

УДК 621.787:539.319

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ ПО ОСТАТОЧНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ

© 2015 В.Ф. Павлов, Н.А. Сургутанов, В.В. Сазанов, В.Э. Костичев,
П.А. Шляпников

Самарский государственный аэрокосмический университет

Поступила в редакцию 21.11.2014

В исследовании проведена оценка влияния остаточных напряжений, наведённых пневмодробеструйной обработкой и обкаткой роликом, на предел выносливости при изгибе образцов из стали 20 диаметром 25 мм с надрезами различных радиусов и надрессованной втулкой.

Ключевые слова: *поверхностное упрочнение, прогнозирование, предел выносливости, концентрация напряжений, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений*

Основную роль в повышении характеристик сопротивления усталости деталей с концентраторами напряжений после поверхностного пластического деформирования (ППД) играют сжимающие остаточные напряжения [1]. Для оценки влияния остаточных напряжений на предел выносливости упрочнённых ППД деталей применяются два критерия. Первым критерием, использованным в работах [1-4], являются остаточные напряжения на поверхности концентратора. Зависимость для определения предела выносливости P_R упрочнённой детали в этом случае имеет вид

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

где $P_R^0(\sigma_R^0, \tau_R^0)$ – предел выносливости неупрочнённой детали, $\psi_P(\psi_\sigma, \psi_\tau)$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию σ_z^{nos} , σ_z^{nos} – осевые (меридиональные) остаточные напряжения на поверхности концентратора опасного сечения детали. Другие компоненты остаточного напряжённого состояния в соответствии с теорией наибольших касательных напряжений не участвуют, так как окружные остаточные напряжения являются промежуточными главными напряжениями, а радиальные остаточные напряжения на поверхности концентратора равны нулю [5].

Обычно формула (1) записывается для приращения предела выносливости ΔP_R упрочнённой детали:

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

При упрочнении деталей ППД часто наблюдается подповерхностный максимум сжимающих остаточных напряжений, то есть к поверхности деталей остаточные напряжения уменьшаются. 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 предел выносливости и остаточные напряжения азотированных и упрочнённых роликом стальных цилиндрических образцов. После нагрева и выдержки этих образцов при температурах 150°C и 200°C наблюдалось повышение предела выносливости при уменьшении сжимающих остаточных напряжений на поверхности образцов и их увеличение на некотором расстоянии от неё. Эти эксперименты указывают на то, что критерий оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей с концентраторами по остаточным напряжениям должен базироваться на учёте остаточных напряжений не только на поверхности, но и по толщине поверхностного слоя опасного сечения деталей.

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 работе [10] было предложено принять за критерий остаточные напряжения на дне нераспространяющейся трещины, в качестве которых рассматриваются дополнительные остаточные напряжения, возникающие за счёт перераспределения остаточных усилий упрочнённой детали в результате образования трещины. Для определения второго критерия в работе [10] использовалось аналитическое решение задачи [11] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении поверхностно упрочнённой детали после нанесения на неё надреза

Павлов Валентин Фёдорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов. E-mail: sopromat@ssau.ru

Сургутанов Николай Андреевич, аспирант

Сазанов Василий Вячеславович, аспирант

Костичев Владислав Эдуардович, аспирант

Шляпников Павел Анатольевич, студент

полуэллиптического профиля. Выделив основную часть решения [11], был получен второй критерий $\bar{\sigma}_{ocm}$ влияния остаточных напряжений на предел выносливости упрочнённой детали в виде

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

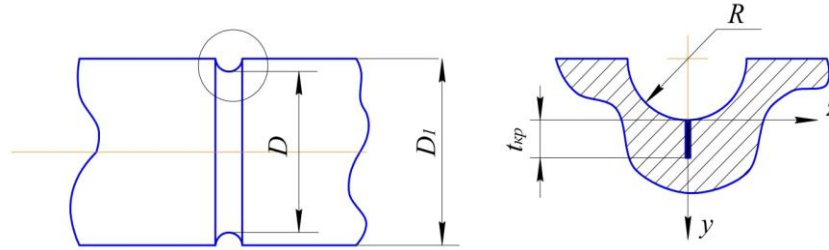


Рис. 1. Цилиндрический образец с надрезом полукруглого профиля и нераспространяющаяся трещина усталости

Критерий $\bar{\sigma}_{ocm}$ 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 $\bar{\sigma}_{ocm}$ определяется по следующей формуле:

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

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

В работе [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 опасного поперечного сечения и для сплошных цилиндрических деталей определяется соотношением

$$t_{кр} = 0,0216D \quad (5)$$

где D – диаметр опасного сечения детали (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 цилиндрических упрочнённых и неупрочнённых образцах из стали диаметром 25 мм с круговыми надрезами полукруглого профиля и напрессованной втулкой. Исследуемая сталь 20 имела следующие механические характеристики:

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые (меридиональные) остаточные напряжения в опасном 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.

