

ЗАВИСИМОСТЬ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ОТ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ

©2014 В.А. Кирпичёв¹, В.С. Вакулюк¹, А.С. Букатый¹, В.В. Лунин², С.А. Михалкина¹

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

²Самарский государственный технический университет

Изучено влияние характера распределения сжимающих остаточных напряжений на предел выносливости при изгибе поверхностно упрочнённых образцов из различных сталей и сплавов. Образцы с V-образными надрезами из сталей ВНС40 и 38Х2МЮА подвергались азотированию, корсетные образцы из сплава ВКС-5 – цементации и ионной цементации, плоские образцы из сплава ЭИ698ВД – пневмодробеструйной обработке. Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости производилась по двум критериям: остаточным напряжениям на поверхности опасного сечения и среднеинтегральным остаточным напряжениям. Установлено, что предел выносливости поверхностно упрочнённых образцов (деталей) определяется не величиной сжимающих остаточных напряжений на поверхности, а полнотой эпюры остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости. Достаточно точную для практики оценку влияния характера распределения сжимающих остаточных напряжений на предел выносливости упрочнённых образцов (деталей) даёт критерий среднеинтегральных остаточных напряжений, вычисленный по толщине поверхностного слоя опасного сечения, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости. Оценка приращения предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов (деталей) по критерию остаточных напряжений на поверхности опасного сечения может привести на практике к существенной ошибке.

Поверхностное упрочнение, характер распределения сжимающих остаточных напряжений, предел выносливости, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

Изучалось влияние характера распределения сжимающих остаточных напряжений, наведённых в поверхностном слое различными технологическими методами, на предел выносливости гладких образцов и образцов с концентраторами напряжений.

Оценка влияния сжимающих остаточных напряжений на приращение предела выносливости образцов при изгибе в случае симметричного цикла $\Delta\sigma_{-1}$ производилась по двум критериям. Во-первых, по критерию остаточных напряжений на поверхности опасного сечения образцов σ_z^{nos} [1-4] по зависимости

$$\Delta\sigma_{-1} = \psi_{\sigma} \cdot |\sigma_z^{nos}|, \quad (1)$$

где ψ_{σ} – коэффициент влияния упрочнения на предел выносливости по критерию σ_z^{nos} .

Во-вторых, по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ocm}$ [5] по формуле

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} \cdot |\bar{\sigma}_{ocm}|, \quad (2)$$

где $\bar{\psi}_{\sigma}$ – коэффициент влияния упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{ocm}$,

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

$\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении образца по толщине поверхностного слоя a ; $\xi = a/t_{кр}$ – расстояние от поверхности образца до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе образца (детали) на пределе выносливости.

Цилиндрические образцы с V-образным надрезом при наименьшем диаметре 7,5 мм (рис. 1) из сталей ВНС40 и 38Х2МЮА подвергались азотированию при температуре 550°С в среде аммиака в течение 8 часов. Меридиональные σ_ϕ

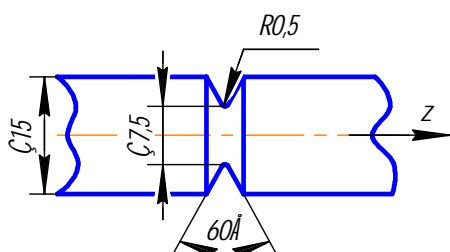


Рис. 1. Рабочая часть образцов с V-образным надрезом из сталей ВНС40 и 38Х2МЮА

(осевые σ_z – в наименьшем сечении) остаточные напряжения определялись по методике, изложенной в работе [6], и по толщине поверхностного слоя a наименьшего сечения образцов приведены на рис. 2.

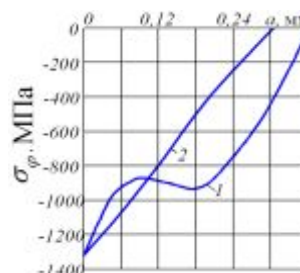


Рис.2. Остаточные напряжения в образцах с надрезами из сталей ВНС40 (1) и 38Х2МЮА (2)

Из приведённых на рис. 2 данных видно, что после азотирования сжимающие остаточные напряжения в образцах из стали ВНС40 имеют второй подповерхностный максимум на глубине 0,18 мм. Толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями в наименьшем сечении образцов из стали ВНС40 составляет 0,37 мм, из стали 38Х2МЮА – 0,31 мм.

