for practice. The use of the proposed method can significantly reduce long-term and expensive fatigue tests.

Keywords: details of different diameter; surface hardening; limit endurance; criterion of the average integral residual stresses.

В практике современного машиностроения для повышения надежности и ресурса деталей механизмов и машин при их финишной обработке широко применяют методы поверхностного пластического деформирования (ППД), которые приводят к существенному повышению сопротивления усталости.

При этом в каждом конкретном случае необходимо назначать оптимальные по характеристикам сопротивления усталости детали методы и режимы ППД. Проведенные к настоящему времени экспериментальные исследования [1–8] показывают, что эффективность обработки ППД зависит от величины и характера распределения сжимающих остаточных напряжений в упрочненном поверхностном слое деталей.

Поэтому оптимальные методы и режимы ППД для конкретной детали можно назначить по результатам исследования распределения остаточных напряжений по глубине упрочненного слоя ее опасного сечения.

Исследовали влияние глубины упрочненного поверхностного слоя при опережающем поверхностном пластическом деформировании (ОППД) на предел выносливости образцов из стали 20 ($\sigma_b = 522$ МПа, $\delta = 26,1\%$, $\sigma_{0,2} = 395$ МПа, $\psi = 65,9\%$, $S_k = 1416$ МПа) в условиях концентрации напряжений (рис. 1).

Для создания упрочненного слоя различной глубины гладкие образцы диаметрами D , равными 10, 25 мм, а также $D = 25$ мм с отверстием диаметром $d = 15$ мм подвергали пневмодробеструйной обработке (ПДО) дробью диаметром 1,5–2,5 мм при давлении воздуха 0,28 МПа в течение 10 мин и обкатке роликом (ОР) диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм при усилиях P , равных 0,5 кН (ОР1) и 1,0 кН (ОР2) с подачей 0,11 мм/об и скоростью вращения образца 400 об/мин.

Остаточные напряжения в гладких образцах определяли методом удаления части цилиндрической поверхности [9] ($D = 10$ мм), а также методом колец и полосок [10]. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по глубине a упрочненного поверхностного слоя гладких об-

разцов показано на рис. 2. Из приведенных на нем эпюор остаточных напряжений можно видеть, что в образцах диаметром $D = 25$ мм сжимающие остаточные напряжения и глубина их залегания несколько выше, чем в образцах диаметром $D = 10$ мм, за счет повышения жесткости образцов с увеличением диаметра.

Максимальные сжимающие остаточные напряжения после использования методов поверхностного упрочнения различаются незначительно, составляя после пневмодробеструйной обработки – 338 МПа ($D = 10$ мм) и – 342 МПа ($D = 25$ мм), а после обкатки роликом — 362 МПа ($D = 10$ мм) и – 364 МПа ($D = 25$ мм).

Однако глубина слоя со сжимающими остаточными напряжениями (глубина упрочненного слоя) различается существенно: после ПДО — 0,29 мм ($D = 10$ мм) и 0,33 мм ($D = 25$ мм); после ОР при $P = 0,5$ кН — 0,48 мм ($D = 10$ мм) и 0,52 мм ($D = 25$ мм), а после ОР при $P = 1,0$ кН — 0,69 мм ($D = 10$ мм) и 0,71 мм ($D = 25$ мм). Следовательно, глубина упрочненного слоя со сжимающими остаточными напряжениями после обкатки роликом при $P = 1,0$ кН

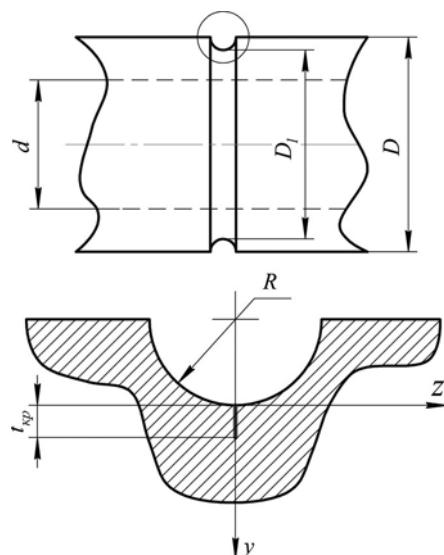


Рис. 1. Цилиндрический образец с надрезом и нераспространяющаяся трещина усталости

