

УДК 621.787:539.319

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 40X ПО ОСТАТОЧНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ ОБРАЗЦА-СВИДЕТЕЛЯ

©2014 В.П. Сазанов, В.С. Вакулюк, В.К. Шадрин, Н.А. Сургутанов,
П.А. Шляпников

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

Изучена возможность использования образцов-свидетелей, обрабатываемых одновременно с деталями, для оценки влияния гидродробеструйной обработки на предел выносливости деталей с концентраторами напряжений на примере цилиндрических образцов с отверстием из стали 40X с круговым надрезом полукруглого профиля радиуса 0,3 мм. Исследование показало, что расхождение между расчётными и экспериментальными значениями остаточных напряжений в гладких образцах не превышает 8%, в образцах с надрезом – 6%. При оценке влияния гидродробеструйной обработки на предел выносливости при изгибе в случае симметричного цикла полых цилиндрических образцов из стали 40X с надрезом радиуса 0,3 мм установлено, что использование рассчитанного по первоначальным деформациям образца-свидетеля распределения остаточных напряжений позволяет прогнозировать приращение предела выносливости образцов в условиях концентрации напряжений с точностью до 8%. Показано, что при прогнозировании приращения предела выносливости упрочнённых гидродробеструйной обработкой образцов из стали 40X с концентраторами напряжений целесообразно использовать критерий среднеинтегральных остаточных напряжений, вычисленный по толщине поверхностного слоя опасного сечения, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости.

Поверхностное упрочнение, образец-свидетель, остаточные напряжения, предел выносливости.

Эксплуатационные качества изделий авиационной и ракетно-космической техники определяются, в числе других характеристик, ресурсом и надёжностью работы, в первую очередь, высоконагруженных узлов и деталей, прочность которых зависит от конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. При переменных внешних нагрузках и длительном их воздействии особую значимость приобретает влияние физико-механического состояния поверхностного слоя деталей в местах наиболее вероятного разрушения – концентраторах напряжений. Среди характеристик этого состояния важную роль играют остаточные напряжения, возникающие при различных технологических процессах обработки деталей. В основе образования остаточных напряжений лежат необратимые объёмные изменения в материале деталей. Для повышения сопротивления усталости деталей машин широко применяются различные методы поверхностного пластиче-

ского деформирования. Эти методы оказываются наиболее эффективными для деталей сложной формы с различными концентраторами напряжений.

Для оценки эффективности повышения сопротивления усталости деталей за счёт упрочняющих технологий и оптимизации режимов упрочнения на стадии проектирования необходимо разрабатывать специализированные расчётно-теоретические и расчётно-экспериментальные методы. В данной работе для исследования применён расчётно-экспериментальный метод, который основан на использовании конечно-элементного моделирования (комплекс PATRAN/NASTRAN), а также экспериментальных механических методов определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя.

Использованный в данном исследовании расчётно-экспериментальный метод с применением образцов-свидетелей и современных расчётных комплексов позво-

ляет сохранить исследуемую деталь и получить распределение остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя в любом её сечении. В этом случае при измерении остаточных напряжений механическими методами разрушению подвергается только образец-свидетель. Такой образец, имеющий определённую форму и геометрические размеры, проходит весь технологический цикл обработки вместе со штатной деталью.

В основе вышеуказанного расчётно-экспериментального метода лежит известная концепция, что обрабатываемые совместно деталь и образец-свидетель при поверхностном пластическом деформи-

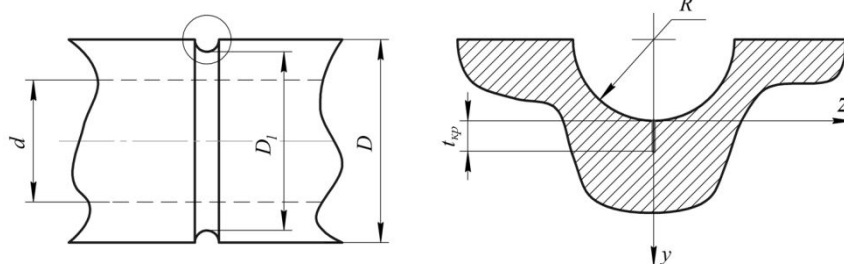


Рис. 1. Цилиндрический образец с надрезом и нераспространяющаяся трещина усталости

образцы перед испытаниями подвергались гидродробеструйной обработке (ГДО). В качестве образца-свидетеля при проведении исследований использовалась цилиндрическая втулка диаметром 51,5 мм и длиной 45 мм, в которой определялись остаточные напряжения по толщине упрочнённого поверхностного слоя методом колец и полосок [5].

