

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ОБРАЗЦОВ С НАДРЕЗАМИ РАЗЛИЧНОГО РАДИУСА

В.С. Вакулюк, В.Ф. Павлов, А.В. Чирков, С.А. Михалкина

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34

E-mail: sopromat@ssau.ru

Изучено влияние радиуса кругового надреза полукруглого профиля на предел выносливости цилиндрических сплошных и полых образцов из стали 20 диаметром 25 мм при опережающем поверхностном пластическом деформировании. Установлено, что с увеличением радиуса надреза от 0,3 мм до 1,0 мм предел выносливости образцов уменьшается при одной и той же упрочняющей обработке. Для сохранения эффекта упрочнения следует увеличивать толщину упрочненного поверхностного слоя образцов при опережающем поверхностном пластическом деформировании.

Ключевые слова: цилиндрический образец, опережающее поверхностное пластическое деформирование, надрез различного радиуса, предел выносливости.

В исследовании изучалось влияние радиуса надреза при опережающем поверхностном пластическом деформировании (ОППД) цилиндрических сплошных образцов диаметром $D_1 = 25$ мм и образцов с отверстием $D_1/d = 25/15$ мм/мм (рис. 1) на предел выносливости при изгибе. Гладкие образцы из стали 20 ($\sigma_B = 522$ МПа, $\sigma_T = 395$ МПа, $\delta = 26,1$ %, $\psi = 65,9$ %, $S_k = 1416$ МПа) 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 (ОР-1) и $P = 1,0$ кН (ОР-2) с подачей 0,11 мм/об и скоростью вращения образца 400 об/мин. Затем на все упрочненные и неупрочненные гладкие образцы диаметром 25 мм наносились круговые надрезы полукруглого профиля трех радиусов: $R = 0,3$ мм, $R = 0,5$ мм и $R = 1,0$ мм.

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 приведено на рис. 2. Из данных рис. 2 можно видеть, что при одной и той же упрочняющей обработке в гладких образцах с отверстием сжимающие остаточные напряжения по максимальной величине примерно одинаковы с напряжениями сплошных образцов, а глубина смены знака этих напряжений для образцов с отверстием меньше, чем для сплошных образцов. Следует также отметить, что значения реактивных растягивающих остаточных напряжений под упрочненным слоем в образцах с отверстием выше, чем в сплошных

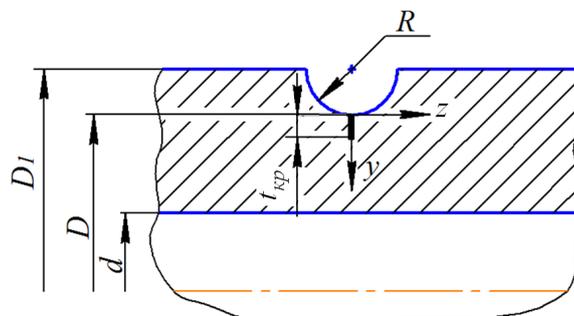
Владимир Степанович Вакулюк (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Сопротивление материалов».

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

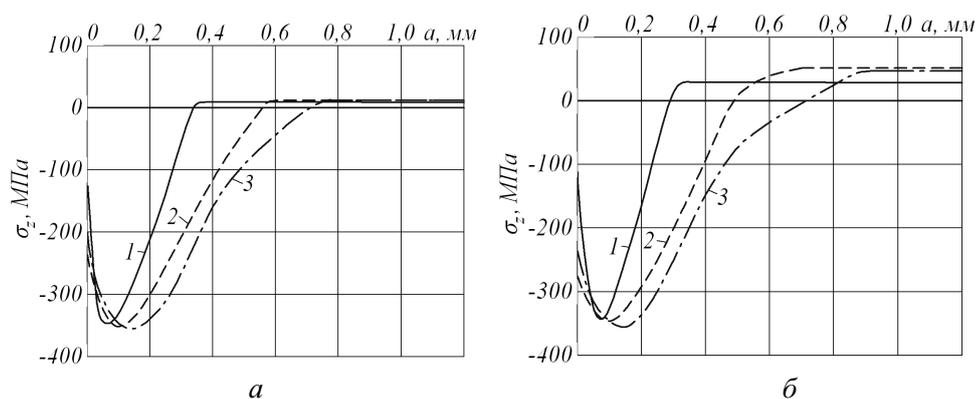
Алексей Викторович Чирков (к.т.н.), ассистент кафедры «Сопротивление материалов».