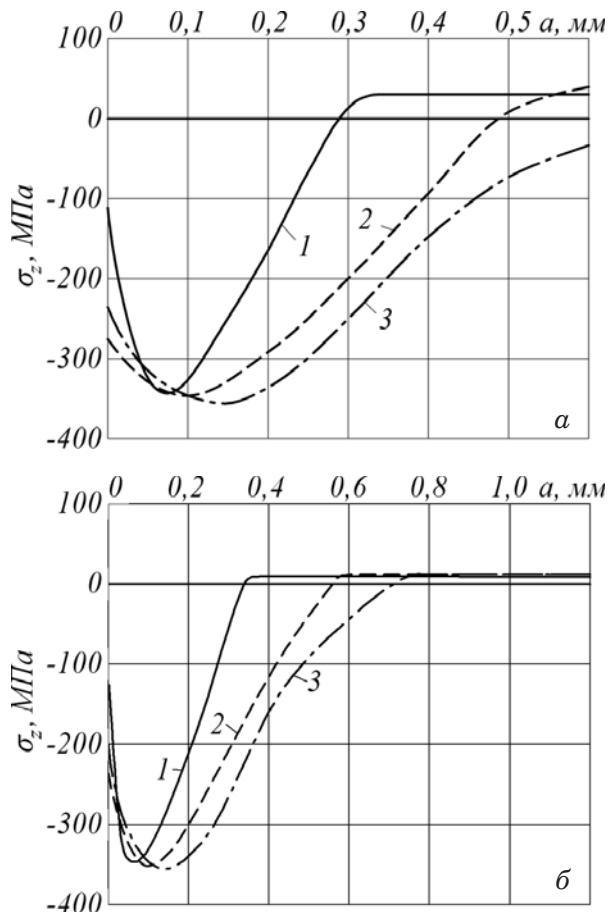


Рис. 2. Распределения осевых σ_z остаточных напряжений в гладких образцах диаметрами D , равными 10 мм, 25 мм с отверстием $d = 15$ мм (а) и 25 мм (б): 1 — ПДО; 2 — ОР1; 3 — ОР2

превышает соответствующую глубину слоя после пневмодробеструйной обработки в 2,2–2,4 раза.

Следует отметить, что сжимающие остаточные напряжения в гладких образцах диаметром $D = 10$ мм и в образцах диаметром $D = 25$ мм с отверстием $d = 15$ мм после одной и той же упрочняющей обработки были практически одинаковыми, причем различие после ПДО было значительно меньше, чем после ОР. Такое совпадение распределений сжимающих остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя для цилиндрических сплошных образцов различного диаметра с отверстием в случае, когда удвоенная глубина стенки равна диаметру гладкого образца, описано в работах [11, 12].

На все неупрочненные и упрочненные гладкие образцы фасонным резцом наносили круговые надрезы полукруглого профиля радиусами R , равными 0,3 и 0,5 мм. Остаточные напряжения в упрочненных образцах с надрезами определяли как аналитически, так и численным методом — путем расчета перераспределения остаточных напряжений, обусловленного нанесением надрезов [13]. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по глубине a поверхностного слоя наименьшего сечения образцов с надрезами приведено на рис. 3. Видно, что в упрочненных роликом образцах с надрезами сжимающие остаточные напряжения существенно выше как на поверхности, так и по глубине поверхностного слоя наименьшего сечения, чем в образцах,

Результаты испытаний на усталость образцов с надрезами

D , мм	d , мм	R , мм	Неупрочненные образцы		Упрочненные образцы		
			σ_{-1} , МПа	Обработка	σ_{-1} , МПа	$\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, МПа	$\bar{\Psi}_{\sigma}$
10	0	0,3	110	ПДО	155	-126	0,357
				ОР1	230	-337	0,356
		0,5	120	ОР2	267,5	-454	0,347
	0,5			ПДО	137,5	-48	0,365
				ОР1	187,5	-178	0,379
				ОР2	250	-333	0,390
25	0	0,3	107,5	ПДО	137,5	-87	0,345
				ОР1	165	-171	0,336
		0,5	112,5	ОР2	175	-202	0,334
	0,5			ПДО	130	-52	0,337
				ОР1	150	-111	0,338
				ОР2	172,5	-169	0,355
25	15	0,3	95	ПДО	127,5	-88	0,368
				ОР1	155	-181	0,331
		0,5	110	ОР2	177,5	-248	0,333
	0,5			ПДО	127,5	-47	0,372
				ОР1	152,5	-128	0,332
				ОР2	182,5	-218	0,333

