

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Павлов В.Ф.,
Вакулюк В.С.,
Сазанов В.П.,
Семёнова О.Ю.,
Чуриков Д.С.

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

Московское шоссе, д. 34,
г. Самара, 443086,
Российская Федерация

pavlov.vf@ssau.ru

В проведённом исследовании представлена оценка влияния сжимающих остаточных напряжений, наведённых пневмодробеструйной обработкой и обкаткой роликом, на предел выносливости при изгибе цилиндрических образцов из стали 20 диаметром 25 мм с круговыми надрезами полукруглого профиля различных радиусов и напрессованной втулкой. Установлено, что при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов из стали 20 с концентраторами в виде надрезов и напрессованной втулки наиболее целесообразно использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений. Использование критерия осевых остаточных напряжений на поверхности опасного сечения образцов с концентратором неприемлемо, так как соответствующий коэффициент, учитывающий влияние этого критерия на предел выносливости, имеет существенное рассеяние. Показано, что для сохранения эффекта упрочнения с точки зрения предела выносливости при увеличении глубины надреза следует увеличивать толщину слоя со сжимающими остаточными напряжениями гладкой заготовки.

Ключевые слова: поверхностное упрочнение; образцы из стали 20; прогнозирование предела выносливости; концентрация напряжений; критерий среднеинтегральных остаточных напряжений

1 Введение

Основную роль в повышении сопротивления усталости деталей с концентраторами напряжений после поверхностного пластического деформирования (ППД) играют сжимающие остаточные напряжения [1]. Для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости упрочнённых ППД деталей используются два критерия остаточных напряжений. Первым критерием, использованным в работах [1-4], являются осевые остаточные напряжения на поверхности опасного сечения детали. Зависимость по определению предела выносливости поверхностно упрочнённой детали в этом случае имеет вид

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

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^{nov} , σ_z^{nov} – осевые (меридиональные) остаточные напряжения на поверхности концентратора опасного сечения детали. Другие составляющие 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].

На практике формула (1) обычно записывается для приращения предела выносливости ΔP_R упрочнённой детали в виде:

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

При упрочнении деталей ППД очень 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 повышение предела выносливости наблюдается и в этих случаях. Например, авторами статьи [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 увеличение предела выносливости при уменьшении сжимающих остаточных напряжений на поверхности образцов и их увеличении на некотором расстоянии от поверхности.

Эти опыты указывают на то, что оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей по остаточным напряжениям должна базироваться на учёте остаточных напряжений не только на поверхности, но и по толщине поверхностного слоя опасного сечения деталей.

При переменных напряжениях, близких к пределу выносливости, в упрочнённых ППД деталях с концентраторами напряжений всегда возникают нераспространяющиеся усталостные трещины [3, 8, 9]. В связи с этим в работе [10] было предложено принять в качестве критерия влияния на предел выносливости остаточные напряжения на

дне нераспространяющейся трещины, возникающие за счёт перераспределения остаточных усилий упрочнённой детали в результате образования трещины.

Для определения второго критерия в работе [10] использовалось аналитическое решение задачи [11] по вычислению дополнительных остаточных напряжений в опасном сечении поверхностно упрочнённой детали после нанесения на неё надреза полуэллиптического профиля. Выделив основную часть решения [11], был получен критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ влияния ППД 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 (меридиональные) остаточные напряжения в опасном сечении детали (образца), $\xi = y/t_{кр}$ – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$ (рисунок 1), $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали (образца) на пределе выносливости.

