

В. А. КИРПИЧЁВ, А. С. БУКАТЫЙ, А. П. ФИЛАТОВ, А. В. ЧИРКОВ

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

На основании экспериментальных данных установлена зависимость коэффициента влияния сжимающих остаточных напряжений на предел выносливости поверхностно упрочнённой детали от степени концентрации напряжений. *Поверхностное упрочнение; остаточные напряжения; предел выносливости; степень концентрации напряжений*

Исследовалось влияние сжимающих остаточных напряжений на предел выносливости поверхностно упрочнённых цилиндрических образцов с такими концентраторами напряжений, как надрез, галтель, напрессованная втулка и резьба. При этом концентраторы наносились на образец как до упрочнения (надрез и галтель), так и после упрочнения (надрез и резьба) образца. Изучалось также влияние поверхностного упрочнения на предел выносливости плоских гладких образцов.

Влияние поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости (предельной амплитуды) образцов с концентраторами напряжений при изгибе  $\Delta\sigma_{-1}$  в случае симметричного цикла и растяжении  $\Delta\sigma_{Ra}$  в случае асимметричного цикла оценивалось по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  [1]

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

где  $\bar{\psi}_{\sigma}$  – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости;

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

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

Остаточные напряжения в гладких цилиндрических образцах диаметром 10 мм определялись экспериментально методом удаления части цилиндрической поверхности [2], в образцах диаметром 15 мм с V-образными надрезами – методом удаления половины поверхности надреза в пределах его криволинейной части [3], в гладких образцах диаметром 15–25 мм – методом колец и полосок [4]. Остаточные напряжения в плоских гладких образцах определялись по методике работы [5].

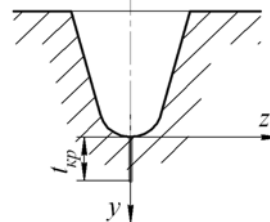


Рис. 1. Нераспространяющаяся трещина усталости в детали с концентратором напряжений

Остаточные напряжения в образцах с надрезами, нанесёнными на упрочнённую поверхность, определялись расчётным методом суммированием дополнительных остаточных напряжений, возникающих в образцах за счёт нанесения надрезов, с остаточными напряжениями гладких образцов [6, 7].

Испытания на усталость в случае симметричного цикла образцов диаметром 10–16 мм при чистом изгибе проводились на машинах МУИ-6000 и НУ-3000, диаметром 25 мм при поперечном изгибе – на машине УММ-01, плоских гладких образцов толщиной 3 мм – на вибростенде. Испытания резьбовых образцов М16 при растяжении в случае отнулевого положительного цикла осуществлялись на машине УМП-02 [8]. В соответствии с ГОСТ 25.502-79 база испытаний для образцов из сталей составляла  $3 \times 10^6$ , для образцов из алюминиевого сплава Д16Т –  $10 \times 10^6$  циклов нагружения. Для

Контактная информация: (846) 267-45-26, 267-45-27

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.1/13944).

определения критической глубины  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости выстоявшие базу испытаний упрочнённые образцы при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при большем напряжении. На изломах этих образцов чётко просматривались нераспространяющиеся усталостные трещины.

Эффективный коэффициент концентрации напряжений  $K_\sigma$  для надрезов, галтелей и свободной резьбы (без гайки) вычислялся по формуле [9]

$$K_\sigma = 1 + q(\alpha_\sigma - 1), \quad (3)$$

где  $q$  – коэффициент чувствительности к концентрации напряжений [9],  $\alpha_\sigma$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений, определявшийся по графикам работы [10]. Коэффициент  $K_\sigma$  для напесованной втулки находился по данным работы [9], резьбы с гайкой – работы [11].