$\sigma_T=395$ МПа, $\sigma_\sigma=522$ МПа, $\delta=26,1$ %, $\psi=65,9$ %, $S_k=1416$ МПа. Гладкие образцы диаметром $D_1=25$ мм подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО) стальными шариками диаметром 1,5-2,5 мм в течение 10 минут, а также обкатке роликом (ОР) диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм при усилиях $P=0,5$ кН (ОР1) и $P=1,0$ кН (ОР2) с подачей 0,11 мм/об и скоростью вращения образца 400 об/мин. Затем на упрочнённые и неупрочнённые гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиусов $R=0,3$ мм, $R=0,5$ мм и $R=1,0$ мм.

Остаточные напряжения в гладких образцах 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 глубина залегания сжимающих остаточных напряжений при ОР больше, чем при ПДО, причём с увеличением усилия обкатки толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями увеличивается.

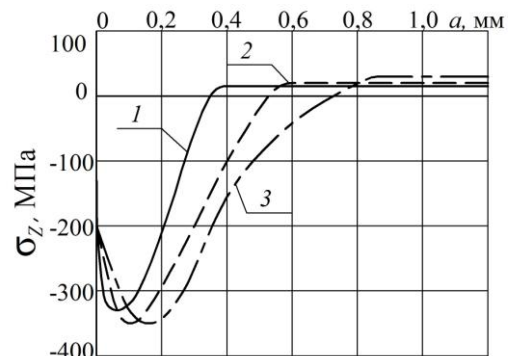


Рис. 2. Осевые σ_z остаточные напряжения в упрочнённых гладких образцах диаметром 25 мм после: 1 – ПДО; 2 – ОР1; 3 – ОР2

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. Следует отметить, что результаты определения дополнительных остаточных напряжений двумя методами имели хорошее совпадение. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a в наименьшем сечении образцов с надрезами $R=0,3$ мм, $R=0,5$ мм и $R=1,0$ мм приведено на рис. 3, а значения остаточных напряжений на поверхности дна надрезов σ_z^{nos} представлены в табл. 1.

Обращает на себя внимание значительная величина сжимающих остаточных напряжений после обкатки роликом (ОР1), достигающих -908 МПа на дне надреза радиуса $R=0,3$ мм, что существенно выше не только предела текучести, но и предела прочности исследуемой стали 20. В работе [14] было показано, что остаточные напряжения в упрочнённом (наклёпанном) слое могут превышать сопротивление разрыву S_k материала детали (образца) на 15%. В данном случае этот предел не превышен, так как $S_k=1416$ МПа.

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых образцов с надрезами и напрессованной втулкой проводились на машине УММ-01 [15]; база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости σ_{-1} образцов представлены в табл. 1.

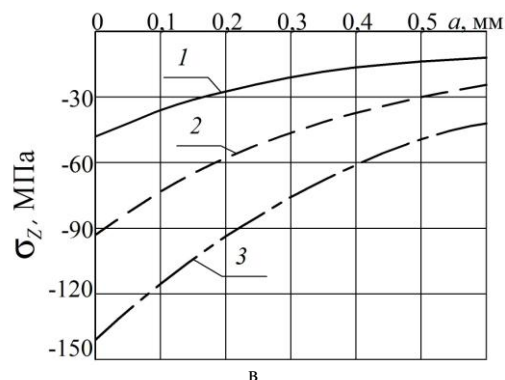
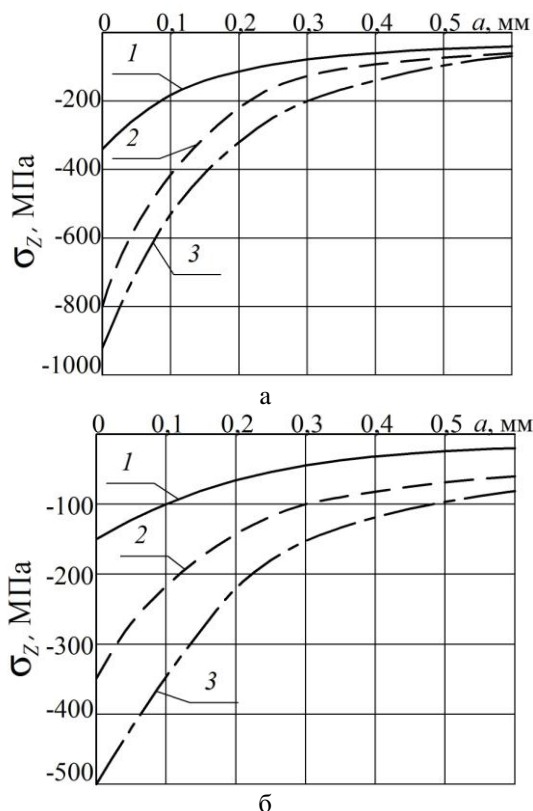