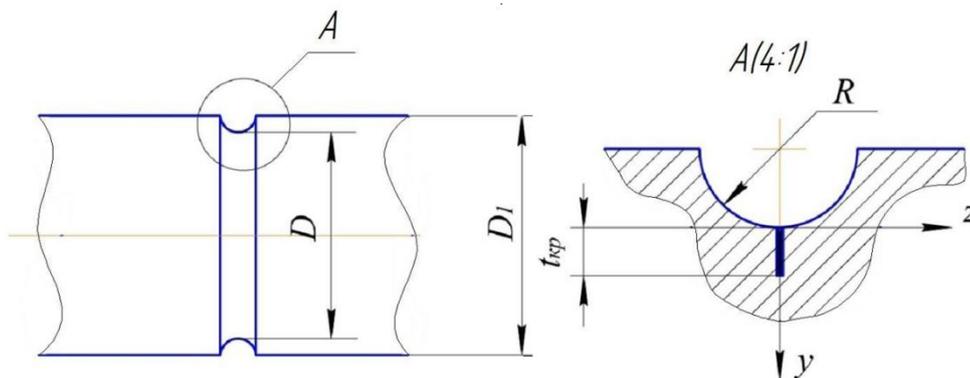


Рисунок 1. Цилиндрический образец с надрезом полуэллиптического профиля и нераспространяющаяся трещина усталости

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 ППД детали с концентратором напряжений при

использовании критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ вычисляется по следующей 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 поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$.

В монографии [12] для упрочнённых различными методами ППД деталей (образцов) из различных материалов с различными видами концентраторов напряжений при растяжении-сжатии, изгибе и кручении было экспериментально показано, что критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости зависит только от размеров опасного поперечного сечения и для сплошных цилиндрических деталей определяется по формуле:

$$t_{кр} = 0,0216D, \quad (5)$$

где D – диаметр опасного сечения детали (рисунок 1).

2 Цель исследования

Для проверки возможности использования обоих критериев при оценке влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости при изгибе в случае симметричного цикла были проведены опыты на сплошных цилиндрических упрочнённых и неупрочнённых образцах диаметром 25 мм из стали 20 с круговыми надрезами полукруглого профиля и напрессованной втулкой. Исследуемая сталь 20 имела следующие механические характеристики: $\sigma_T = 395$ МПа, $\sigma_s = 522$ МПа, $\delta = 26,1$ %, $\psi = 65,9$ %, $S_k = 1416$ МПа.

3 Результаты исследования

Гладкие цилиндрические образцы диаметром $D_1 = 25$ мм упрочнялись пневмодробеструйной обработкой (ПДО)

стальными шариками диаметром 1,5-2,5 мм в течение 10 минут, а также обкаткой 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 неупрочнённые и упрочнённые 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 упрочнённых образцах определялись опытным путём методом колец и полосок [13]. Эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя а гладких образцов представлены на рисунке 2. Из приведённых на рисунке 2 эпюр видно, что глубина залегания сжимающих остаточных напряжений после ОР больше, чем после ПДО, причём с увеличением усилия обкатки роликом толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями увеличивается.

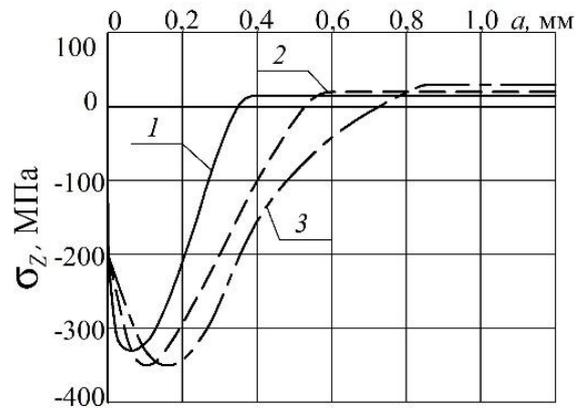


Рисунок 2. Осевые σ_z остаточные напряжения в упрочнённых гладких образцах диаметром 25 мм после: 1 – ПДО; 2 – ОР1; 3 – ОР2

Остаточные напряжения в образцах с надрезами определялись расчётным путём – суммированием дополнительных остаточных напряжений за счёт перераспределения остаточных напряжений после опережающего поверхностного пластического деформирования и остаточных напряжений гладких образцов. При этом дополнительные остаточные

напряжения вычислялись как аналитическим [11], так и численным [14] методами. Необходимо отметить, что результаты вычисления дополнительных остаточных напряжений двумя методами имели хорошее совпадение.

Эпюры 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 представлены на рисунке 3, а значения остаточных напряжений на поверхности дна надрезов $\sigma_z^{нов}$ приведены в таблице 1.