Светлана Алексеевна Михалкина, старший преподаватель кафедры «Сопротивление материалов».

образцах. Все эти особенности характера распределения остаточных напряжений необходимо учитывать при прогнозировании предела выносливости упрочненных деталей с концентраторами после ОППД.



Р и с. 1. Надрез полукруглого профиля и нераспространяющаяся трещина усталости



Р и с. 2. Осевые σ_z остаточные напряжения в упрочненных гладких сплошных образцах диаметром $D_1 = 25$ мм (а) и полых образцах диаметром $D_1/d = 25/15$ мм/мм (б) после:
1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

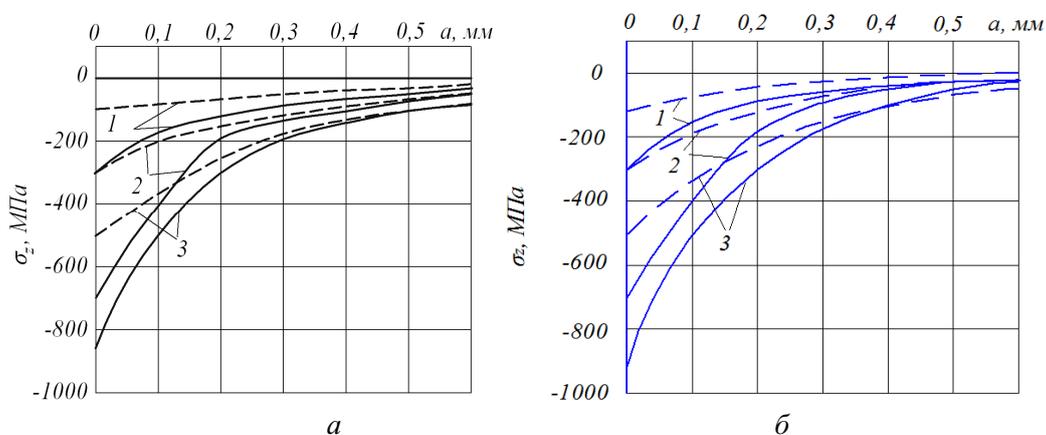
Из данных рис. 2 следует, что после нанесения на упрочненные ПДО образцы надрезов с радиусами $R = 0,3$ мм и $R = 0,5$ мм материал на дне концентраторов находится в ненаклепанном состоянии. Такое же состояние наблюдается после нанесения на упрочненные обкаткой роликом образцы при $P = 0,5$ кН надрезов с радиусом $R = 0,5$ мм. Для образцов с надрезами $R = 1,0$ мм во всех случаях упрочнения материал на дне концентраторов находится в ненаклепанном состоянии. В остальных случаях обкатки роликом материал на дне надрезов находится в наклепанном состоянии ($P = 0,5$ кН – $R = 0,3$ мм; $P = 1,0$ кН – $R = 0,3$ мм и $R = 0,5$ мм).

Остаточные напряжения в упрочненных образцах с надрезами определялись аналитическим методом – суммированием дополнительных остаточных напряжений за счет перераспределения остаточных усилий при нанесении надреза и остаточных напряжений гладких образцов [2], а также численным методом с использованием программного комплекса Nastran/Patran. Остаточные напряжения в образцах с надрезами, определенные аналитическим и численным методами, имели хорошее сов-

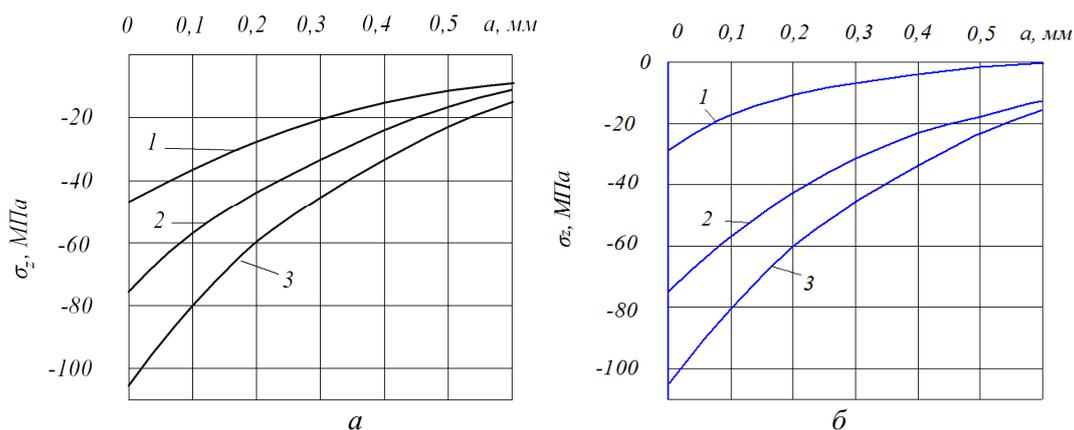
падение. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a наименьшего сечения образцов приведено на рис. 3 и рис. 4.

