

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИРАЩЕНИЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛЕЙ ЗА СЧЁТ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ

©2014 В.Ф. Павлов, А.П. Филатов, О.Ю. Семёнова, В.В. Сазанов, Н.Н. Микушев

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

Исследовалось влияние обкатки роликом при различных усилиях на предел выносливости при изгибе образцов из стали 20 диаметром 50 мм с надрезами различных радиусов и напрессованной втулкой. Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов производилась по двум критериям – остаточным напряжением на поверхности опасного сечения и среднеинтегральным остаточным напряжением по толщине опасного сечения, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости. На основании проведённых экспериментов установлено, что при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочнённых цилиндрических образцов из стали 20 диаметром 50 мм с надрезами и напрессованной втулкой наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений с учётом степени концентрации напряжений. Для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов из стали 20 с надрезами и напрессованной втулкой использование в качестве критерия остаточных напряжений на поверхности концентратора не представляется возможным, так как соответствующий коэффициент, учитывающий влияние этого критерия на предел выносливости, имеет существенное рассеяние. Кроме того, в настоящем исследовании подтверждена зависимость критической глубины нераспространяющейся трещины усталости от размеров опасного поперечного сечения образца (детали).

*Поверхностное упрочнение, образцы из стали 20, 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 работах [1-4], являются остаточные напряжения на поверхности концентратора. Зависимость для определения предела выносливости  $P_R$  упрочнённой детали в этом случае имеет вид

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

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,  $\sigma_z^{nov}$ ,  $\sigma_z^{nov}$  – осевые (меридиональ-

ные) остаточные напряжения на поверхности концентратора опасного сечения детали. Другие компоненты остаточного напряжённого состояния в соответствии с третьей теорией предельных напряжённых состояний не участвуют, так как радиальные остаточные напряжения на поверхности концентратора равны нулю, а окружные остаточные напряжения являются промежуточными главными напряжениями [5].

Обычно зависимость (1) записывается для приращения  $\Delta P_R$  предела выносливости упрочнённой детали

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

На практике при упрочнении деталей ППД часто наблюдается подповерхностный максимум сжимающих остаточных напряжений, то есть к поверхности деталей 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 остаточные напряжения и сопротивление усталости азотированных и упрочнённых роликом стальных цилиндрических образцов. После нагрева и выдержки этих образцов при температурах 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 указывает 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. При этом исходные остаточные напряжения детали на дне трещины не учитываются в силу их малости по сравнению с дополнительными.

Для определения второго критерия в работе [10] использовалось решение задачи [11] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении поверхностно упрочнённой детали после нанесения на неё надреза полуэллиптического профиля. Выделив основную часть 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 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.

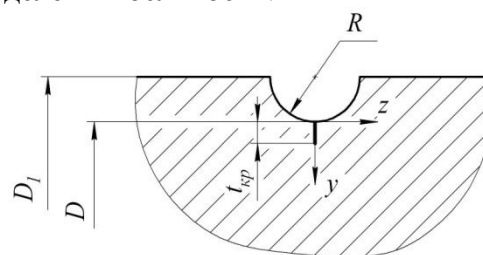


Рис.1. Нераспространяющаяся трещина усталости

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 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  $\bar{\sigma}_{ост}$ . В дальнейшем критерий  $\bar{\sigma}_{ост}$  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  $t_{кр}$  нераспростра-

няющейся трещины усталости зависит только от размеров опасного поперечного сечения и для 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 20 диаметром 50 мм 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.

Гладкие образцы диаметром  $D_1 = 50$  мм подвергались обкатке роликом диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм при усилиях  $P = 0,5$  кН (OP1) и  $P = 1,0$  кН (OP2) 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  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$  гладких образцов представлено на рис. 2. Можно видеть, что сжимающие остаточные напряжения и глубина их залегания с увеличением усилия обкатки возрастают.

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 хорошее совпадение.

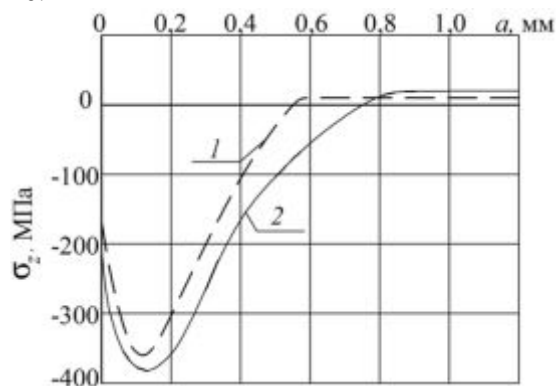


Рис. 2. Осевые остаточные напряжения  $\sigma_z$  в упрочнённых гладких образцах диаметром 50 мм после: 1 – OP1; 2 – OP2

Распределение осевых  $\sigma_z$  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, а значения остаточных напряжений на поверхности дна надрезов  $\sigma_z^{нов}$  представлены в табл. 1.

