

УДК 621.787:539.319

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ РАЗЛИЧНОГО ДИАМЕТРА

© 2012 В. А. Кирпичёв, В. Ф. Павлов, А. В. Чирков, А. В. Иванова

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

На примере образцов из стали 20 различного диаметра экспериментально установлено, что в условиях концентрации напряжений для прогнозирования влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений.

Поверхностное упрочнение, прогнозирование предела выносливости, концентрация напряжений, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

После поверхностного пластического деформирования (ППД) в поверхностном слое деталей изменяется структура, возникают наклёп и сжимающие остаточные напряжения. Известно [1], что основную роль в повышении сопротивления усталости упрочнённых деталей с концентраторами играют сжимающие остаточные напряжения. Для оценки влияния остаточных напряжений на предел выносливости таких деталей применяются два критерия. Первым критерием, использованным в [1-4], являются остаточные напряжения на поверхности концентратора. Зависимость для определения предела выносливости имеет вид

$$P_R = P_R^0 - \psi_P \cdot \sigma_z^{ног}, \quad (1)$$

где $P_R^0(\sigma_R^0, \tau_R^0)$ – предел выносливости неупрочнённой детали, $\psi_P(\psi_\sigma, \psi_\tau)$ – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости, $\sigma_z^{ног}$ – осевые (меридиональные) остаточные напряжения на поверхности концентратора в наименьшем сечении детали. Другие компоненты остаточного напряжённого состояния в соответствии с третьей теорией прочности не участвуют, так как радиальные напряжения на поверхности концентратора σ_r равны нулю, а окружные σ_θ являются промежуточными главными напряжениями [5].

Обычно зависимость (1) записывается для приращения предела выносливости

$$\Delta P_R = \psi_P \cdot |\sigma_z^{ног}|. \quad (2)$$

На практике, при упрочнении деталей ППД, часто наблюдается подповерхностный максимум сжимающих остаточных напряжений, то есть к поверхности деталей напряжения уменьшаются. Часто этот спад бывает весьма существенным, иногда остаточные напряжения снижаются к поверхности до нуля и даже становятся растягивающими [6]. Однако увеличение предела выносливости наблюдается и в этих случаях. Так, например, авторами исследования [7] определялись остаточные напряжения и сопротивление усталости азотированных и упрочнённых роликом стальных цилиндрических образцов. После нагрева и выдержки этих образцов при температуре 150°C и 200°C наблюдалось снижение сжимающих остаточных напряжений на поверхности и их увеличение на некотором расстоянии от неё, в результате чего повышался предел выносливости.

Всё изложенное выше говорит о том, что критерий оценки влияния поверхностного упрочнения деталей с концентраторами по остаточным напряжениям должен базироваться на учёте остаточных напряжений не только на поверхности, но и по толщине поверхностного слоя.

При достаточно больших переменных напряжениях, близких к пределу выносливости, в упрочнённых деталях с концентраторами всегда возникают нераспространяющиеся усталостные трещины [3, 8, 9]. В связи с этой особенностью сопротивления усталости в [10] было предложено принять за критерий

остаточные напряжения на дне нераспространяющейся трещины, в качестве которых следует рассматривать дополнительные остаточные напряжения, возникающие за счёт перераспределения остаточных усилий упрочнённой детали в результате образования трещины. При этом исходные остаточные напряжения детали на дне трещины не учитываются в силу их малости по сравнению с дополнительными.