Рис. 3. Осевые остаточные напряжения σ_z в упрочнённых образцах диаметром 25 мм с надрезами $R=0,3$ мм (а), $R=0,5$ мм (б) и $R=1,0$ мм (в) после: 1 – ПДО; 2 – ОР1; 3 – ОР2

Упрочнённые образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при больших напряжениях. На изломах этих образцов были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, критическая глубина $t_{кр}$ которых соответствует зависимости (5) и приведена в табл. 1. На рис. 4 представлена фотография излома одного из упрочнённых ПДО образцов с надрезом $R=0,5$ мм, на которой чётко видна нераспространяющаяся трещина 2. Трещина имеет серповидную форму, так как испытания на усталость проводились при поперечном изгибе в одной плоскости.

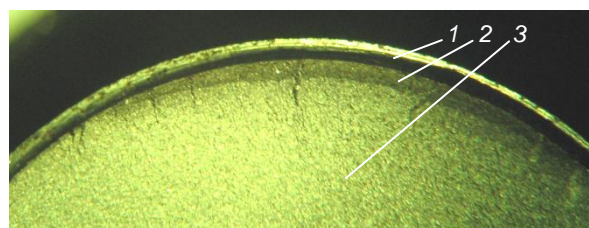


Рис. 4. Фрагмент излома упрочнённого дробью образца диаметром $D_1 = 25$ мм с надрезом $R=0,5$ мм: 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

Из представленных в табл. 1 данных видно, что пневмодробеструйная обработка и обкатка роликом образцов с надрезом и напрессованной втулкой приводят к существенному повышению предела выносливости, причём с увеличением усилия обкатки с $P=0,5$ кН до $P=1,0$ кН предел выносливости возрастает. Приращение предела выносливости образцов с надрезом после обкатки роликом выше, чем после пневмодробеструйной обработки. Наблюдаемое явление объясняется большей глубиной залегания сжимающих остаточных напряжений в гладких упрочнённых образцах при ОР, чем при ПДО (рис. 2), результатом чего явилось повышение остаточных напряжений в опасном сечении образцов с надрезами. Для сохранения эффекта упрочнения при опережающем поверхностном пластическом деформировании с увеличением радиуса надреза необходимо увеличивать толщину слоя со сжимающими остаточными напряжениями гладкой детали (заготовки).

Таблица 1. Результаты испытаний образцов с надрезами и напрессованной втулкой на усталость и определения остаточных напряжений

Концентратор	Неупроч. образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы							K_σ	$(\bar{\psi}_\sigma)_{расч}$
		обработка	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$		
надрез $R = 0,3$ мм	107,5	ПДО	137,5	-343	0,087	0,540	-87	0,345	2,68	0,340
		ОР1	165	-787	0,073	0,510	-171	0,336		
		ОР2	175	-908	0,074	0,520	-202	0,334		
надрез $R = 0,5$ мм	112,5	ПДО	130	-142	0,123	0,525	-52	0,337	2,59	0,345
		ОР1	150	-349	0,107	0,530	-111	0,338		
		ОР2	172,5	-515	0,117	0,520	-169	0,355		
надрез $R = 1,0$ мм	112,5	ПДО	120	-46	0,163	0,490	-21	0,357	2,51	0,352
		ОР1	130	-92	0,190	0,510	-46	0,380		
		ОР2	142,5	-145	0,207	0,495	-79	0,380		
напрессованная втулка	100	ОР1	150	-220	0,227	0,535	-148	0,338	2,88	0,327
		ОР2	170	-210	0,333	0,540	-201	0,348		

Критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ вычислялся по формуле (3) по толщине опасного сечения образцов, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости. При этом для образцов с надрезами использовались эпюры остаточных напряжений, приведённые на рис. 3, а для образцов с напрессованной втулкой – на рис. 2. Значения критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ представлены в табл. 1.

Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов по первому критерию $\sigma_z^{нов}$ – 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 0,333 (табл. 1), то есть изменяется в 4,5 раза, что неприемлемо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей.