Следует обратить внимание на значительную величину сжимающих остаточных напряжений после обкатки роликом (ОР2), достигающих -908 МПа на дне надреза с радиусом $R = 0,3$ мм, что существенно выше не только предела текучести, но и предела прочности исследуемой стали 20. В статье [15] было установлено, что остаточные напряжения в упрочнённом (наклёпанном) слое могут превышать сопротивление разрыву S_k материала детали (образца) на 15%. В исследуемом 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 [16] при базе испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости σ_{-1} образцов приведены в таблице 1. Упрочнённые образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при больших напряжениях. На изломах этих образцов были видны нераспространяющиеся трещины усталости, глубина $t_{кр}$ которых соответствует зависимости (5) и приведена в таблице 1.

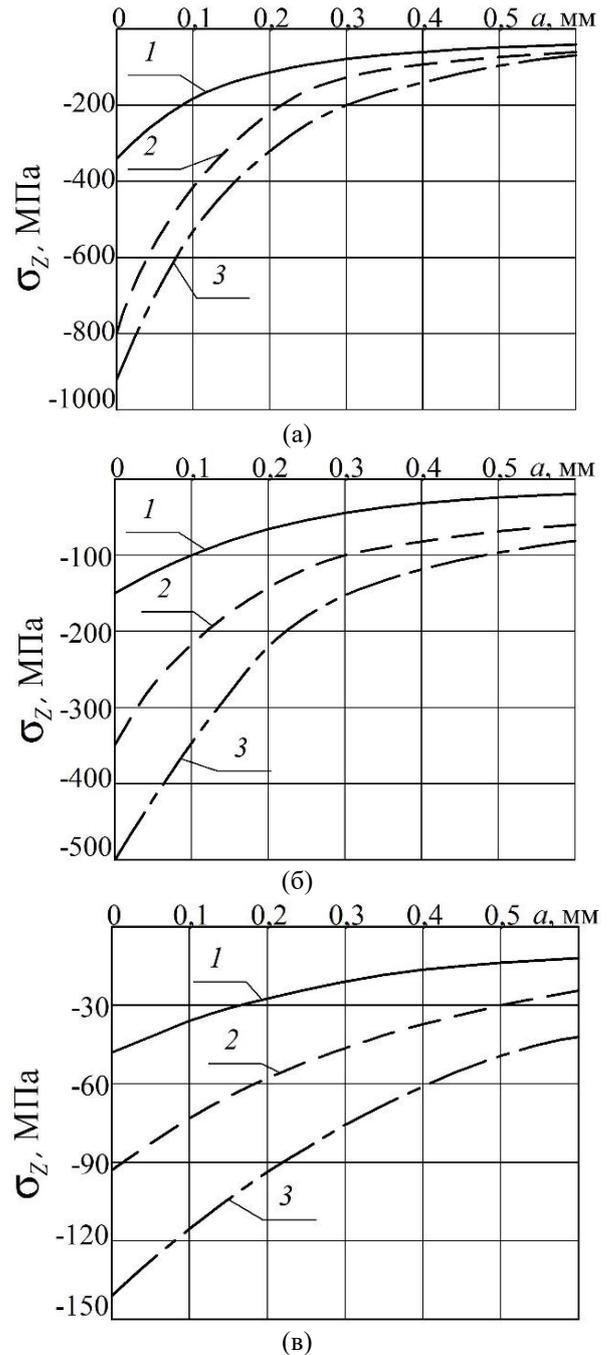


Рисунок 3. Осевые остаточные напряжения σ_z в упрочнённых образцах диаметром 25 мм с надрезами $R = 0,3$ мм (а), $R = 0,5$ мм (б) и $R = 1,0$ мм (в) после: 1 – ПДО; 2 – ОР1; 3 – ОР2

На рисунке 4 представлена фотография излома одного из упрочнённых ПДО образцов с надрезом $R = 0,5$ мм, на которой чётко просматривается нераспространяющаяся трещина 2. Трещина имеет серповидную форму, так как испытания на усталость проводились при поперечном изгибе в одной плоскости.