Для определения второго критерия в [10] использовалось решение задачи [11] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении поверхностно упрочнённой детали после нанесения на неё надреза полуэллиптического профиля. При выделении основной части решения [11] был получен второй критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ влияния остаточных напряжений на предел выносливости упрочнённой детали в виде:

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

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

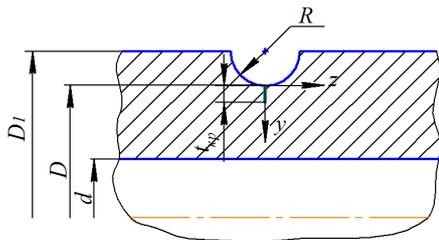


Рис. 1. Нераспространяющаяся трещина усталости

Критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ имеет чётко выраженный физический смысл – это остаточное напряжение на дне трещины с точностью до постоянного коэффициента, зависящего от радиуса у дна трещины и её глубины. Приращение предела выносливости $\Delta P_R (\Delta \sigma_R, \Delta \tau_R)$ упрочнённой детали с концентратором напряжений при использовании критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ определяется по формуле:

$$\Delta P_R = \bar{\psi}_P \cdot |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (4)$$

где $\bar{\psi}_P (\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau)$ – коэффициент влияния остаточных напряжений по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ на предел выносливости по разрушению. В дальнейшем критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ будем называть критерием среднеинтегральных остаточных напряжений.

В [12] для упрочнённых различными методами ППД деталей (образцов) из различных материалов с различными концентраторами напряжений при растяжении-сжатии, изгибе и кручении было экспериментально установлено, что критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости зависит только от размеров наименьшего поперечного сечения и для полых цилиндрической детали определяется соотношением

$$t_{кр} = 0,0216D \left[1 - 0,04 \left(\frac{d}{D} \right)^2 - 0,54 \left(\frac{d}{D} \right)^3 \right], \quad (5)$$

где D – диаметр наименьшего поперечного сечения детали, d – диаметр отверстия (рис. 1).

Для проверки возможности использования обоих критериев при оценке влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости при изгибе в случае симметричного цикла были проведены эксперименты на сплошных и полых цилиндрических упрочнённых и неупрочнённых образцах различного диаметра из стали 20 с круговыми надрезами полукруглого профиля. Исследуемая сталь 20 имела следующие механические характеристики: $\sigma_T = 395$ МПа, $\sigma_e = 522$ МПа, $\delta = 26,1\%$, $\psi = 65,9\%$, $S_k = 1416$ МПа.

Гладкие сплошные образцы диаметром $D_1 = 10$ мм и $D_1 = 25$ мм подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО), а также обкатке роликом (ОР) при усилии $P = 0,5$ кН и $P = 1,0$ кН.

Гладкие образцы диаметром $D_1 = 50$ мм с отверстием диаметром $d = 40$ мм – обкатке роликом. Затем на все упрочнённые и неупрочнённые гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса $R = 0,3$ мм и $R = 0,5$ мм.

Остаточные напряжения в гладких цилиндрических образцах диаметром $D_1 =$

10 мм определялись экспериментально методом колец и полосок [13], а также методом удаления части цилиндрической поверхности [14]. Остаточные напряжения в гладких цилиндрических образцах диаметром $D_1 = 25$ мм и $D_1/d = 50/40$ мм/мм определялись методом колец и полосок [13].

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 в образцах диаметром $D_1 = 25$ мм несколько больше, чем в образцах диаметром $D_1 = 10$ мм. Это различие объясняется повышением жёсткости образцов с увеличением размеров их поперечного сечения. Аналогичные закономерности в распределении остаточных напряжений после гидродробеструйной обработки образцов из стали 45 и сплава Д16Т были установлены в работе [12] при

изменении диаметра образцов D_1 от 10 мм до 50 мм.

Следует также отметить, что распределение сжимающих остаточных напряжений в упрочнённых гладких образцах сплошного сечения диаметром $D_1 = 10$ мм и в полых образцах диаметром $D_1/d = 50/40$ мм/мм практически совпадало. Это совпадение для цилиндрических образцов с отверстием при постоянной толщине стенки было обосновано расчётным методом в [15].