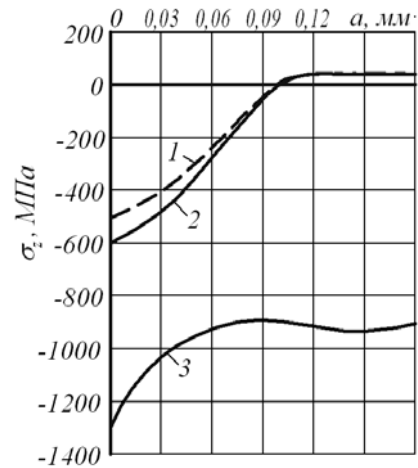
**Надрез, нанесённый на образец до упрочнения.** На образцы диаметром 15 мм из сталей 45, 30ХГСА и ВНС40 наносились V-образные надрезы глубиной 3,75 мм с радиусом закругления 0,5 мм и углом раскрытия 60°. Образцы с надрезом из сталей 45 и 30ХГСА подвергались обработке стальными микрошариками (ОМ) диаметром 0,10–0,15 мм в течение трёх минут на дробемётной установке, из стали ВНС40 – азотированию (А) при температуре 550 °С в среде аммиака в течение 8 часов и последующему охлаждению с печью. Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$  представлено на рис. 2, а результаты испытаний на усталость – в табл. 1. На рис. 3 приведена фотография фрагмента излома азотированного образца из стали ВНС40, разрушенного после испытаний на усталость при напряжении, равном пределу выносливости ( $\sigma_{-1} = 560$  МПа). На изломе видна кольцевая нераспространяющаяся усталостная трещина 2 глубиной 0,160 мм.

Из данных, приведённых в табл. 1, видно, что значения коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  находятся в пределах от 0,357 до 0,380 при неизменном значении  $\alpha_\sigma = 2,33$  и изменении  $K_\sigma$  от 1,85 до 2,16.

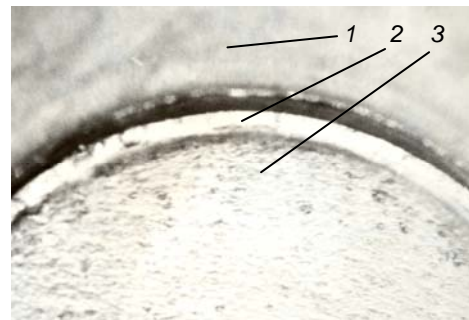
Таблица 1

**Результаты испытаний на усталость при изгибе образцов с V-образными надрезами**

Материал	$\alpha_\sigma$	$K_\sigma$	Неупр. образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы			
				обработка	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
сталь 45	2,33	1,85	77,5	ОМ	120	-119	0,357
30ХГСА	2,33	1,93	35	ОМ	85	-137	0,364
ВНС40	2,33	2,16	200	А	560	-947	0,380



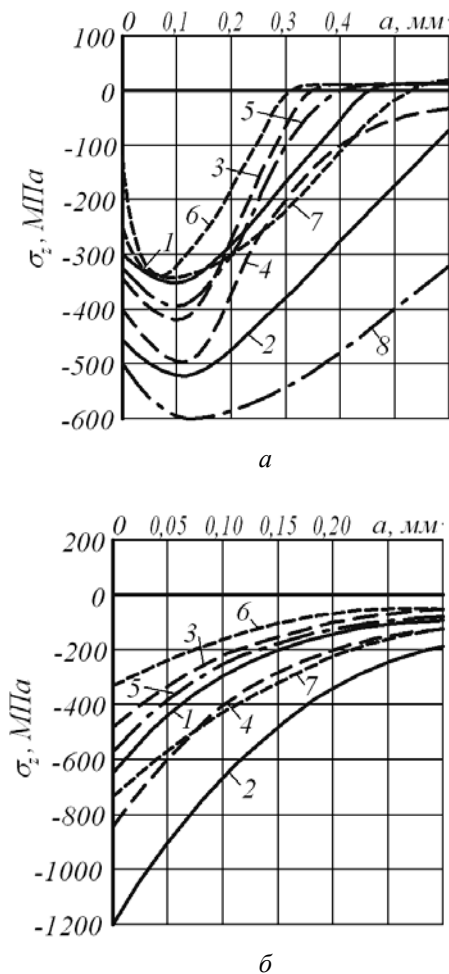
**Рис. 2.** Осевые остаточные напряжения  $\sigma_z$  в образцах с V-образными надрезами из сталей 45 (1), 30ХГСА (2), ВНС40 (3) после обработки микрошариками (1, 2) и азотирования (3)



**Рис. 3.** Фрагмент излома азотированного образца из стали ВНС40 после испытаний на усталость: 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

**Надрез, нанесённый на образец после упрочнения.** Исследовались цилиндрические образцы с круговыми надрезами полукруглого профиля из сталей 45, 12Х18Н10Т, 40Х и 20.