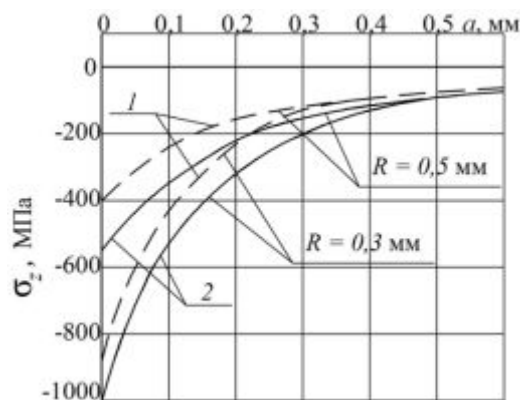


Рис. 3. Осевые остаточные напряжения  $\sigma_z$  в упрочнённых образцах диаметром 50 мм с надрезами  $R = 0,3$  мм и  $R = 0,5$  мм после: 1 – OP1; 2 – OP2

Обращает на себя внимание значительная величина сжимающих остаточных напряжений, достигающих -1004 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 УМП-02 [15]; база испытаний –  $3 \cdot 10^6$  циклов нагружения. Резуль-

таты определения предела выносливости  $\sigma_{-1}$  образцов представлены в табл. 1. 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.

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

Концентратор	Неупроч. образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы							$K_\sigma$	$(\bar{\psi}_\sigma)_{расч}$
		обработка	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\sigma_z^{нов}$ , МПа	$\psi_\sigma$	$t_{кр}$ , мм	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$		
надрез $R = 0,3$ мм	87,5	ОР1	117,5	-898	0,033	1,040	-94	0,322	2,86	0,328
		ОР2	130	-1004	0,042	1,110	-128	0,332		
надрез $R = 0,5$ мм	92,5	ОР1	122,5	-396	0,078	1,077	-82	0,366	2,47	0,353
		ОР2	132,5	-547	0,073	1,024	-112	0,357		
надрез $R = 1,0$ мм	92,5	ОР1	110	-126	0,139	1,073	-46	0,380	2,32	0,363
		ОР2	115	-166	0,136	1,035	-62	0,363		
напрессованная втулка	87,5	ОР1	107,5	-180	0,111	1,02	-64	0,313	2,97	0,321
		ОР2	112,5	-170	0,147	1,14	-82	0,305		

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

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 коэффициента  $\psi_\sigma$ . Этот коэффициент в проведённом исследовании изменяется в широких пределах: от 0,033 до 0,147 (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 0,305 до 0,380, составляя в среднем 0,342.

В работе [16] на основании многочисленных экспериментов была установлена зависимость между коэффициентом влияния  $\bar{\psi}_\sigma$  поверхностного упрочнения на предел выносливости при изгибе по критерию  $\bar{\sigma}_{ост}$  и эффективным коэффициентом концентрации напряжений  $K_\sigma$  в виде

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

В табл. 1 приведены значения коэффициента  $K_\sigma$ , определённые по данным работы [9]. Расчётные величины коэффициента  $(\bar{\psi}_\sigma)_{расч}$  представлены также в табл. 1. Из приведённых 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 наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$ . Для определения приращения предела выносливости при изгибе таких об-

разцов (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  $K_\sigma$ .

### Выводы

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

2. Для прогнозирования предела выносливости упрочнённых образцов 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.

### 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 изд-во, 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. Вып. 66. Куйбышев: КуАИ, 1973. 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. Вып. 1. Куйбышев: КуАИ, 1974. С. 88-95.

12. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления

усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. 125 с.

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

14. 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.

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

16. Кирпичёв В.А., Букатый А.С., Филатов А.П., Чирков А.В. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15, № 4(44). С. 81-85.

### Информация об авторах

**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](mailto:sopromat@ssau.ru), Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

**Филатов Анатолий Петрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru). Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

**Семёнова Ольга Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики, Самарский государственный аэрокосмический университет

имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru), Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

**Сазанов Василий Вячеславович**, аспирант кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru), Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

**Микушев Николай Николаевич**, аспирант кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru), Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

## **FORECASTING AN INCREMENT IN THE PARTS' ENDURANCE LIMIT DUE TO SURFACE HARDENING**

©2014 V.F. Pavlov, A.P. Filatov, O.Yu. Semyonova, V.V. Sazanov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

Rolling with various forces influence on the endurance limit of specimens made of steel 20 of 50 mm diameter with cuts of various radiuses and pressurized bush has been examined. The estimation of the surface hardening influence on the specimens endurance limit has been carried out using two criterions, namely: residual stresses on the dangerous section surface and the average integral residual stresses through the dangerous section thickness, equal the fatigue non-propagating crack critical depth. On base of carried out experiments it's been established that the employment of the average integral residual stresses criterion is more rightful for the endurance limit prediction of surface hardened cylindrical specimens made of steel 20 with diameter 50 mm with cuts and pressurized bush taking into account the concentration degree. The residual stresses on the concentrator surface is not acceptable as a criterion for the endurance limit prediction of surface hardened specimens made of steel 20 with cuts and pressurized bush because the corresponding coefficient of the criterion influence on the endurance limit has a essential dispersion. Besides, the dependence of the fatigue non-propagating crack critical depth on the specimen (part) dangerous cross-section sizes has been confirmed.