Следовательно, распределение сжимающих остаточных напряжений в опасном сечении образцов из стали ВНС40 после азотирования является более полным, чем образцов из стали 38Х2МЮА. Значения остаточных напряжений на поверхности надреза $\sigma_z^{нов}$ приведены в табл.1.

Таблица 1 - Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений образцов с V-образными надрезами

Материал	Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы				
		σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
ВНС40	200	560	-1320	0,273	-947	0,380
38Х2МЮА	165	455	-1330	0,218	-816	0,356

Испытания образцов с V-образным надрезом на усталость при изгибе в случае симметричного цикла проводились на машине МУИ-6000, база испытаний – $5 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости σ_{-1} приведены в табл.1. Можно видеть, что при практически одинаковых остаточных напряжениях на поверхности дна надреза, приращение предела выносливости за счёт азотирования образцов из стали

ВНС40 на 70 МПа выше, чем образцов из стали 38Х2МЮА. Это различие объясняется большей полнотой эпюры остаточных напряжений в образцах из стали ВНС40, чем в образцах из стали 38Х2МЮА.

Образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжениях, равных пределу выносливости, доводились до разрушения при бóльших напряжениях. Во всех азотированных образцах были обнаружены

нераспространяющиеся трещины усталости, средняя критическая глубина $t_{кр}$ которых составляла 0,162 мм. По толщине поверхностного слоя, равной $t_{кр}$, по формуле (3) вычислялись среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$ с использованием эпюр остаточных напряжений, приведённых на рис. 2. Значения критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ представлены в табл. 1. Сравнивая значения коэффициентов ψ_{σ} и $\bar{\psi}_{\sigma}$, вычисленных по формулам (1) и (2), можно видеть, что коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ влияния упрочнения по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ изменяется в значительно меньших пределах, чем коэффициент ψ_{σ} влияния упрочнения по критерию $\sigma_z^{ное}$. Среднее значение коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ составляет 0,368, что незначительно отличается от $\bar{\psi}_{\sigma} = 0,36$, установленного в работах [6, 7] для образцов и деталей из других материалов с аналогичной концентрацией напряжений.

Корсетные образцы круглого поперечного сечения с наименьшим диаметром 7,5 мм (рис. 3) из сплава ВКС-5 под-

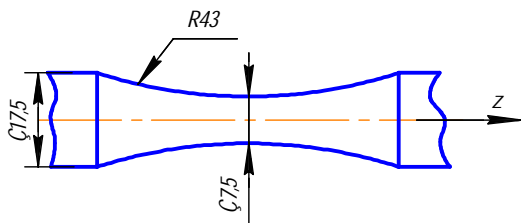


Рис. 3. Рабочая часть корсетных образцов из сплава ВКС-5

Из приведённых на рис. 4 эпюр следует, что толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями после цементации составляет 0,23 мм, а после ионной цементации – 0,10 мм. При примерно одинаковых остаточных напряжениях на поверхности (-2200 МПа и -2100 МПа)

вергались цементации и ионной цементации с характерными для практики режимами. Меридиональные σ_{ϕ} (осевые σ_z – в наименьшем сечении) остаточные напряжения определялись методом удаления половины поверхности образца в пределах его корсетной части по методике, описанной в работе [8]. Исследовались остаточные напряжения в образцах как непосредственно после термической обработки, так и после испытаний на усталость. Необходимо отметить, что остаточные напряжения в образцах, прошедших базу испытаний при напряжениях, близких к пределу выносливости, практически не отличались от остаточных напряжений образцов, не подвергавшихся испытаниям на усталость. Следовательно, остаточные напряжения после термической и химико-термической обработки в исследованных образцах весьма устойчивы к воздействию переменных напряжений. Распределение меридиональных σ_{ϕ} остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a корсетных образцов приведено на рис. 4.