Моделирование остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя выполнялось методом термоупругости [6] с использованием комплекса PATRAN/NASTRAN. При проведении расчётов были приняты следующие условия:

- все образцы и образец-свидетель при упрочнении получали одинаковые изотропные первоначальные деформации;
- деформации сдвига малы, и в первоначальных деформациях эта составляющая не учитывалась.

Расчёты проводились в следующей последовательности:

– получение одинаковых первоначальных деформаций [1-3]. Однако, во всех случаях практического применения, эта концепция требует проведения тщательной экспериментальной и расчётной проверки. С целью апробации и правильности выбора принятых положений и расчётных методов был проведён анализ результатов испытаний на усталость и экспериментального определения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя цилиндрических образцов из стали 40X [4] с размерами $D \times d = 25 \text{ мм} \times 19 \text{ мм}$, где D – наружный диаметр, d – внутренний диаметр (рис. 1).

– определение первоначальных деформаций на образце-свидетеле $\varnothing 51,5 \text{ мм} \times 45 \text{ мм}$;

– расчёт распределения остаточных напряжений в исследуемых образцах по полученным значениям первоначальных деформаций образца-свидетеля;

– сравнение расчётных распределений остаточных напряжений для образцов с их экспериментальными распределениями;

– расчёт распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения образцов с надрезами;

– прогнозирование приращения предела выносливости образцов с надрезами за счёт упрочнения и сравнение полученных значений с результатами испытаний образцов на усталость.

При определении первоначальных деформаций в конечно-элементной модели образца-свидетеля в качестве исходных данных использовалось экспериментальное распределение осевых σ_z остаточных

напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя a (рис. 2) этого образца.

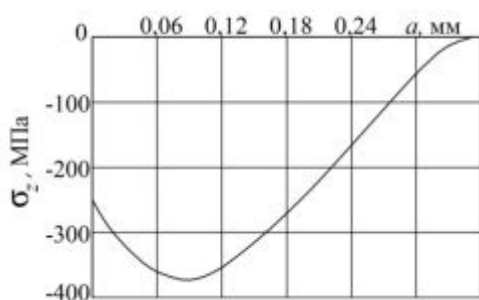


Рис. 2. Осевые σ_z остаточные напряжения в образце-свидетеле (втулка $\varnothing 51,5 \text{ мм} \times 45 \text{ мм}$) после ГДО

Известно [7], что при оценке приращения предела выносливости за счёт поверхностного упрочнения определяющими являются осевые остаточные напряжения. Поэтому сравнение расчётных и экспериментальных распределений остаточных напряжений выполнялось по осевой компоненте. На рис. 3 представлены экспериментальные [4] и расчётные распределения осевых σ_z остаточных напряжений в гладких образцах с размерами $D \times d = \varnothing 25 \text{ мм} \times 19 \text{ мм}$ по толщине поверхностного слоя a . Из данных рис. 3 видно, что расхождение расчётных и экспериментальных значений наибольших осевых σ_z остаточных напряжений не превышает 8%.

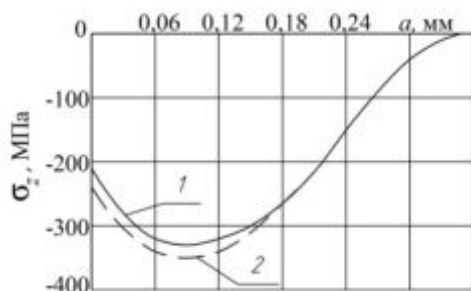


Рис. 3. Осевые σ_z остаточные напряжения в гладких образцах с размерами $D \times d = \varnothing 25 \text{ мм} \times 19 \text{ мм}$ после ГДО, определённые экспериментально (1) и расчётом (2)

Полученное расчётным методом распределение осевых остаточных напря-

жений в гладких образцах после гидродробеструйной обработки использовалось для расчёта распределения остаточных напряжений в образцах с круговым надрезом полукруглого профиля радиуса $R = 0,3 \text{ мм}$, нанесённым на гладкие образцы после упрочнения ГДО. Остаточные напряжения в образцах с надрезами определялись как сумма дополнительных напряжений, возникающих за счёт перераспределения остаточных усилий при нанесении надреза, и остаточных напряжений гладких образцов.