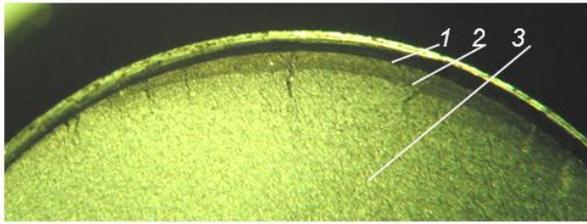


Рисунок 4. Фотография излома упрочнённого ПДО образца диаметром $D_1 = 25$ мм с надрезом $R = 0,5$ мм:
1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

Из приведённых в таблице 1 данных следует, что пневмодробеструйная обработка и обкатка роликом образцов с надрезом и напрессованной втулкой приводят к значительному повышению предела выносливости, при этом 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. Это явление объясняется большей глубиной залегания сжимающих остаточных напряжений в гладких упрочнённых образцах при ОР, чем при ПДО (рисунок 2), результатом чего является увеличение остаточных напряжений в опасном сечении образцов с надрезами. Для сохранения эффекта упрочнения при опережающем поверхностном пластическом деформировании с увеличением радиуса надреза необходимо повышать 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		
напрес. 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 $\bar{\sigma}_{ост}$ определялся по зависимости (3) по глубине опасного сечения образцов, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости. При этом для образцов с надрезами использовались эпюры остаточных напряжений, изображённые на рисунке 3, а для образцов с напрессованной втулкой – на рисунке 2. Значения критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ приведены в таблице 1.

Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов по остаточным напряжениям на поверхности концентратора $\sigma_z^{нов}$ приводит к существенному рассеянию соответствующего коэффициента ψ_σ . Этот коэффициент в проведённом исследовании изменяется от 0,073 до 0,333 (таблица 1), то есть изменяется в 4,5 раза, что недопустимо при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей.

Оценка влияния поверхностного упрочнения по среднеинтегральным остаточным напряжениям $\bar{\sigma}_{ост}$ приводит к значительно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$. Коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ в проведённом исследовании изменяется от 0,334 до 0,380, составляя в среднем 0,350.

В работе [17] на основании большого числа экспериментов была выявлена зависимость между коэффициентом влияния $\bar{\psi}_{\sigma}$ поверхностного упрочнения по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ на предел выносливости при изгибе и действительным коэффициентом концентрации напряжений K_{σ} в виде:

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

Значения действительного коэффициента K_{σ} , определённые по данным работы [9], представлены в таблице 1, где приведены также расчётные величины коэффициента влияния $(\bar{\psi}_{\sigma})_{расч}$. Из приведённых данных следует, 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, в проведённом исследовании установлено, что для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов (деталей) с концентраторами напряжений из стали 20 наиболее оправдано применение критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$. При определении предела выносливости в случае изгиба таких образцов (деталей) следует пользоваться формулой (4). Критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ вычисляется по формуле (3) по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости, определяемой по формуле (5). Коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных

напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ для упрочнённых деталей с концентраторами вычисляется по формуле (6) по известному действительному коэффициенту концентрации напряжений K_{σ} .

4 Заключение

1. На основании проведённого исследования установлено, что при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочнённых цилиндрических образцов из стали 20 с надрезами и напрессованной втулкой наиболее оправдано применение критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$.

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

Список использованных источников

- [1] Иванов С.И., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений 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 цементованной 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: Межвузовский сборник. Куйбышев: КуАИ, 1974. Вып. 3. С. 88-95.

[12] Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. 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] Сазанов В.П., Чирков А.В., Семёнова О.Ю., Иванова А.В. Моделирование остаточного напряжённого состояния детали в условиях концентрации напряжений с использованием программного комплекса PATRAN/ NASTRAN // Вестник СамГТУ. Сер.: Технич. науки. 2012. №1 (33). С. 106-114.

[15] 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.

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

[17] Кирпичёв В.А., Букатый А.С., Филатов А.П., Чирков А.В. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной

степени концентрации напряжений // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2011. Т.15. №4 (44). С. 81-85.