Гладкие образцы диаметром 15 мм из сталей 45 и 12Х18Н10Т подвергались гидродробеструйной обработке (ГДО) дробью диаметром 2 мм при давлении масла 0,28 МПа в течение 8 минут и обкатке роликом (ОР) диаметром 60 мм с профильным радиусом 1,6 мм при усилии 0,5 кН. Гладкие образцы диаметром 25 мм из стали 40Х упрочнялись ГДО, диаметром 25 мм из стали 20 – ГДО и обкаткой роликом (ОР) по тем же режимам, что и образцы из сталей 45 и 12Х18Н10Т. Распределение осевых остаточных напряжений  $\sigma_z$  по толщине поверхностного слоя  $a$  в гладких образцах представлено на рис. 4, а. На упрочнённые и неупрочнённые образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса  $R = 0,3$  мм. Осевые остаточные напряжения  $\sigma_z$  в наименьшем сечении образцов с надрезом по толщине поверхностного слоя  $a$  приведены на рис. 4, б.



**Рис. 4.** Осевые остаточные напряжения  $\sigma_z$  в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом  $R = 0,3$  мм (б) из сталей 45 (1,2), 12Х18Н10Т (3, 4), 40Х (5, 8) и 20 (6,7) после ГДО (1, 3, 5, 6) и ОР (2, 4, 7, 8)

Результаты испытаний на усталость приведены в табл.2, из которой видно, что коэффициент  $\bar{\psi}_\sigma$  изменяется в данном случае от 0,329 до 0,381, составляя в среднем 0,353. Это практически совпадает с значением  $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$ , установленным в [12] для образцов с такой же концентрацией напряжений. При этом коэффициенты  $\alpha_\sigma$  и  $K_\sigma$  изменяются незначительно:  $\alpha_\sigma$  – от 2,78 до 2,83,  $K_\sigma$  – от 2,09 до 2,23.

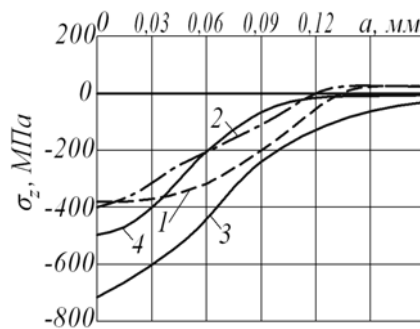
Таблица 2

**Результаты испытаний на усталость при изгибе образцов с надрезами полукруглого профиля**

Материал	$\alpha_\sigma$	$K_\sigma$	Неупр. образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы			
				обра-ботка	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
сталь 45	2,78	2,16	130	ГДО	205	-184	0,381
				ОР	260	-388	0,335
12Х18Н10Т	2,78	2,09	162,5	ГДО	205	-129	0,329
				ОР	262,5	-277	0,361
40Х	2,83	2,23	160	ГДО	202,5	-110	0,386
сталь 20	2,83	2,11	107,5	ГДО	137,5	-87	0,345
				ОР	165	-171	0,336

**Галтель.** Образцы из сталей 30ХГСА, 45, 12Х18Н10Т и сплава Д16Т диаметром 10 мм в гладкой части с галтелью радиуса  $R$  подвергались обработке микрошариками (ОМ) диаметром 0,10–0,15 мм в течение трёх минут на дробемётной установке. Эпюры осевых остаточных напряжений  $\sigma_z$  по толщине поверхностного слоя  $a$  гладких образцов приведены на рис. 5.

