

УДК 621.787:539.319

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБКАТКИ ПОВЕРХНОСТИ РОЛИКОМ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ РЕЗЬБОВЫХ ОБРАЗЦОВ

© 2015 В. П. Сазанов

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

В исследовании изучено влияние опережающего поверхностного пластического деформирования на предел выносливости образцов с резьбой М16х2 из сталей 40Х и 30ХГСА. Исследование выполнено расчётно-экспериментальным методом с использованием результатов определения остаточных напряжений механическим способом на образцах, вырезанных из гладких заготовок, моделированием на конечно-элементных моделях резьбовых образцов. Для расчёта остаточного напряжённо-деформированного состояния в среде PATRAN/NASTRAN использован метод термоупругости, в котором распределение первоначальных деформаций в упрочнённом слое заменено соответствующим температурным полем. По результатам расчёта построены графики распределений осевых остаточных напряжений по сечениям впадин резьбы. Прогнозирование приращения предела выносливости резьбовых деталей за счёт упрочнения выполнено по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений. Проведено сравнение результатов расчёта с опытными данными испытаний образцов на усталость. При этом образцы из стали 30ХГСА без гайки испытывались при симметричном цикле по схеме чистого изгиба, из стали 40Х с гайкой – при отнулевом положительном цикле в случае растяжения. В образцах, выстоявших базу испытаний и подвергнутых разрушению, были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости.

Опережающее поверхностное пластическое деформирование, концентратор напряжений, остаточные напряжения, обкатка роликом, первоначальные деформации, предел выносливости.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-143-150

Опережающее поверхностное пластическое деформирование (ОППД) является одним из эффективных способов повышения сопротивления усталости деталей с концентраторами напряжений. При этом технологическая операция изготовления концентратора требуемой геометрической формы производится на предварительно упрочнённой заготовке. В этом случае сжимающие остаточные напряжения в области концентратора образуются за счёт перераспределения остаточных усилий гладкой упрочнённой поверхности детали. Опережающее поверхностное пластическое деформирование наиболее эффективно, когда непосредственное упрочнение концентратора затруднено.

Влияние ОППД при обкатке роликом было изучено на партиях образцов с метрической резьбой М16х2, изготовленных из сталей 40Х и 30ХГСА [1, 2]. При этом половина заготовок диаметром 16

мм из каждой стали подвергалась обкатыванию на трёхроликовом приспособлении роликами диаметром 50 мм с профильным радиусом 13 мм при частоте вращения заготовки 400 об/мин и подаче 0,43 мм/об. Усилие обкатки составляло 10,75 кН. Затем на упрочнённых и неупрочнённых заготовках нарезалась резьба М16х2.

Испытание упрочнённых и неупрочнённых образцов на усталость было выполнено следующим образом. Образцы из стали 30ХГСА без гайки испытывались при симметричном цикле по схеме чистого изгиба, из стали 40Х с гайкой – при отнулевом положительном цикле в случае растяжения. База испытаний принималась равной $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения.

Исследование влияния ОППД на сопротивление усталости резьбовых деталей выполнено расчётно-экспериментальным методом, который основывается на использовании результатов лабораторного

определения остаточных напряжений в упрочнённом поверхностном слое и расчётах напряжённо-деформированного состояния методом конечно-элементного моделирования.

Остаточные напряжения в поверхностном слое гладких упрочнённых заготовок определялись методом колец и полосок [3]. Для этого образцы диаметром 16 мм предварительно растачивались до толщины стенки 2 мм. Дополнительные остаточные напряжения измерялись по методике работы [4] с помощью тензорезисторов. Остаточные напряжения сплошных образцов определялись как разность напряжений, вычисленных по

результатам исследований колец и полосок, и дополнительных остаточных напряжений за счёт расточки. Распределение осевых остаточных напряжений σ_z гладких образцов из сталей 40Х и 30ХГСА приведено на рис. 1, на котором отсчёт координаты y выполнялся от поверхности к оси цилиндра. Из данных рис. 1 следует, что при одном и том же усилии обкатки роликом (10,75 кН) сжимающие остаточные напряжения в заготовках из стали 40Х ниже, чем в заготовках из стали 30ХГСА, что объясняется меньшими значениями предела текучести и предела прочности (табл. 1).