Дополнительные остаточные напряжения рассчитывались двумя методами: аналитическим [8] и численным с использованием программного комплекса PATRAN/NASTRAN [6]. На рис. 4 представлены экспериментальная [4] и расчётная эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a поверхностного слоя опасного сечения образцов с надрезами после опережающего поверхностного пластического деформирования. Можно видеть, что остаточные напряжения, полученные по экспериментальной и расчётной эпюрам гладкого образца, отличаются по наибольшим значениям не более, чем на 6%.

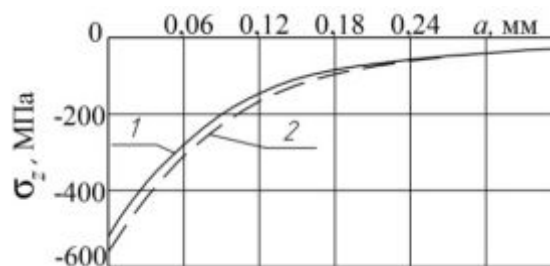


Рис. 4. Осевые σ_z остаточные напряжения в образцах с размерами $D \times d = \varnothing 25 \text{ мм} \times 19 \text{ мм}$ с надрезом $R = 0,3 \text{ мм}$, вычисленные по экспериментальным (1) и расчётным (2) данным

Прогнозирование влияния гидродробеструйной обработки на приращение предела выносливости образцов с надрезом при изгибе в случае симметричного цикла $\Delta\sigma_{-1}$ с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напря-

жений $\bar{\sigma}_{ocm}$ [4, 9] проводилось по следующей зависимости:

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

Здесь $\bar{\psi}_{\sigma}$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{ocm}$:

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

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении образца по толщине поверхностного слоя a ; $\xi = a/t_{kp}$ – расстояние от поверхности опасного сечения образца до текущего слоя, выраженное в долях t_{kp} ; t_{kp} – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в опасном сечении упрочнённого образца (детали) при работе на пределе выносливости (рис. 1).

На основании многочисленных экспериментальных данных для образцов и деталей из различных материалов с различными концентраторами напряжений в работе [10] было установлено, что коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ зависит только от степени концентрации напряжений и вычисляется для случая изгиба по следующей формуле:

$$\bar{\psi}_{\sigma} = 0,612 - 0,081\alpha_{\sigma}, \quad (3)$$

где α_{σ} – теоретический коэффициент концентрации напряжений, который определялся по данным справочника [11]. В исследуемом случае при $\alpha_{\sigma} = 3,0$ коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{ocm}$ составил $\bar{\psi}_{\sigma} = 0,369$.

В работах [4, 12-14] установлено, что критическая глубина t_{kp} нераспространяющейся трещины усталости не зависит от вида поверхностного упрочнения, материала, типа и размеров концентратора, величины сжимающих остаточных напряжений, типа деформации, асимметрии цикла напряжений и определяется только размерами опасного поперечного сечения детали. Для полых ци-

линдрических образцов и деталей зависимость для t_{kp} имеет следующий вид [4, 13]:

$$t_{kp} = 0,0216D_1 \left[1 - 0,04 \left(\frac{d}{D_1} \right)^2 - 0,54 \left(\frac{d}{D_1} \right)^3 \right], \quad (4)$$

где D_1 – диаметр опасного сечения образца или детали, d – диаметр отверстия образца или детали (рис. 1). Расчётное значение t_{kp} , вычисленное по формуле (4) при $D_1 = 24,4$ мм и $d = 19$ мм, составляет 0,380 мм.

Критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ocm} = -117$ МПа вычислялся по формуле (2) по толщине поверхностного слоя опасного сечения образцов с надрезом, равной критической глубине t_{kp} нераспространяющейся трещины усталости. При расчёте критерия $\bar{\sigma}_{ocm}$ использовалось распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образцах с надрезом $R = 0,3$ мм, приведённое на рис. 4.

После вычисления критерия $\bar{\sigma}_{ocm}$ и коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$, по формуле (1) определялось расчётное значение приращения предела выносливости $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ упрочнённых гидродробеструйной обработкой образцов с надрезом радиуса $R = 0,3$ мм, которое составило $(\Delta\sigma_{-1})_{расч} = 43,2$ МПа. Эта величина сравнивалась с экспериментальным значением $(\Delta\sigma_{-1})_{расч} = 40$ МПа, приведённым в работе [4]. Следовательно, расхождение между расчётным и экспериментальными значениями приращения предела выносливости за счёт ГДО не превышает 8%. Поэтому, используя результаты определения остаточных напряжений в образцах-свидетелях, представляется возможным прогнозировать предел выносливости поверхностно упрочнённых цилиндрических деталей из стали 40Х в условиях концентрации напряжений с достаточной для многоциклового усталости точностью.