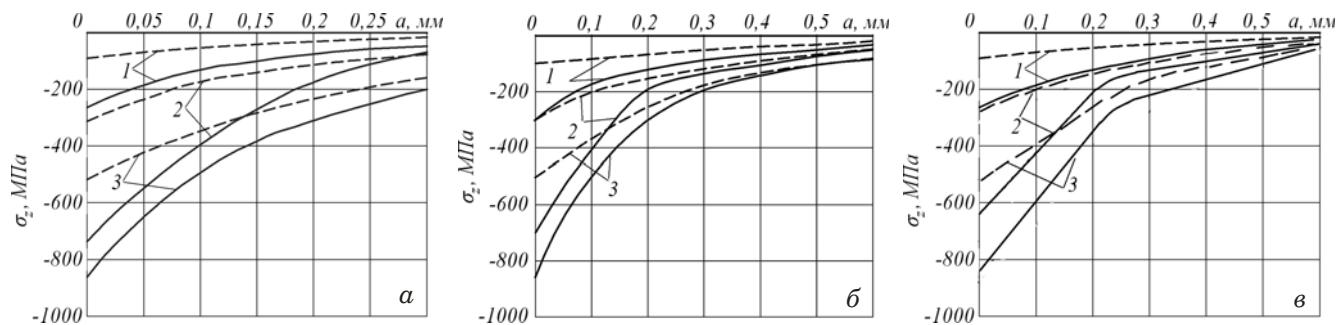


Рис. 3. Распределения осевых σ_z остаточных напряжений в образцах диаметрами D , равными 10 мм (а), 25 мм (б) и $D = 25$ мм, $d = 15$ мм (в) с надрезами R , равными 0,3 мм (сплошная линия) и 0,5 мм (пунктирная линия): 1 — ПДО; 2 — ОР1,3 — ОР2

упрочненных пневмодробеструйной обработкой. Наблюданное различие в распределении остаточных напряжений образцов с надрезами обусловлено тем, что глубина упрочненного поверхностного слоя гладких образцов после обкатки роликом больше, чем после пневмодробеструйной обработки (см. рис. 2).

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла образцов с надрезами диаметром $D = 10$ мм проводили на машине МУИ-6000, диаметром $D = 25$ мм — на машине УММ-01 [14]; база испытаний — $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости σ_{-1} приведены в таблице.

Из нее следует, что предел выносливости образцов с надрезами после обкатки роликом существенно выше, чем после пневмодробеструйной обработки. При радиусе надреза $R = 0,3$ мм предел выносливости σ_{-1} образцов после ОР2 повысился в 2,4 ($D = 10$ мм) и в 1,6 ($D = 25$ мм) раза, а после ПДО только в 1,4 ($D = 10$ мм) и в 1,3 ($D = 25$ мм) раза.

С увеличением радиуса надреза до 0,5 мм это различие возрастает. Следовательно, с увеличением глубины упрочненного поверхностного слоя (глубины слоя со сжимающими остаточными напряжениями) гладких образцов при ОППД предел выносливости образцов с надрезами, нанесенными на эти гладкие образцы, повышается. В упрочненных образцах после испытаний на усталость обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, которые для образцов диаметром $D = 10$ мм имели концентрическую, а для образцов диаметрами $D = 25$ мм и $D/d = 25$ мм/15 мм — серповидную форму.

Концентрическая форма нераспространяющейся трещины объясняется тем, что испытания образцов диаметром $D = 10$ мм проводили при изгибе с вращением, диаметрами $D = 25$ мм и $D/d = 25$ мм/15 мм — при изгибе в одной плоскости.