Остаточные напряжения в образцах с надрезами определялись расчётным путём – суммированием дополнительных остаточных напряжений за счёт перераспределения остаточных усилий после опережающего поверхностного пластического деформирования и остаточных напряжений гладких образцов. При этом дополнительные остаточные напряжения вычислялись как аналитическим [11], так и численным методами. Необходимо заметить, что результаты определения дополнительных остаточных напряжений двумя методами имели удовлетворительное совпадение.

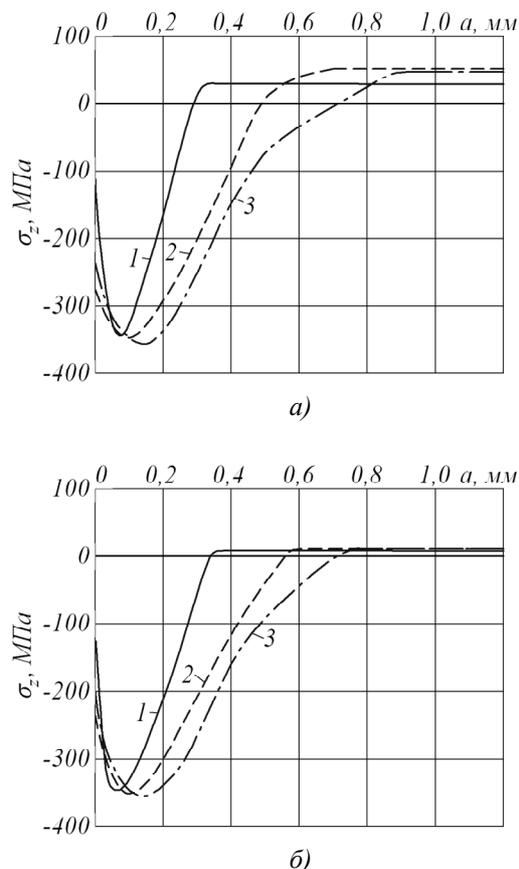
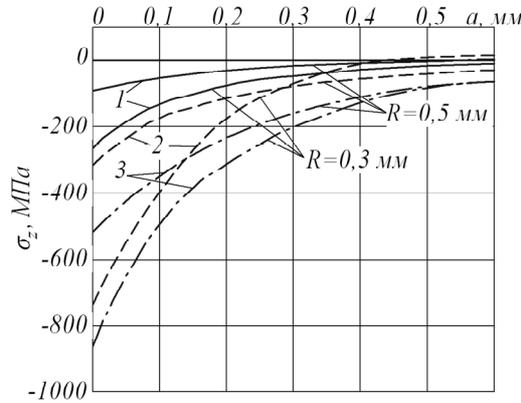


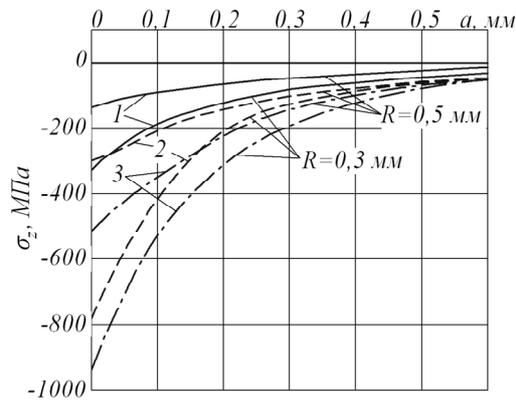
Рис. 2. Остаточные напряжения в упрочнённых образцах диаметром $D_1 = 10$ мм, $D_1/d = 50/40$ мм/мм (а) и $D_1 = 25$ мм (б): 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a в наименьшем сечении образцов с надрезами $R = 0,3$ мм и $R = 0,5$ мм приведено

на рис. 3 и рис. 4, а значения остаточных напряжений на поверхности дна надрезов $\sigma_z^{нов}$ представлены в табл. 1.