MULTI-CYCLIC FATIGUE OF MACHINES PARTS PREDICTION AFTER SUPERFICIAL PLASTIC DEFORMING

**Valentin F. Pavlov,
Vladimir S. Vakulyuk,
Vyacheslav P. Sazanov,
Ol'ga Yu. Semenova,
Dmitrij S. Churikov**

Samara National Research University
(Samara University)

34, Moskovskoye shosse, Samara,
443086, Russian Federation

pavlov.vf@ssau.ru

The evaluation of compressive residual stresses caused by pneumo-shot blasting and rolling influence on the endurance limit of specimens made of steel 20 of 25 mm diameter with circular cuts of a semicircular profile of various radiuses under bending has been examined. It's been stated that it's more reasonable to use the average integral residual stresses criterion for an endurance limit prediction of surface hardened specimens made of steel 20 with concentrators like cuts and pressurized hub. The criterion of axial residual stresses on a dangerous section surface of specimens with stress concentrators can't be used because the corresponding coefficient taking into account the influence of this criterion on an endurance limit has the essential dispersion. It's been shown that in order to maintain the hardening effect on cut's depth rising one should raise the layer with compressive residual stresses depth of a smooth specimen.

Keywords: surface hardening; specimens made of steel 20; prediction of the endurance limit; stress concentration; average integral residual stresses criterion

References

- [1] Ivanov, S.I., Pavlov, V.F., (1976) Vliyaniye ostatochnykh napryazhenij na ustalostnuyu prochnost' [Residual stresses influence on fatigue strength]. Problemy prochnosti [Strength problems], no. 5, pp. 25-27. (in Russian).
- [2] Kravchenko, B.A., Mitryaev, K.F., (1968) Obrabotka i vynoslivost' vysokoprochnykh materialov [Machining and endurance of high-strength materials]. Kujbyshev: Kujbyshevskoe knizhnoe izdatel'stvo [Kuibyshev: Kuibyshev Publishing House], 131 pp. (in Russian).
- [3] Serensen, S.V., Borisov, S.P., Borodin, N.A., (1969) K voprosu ob otzenke soprotivleniya ustalosti poverhnostno uprochnnyonykh obraztzov s uchetom kinetiki ostatochnoy napryajennosti [On surface hardened specimens fatigue resistance evaluation taking into account residual stress kinetics]. Problemy prochnosti [Strength problems], no. 2, pp. 3-7. (in Russian).
- [4] Turovskiy, M.L., Shifrin, N.M., (1970) Kontzentratsiya napryazhenij v poverhnostnom sloe tsementovannoy stali [Stress concentration in the surface layer of cemented steel]. Vestnik mashinostroyeniya [Mechanical Engineering Bulletin], no. 11, pp. 37-40. (in Russian).
- [5] Ivanov, S.I., Pavlov, V.F., (1973) Vliyaniye ostatochnykh napryazhenij na vynoslivost' nenaklyopannogo materiala [The influence of residual stresses on the endurance of materials without work hardening]. Voprosy prikladnoy mekhaniki v aviacionnoy tekhnike. Kujbyshev: KuAI [Problems of applied mechanics in aircraft engineering. Kuibyshev Aviation Institute], issue 66, pp. 70-73. (in Russian).
- [6] Shkol'nik, L.M., Devyatkin, V.P., (1950) Povysheniye prochnosti shesteryon drobestruynym naklyopom [The increase of gear wheels strength by shot peening]. Vestnik mashinostroyeniya [Mechanical Engineering Bulletin], no.12, pp. 7-12. (in Russian).
- [7] Turovskiy, M.L., Novik, R.A., (1970) Uprochyayuschaya obkatka rolikami stal'nykh detaley [Hardening rolling of nitrated steel parts]. Vestnik mashinostroyeniya [Mechanical Engineering Bulletin], no.1, pp. 39-42. (in Russian).
- [8] Kudryavtsev, P.I., (1982) Nerasprostranyayushchiesya ustalostnye treshchiny [Non-propagating fatigue cracks]. Moscow: Mashinostroyeniye (Mechanical Engineering), 171 pp. (in Russian).
- [9] Serensen, S.V., Kogayev, V.P., Shneyderovich, R.M., (1975) Nesutchaya sposobnost' i raschet detaley mashin na prochnost' [Carrying capacity and strength analysis of machine elements]. Moscow: Mashinostroyeniye (Mechanical Engineering), 488 pp. (in Russian).
- [10] Pavlov, V.F., (1986) O svyazi ostatochnykh napryazhenij i predela vynoslivosti pri izgibe v usloviyah koncentracii napryazhenij [On connection between residual stresses and endurance limit under bending in stresses concentration conditions]. Izvestiya vusov. Mashinostroeniye [Universities News. Mechanical Engineering], no. 8, pp. 29-32. (in Russian).
- [11] Ivanov, S.I., Shatunov, M.P., Pavlov, V.F., (1974) Vliyaniye ostatochnykh napryazhenij na vynoslivost' obrazcov s nadrezom [The influence of residual stresses on the endurance of notched specimens]. Voprosy prochnosti elementov aviacionnykh konstruktsiy. Kujbyshev: KuAI [Problems of aircraft constructions elements strength. Kuibyshev Aviation Institute], issue 3, pp. 88-95. (in Russian).