Выводы

1. Используемый в работе метод расчёта остаточных напряжений в полых цилиндрических образцах диаметром 25/19 мм/мм из стали 40X после гидродробеструйной обработки по первоначальным деформациям образца-свидетеля показал, что расхождение между расчётными и экспериментальными значениями остаточных напряжений в гладких образцах не превышает 8%, в образцах с надрезом – 6%.

2. При оценке влияния поверхностного упрочнения гидродробеструйной обработкой на сопротивление усталости при изгибе в случае симметричного цикла полых цилиндрических образцов из стали 40X с надрезом установлено, что использование рассчитанного по первоначальным деформациям образца-свидетеля распределения остаточных напряжений позволяет прогнозировать приращение предела выносливости образцов в условиях концентрации напряжений с точностью до 8%.

3. Для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённой полый детали с концентратором напряжений вначале необходимо определить первоначальные деформации образца-свидетеля, обработанного одновременно с упрочняемой деталью. По первоначальным деформациям образца-свидетеля производится расчёт остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали. Критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости вычисляется по формуле (4), критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ – по формуле (2), коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ влияния упрочнения на предел выносливости – по зависимости (3). После определения значений критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ и коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ по формуле (1) рассчитывается приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ поверхностно упрочнённой детали с концентратором напряжений.

Библиографический список

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
2. Павлов В.Ф., Столяров А.К., Вакулюк В.С., Кирпичёв В.А. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям. Самара: СНЦ РАН, 2008. 124 с.
3. Стружанов В.В. Об остаточных напряжениях после прокатки и расслоении двухслойных полос // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2010. № 5(21). С. 55-63.
4. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. Самара: СНЦ РАН, 2012. 125 с.
5. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. Вып. 53. Куйбышев: КуАИ, 1971. С. 32-42.
6. Сазанов В.П., Чирков А.В., Самойлов В.А., Ларионова Ю.С. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестник СГАУ. 2011. № 3(27), ч. 3. С. 171-174.
7. Иванов С.И., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность // Проблемы прочности. 1976. № 5. С. 25-27.
8. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: межвузовский сборник. Вып. 3. Куйбышев: КуАИ, 1974. С. 88-95.
9. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напря-

жений // Известия вузов. Машиностроение. 1986. № 8. С. 29-32.

10. Кирпичёв В.А., Филатов А.П., Каранаева О.В., Чирков А.В., Семёнова О.Ю. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАНУ, 2011. С. 678-685.

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

12. 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.

13. Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали // Известия вузов. Машиностроение. 1988. № 12. С. 37-40.

14. Иванов С.И., Павлов В.Ф., Коновалов Г.В., Минин Б.В. Технологические остаточные напряжения и сопротивление усталости авиационных резьбовых деталей. М.: Отраслевая библиотека «Технический прогресс и повышение квалификации» МАП, 1992. 192 с.

Информация об авторах

Сазанов Вячеслав 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. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Вакулок Владимир Степанович, кандидат технических наук, доцент кафедры 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.

Шадрин Валентин Карпович, кандидат технических наук, доцент кафедры 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.

Сургутанов Николай Андреевич, аспирант кафедры 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.

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

ASSESSING THE INFLUENCE OF SURFACE HARDENING ON THE ENDURANCE LIMIT OF SPECIMENS MADE OF STEEL 40X USING RESIDUAL STRESSES OF REFERENCE SPECIMEN

©2014 V.P. Sazanov, V.S. Vakuljuk, V.K. Shadrin, N.A. Surgutanov, P.A. Shlyapnikov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The possibility of the employment of reference specimens hardened simultaneously with the parts has been examined for the hydroblasting influence estimation on the parts with concentrators endurance limit on the example of hollow cylindrical parts made of steel 40 with circular cuts of semicircular profile with the radius 0,3 mm. The investigation has shown that the difference between residual stresses values found by calculating and experimental methods doesn't exceed 8% in smooth specimens, in specimens with cuts – 6%. Under the hydroblasting influence on the endurance limit estimation in conditions of bending in the case of symmetric cycle for hollow cylindrical specimens made of steel 40X with cut of radius 0,3 mm it's been established that the employment of residual stresses distribution calculated by the initial deformations of reference specimen let predict the specimens endurance limit increase under stress concentration conditions to an approximation of 8%. It has been shown that it's reasonable to use the average integral residual stresses criterion calculated through the dangerous section surface layer thickness equal the non-propagating fatigue crack critical depth for the prediction of the endurance limit increase of hardened by hydroblasting specimens made of steel 40 with stress concentrators.