а)



б)

Рис. 3. Остаточные напряжения в упрочнённых образцах диаметром $D_1 = 10$ мм (а) и $D_1 = 25$ мм (б) с надрезами после:
1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН;
3 – ОР, $P = 1,0$ кН

Обращает на себя внимание значительная величина сжимающих остаточных напряжений, достигающих на дне надреза $R = 0,3$ мм -908 МПа ($D_1 = 25$ мм), что существенно выше не только предела текучести, но и предела прочности исследуемой стали 20. В [16] показано, что остаточные напряжения в упрочнённом (наклёпанном) слое могут превышать сопротивление разрыву S_k материала детали (образца) на 15%. В нашем случае этот предел не превышен, так как $S_k = 1416$ МПа.

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых образцов диаметром $D_1 = 10$ мм в гладкой части

проводились на машине МУИ-6000, диаметром $D_1 = 25$ мм – на машине УММ-01, диаметром $D_1/d = 50/40$ мм/мм – на машине УМП-02; база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения.

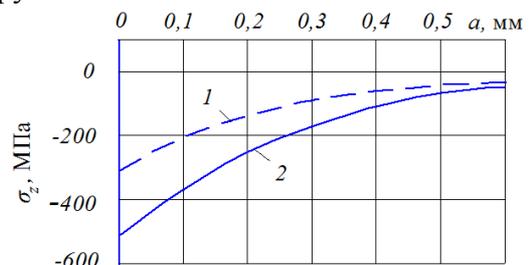


Рис. 4. Остаточные напряжения в упрочнённых образцах диаметром $D_1/d = 50/40$ мм/мм с надрезом $R = 0,5$ мм:
1 – ОР, $P = 0,5$ кН, 2 – ОР, $P = 1,0$ кН

Результаты определения предела выносливости σ_{-1} представлены в табл. 1. Упрочнённые образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при бóльших напряжениях. На изломах этих образцов были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, глубина $t_{кр}$ которых соответствует зависимости (5) и приведена в табл. 1.

На рис. 5 представлена фотография излома одного из упрочнённых дробью образцов $D_I = 10$ мм с надрезом $R = 0,5$ мм, на рис. 6 – диаметром $D_I = 25$ мм с надрезом $R = 0,5$ мм, а на рис. 7 – диаметром $D_I/d = 50/40$ мм/мм. На фотографиях чётко видны нераспространяющиеся трещины усталости 2, причём для образцов диаметром $D_I = 10$ мм нераспространяющаяся трещина имеет концентрическую форму (рис. 5), так как эти образцы испытывались на усталость при чистом изгибе с вращением. Для образцов диаметром $D_I = 25$ мм и $D_I/d = 50/40$ мм/мм трещина имеет серповидную форму, так как испытания на усталость этих образцов проводились при поперечном изгибе в одной плоскости.

Из представленных в табл. 1 данных видно, что опережающее поверхностное пластическое деформирование образцов с

надрезом пневмодробеструйной обработкой и обкаткой роликом приводит к существенному повышению предела выносливости. Наиболее эффективна для исследованных образцов обкатка роликом, причём с увеличением усилия обкатки с $P = 0,5$ кН до $P = 1,0$ кН предел выносливости возрастает. Наблюдаемое явление объясняется бóльшей глубиной залегания сжимающих остаточных напряжений в гладких упрочнённых образцах при увеличении усилия обкатки (рис. 2), результатом чего явилось повышение остаточных напряжений в наименьшем сечении образцов с надрезом.

Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов по первому критерию $\sigma_z^{ног}$ – остаточным напряжениям на поверхности надреза – приводит к значительному рассеянию коэффициента ψ_σ . Этот коэффициент в проведённом исследовании изменяется в широких пределах: от 0,073 до 0,251 (табл. 1), то есть изменяется почти в 3,5 раза, что неприемлемо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей.