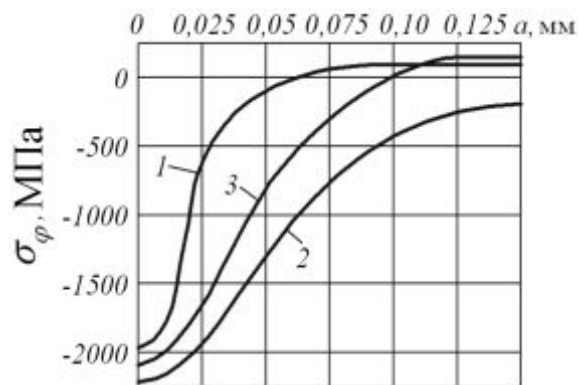


Рис. 4. Остаточные напряжения в корсетных образцах из сплава ВКС-5: 1 – исходное состояние, 2 – цементация, 3 – ионная цементация

распределение остаточных напряжений после цементации по толщине поверхностного слоя является более полным, чем после ионной цементации. Значения остаточных напряжений на поверхности образцов $\sigma_{\phi}^{ное}$ приведены в табл. 2.

Таблица 2 - Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений корсетных образцов из сплава ВКС-5

Вариант	Обработка	σ_{-1} , МПа	$\sigma_{\varphi}^{нов}$, МПа	ψ_{σ}	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
1	исходное состояние	760	-1950	–	-136	–
2	цементация	1040	-2200	1,12	-672	0,522
3	ионная цементация	900	-2100	0,933	-389	0,533

Испытания корсетных образцов на усталость при изгибе в случае симметричного цикла проводились на машине МВП-10000, база испытаний – $30 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты испытаний по определению предела выносливости σ_{-1} приведены в табл. 2. И в этом случае при практически одинаковых остаточных напряжениях на поверхности приращение предела выносливости образцов после цементации на 140 МПа выше, чем после ионной цементации за счёт большей полноты эпюры и большей толщины слоя со сжимающими остаточными напряжениями.

В образцах, выстоявших базу испытаний при напряжениях, равных пределу выносливости, были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, средняя критическая глубина $t_{кр}$ которых составляла 0,160 мм. По формуле (3) с использованием распределений остаточных напряжений, приведённых на рис. 4, были вычислены среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$, значения которых представлены в табл. 2.

В работе [9] на основании большого количества экспериментов была установлена зависимость между коэффициентом влияния упрочнения $\bar{\psi}_{\sigma}$ на предел выносливости при изгибе по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ и теоретическим коэффициентом концентрации напряжений α_{σ} в виде

$$\bar{\psi}_{\sigma} = 0,612 - 0,081 \cdot \alpha_{\sigma}. \quad (4)$$

Для используемых в исследовании корсетных образцов с геометрическими параметрами, указанными на рис. 3, по данным работы [10] коэффициент $\alpha_{\sigma} = 1,06$. Среднее значение коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ (табл. 2) составляет значение 0,538, кото-

рое несущественно отличается от значения $\bar{\psi}_{\sigma} = 0,53$, вычисленного по формуле (4) при указанной степени концентрации напряжений. Следовательно, и в данном случае оценка приращения предела выносливости образцов за счёт поверхностного упрочнения по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ приводит к удовлетворительным результатам. Коэффициент ψ_{σ} по критерию $\sigma_z^{нов}$ составляет в среднем 1,03 и в 4 раза больше, чем для образцов с V-образными надрезами, что не позволяет использовать этот критерий для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов и деталей.

Плоские образцы из сплава ЭИ698ВД прямоугольного поперечного сечения толщиной 3 мм (рис. 5) упрочнялись на пневмодробеструйной установке стальными шариками диаметром 0,18 – 0,5 мм при различном давлении воздуха p . Осевые остаточные напряжения σ_z определялись по методике работы [11]. Распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a приведено на рис. 6.

В образцах после шлифования (исходное состояние – эпюра 1) действовали растягивающие остаточные напряжения с максимумом 180 МПа на глубине 0,04 мм. При упрочнении стальными шариками с увеличением давления воздуха толщина поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями увеличивается при одновременном уменьшении напряжений к поверхности и смещении максимума от поверхности вглубь образца. В табл. 3 приведены значения остаточных напряжений $\sigma_z^{нов}$ на поверхности упрочнённых образцов.