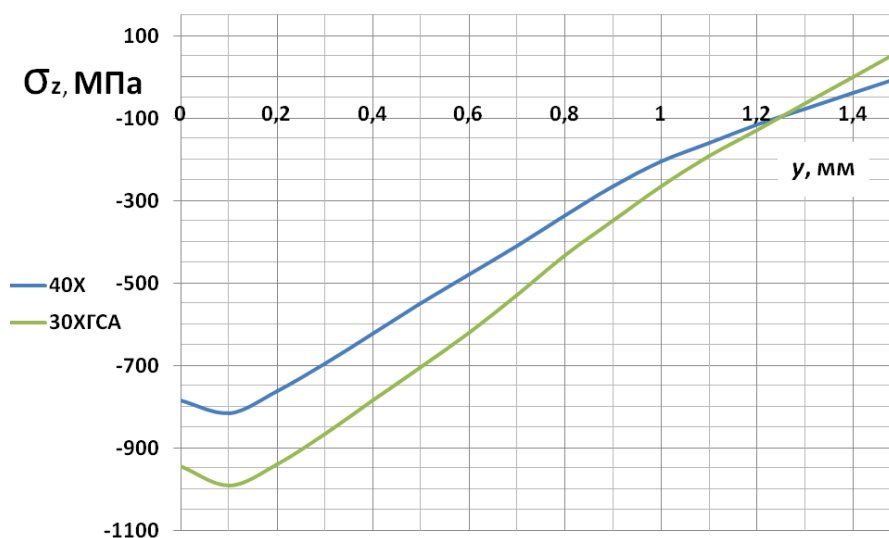


Рис. 1. Осевые остаточные напряжения по толщине упрочнённого слоя в гладких заготовках после обкатки роликом

Таблица 1. Механические характеристики материалов образцов

Марка материала	σ_s , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
30ХГСА	1040	940	11	46
40Х	750	440	18	61

Для моделирования остаточного напряжённо-деформированного состояния был использован расчётный комплекс PATRAN/NASTRAN. Моделирование выполнялось методом термоупругости, при котором распределение остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя заменяется соответствующим темпе-

ратурным полем [5, 6]. Конечно-элементная модель гладкой заготовки в осесимметричной постановке представляла собой четверть сечения цилиндра с наложением соответствующих граничных условий. Принятая длина расчётной области заготовки исключала влияние краевых зон для сечения, в котором величина осе-

вых остаточных напряжений сравнивались с их экспериментальными значениями. При моделировании был использован треугольный шестиузловой осесимметричный конечный элемент типа 2D-Solid. На конечно-элементных моделях гладких заготовок из сталей 40X и 30XГСА были определены распределения первоначальных деформаций по толщине упрочнённого слоя, которые обеспечивают соответствующие им экспериментальные зависимости остаточных напряжений (рис. 1). Это определение было выполнено методом последовательных приближений за пять пошаговых расчётов.

Конечно-элементные модели с гладкими и резьбовыми частями образцов также были выполнены в осесимметрич-

ной постановке, учитывая, что наклон витков резьбы весьма мал (рис. 2). Первоначальные деформации в виде соответствующих им температурных полей по толщине упрочнённого поверхностного слоя принимались из результатов их определения на моделях гладких заготовок.

Результаты расчёта распределений осевых σ_z остаточных напряжений по толщине наименьшего (опасного) поперечного сечения пяти впадин резьбы в виде графиков для образцов из сталей 40X и 30XГСА приведены на рис. 3, 4. Нумерация впадин выполнена от гладкой части образцов в сторону резьбовой.