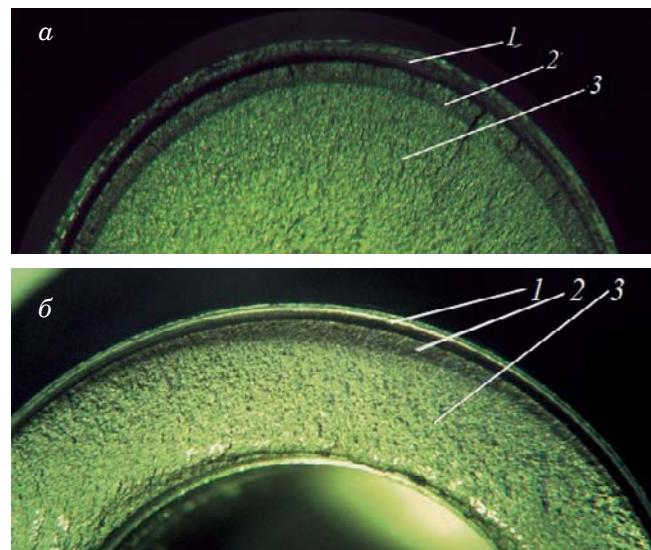


Рис. 4. Изломы упрочненного дробью образца диаметром $D = 10$ мм (а) и упрочненного роликом образца с отверстием диаметром $D/d = 25$ мм/15 мм (б) с надрезами $R = 0,5$ мм: 1 — надрез; 2 — нераспространяющаяся трещина; 3 — зона долома

На рис. 4 представлены фотографии изломов образцов диаметром $D = 10$ мм (а) и диаметром $D/d = 25$ мм/15 мм (б), на которых видны нераспространяющиеся трещины усталости 2. В образцах различных диаметров, испытанных при напряжениях, равных пределу выносливости, средняя критическая глубина (t_{kp}) трещин существенно отличалась: при $D = 10$ мм — $t_{kp} = 0,201$ мм ($R = 0,3$ мм) и $t_{kp} = 0,197$ мм ($R = 0,5$ мм); при $D = 25$ мм — $t_{kp} = 0,525$ мм ($R = 0,3$ мм) и $t_{kp} = 0,523$ мм ($R = 0,5$ мм); при $D/d = 25$ мм/15 мм — $t_{kp} = 0,446$ мм ($R = 0,3$ мм) и $t_{kp} = 0,442$ мм ($R = 0,5$). Это соответствует данным работы [5] о зависимости t_{kp} от диаметра опасного сечения поверхностно-упрочненных образцов и деталей, изготовленных из других сталей и сплавов.

Оценку влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов с надрезами

проводили по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений [15]

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

где $\sigma_z(\xi)$ — осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении образца (детали) по глубине поверхности слоя a ; $\varepsilon = a/t_{\text{кр}}$ — расстояние от дна надреза до текущего слоя, выраженное в долях $t_{\text{кр}}$ (см. рис. 1); $t_{\text{кр}}$ — критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе образца (детали) на пределе выносливости.

Приращение предела выносливости упрочненных образцов $\Delta\sigma_{-1}$ с использованием критерия $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ определяли по зависимости

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} |\bar{\sigma}_{\text{ост}}|,$$

где $\bar{\psi}_{\sigma}$ — коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по разрушению.

Значения критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ и коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ приведены в таблице. Видно, что коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ имеет небольшое рассеяние, составляя в среднем 0,366, 0,341, 0,345 для образцов диаметрами 10, 25 и 25 мм/15 мм соответственно. Он незначительно отличается от $\bar{\psi}_{\sigma} = 0,36$, установленного в [5] для упрочненных образцов и деталей с аналогичной концентрацией напряжений. Меньшее в среднем значение коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ для образцов диаметром 25 мм объясняется, очевидно, большей концентрацией напряжений с увеличением диаметра образца при одном и том же радиусе полукруглого надреза [16].

Проведенное исследование показало, что при опережающем поверхностном пластическом деформировании гладких образцов увеличение глубины слоя со сжимающими остаточными напряжениями приводит к повышению предела выносливости образцов с надрезами за счет увеличения сжимающих остаточных напряжений в их опасном сечении.