Результаты испытаний образцов с галтелью на усталость при изгибе представлены в табл. 3. Можно видеть, что коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости  $\bar{\psi}_\sigma$  составляет в среднем 0,365 при изменении теоретического коэффициента концентрации напряжений  $\alpha_\sigma$  в пределах от 3,22 до 3,81 и эффективного  $K_\sigma$  – от 2,32 до 2,82.



**Рис. 5.** Осевые остаточные напряжения  $\sigma_z$  в гладких образцах после обработки микрошариками: 1 – 30ХГСА, 2 – сталь 45, 3 – 12Х18Н10Т, 4 – Д16Т

Таблица 3

**Результаты испытаний на усталость при изгибе образцов с галтелью и напрессованной втулкой**

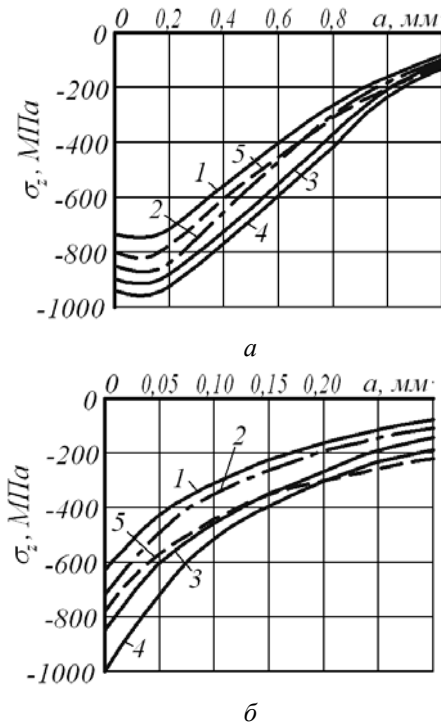
Материал	$R$ , мм	$\alpha_\sigma$	$K_\sigma$	Неупр. образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы			
					обра-ботка	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
30ХГСА	0,1	3,61	2,82	155	ОМ	180	-74,8	0,335
сталь 45	0,125	3,45	2,61	117,5	ОМ	152,5	-95,3	0,367
					ОМ	220	-180	0,389
12Х18Н10Т	0,15	3,22	2,32	150	ОМ	220	-180	0,389
Д16Т	0,08	3,81	2,57	42,5	ОМ	72,5	-81,5	0,368
40Х	–	4,48	3,95	162,5	ОР	285	-484	0,253

**Втулка, напрессованная на вал.** Гладкие образцы диаметром 25 мм из стали 40Х подвергались обкатке роликом (ОР) диаметром 60 мм с профильным радиусом 1,6 мм при усилии 1,0 кН. Распределение осевых остаточных напряжений  $\sigma_z$  по толщине поверхностного слоя  $a$  представлено на рис. 4, а (эпора 8).

Результаты испытаний образцов с напрессованной втулкой на усталость в случае изгиба содержатся в табл. 3. Из данных табл. 3 следует, что для образцов с напрессованной втулкой коэффициент  $\bar{\psi}_\sigma$ , равный 0,253, заметно меньше, чем для исследованных выше образцов с другими концен-

траторами напряжений. Это объясняется более высокими значениями коэффициентов концентрации напряжений  $\alpha_\sigma$  и  $K_\sigma$  для втулки, напрессованной на вал, чем для образцов с надрезом и гальтелью (табл. 1–3).

**Резьба.** Гладкие образцы диаметром 16 мм из сталей 30ХГСА и 40Х подвергались обкатке на трёхроликовом приспособлении роликами диаметром 50 мм с профильным радиусом 13 мм. Усилие обкатки для образцов из стали 30ХГСА принималось равным 4,3; 6,45; 8,6 и 10,75 кН, из стали 40Х – 10,75 кН. Затем на упрочнённых и неупрочнённых гладких образцах фасонным резцом нарезалась резьба М16×2. Распределение осевых остаточных напряжений  $\sigma_z$  по толщине поверхностного слоя  $a$  в гладких образцах и в образцах с резьбой представлено на рис. 6.