Рис. 2. Конечно-элементная модель образца с резьбовой частью

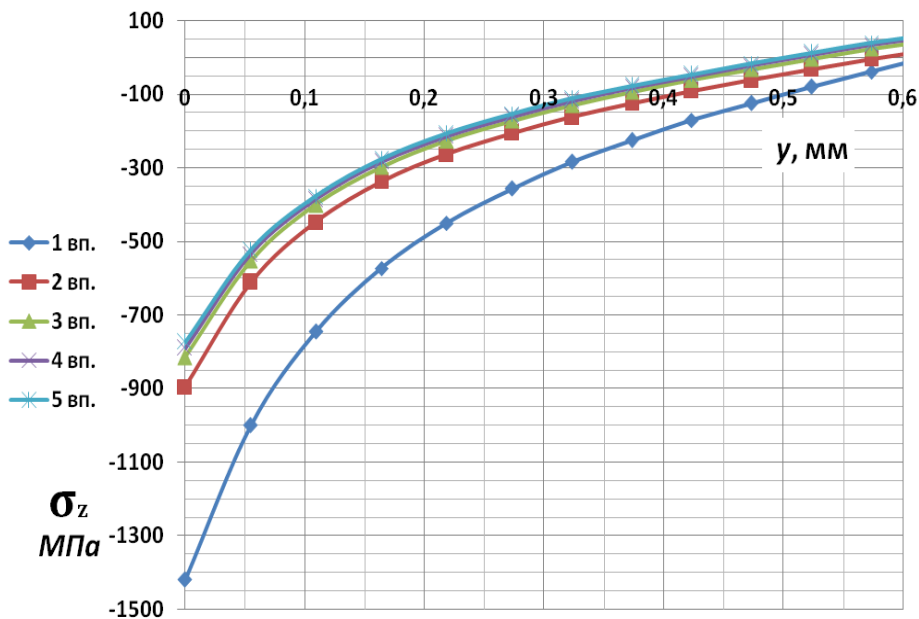


Рис. 3. Осевые остаточные напряжения в наименьших сечениях впадин резьбы для образцов из стали 40X

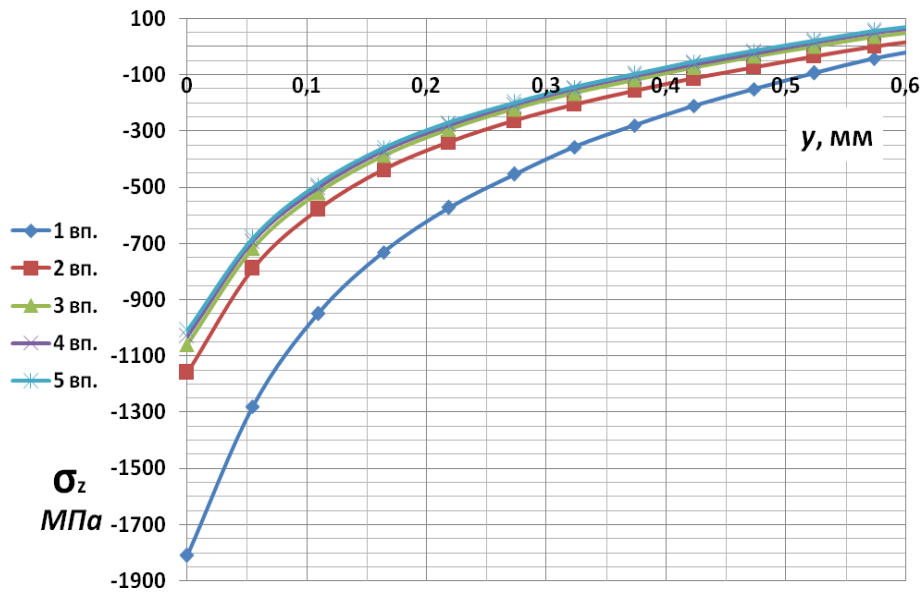


Рис. 4. Осевые остаточные напряжения в наименьших сечениях впадин резьбы для образцов из стали 30ХГСА

Из данных рис. 3, 4 следует, что наибольшие сжимающие остаточные напряжения формируются во впадине первого витка резьбы. В последующих впадинах их уровень значительно ниже, причём, начиная с третьей впадины, распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения практически остаётся неизменным.

Оценка влияния обкатки роликом на приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{Ra}$ резьбовых образцов с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [7, 8] проводилась по следующей зависимости:

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

где $\bar{\psi}_{\sigma}$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$.

Значения критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ вычислялись по толщине поверхностного слоя наименьшего (опасного) сечения впадины, равной критической глубине $t_{кр}$

нераспространяющейся трещины усталости [8, 9]. Критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости определялась по зависимости, установленной на основании многочисленных экспериментов в работах [8, 9]:

$$t_{кр} = 0,0216D, \quad (2)$$

где D – диаметр опасного сечения детали с концентратором напряжений.

При расчёте критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ использовались распределения осевых σ_z остаточных напряжений в наименьших сечениях впадин резьбы, приведённые на рис. 3, 4 и соответствующие зоне излома образцов.

Упрочнённые резьбовые образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при больших напряжениях. На изломах этих образцов были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости. На рис. 5 приведена фотография излома образца из стали 40Х, который перед нарезанием резьбы прошёл обкатку роликом.