Следует отметить, что задача определения остаточных напряжений в круговых концентраторах цилиндрических образцов после ОППД рассматривалась в ряде работ. В частности, в [3 – 5] она была решена методом конечных элементов для осесимметричной постановки и в результате получены поля остаточных напряжений для осевой, радиальной и тангенциальной компонент тензора напряжений.

Анализируя данные рис. 2 – 4, можно видеть, что при практически одинаковых максимальных остаточных напряжениях гладких образцов в образцах с надрезами одного радиуса остаточные напряжения тем выше, чем больше толщина поверхностного слоя гладких образцов со сжимающими остаточными напряжениями. Эта закономерность объясняется концентрацией остаточных напряжений в области дна надреза [2].



Р и с. 3. Осевые σ_z остаточные напряжения в сплошных (а) и полых (б) упрочненных образцах с надрезами (— — — — — $R = 0,3$ мм; - - - - - $R = 0,5$ мм) после:
1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН



Р и с. 4. Осевые σ_z остаточные напряжения в сплошных (а) и полых (б) упрочненных образцах с надрезами $R = 1,0$ мм после:
1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

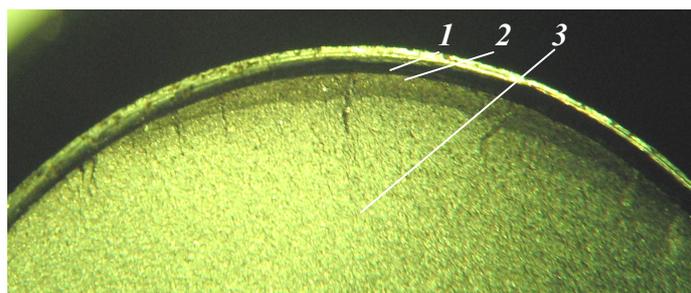
Испытания на усталость при поперечном изгибе в случае симметричного цикла образцов с надрезами проводились на машине УММ-01 [6], база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости σ_{-1} представлены в таблице.

Выстоявшие базу испытаний упрочненные образцы при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при большем напряжении. Во всех упрочненных образцах были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, средняя глубина $t_{кр}$ которых для каждой партии образцов представлена в таблице. Следует отметить, что значения $t_{кр}$ хорошо согласуются с установленной ранее [7, 8] зависимостью

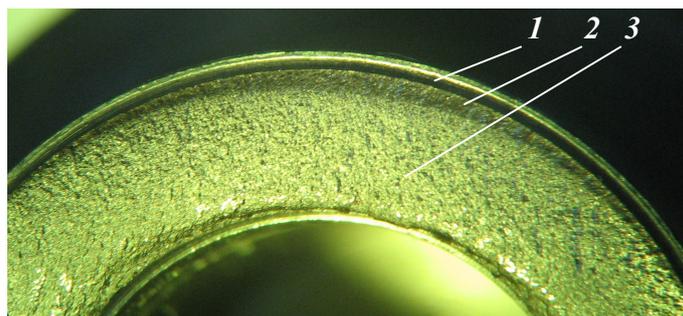
$$t_{кр} = 0,0216D \left[1 - 0,04 \left(\frac{d}{D} \right)^2 - 0,54 \left(\frac{d}{D} \right)^3 \right], \quad (1)$$

где D – диаметр опасного сечения упрочненного образца (детали) с концентратором напряжений, d – диаметр отверстия.

На рис. 5 представлены фотографии изломов сплошного (рис. 5, *а*) и полого (рис. 5, *б*) упрочненных образцов, на которых четко просматриваются нераспространяющиеся трещины усталости 2.