С увеличением диаметра гладких образцов (деталей) при одной и той же поверхностной упрочняющей обработке глубина слоя со сжимающими остаточными напряжениями возрастает за счет повышения жесткости образцов.

Критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости $t_{\text{кр}}$ для образцов из стали 20 диаметрами 10, 25 и 25 мм/15 мм соответствует установленной ранее зависимости $t_{\text{кр}}$ от диаметра опасного сечения образцов и деталей, изготовленных из других материалов.

Оценка приращения предела выносливости поверхности упрочненных образцов по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений дает приемлемые для практики результаты, что позволит значительно сократить длительные и дорогостоящие испытания на усталость.

ЛИТЕРАТУРА

- Иванов С. И., Павлов В. Ф. Влияние остаточных напряжений и наклена на усталостную прочность / Проблемы прочности. 1976. № 5. С. 25 – 27.
- 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.
- Радченко В. П., Кирпичев В. А., Лунин В. В. Влияние превмодробструйной обработки и термоэкспозиции на остаточные напряжения и предел выносливости образцов с надрезами из сплавов В95 и Д16Т / Вестник СамГТУ. Сер.: физ.-мат. науки. 2011. № 3(24). С. 181 – 184.
- Павлов В. Ф., Вакулюк В. С., Чирков А. В., Сазанов В. П. Прогнозирование предела выносливости поверхности упрочненных деталей в условиях концентрации напряжений / Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15. № 4(44). С. 111 – 115.
- Павлов В. Ф., Кирпичев В. А., Вакулюк В. С. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений. — Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. — 125 с.
- Кирпичев В. А., Саушкин М. Н., Сазанов В. П., Семенова О. Ю. Остаточные напряжения и сопротивление усталости образцов с V-образным надрезами из стали ВНС 40 / Вестник СГАУ. 2012. № 5(36). Ч. 1. С. 95 – 99.
- Радченко В. П., Кирпичев В. А., Лунин В. В. Влияние обкатки роликом на остаточные напряжения и сопротивление усталости образцов из стали 40ХН / Вестник СамГТУ. Сер.: техн. науки. 2013. № 1 (37). С. 142 – 150.
- Вакулюк В. С., Кирпичев В. А., Павлов В. Ф., Сазанов В. П. Прогнозирование предела выносливости поверхности упрочненных образцов с концентраторами напряжений / Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17. № 1(54). С. 45 – 49.
- Иванов С. И., Григорьева И. В. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом снятия части поверхности / Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. Вып. 48. — Куйбышев: КуАИ, 1971. С. 179 – 183.
- Иванов С. И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок / Остаточные напряжения. Вып. 53. — Куйбышев: КуАИ, 1971. С. 32 – 42.
- Павлов В. Ф., Кирпичев В. А., Иванов В. Б., Семенова О. Ю., Денискина Е. А. Закономерности распределения остаточных напряжений в упрочненных цилиндрических деталях с отверстием различного диаметра / Труды четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием. Ч. 1. Математическое моделирование и краевые задачи. — Самара: СамГТУ, 2007. С. 171 – 174.
- Павлов В. Ф., Кирпичев В. А., Семенова О. Ю., Иванов В. Б. Особенности распределения остаточных напряжений в упрочненных цилиндрических деталях после дробоструйной обработки / Труды пятой Всероссийской научной конференции с международным участием. Ч. 1. Математическое моделирование и краевые задачи. — Самара: СамГТУ, 2008. С. 229 – 232.
- Иванов С. И., Шатунов М. П., Павлов В. Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом / Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. Вып. 1. — Куйбышев: КуАИ, 1974. С. 88 – 95.
- Филатов Э. Я., Павловский В. Э. Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость. — Киев: Наукова Думка, 1985. — 92 с.
- Павлов В. Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений / Изв. вузов. Машиностроение. 1986. № 8. С. 29 – 32.

16. Кирпичев В. А., Филатов А. П., Карапаева О. В., Чирков А. В., Семенова О. Ю. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упроченных деталей при различной степени концентрации напряжений / Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». — Киев: ИПП им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2011. С. 678 – 685.