**Рис. 6.** Осевые остаточные напряжения  $\sigma_z$ :  
 а – в гладких образцах,  
 б – в образцах с резьбой из сталей 30ХГСА (1-4)  
 и 40Х (5) после обкатки с усилием: 1 – 4,3 кН;  
 2 – 6,45 кН; 3 – 8,6 кН; 4, 5 – 10,75 кН

Результаты испытаний на усталость при изгибе в случае симметричного цикла образцов из стали 30ХГСА со свободной резьбой (без гайки) и при асимметричном цикле растяжения с средним напряжением  $\sigma_m$  образцов из стали 40Х с гайкой приведены в табл.4. Из данных табл. 4 следует, что для образцов из стали 30ХГСА коэффициент  $\bar{\psi}_\sigma$ , равный в среднем 0,369, близок к значению 0,36 [12] для образцов с аналогичной концентрацией напряжений. Для образцов из стали 40Х коэффициент  $\bar{\psi}_\sigma = 0,111$  значительно меньше, чем

для образцов из стали 30ХГСА со свободной резьбой (без гайки) и объясняется большей концентрацией напряжений для резьбы с гайкой. Теоретический  $\alpha_\sigma$  и эффективный  $K_\sigma$  коэффициенты концентрации напряжений по данным работы [11] составляют в этом случае значение, равное 6,2. Такое же значение коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  ( $\bar{\psi}_\sigma = 0,11$ ) получено в работе [13] по результатам определения остаточных напряжений и испытаний на усталость в случае асимметричного цикла растяжения сорока четырёх партий накатанных роликами болтов М6 (с гайкой) из титанового сплава ВТ16 при изменении критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  в широком диапазоне: от -460 МПа до -1370 МПа.

Таблица 4

**Результаты испытаний на усталость при изгибе и растяжении образцов с резьбой**

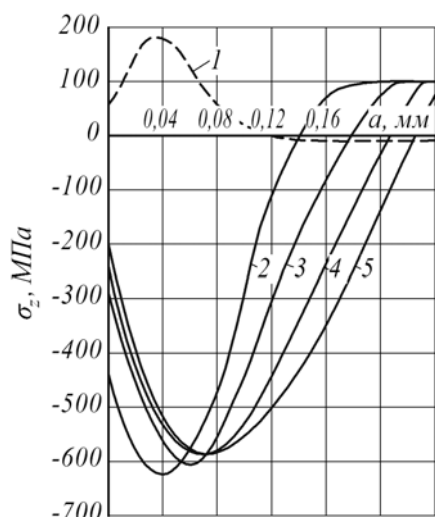
Материал	$\alpha_\sigma$	$K_\sigma$	Усилие обкатки, кН	$\sigma_m$ , МПа	$\sigma_{-1}(\sigma_{Ra})$ , МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
30ХГСА	2,6	2,37	без обкатки	0	284	–	–
			4,3	0	375	-232	0,392
			6,45	0	384	-260	0,385
			8,6	0	398	-322	0,354
			10,75	0	409	-362	0,345
40Х	6,2	6,2	без обкатки	93	93	–	–
			10,75	131	131	-341	0,111

**Гладкие образцы.** Плоские гладкие образцы толщиной 3 мм из сплава ЭИ698ВД после шлифования подвергались упрочнению стальными шариками диаметром 0,18–0,50 мм при различном давлении воздуха Р (табл. 5). Распределение осевых остаточных напряжений  $\sigma_z$  по толщине поверхностного слоя  $a$  приведено на рис. 7, а результаты испытаний на усталость представлены в табл. 5. Анализ полученных данных показывает, что характер распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя упрочнённой детали оказывает значительное влияние на сопротивление усталости [14]. Коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости  $\bar{\psi}_\sigma$  в случае гладких образцов составляет в среднем 0,492, что существенно больше, чем для образцов с концентраторами, и объясняется отсутствием концентрации напряжений.