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 проведенном исследовании изменяется от 0,334 до 0,380, составляя в среднем 0,350. В работе [16] на основании многочисленных экспериментов была установлена зависимость между коэффициентом влияния $\bar{\psi}_\sigma$ поверхностного упрочнения по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ на предел выносливости при изгибе и эффективным коэффициентом концентрации напряжений K_σ в виде

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,514 - 0,065 K_\sigma \quad (6)$$

Значения коэффициента K_σ , определённые по данным работы [9], приведены в табл. 1, где представлены также расчётные величины коэффициента $(\bar{\psi}_\sigma)_{расч}$. Из приведенных данных видно,

что опытные значения коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ для каждого радиуса надреза и напрессованной втулки незначительно отличаются от расчётных значений, вычисленных по формуле (6).

Таким образом, проведенное исследование показало, что для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов (деталей) с концентраторами напряжений из стали 20 наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$. Для определения приращения предела выносливости при изгибе таких образцов (деталей) 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 поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ для упрочнённых деталей с концентраторами определяется по формуле (6) по известному эффективному коэффициенту концентрации напряжений K_σ .

Выводы:

1. Проведенное исследование показало, что при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочнённых цилиндрических образцов из стали 20 с надрезами и напрессованной втулкой наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$.

2. Для прогнозирования предела выносливости упрочнённых образцов из стали 20 с надрезами и напрессованной втулкой 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 сохранения эффекта упрочнения деталей после опережающего поверхностного пластического деформирования при увеличении глубины концентратора необходимо увеличивать толщину слоя со сжимающими остаточными напряжениями гладкой заготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов // Проблемы прочности. 1976. №5. С. 25-27.
2. Кравченко, Б.А. Обработка и выносливость высокопрочных материалов / Б.А. Кравченко, К.Ф. Митряев. – Куйбышев: Куйбышев. книж. изд-во, 1968. 131 с.
3. Серенсен, С.В. К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочнённых образцов с учётом кинетики остаточной напряжённости / С.В. Серенсен, С.П. Борисов, Н.А. Бородин // Проблемы прочности. 1969. №2. С. 3-7.
4. Туровский, М.Л. Концентрация напряжений в поверхностном слое цементированной стали / М.Л. Туровский, Н.М. Шифрин // Вестник машиностроения. 1970. №11. С. 37-40.
5. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на выносливость ненаклёпанного материала / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов // Вопросы прикладной механики в авиационной технике. – Куйбышев: КуАИ, 1973. Вып.66. С. 70-73.
6. Школьник, Л.М. Повышение прочности шестерён дробеструйным наклёпом / Л.М. Школьник, В.П. Девяткин // Вестник машиностроения. 1950. №12. С. 7-12.
7. Туровский, М.Л. Упрочняющая обкатка роликами азотированных стальных деталей / М.Л. Туровский, Р.А. Новик // Вестник машиностроения. 1970. №1. С. 39-42.
8. Кудрявцев, П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины. – М.: Машиностроение, 1982. 171 с.
9. Серенсен, С.В. Несущая способность и расчёт деталей машин на прочность / С.В. Серенсен, В.П. Козаев, Р.М. Шнейдерович. – 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. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1974. Вып.1. С. 88-95.
12. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям: монография / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. 125 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. Радченко, В.П. Наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений при поверхностном упрочнении деталей / В.П. Радченко, В.Ф. Павлов // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. С. 354-357.
15. Филатов, Э.Я. Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость / Э.Я. Филатов, В.Э. Павловский. – Киев: Наукова Думка, 1985. 92 с.
16. Кирпичёв, В.А. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений / В.А. Кирпичёв, А.С. Букатый, А.П. Филатов, А.В. Чирков // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15, №4 (44). С. 81-85.

FORECASTING THE ENDURANCE LIMIT OF SURFACE STRENGTHENED DETAILS WITH CONCENTRATORS ON RESIDUAL STRESSES

© 2015 V.F. Pavlov, N.A. Surgutanov, V.V. Sazanov, V.E. Kostichev, P.A. Shlyapnikov

Samara State Aerospace University

In research the estimation of influence of the residual stresses induced by pneumatic blasting and rolling on endurance limit of specimen from steel 20, diameter of 25 mm with cuts of various radiuses and pressurized bush under bending is carried out.

Key words: *superficial hardening, forecasting, endurance limit, stresses concentration, average integral residual stresses criterion*

Valentin Pavlov, Doctor of technical Sciences, Professor,
Head of the Materials Resistance Department. E-mail:
sopromat@ssau.ru

Nikolay Surgutanov, Post-graduate Student
Vasiliy Sazanov, Post-graduate Student
Vladislav Kostichev, Post-graduate Student
Pavel Shlyapnikov, Student