REFERENCES

1. Ivanov S. I., Pavlov V. F. Residual stresses and peening influence on the fatigue strength / Probl. Prochn. 1976. N 5. P. 25 – 27 [in Russian].
2. Pavlov V. F., Prokhorov A. A. The connection between residual stresses and endurance limit under the torsion in stresses concentration conditions / Probl. Prochn. 1991. N 5. P. 43 – 46 [in Russian].
3. Radchenko V. P., Kirpichev V. A., Lunin V. V. Shotblasting influence on the endurance limit of specimens made of alloys V95 and D16T with notches / Vestn. SamGTU. Ser. Fiz.-Mat. Nauki. 2011. N 3(24). P. 181 – 184 [in Russian].
4. Pavlov V. F., Vakulyuk V. S., Chirkov A. V., Sazanov V. P. Surface hardened parts endurance limit prediction in stresses concentration conditions / Vestn. UGATU. 2011. Vol. 15. N 4(44). P. 111 – 115 [in Russian].
5. Pavlov V. F., Kirpichev V. A., Vakulyuk V. S. Residual stresses and fatigue resistance of surface hardened parts with stress concentrators. — Samara: Izd. SNTs RAN, 2012. — 125 p. [in Russian].
6. Kirpichev V. A., Saushkin M. N., Sazanov V. P., Semenova O. Yu. Residual stresses and fatigue resistance of specimens with V-form cuts made of VNS40 steel / Vestn. SGAU. 2012. N 5(36). Part 1. P. 95 – 99 [in Russian].
7. Radchenko V. P., Kirpichev V. A., Lunin V. V. Rolling influence on residual stresses and fatigue resistance of specimens made of steel 40KhN / Vestn. SamGTU. Ser. Tekhn. Nauki. 2013. N 1(37). P. 142 – 150 [in Russian].
8. Vakulyuk V. S., Kirpichev V. A., Pavlov V. F., Sazanov V. P. Surface hardened specimens with stress concentrators endur-
ance limit prediction / Vestn. UGATU. 2013. Vol. 17. N 1(54). P. 45 – 49 [in Russian].
9. Ivanov S. I., Grigor'eva I. V. On residual stresses determining in a cylinder by removing part of the surface / Problems of aircraft constructions elements strength. Issue 48. — Kuibyshev: KuAI, 1971. P. 179 – 183 [in Russian].
10. Ivanov S. I. On residual stresses determining in a cylinder by rings-and-stripes method / Residual stresses. Issue 53. — Kuibyshev: KuAI, 1971. P. 32 – 42 [in Russian].
11. Pavlov V. F., Kirpichev V. A., Ivanov V. B., Semenova O. Yu., Deniskina E. A. The regularities of residual stresses distribution in cylindrical parts with holes of various diameters / Proc. of the fourth All-Russian scientific conference with international participation. Part 1. Mathematical modeling and boundary-value problems. — Samara: SamGTU, 2007. P. 171 – 174 [in Russian].
12. Pavlov V. F., Kirpichev V. A., Semenova O. Yu., Ivanov V. B. The peculiarities of residual stresses distribution in hardened cylindrical parts after shot-blasting / Proc. of the fifth All-Russian scientific conference with international participation. Part 1. Mathematical modeling and boundary-value problems. — Samara: SamGTU, 2008. P. 229 – 232 [in Russian].
13. Ivanov S. I., Shatunov M. P., Pavlov V. F. The influence of residual stresses on the endurance of notched specimens / Problems of aircraft constructions elements strength. Issue 1. — Kuibyshev: KuAI, 1974. P. 88 – 95 [in Russian].
14. Filatov É. Ya., Pavlovskii V. É. Universal machine complex for fatigue tests of materials and structures. — Kiev: Naukova dumka, 1985. — 92 p. [in Russian].
15. Pavlov V. F. On the connection between residual stresses and endurance limit under bending in stresses concentration conditions / Izv. Vuzov. Mashinostr. 1986. N 8. P. 29 – 32 [in Russian].
16. Kirpichev V. A., Filatov A. P., Karanaeva O. V., Chirkov A. V., Semenova O. Yu. Surface hardened parts endurance limit prediction under stresses concentration various degree. Proceedings of the International Scientific Technical Conference “Materials and constructions elements strength”. — Kiev: IPP im. G. S. Pisarenko NAN Ukraine, 2011. P. 678 – 685 [in Russian].