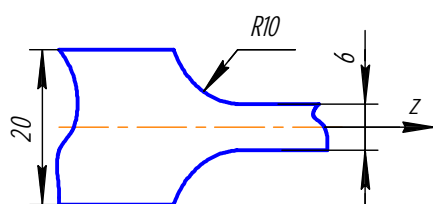


Рис. 5. Рабочая часть плоских образцов из сплава ЭИ698ВД

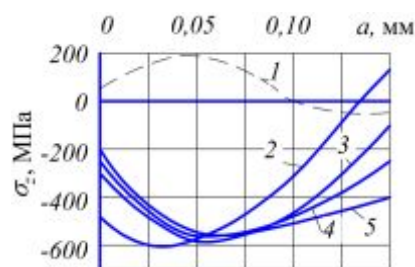


Рис. 6. Остаточные напряжения в плоских образцах из сплава ЭИ698ВД; номера эюр соответствуют вариантам табл. 3

Таблица 3 - Режимы упрочнения, результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений в плоских образцах из сплава ЭИ698ВД

Вариант	p , МПа	σ_{-1y} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
1	исх. сост.	332,9	–	–	–	–
2	0,15	545,4	-440	0,483	-531	0,400
3	0,3	562,6	-280	0,820	-524	0,438
4	0,45	630,2	-260	1,143	-483	0,616
5	0,6	574,8	-220	1,100	-472	0,513

Ускоренные испытания на усталость плоских образцов при изгибе в случае симметричного цикла проводились на вибростенде, база испытаний – $2 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Значения условного предела выносливости σ_{-1y} представлены в табл. 3. В упрочнённых образцах после испытаний на усталость при напряжениях, равных пределу выносливости, были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, средняя критическая глубина которых составляла $t_{кр} = 0,065$ мм. По толщине поверхностного слоя, равной 0,065 мм, по формуле (3) вычислялись среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$ с использованием распределения остаточных напряжений, приведённых на рис. 6. Значения $\bar{\sigma}_{ост}$ представлены в табл. 3.

Анализируя данные табл. 3, можно видеть, что коэффициент влияния ψ_σ по критерию $\sigma_z^{нов}$ изменяется в 2,3 раза. Изменение коэффициента ψ_σ в таких широких пределах и в этом случае не позволяет использовать критерий $\sigma_z^{нов}$ для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых гладких деталей.

Значение коэффициента влияния $\bar{\psi}_\sigma$ по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ составляет в среднем 0,492 и практически совпадает со значением $\bar{\psi}_\sigma$, вычисленным по формуле (4) при теоретическом коэффициенте концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 1,0$, то есть для случая гладкой детали. Таким образом и для гладких образцов (деталей), то есть для образцов (деталей) без концентраторов напряжений, полнота эпюры сжимающих остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя, равной $t_{кр}$, является определяющим фактором влияния упрочнения на предел выносливости.

Выводы

1. Предел выносливости поверхностно упрочнённых образцов (деталей) определяется не величиной сжимающих остаточных напряжений на поверхности, а полнотой эпюры остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости.

2. Достаточно точную для практики оценку влияния характера распределения

сжимающих остаточных напряжений на предел выносливости поверхностно упрочнённых образцов (деталей) даёт критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, вычисленный по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости.

3. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов (деталей) по критерию остаточных напряжений $\sigma_z^{нов}$ на поверхности опасного сечения может привести на практике к существенной ошибке.

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: Куйбышев. книж. 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. 3-6.

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

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

6. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости упрочнённых деталей по оста-

точным напряжениям. Самара: СНЦ РАН, 2012. 125 с.

7. Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали // Известия вузов. Машиностроение. 1988. № 8. С. 22-26.

8. Павлов В.Ф., Вакулюк В.С., Кирпичёв В.А., Лапин В.И. Остаточные напряжения и предел выносливости корсетных образцов после различных видов термической и химико-термической обработки // Вестник СамГТУ. Технические науки. 2010. № 3(28). С. 101-106.

9. 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.

10. Петерсон Р.Е. Коэффициенты концентрации напряжений. М.: Мир, 1977. 304 с.

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

Информация об авторах

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

Вакулюк Владимир Степанович, кандидат технических наук, доцент ка-

федры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Букатый Алексей Станиславович, кандидат технических наук, докторант кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.

Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: bukaty@inbox.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Лунин Валентин Валерьевич, аспирант кафедры прикладной математики и информатики, Самарский государственный технический университет. E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Михалкина Светлана Алексеевна, старший преподаватель кафедры высшей математики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

DEPENDENCE OF THE ENDURANCE LIMIT ON THE CHARACTER OF RESIDUAL STRESSES DISTRIBUTION IN THE SURFACE LAYER OF HARD- ENED PARTS

©2014 V.A. Kirpichyov¹, V.S. Vakulyuk¹, A.S. Bukaty¹, V.V. Lunin², S.A. Mikhalkina¹

¹Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

²Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

The influence of the character of compressive residual stress distribution on the endurance limit of surface-hardened specimens made of various steels and alloys under bending has been examined. Specimens made of ВНС40 and 38Х2МЮА steels with V-shaped notches were hardened by nitriding, foundation specimens made of ВКС-5 alloy – by cementation and ionic cementation, flat specimens made of ЭИ698ВД alloy – by air-shot-blasting. The influence of surface hardening on the endurance limit was assessed using two criterions, namely: residual stresses on the dangerous section surface and the average integral residual stresses. It was established that the endurance limit of surface-hardened specimens (parts) is determined not by the value of compressive residual stresses on the surface but by the completeness of the diagram of the residual stress over the part surface layer thickness on condition that the surface layer thickness is equal to the critical depth of the non-propagating fatigue crack. The average integral residual stress criterion calculated over the thickness of a surface layer of the dangerous section equal to the critical depth of the non-propagating fatigue crack gives a rather accurate estimation of the influence the character of compressive residual stress distribution has on the endurance limit of hardened specimens (parts). In practice the estimation of the increment of surface-hardened specimens (parts) endurance limit by the criterion of residual stresses on the dangerous section surface may lead to a significant error.

Surface hardening, compressive residual stress distribution character, endurance limit, criterion of average integral residual stresses.

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. Krapchenko B.A., Mitryaev K.F. *Machining and endurance of high-strength materials*. Kuibyshev: Kuibyshev Publishing House, 1968. 131 p.
3. Serensen S.V., Borisov S.P., Borodin N.A. Evaluation of fatigue resistance of surface-hardened specimens taking into account residual stress kinetics. // *Strength of Materials*. 1969. No. 2. P. 3-6. (In Russ.)
4. Turovsky M.L., Shifrin N.M. Stress concentration in the surface layer of case-

hardened steel. // Vestnik mashinostroyeniya. 1970. No. 11. P. 37- 40. (In Russ.)

5. Pavlov V.F. Connection between residual stresses and endurance limit under bending in stress concentration conditions // Izvestiya vusov. Mashinostroyeniye. 1986. No. 8. P. 29-32. (In Russ.)

6. Pavlov V.F. Kirpichyov V.A., Vakulyuk V.S. Prognozirovaniye soprotivleniya ustalosti uprochnennykh detaley po osta-tochnym napryazheniyam [Prediction of fatigue resistance of surface-hardened parts by residual stresses]. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2012. 125 p.

7. Pavlov V.F. The influence of the value and distribution of residual stresses in the surface layer of a part with a concentrator on the endurance limit. Report 1. Solid parts // Izvestiya vusov. Mashinostroyeniye. 1988. No. 8. P. 22-26. (In Russ.)

8. Pavlov V.F., Vakulyuk V.S., Kirpichyov V.A., Lapin V.I. Residual stresses and limit of endurance of corset specimens after various types of thermal and thermochemical processing // Vestnik of Samara St. Tech. Univ. Technical Sciences Series. 2010. No. 3(28). P. 101-106. (In Russ.)

9. 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. No. 4(44). P. 81-85. (In Russ.)

10. Peterson R.E. Koeffitsienty kontsentratsii napryazheniy [Stress concentration coefficients]. Moscow: MIR Publ., 1977. 304 p.

11. Birger I.A. Ostatochnye napryazheniya [Residual stresses]. Moscow: Mashgiz Publ., 1963. 232 p.

About the authors

Kirpichyov Victor Alexeevich, Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Strength of Materials, Dean of the Aircraft Construction Faculty, Samara State Aerospace University. E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of Research: residual stresses mechanics.

Vakulyuk Vladimir Stepanovich, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Strength of Materials, Samara State Aerospace University. E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of Research: residual stresses mechanics.

Bukaty Alexey Stanislavovich, Candidate of Science (Engineering), Doctoral

Candidate of the Department of Strength of Materials, Samara State Aerospace University. E-mail: bukaty@inbox.ru. Area of Research: residual stresses mechanics.

Lunin Valentin Valerievich, post-graduate student of the Applied Mathematics and Informatics Department, Samara State Technical University. E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of Research: residual stresses mechanics.

Mikhalkina Svetlana Alexeevna, Senior Lecturer of the Higher Mathematics Department, Samara State Aerospace University. E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of Research: residual stresses mechanics.