а



б

Р и с. 5. Изломы упрочненного ПДО образца диаметром $D = 25$ мм с надрезом $R = 0,5$ мм (*а*) и упрочненного роликом при $P = 1,0$ кН образца $D/d = 25/15$ мм/мм с надрезом $R = 0,5$ мм (*б*): 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

Из данных таблицы видно, что с увеличением радиуса надреза приращение предела выносливости образцов за счет упрочнения снижается, так как уменьшаются сжимающие остаточные напряжения в их опасном сечении. Поэтому для сохранения эффекта упрочнения при опережающем поверхностном пластическом деформирова-

нии с увеличением глубины надреза необходимо увеличивать толщину слоя гладкой детали со сжимающими остаточными напряжениями.

Для оценки приращения предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ за счет поверхностного упрочнения использовались два критерия влияния остаточных напряжений на предел выносливости при изгибе в случае симметричного цикла. Первым критерием [9 – 12] являются осевые остаточные напряжения $\sigma_z^{ног}$ на поверхности концентратора. Зависимость для определения приращения предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ упрочненных образцов (деталей) в этом случае имеет вид

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

где ψ_{σ} – коэффициент влияния остаточных напряжений по критерию $\sigma_z^{ног}$ на предел выносливости по разрушению.

Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

D, мм	d, мм	R, мм	Неупроч. образцы σ_{-1} , МПа	Упрочненные образцы						
				Обработка	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{ног}$, МПа	ψ_{σ}	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
24,4	0	0,3	107,5	ПДО	137,5	-343	0,087	0,540	-87	0,345
				ОР-1	165	-787	0,073	0,510	-171	0,336
				ОР-2	175	-908	0,074	0,520	-202	0,334
24,0	0	0,5	112,5	ПДО	130	-142	0,123	0,525	-52	0,337
				ОР-1	150	-349	0,107	0,530	-111	0,338
				ОР-2	172,5	-515	0,117	0,520	-169	0,355
23,0	0	1,0	112,5	ПДО	120	-46	0,163	0,490	-21	0,357
				ОР-1	130	-92	0,190	0,510	-46	0,380
				ОР-2	142,5	-145	0,207	0,495	-79	0,380
24,4	15	0,3	95	ПДО	127,5	-307	0,106	0,452	-88	0,368
				ОР-1	155	-732	0,082	0,445	-181	0,331
				ОР-2	177,5	-861	0,096	0,442	-248	0,333
24,0	15	0,5	110	ПДО	127,5	-124	0,121	0,438	-47	0,372
				ОР-1	152,5	-311	0,137	0,442	-128	0,332
				ОР-2	182,5	-517	0,140	0,446	-218	0,333
23,0	15	1,0	90	ПДО	95	-29	0,175	0,410	-14	0,357
				ОР-1	105	-77	0,195	0,420	-39	0,384
				ОР-2	110	-105	0,191	0,420	-53	0,377

Для определения второго критерия в работе [13] использовалось решение задачи [2] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении образца (детали) после нанесения на упрочненную поверхность надреза полуэллиптического профиля. После выделения основной части решения [2] был получен второй критерий $\bar{\sigma}_{ocm}$ влияния упрочнения на предел выносливости образца (детали) в виде

$$\bar{\sigma}_{ocm} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (3)$$

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

Критерий $\bar{\sigma}_{ocm}$, который в дальнейшем будем называть критерием среднеинтегральных остаточных напряжений, имеет четко выраженный физический смысл – это остаточное напряжение на дне нераспространяющейся трещины усталости с точностью до постоянного коэффициента, зависящего от радиуса у дна трещины и ее глубины. Приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ при изгибе в случае симметричного цикла с использованием критерия $\bar{\sigma}_{ocm}$ определяется по формуле

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_\sigma |\bar{\sigma}_{ocm}|, \quad (4)$$

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

Значения остаточных напряжений на поверхности надрезов σ_z^{nos} и среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ocm}$ приведены в таблице. По результатам испытаний на усталость неупрочненных и упрочненных образцов по формулам (2) и (4) вычислялись коэффициенты ψ_σ и $\bar{\psi}_\sigma$, значения которых представлены в таблице. Из данных таблицы можно видеть, что оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов по первому критерию – остаточным напряжениям на поверхности концентратора σ_z^{nos} – приводит к значительному рассеянию коэффициента ψ_σ . Этот коэффициент в настоящем исследовании изменяется в широких пределах – от 0,073 до 0,207, то есть в три раза, что неприемлемо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных деталей.