Таблица 1. Результаты испытаний образцов на усталость и определения остаточных напряжений

D_I/d , мм/мм	R , мм	Неупроч. образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы						
			обработка	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{ног}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
10/0	0,3	110	ПДО	155	-263	0,171	0,203	-126	0,357
			ОР, $P = 0,5$ кН	230	-732	0,164	0,195	-337	0,356
			ОР, $P = 1,0$ кН	267,5	-861	0,183	0,205	-454	0,347
	0,5	120	ПДО	137,5	-90	0,194	0,196	-48	0,365
			ОР, $P = 0,5$ кН	187,5	-311	0,217	0,202	-178	0,379
			ОР, $P = 1,0$ кН	250	-517	0,251	0,192	-333	0,390
25/0	0,3	107,5	ПДО	137,5	-343	0,087	0,540	-87	0,345
			ОР, $P = 0,5$ кН	165	-787	0,073	0,510	-171	0,336
			ОР, $P = 1,0$ кН	175	-908	0,074	0,520	-202	0,334
	0,5	112,5	ПДО	130	-142	0,123	0,525	-52	0,337
			ОР, $P = 0,5$ кН	150	-349	0,107	0,530	-111	0,338
			ОР, $P = 1,0$ кН	172,5	-515	0,117	0,520	-169	0,355
50/40	0,5	60	ОР, $P = 0,5$ кН	87,5	-311	0,088	0,710	-82	0,335
			ОР, $P = 0,5$ кН	105	-517	0,087	0,720	-133	0,338

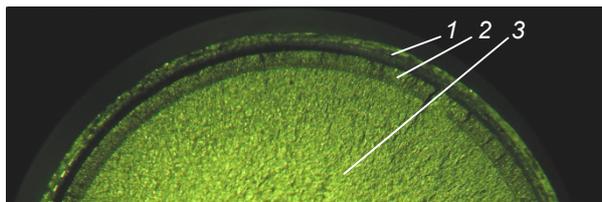


Рис. 5. Фрагмент излома упрочнённого дробью образца диаметром $D_1 = 10$ мм с надрезом $R = 0,5$ мм:

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

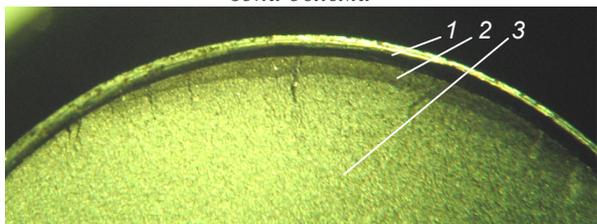


Рис. 6. Фрагмент излома упрочнённого дробью образца диаметром $D_1 = 25$ мм с надрезом $R = 0,5$ мм:

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

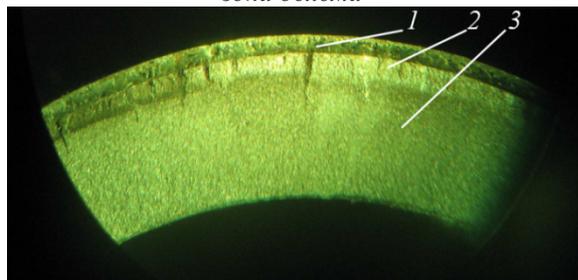


Рис. 7. Фрагмент излома упрочнённого роликом образца диаметром $D_1/d = 50/40$ мм/мм с надрезом $R = 0,5$ мм:

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

Оценка влияния поверхностного упрочнения по второму критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ – среднеинтегральным остаточным напряжениям – приводит к существенно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$. Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ в проведённом исследовании изменяется от 0,334 до 0,390, составляя в среднем 0,351, и практически совпадает с значением $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$, установленным в [12] для упрочнённых образцов и деталей с аналогичной концентрацией напряжений.

Таким образом, проведённое исследование показало, что для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов с концентраторами напряжений наиболее оправдано использование критерия

среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$. Для определения приращения предела выносливости таких образцов при изгибе следует воспользоваться формулой (4). Критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ при этом вычисляется по зависимости (3) по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости и определяемой формулой (5). Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ влияния упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ для упрочнённых деталей и образцов с надрезами можно принять равным 0,36.