Таблица 5

**Результаты испытаний на усталость при изгибе плоских гладких образцов из сплава ЭИ698ВД**

Материал	$\alpha_\sigma$	$K_\sigma$	Р, МПа	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
ЭИ698ВД	1,0	1,0	шлиф.	332,9	–	–
			0,15	545,4	-531	0,400
			0,3	562,6	-524	0,438
			0,45	630,2	-483	0,616
			0,6	574,8	-472	0,513



**Рис. 7.** Осевые остаточные напряжения  $\sigma_z$  в плоских гладких образцах из сплава ЭИ698ВД после шлифования (1) и упрочнения стальными шариками: 2 –  $P = 0,15$  МПа; 3 –  $P = 0,3$  МПа; 4 –  $P = 0,45$  МПа; 5 –  $P = 0,6$  МПа

Линейная аппроксимация методом наименьших квадратов значений коэффициента влияния остаточных напряжений на предел выносливости  $\bar{\psi}_\sigma$  от величины теоретического  $\alpha_\sigma$  и эффективного  $K_\sigma$  коэффициентов концентрации напряжений даёт для описанных в настоящем исследовании и в работах [12, 13] экспериментов следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_\sigma &= 0,612 - 0,081\alpha_\sigma, \\ \bar{\psi}_\sigma &= 0,514 - 0,065K_\sigma. \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, для прогнозированияращения предела выносливости при изгибе и растяжении упрочнённых деталей с различной степенью концентрации напряжений представляется возможным использовать зависимость (1), среднеинтегральные остаточные напряжения  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  в которой вычисляются по формуле (2), а коэффициент  $\bar{\psi}_\sigma$  определяется зависимостями (4) по известным значениям теоретического  $\alpha_\sigma$  или эффективного  $K_\sigma$  коэффициентов концентрации напряжений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов В. Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. 1986. № 8. С. 29–32.
2. 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.
3. Павлов В. Ф., Кольцун Ю. И., Кирпичёв В. А. Определение остаточных напряжений в цилиндрических образцах с V-образным надрезом // Известия вузов. Авиационная техника. 1986. №4. С. 92–95.

4. Иванов С. И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. Куйбышев: КуАИ, 1971. Вып. 53. С. 32–42.

5. Биргер И. А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.

6. 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.

7. Иванов С. И., Филатов А. П. Остаточные напряжения и сопротивление усталости деталей с резьбой, нарезанной по предварительно упрочнённой поверхности // Вестник машиностроения. 1989. №1. С.24–25.

8. Филатов Э. Я., Павловский В. Э. Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость. Киев: Наукова думка, 1985. 92 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. Петерсон Р. Е. Коэффициенты концентрации напряжений. М.: Издательство «МИР», 1977. 304 с.

11. Биргер И. А., Исислевич Г. Б. Резьбовые соединения. М.: Машгиз, 1973. 256 с.

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. Технологические остаточные напряжения и сопротивление усталости авиационных резьбовых деталей / С. И. Иванов, В. Ф. Павлов, Г. В. Коновалов, Б. В. Минин // М.: Отрасл. биб-ка «Технический прогресс и повышение квалификации» МАП, 1991. 192 с.

14. Павлов В. Ф. Влияние характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя детали на сопротивление усталости // Известия вузов. Машиностроение, 1987. №7. С. 3–6.

### ОБ АВТОРАХ

**Кирпичёв Виктор Алексеевич**, д-р. техн. наук, профессор, проф. каф. сопротивления материалов Самарского гос. аэрокосм. ун-та им. академика С. П. Королёва (нац. исслед. ун-та) СГАУ, г. Самара. Исследования в области механики деформируемых тел и конструкций.

**Букатый Алексей Станиславович**, канд. техн. наук, доц. каф. технологии машиностроения Ярославского гос. техн. ун-та, г. Ярославль. Исследования в области механики деформируемых тел и конструкций.

**Филатов Анатолий Петрович**, канд. техн. наук, доцент, доц. каф. сопротивления материалов СГАУ. Исследования в области механики деформируемых тел и конструкций.

**Чирков Алексей Викторович**, асс. каф. сопротивления материалов СГАУ. Исследования в области механики деформируемых тел и конструкций.