Оценка влияния поверхностного упрочнения по второму критерию – среднеинтегральным остаточным напряжениям $\bar{\sigma}_{ocm}$ – приводит к существенно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$. Это объясняется тем, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений учитывает влияние на сопротивление усталости не только величины сжимающих остаточных напряжений, но и характера их распределения по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали (образца). Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ в проведенном исследовании изменяется от 0,331 до 0,384, составляя в среднем 0,350, и практически совпадает с значением $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$, установленным в [8] для упрочненных образцов и деталей с аналогичной концентрацией напряжений.

Необходимо отметить, что на значения коэффициентов ψ_σ и $\bar{\psi}_\sigma$ не оказывает

влияния состояние материала на поверхности концентраторов. Из данных таблицы видно, что не наблюдается определенной зависимости между величинами коэффициентов ψ_σ , $\bar{\psi}_\sigma$ и наклепанным или ненаклепанным состоянием материала образцов.

Выводы

1. Проведенное исследование показало, что с увеличением глубины надреза при опережающем поверхностном пластическом деформировании сжимающие остаточные напряжения в опасном сечении образца (детали) уменьшаются – в результате предел выносливости снижается. Для сохранения эффекта упрочнения необходимо увеличивать толщину поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями при ОППД.

2. Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости цилиндрических образцов с круговыми надрезами различного радиуса по критерию остаточных напряжений $\sigma_z^{нов}$ на поверхности концентратора приводит к существенному рассеянию коэффициента ψ_σ , что затрудняет использование критерия $\sigma_z^{нов}$ на практике.

3. Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ дает приемлемые для практики результаты – коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ изменяется в значительно меньших пределах, чем коэффициент ψ_σ . Поэтому критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ представляется возможным использовать для прогнозирования предела выносливости цилиндрических образцов с круговыми надрезами после опережающего поверхностного пластического деформирования.

4. Для исследованных цилиндрических сплошных и полых образцов диаметром 25 мм из стали 20 экспериментально подтверждена установленная ранее зависимость (1) критической глубины нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ от размеров опасного поперечного сечения.

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. *Саушкин М.Н., Куров А.Ю.* Анализ напряженного состояния в надрезах полукруглого профиля после опережающего поверхностного пластического деформирования сплошных цилиндрических образцов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физ.-мат. науки. – 2012. – № 1(26). – С. 133-140.
4. *Саушкин М.Н., Куров А.Ю.* Конечно-элементное моделирование распределения остаточных напряжений в сплошных упрочненных цилиндрических образцах и образцах с полукруглым надрезом // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физ.-мат. науки. – 2012. – № 1(26). – С. 133-140.
5. *Саушкин М.Н., Радченко В.П., Куров А.Ю.* Метод расчета остаточных напряжений в надрезах с полукруглым профилем в полом поверхностно упрочненном цилиндрическом образце // Прикладная механика и техническая физика. – 2013. – Т. 54. – № 4. – С. 150-157.
6. *Филатов Э.Я., Павловский В.Э.* Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 92 с.
7. *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. 22-25.
8. Павлов В.Ф., Куртичев В.А., Иванов В.Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 64 с.
 9. Иванов С.И., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений и наклепа на усталостную прочность // Проблемы прочности. – 1976. – № 5. – С. 25-27.
 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. Кравченко Б.А., Митряев К.Ф. Обработка и выносливость высокопрочных материалов. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1968. – 131 с.
 12. Туровский М.Л., Шифрин Н.М. Концентрация напряжений в поверхностном слое цементированной стали // Вестник машиностроения. – 1970. – № 11. – С. 37-40.
 13. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – № 8. – С. 29-32.

Статья поступила в редакцию 21 марта 2013 г.

RESIDUAL STRESSES AND ENDURANCE LIMIT OF SURFACE HARDENED SPECIMENS WITH DIFFERENT DIAMETERS RADIUS

V.S. Vakulyuk, V.F. Pavlov, A.V. Chirkov, S.A. Mikhalkina

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

Semicircular profile cut radius influence on cylindrical solid and hollow specimens made of steel 20 with 25 mm diameter endurance limit has been examined under outstripping superficial plastic deforming.

It's established that the endurance limit decreases with the increase of cut radius from 0,3mm to 1mm under the same type of hardening.

It should be increase the specimens hardened superficial lay thickness under outstripping superficial plastic deforming for hardening effect conservation.

Keywords: *cylindrical specimen, outstripping superficial plastic deforming, different radiuscut, endurance limit.*

*Vladimir S. Vakulyuk (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Valentin F. Pavlov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Aleksy V. Chirkov (Ph.D. (Techn.)), Senior Lecturer.
Svetlana A. Mikhalkina, Senior Lecturer.*