Выводы

1. Проведённое исследование показало, что при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочнённых цилиндрических образцов различного диаметра (10 – 50 мм) с надрезами наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$.

2. Для прогнозирования предела выносливости упрочнённых образцов с надрезами использование в качестве критерия остаточных напряжений на поверхности концентратора $\sigma_z^{нов}$ не представляется возможным, так как соответствующий коэффициент, учитывающий влияние этого критерия на предел выносливости, имеет существенное рассеяние.

3. Для исследованной стали 20 экспериментально подтверждена установленная ранее зависимость (5) критической глубины нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ от размеров опасного поперечного сечения образца (детали).

Библиографический список

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

2. Кравченко Б. А., Митряев К. Ф. Обработка и выносливость высокопрочных материалов. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1968. – 131 с.

3. Серенсен С. В., Борисов С. П., Бородин Н.А. К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочнённых образцов с учётом кинетики остаточной напряжённости // Проблемы прочности. – 1969. – №2. – С. 3-7.

4. Туровский М. Л., Шифрин Н. М. Концентрация напряжений в поверхностном слое цементированной стали // Вестник машиностроения. – 1970. – №11. – С. 37-40.

5. Иванов С. И., Павлов В. Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость ненаклёпанного материала // Вопросы прикладной механики в авиационной технике. – Куйбышев: КуАИ, 1973. – Вып. 66. – С. 70-73.

6. Школьник Л. М., Девяткин В. П. Повышение прочности шестерён дробеструйным наклёпом // Вестник машиностроения. – 1950. – №12. – С. 7-12.

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

8. Кудрявцев П. И. Нераспространяющиеся усталостные трещины. – М.: Машиностроение, 1982. – 171 с.

9. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчёт деталей машин на прочность. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.

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

11. 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.

12. Павлов В. Ф., Кирпичёв В. А., Иванов В. Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 64 с.

13. Иванов С. И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 48. – С. 179-183.

14. Иванов С. И., Григорьева И. В. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом снятия части поверхности // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 48. – С. 179-183.

15. Павлов В. Ф., Кирпичёв В. А., Иванов В. Б., Семёнова О. Ю., Денискина Е. А. Закономерности распределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических деталях с отверстием различного диаметра // Труды четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1 / Математическое моделирование и краевые задачи. – Самара: СамГТУ, 2007. – С. 171-174.

16. 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 НАН Украины, 2011. – С. 354-357.

17. Филатов Э. Я., Павловский В. Э. Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 92 с.

FATIGUE STRENGTH PREDICTION OF SURFACE - HARDENED CYLINDRICAL SPECIMENS OF DIFFERENT DIAMETERS

©2012 V.A. Kirpichev, V.F. Pavlov, A.V. Chirkov, A. V. Ivanova

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

On the example of specimens made of steel 20 of different diameters experimentally established, that the utilization is more rightful for of surface hardening influence on endurance limit under stress concentration.

Surface hardening, specimens made of steel 20 of different diameters, prediction of endurance limit, stress concentration, average integral residual stresses criterion.

Информация об авторах

Кирпичёв Виктор Алексеевич, доктор технических наук, профессор, декан факультета летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Павлов Валентин Фёдорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой 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.

Чирков Алексей Викторович, кандидат технических наук, ассистент 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.

Иванова Алина Всеволодовна, аспирант 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.

Kirpichyev Victor Alekseevich, doctor of technical sciences, professor, dean of aircraft faculty, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: residual stresses mechanics.

Pavlov Valentin Fedorovich, doctor of technical sciences, professor, Head of strength of materials department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: residual stresses mechanics.

Chirkov Alexey Viktorovich, candidate of technical science, assistant of strength of materials department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: residual stresses mechanics.

Ivanova Alina Vsevolodovna, post-graduate student of strength of materials department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: residual stresses mechanics.