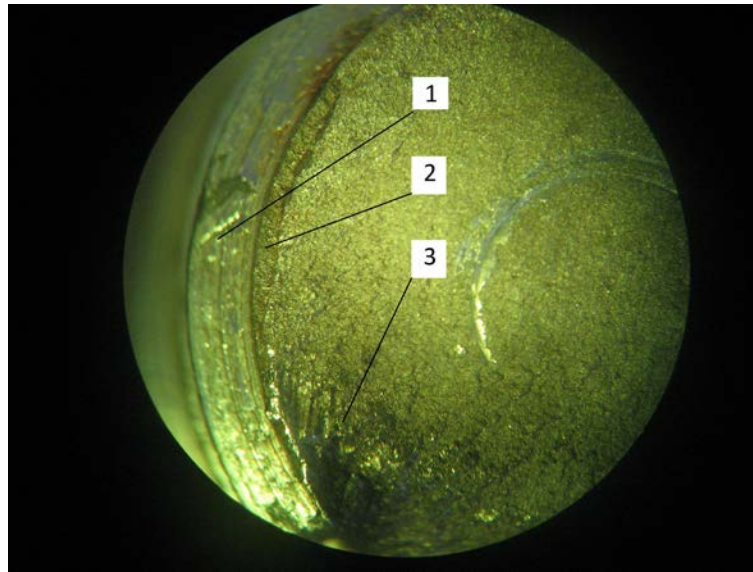


Рис. 5. Фотография излома образца из стали 40X (после ОППД):
1 – виток резьбы, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

На фотографии чётко просматривается нераспространяющаяся трещина усталости 2. Средняя глубина нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ составила 0,30 мм, что незначительно отличается от значения, полученного по зависимости (2) ($t_{кр} = 0,293$ мм).

В табл. 2 представлены значения средних напряжений σ_m при испытаниях на усталость образцов, предельные амплитуды $\Delta\sigma_{Ra}$ циклов, значения среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, опытные $\Delta\sigma_{Ra}^{он}$ и расчётные $\Delta\sigma_{Ra}^{рас}$ значения приращений амплитуд.

При вычислении приращений $\Delta\sigma_{Ra}^{рас}$ для образцов без гайки из стали 30ХГСА коэффициент влияния $\bar{\psi}_\sigma$ принимался равным 0,36, а для образцов с гайкой из

стали 40X – 0,11 [2, 10]. Приращение предела выносливости образцов из стали 30ХГСА составило 44%. Предельная амплитуда цикла напряжений образцов из стали 40X за счёт упрочнения, предшествующего нарезанию резьбы, увеличилась на 41%.

Таким образом, опережающее поверхностное пластическое деформирование является эффективным способом повышения сопротивления усталости резьбовых деталей, причём во впадинах резьбы при таком упрочнении практически отсутствует наклёп. Следует отметить, что упрочнение без наклёпа дна впадин резьбы имеет преимущество для деталей, работающих при повышенных температурах, так как наклёп в опасном сечении детали в этом случае снижает сопротивление усталости [11].

Таблица 2. Результаты испытаний на усталость резьбовых образцов М16х2

Материал	Усилие обкатки, кН	σ_m , МПа	σ_{Ra} , МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$	$\Delta\sigma_{Ra}^{он}$, МПа	$\Delta\sigma_{Ra}^{рас}$, МПа
30ХГСА	0	0	284	0	-	0	0
	10,75	0	409	-372	0,36	125	134
40X	0	93	93	0	-	0	0
	10,75	131	131	-363	0,11	38	40

Выводы

1. Близкие значения приращений предельной амплитуды цикла напряжений подтверждают возможность замены растяжения на изгиб при проведении испытаний на усталость [12].

2. Расчётные значения приращений предельных амплитуд достаточно близки

к их опытным значениям, что указывает на возможность расчёта предела выносливости резьбовых деталей, изготовленных с использованием опережающего поверхностного пластического деформирования, без проведения испытаний на усталость.

Библиографический список

1. Павлов В.Ф., Филатов А.П., Мальков Г.Ф. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости резьбовых деталей из сталей 30ХГСА и 40Х // Известия вузов. Машиностроение. 1990. № 3. С. 15-20.

2. Иванов С.И., Павлов В.Ф., Минин Б.В., Кирпичёв В.А., Кочеров Е.П., Головкин В.В. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высокопрочных резьбовых деталей. Самара: Самарский научный центр РАН, 2015. 171 с.

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

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

5. 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.