- [12] Pavlov, V.F., Kirpichev, V.A., Vakulyuk, V.S., (2012) Prognozirovanie soprotivleniya ustalosti poverhnostno uprochnyonykh detalej po ostatochnym napryazheniyam [The prediction of surface hardened parts fatigue resistance by residual stresses]. Samara: Izdatel'stvo SNC RAN [Samara: Samara scientific centre Publishing House of the Russian Academy of Sciences], 125 pp. (in Russian).
- [13] Ivanov, S.I., (1971) K opredeleniyu ostatochnykh napryazhenij v cilindre metodom kolec i polosok. Ostatochnye napryazheniya [On determination of residual stresses in cylinder by rings-and-stripes method. Residual stresses]. Kuibyshev: KuAI [Kuibyshev Aviation Institute], issue 48, pp. 179-183. (in Russian).
- [14] Sazanov, V.P., Chirkov, A.V., Semenova, O.Yu., Ivanova, A.V., (2012) Modelirovanie ostatochnogo napryazhyonnogo sostoyaniya detali v usloviyah koncentracii napryazhenij s ispol'zovaniem programmnoho kompleksa PATRAN/ NASTRAN [The residual strain state of parts modeling under stress concentration conditions using the calculation program complex NASTRAN/PATRAN]. Vestnik SamGTU [Samara State Technical University bulletin. Part: technical sciences], no. 1 (33), pp. 106-114. (in Russian).
- [15] Radchenko, V.P., Pavlov, V.F., (2011) Naibol'shaya velichina sjimayutschykh ostatochnykh napryazhenij pri poverhnostnom uprochnenii detalej [The maximum of compressive residual stresses under surface hardening of parts]. Trudy MNTK «Prochnost' materialov i elementov konstrukcij». Kiev: IPP im.G.S. Pisarenko NANU [Proceedings of the International Scientific Technical Conference "Strength of materials and structural elements". Kiev: The G.S. Pisarenko Strength Problems Institute of the Ukraine Academy of Sciences], pp. 354-357. (in Russian).
- [16] Filatov, E.Ya., Pavlovsky, V.E., (1985) Universal'niy complex mashin dlya ispytaniya materialov i konstruktzij na ustalost' [Universal machine complex for fatigue tests of materials and structures]. Kiev: Naukova Dumka [Kiev: Scientific Thought], 92 pp. (in Russian).
- [17] Kirpichyov, V.A., Bukaty, A.S., Filatov, A.P., Chirkov, A.V., (2011) Prognozirovanie predela vynoslivosti poverhnostno uprochnyonykh detalej pri razlichnoj stepeni koncentracii napryazhenij [The prediction of hardened parts endurance limit under stresses concentration various degree]. Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta [Ufa State Aviation Technical University bulletin], vol. 15, no.4 (44), pp. 81-85. (in Russian).