Surface hardening, reference specimen, residual stresses, endurance limit.

References

1. Birger I.A. Ostatochnye napryazheniya [Residual stresses]. Moscow: Mashgiz Publ., 1963. 232 p.
2. Pavlov V.F., Stolyarov A.K., Vakulyuk V.S., Kirpichev V.A. Raschet ostatochnykh napryazhenii v detalyakh s kontsentratorami napryazhenii po pervonachal'nym deformatsiyam [Residual stresses calculation in parts with stress concentrators on initial deformations]. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2008. 124 p.
3. Strugeanov V.V. About residual stresses after rolling and exfoliation of two-ply stripe // Vestnik SamGTU. Seriya: Fiziko-Matematicheskie nauki. 2010. No. 5(21). P. 55-63. (In Russ.)
4. Pavlov V.F., Kirpichyov V.A., Vakulyuk V.S. Prognozirovaniye 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.
5. Ivanov S.I. K opredeleniyu ostatochnykh napryazhenii v tsilindre metodom kolets i polosok // Ostatochnye napryazheniya. Issue 53. Kuibyshev: Kuibyshev Aviation Institute Publ., 1971. P. 32-42. (In Russ.)
6. Sazanov V.P., Chirkov A.V., Samoylov V.A., Larionova Yu.S. Modeling of redistribution of residual stresses in the cylindrical specimens after advancing surface plastic forming // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2011. No. 3(27), part 3. P. 171-174. (In Russ.)
7. 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.
8. Ivanov S.I., Shatunov M.P., Pavlov V.F. Vliyanie ostatochnykh napryazhenii na vynoslivost' obratsov s nadrezom // Voprosy prochnosti elementov aviatsionnykh konstruktsiy: Mezhvuzovskiy sbornik. Issue 3. Kuibyshev: Kuibyshev Aviation Institute Publ., 1974. P. 88-95. (In Russ.)
9. Pavlov V.F. About connection between residual stresses and endurance limit under bending under stresses concentration conditions // Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. 1986. No. 8. P. 29-32. (In Russ.)

10. Kirpichyov V.A., Filatov A.P., Karanaeva O.V., Chirkov A.V., Semyonova O.Yu. Surface hardened parts endurance limit prediction under stresses concentration various degree // International Scientific Technical Conference Transactions “Materials and constructions elements strength”. Kiev: the G.S. Pisarenko Strength Problems Institute of the Ukraine Academy of Sciences Publ., 2011. P. 678-685. (In Russ.)

11. Peterson R.E. Koeffitsienty kontsentratsii napryazhenii [Stresses concentration coefficients]. Moscow: Mir Publ., 1977. 304 p.

12. Pavlov V.F. Residual stresses in the part with a concentrator surface layer value and distribution influence on the endurance limit. Report 1. Solid parts // Proceedings of

Higher Educational Institutions. Machine Building. 1988. No. 8. P. 22-26. (In Russ.)

13. Pavlov V.F. Residual stresses in the part with a concentrator surface layer value and distribution influence on the endurance limit. Report 2. Hollow parts // Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. 1988. No. 12. P. 37-40. (In Russ.)

14. Ivanov S.I., Pavlov V.F., Konovalov G.V., Minin V.B. Tekhnologicheskie ostatochnye napryazheniya i soprotivlenie ustalosti aviatsionnykh rez'bovykh detalei [Technological residual stresses and fatigue resistance of aviation threaded parts]. Moscow: Otraselevaya biblioteka «Tekhnicheskiiy progress i povyshenie kvalifikatsii» MAP Publ., 1992. 192 p.

About the authors

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

Shadrin Valentin Karpovich, Candidate of Science (Engineering), Associate Pro-

fessor of Strength of Materials Department, Samara State Aerospace University. E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of Research: residual stresses mechanics.

Surgutanov Nicolay Andreevich, postgraduate student of Strength of Materials Department, Samara State Aerospace University. E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of Research: residual stresses mechanics.

Shlyapnikov Pavel Anatolievich, student of Samara State Aerospace University. E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of Research: residual stresses mechanics.