*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. The effect of residual stresses and cold working on fatigue strength // *Strength of Materials*. 1976. V. 8, no. 5. P. 529-531.
2. Kpavchenko B.A., Mitryaev K.F. *Obrabotka i vynoslivost' vysokoprochnykh materialov [Machining and endurance of high-strength materials]*. Kuibyshev: Kuibyshevskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1968. 131 p.
3. Serensen S.V., Borisov S.P., Borodin N.A. Evaluation of the fatigue resistance of surface-hardened specimens with residual-stress kinetics taken into account // *Strength of Materials*. 1969. V. 1, no. 2. P. 113-116.
4. Turovsky M.L., Shifrin N.M. Stress concentration in the surface layer of cemented steel // *Vestnik machinostroyeniya*. 1970. No. 11. P. 37- 40. (In Russ.)
5. Ivanov S.I., Pavlov V.F. Vliyanie ostatochnykh napryazhenii na vynoslivost' nenaklepanogo materiala // *Voprosy prikladnoy mekhaniki v aviatsionnoy tekhnike*. Issue 66. Kuibyshev: Kuibyshev Aviation Institute Publ., 1973. P. 70-73. (In Russ.)
6. Shkolnik L.M., Devyatkin V.P. The strength of gear wheels increase by shot peening // *Vestnik machinostroyeniya*. 1950. No. 12. P. 7-12. (In Russ.)
7. Turovsky M.L., Novik R.A. Roller hardening of nitrogenized steel parts // *Vestnik machinostroyeniya*. 1970. No. 1. P. 39-42. (In Russ.)
8. Kudryavtsev P.I. *Nerasprostranyayushchiesya ustalostnye treshchiny [Non-propagating fatigue cracks]*. Moscow: Machinostroyeniye Publ., 1982. 171 p.
9. Serensen S.V., Kogayev V.P., Shneyderovich R.M. *Nesushchaya sposobnost' i raschet detalei mashin na prochnost' [Carrying capacity and strength analysis of machine elements]*. Moscow: Machinostroyeniye Publ., 1975. 488 p.
10. Pavlov V.F. About connection between residual stresses and endurance limit under bending in stresses concentration conditions. // *Izvestiya vusov . Mashinostroeniye*. 1986. No. 8. P. 29-32. (In Russ.)
11. Ivanov S.I., Shatunov M.P., Pavlov V.F. Vliyanie ostatochnykh napryazhenii na vynoslivost' obraztsov s nadrezom // *Voprosy prochnosti elementov aviatsionnykh konstruktsiy*. Issue 1. Kuibyshev: Kuibyshev

Aviation Institute Publ., 1974. P. 88-95. (In Russ.)

12. Pavlov V.F., Kirpichyov V.A., Vakulyuk V.S. Prognozirovanie soprotivleniya ustalosti poverkhnostno uprochnennykh detalei po ostatochnym napryazheniyam [Surface hardened parts fatigue resistance prediction by residual stresses]. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2012. 125 p.

13. Ivanov S.I. K opredeleniyu ostatochnykh napryazhenii v tsilindre metodom kolets i polosok // Ostatochnye napryazheniya. Issue 48. Kuibyshev: Kuibyshev Aviation Institute Publ., 1971. P. 179-183. (In Russ.)

14. Radchenko V.P., Pavlov V.F. Maximum value of compressive residual stresses under parts surface hardening // 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 Publ., 2011. P. 354-357. (In Russ.)

15. Filatov E.Ya., Pavlovsky V.E. Universal'nyi kompleks mashin dlya ispytaniya materialov i konstruktsii na ustalost' [Universal machine complex for fatigue tests of materials and structures]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1985. 92 p.

16. Kirpichyov V.A., Bukaty A.S., Filatov A.P., Chirkov A.V. Prediction of the endurance limit of superficially strengthened details at various degree of stress concentration // Vestnik UGATU. 2011. V. 15, no. 4(44). P. 81-85. (In Russ.)

#### **About the authors**

**Pavlov Valentin Fyodorovich**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Strength of Materials Department, Samara State Aerospace University. E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru). Area of Research: residual stresses mechanics.

**Filatov Anatoly Petrovich**, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of Strength of Materials Department, Samara State Aerospace University. E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru). Area of Research: residual stresses mechanics.

**Semyonova Olga Yurievna**, Candidate of Science (Engineering), Associate Pro-

fessor of Higher Mathematics Department, Samara State Aerospace University. E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru). Area of Research: residual stresses mechanics.

**Sazanov Vasily Vyacheslavovich**, postgraduate student of Strength of Materials Department, Samara State Aerospace University. E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru). Area of Research: residual stresses mechanics.

**Mikushev Nicolay Nicolaevich**, postgraduate student of Strength of Materials Department, Samara State Aerospace University. E-mail: [sopromat@ssau.ru](mailto:sopromat@ssau.ru). Area of Research: residual stresses mechanics.