6. Павлов В.Ф., Столяров А.К., Вакулук В.С., Кирпичёв В.А. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям. Самара: Самарский научный центр РАН, 2008. 124 с.

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

8. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулук В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно-упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. 125 с.

9. 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.

10. 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.

11. Кравченко Б.А., Митряев К.Ф. Обработка и выносливость высокопрочных материалов. Куйбышев: Куйбышевское книжное изд-во, 1968. 131 с.

12. Кудрявцев И.В., Чижик В.Н. Повышение сопротивления усталости резьбовых деталей // Вестник машиностроения. 1963. № 1. С. 51-55.

Информация об авторе

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: исследование в области механики остаточных напряжений.

INVESTIGATION OF PRELIMINARY SURFACE ROLLING INFLUENCE ON THE FATIGUE RESISTANCE OF THREADED SPECIMENS

© 2015 V. P. Sazanov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The influence of preliminary surface plastic deformation on the endurance limit of parts made of steels 40X and 30XГСА with the thread M16x2 has been examined. The investigation has been carried out by the computational-experimental method using the results of determining residual stresses mechanically on the specimens cut out of smooth workpieces and by modeling threaded specimens using finite-elements models. The method of thermal elasticity has been used for the calculation of the strain-stress state in the PATRAN/NASTRAN environment, whereby the distribution of initial deformations in the hardened layer is replaced by the appropriate temperature field. The graphs of distribution of axial residual stresses across the thread roots are plotted on the basis of the calculation. The increment of the endurance limit for threaded parts has been predicted by the average integral residual stress criterion. The calculation results are compared with the experimental data of testing the specimens. The specimens made of 30XГСА steel without a nut were tested under the symmetrical cycle according to the pure bending pattern, the specimens made of 40X steel with a nut were tested under the zero-to-tension positive cycle in the case of stretching. Non-propagating fatigue cracks have been found in the specimens that withstood the tests and were destroyed.

Preliminary surface plastic deformation, stress concentrator, residual stresses, roller hardening, initial deformations, endurance limit.

References

1. Pavlov V.F., Filatov A.P., Malkov G.F. Residual stresses influence on threaded parts made of steels 30XГСА and 40X fatigue resistance. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 1990. No. 3. P. 15-20. (In Russ.)
2. Ivanov S.I., Pavlov V.F., Minin B.V., Kirpichev V.A., Kocherov E.P., Golovkin V.V. *Ostatochnye napryazheniya i soprotivlenie ustalosti vysokoprochnykh rez'bovykh detaley* [Residual stresses and fatigue resistance of high-strength threaded parts]. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2015. 171 p.
3. Ivanov S.I. On residual stresses determining in a cylinder by rings-and-stripes method. *Residual stresses*. Issue 48. Kuibyshev: Kuibyshev Aviation Institute Publ., 1971. P. 179-183. (In Russ.)
4. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow: Mashgiz Publ., 1963. 232 p.
5. 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.)
6. Pavlov V.F., Stolyarov A.K., Vakulyuk V.S., Kirpichyov V.A. *Raschet ostatochnykh napryazheniy v detalyakh s kontsentratorami napryazheniy po pervonachal'nykh deformatsiyam* [Calculation of residual stresses in parts with stress concentrators by initial deformations]. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2008. 124 p.

7. Pavlov V.F. On connection between residual stresses and endurance limit under bending in stresses concentration conditions. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 1986. No. 8. P. 29-32. (In Russ.)

8. Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Vakulyuk V.S. *Prognozirovanie soprotivleniya ustalosti poverkhnostno-uprochnennykh detaley po ostatochnym napryazheniyam* [Prediction of fatigue resistance of surface-hardened parts by residual stresses]. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2012. 125 p.

9. Pavlov V.F. The influence of the residual stresses value and distribution in the surface layer of the part with a concentrator on the endurance limit. Report 1. Solid parts. *Proceedings of Higher Educational Institu-*

tions. Machine Building. 1988. No. 8. P. 22-26. (In Russ.)

10. Kirpichev 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.)

11. Kpavchenko B.A., Mitryaev K.F. *Obrabotka i vynoslivost' vysokoprochnykh materialov* [Machining and endurance of high-strength materials]. Kuibyshev: Kuybyshevskoe knizhnoe izdatel'stvo Publ., 1968. 131 p.

12. Kudryavtzev I.V., Chijik V.N. The increase of threaded parts fatigue resistance. *Vestnik mashinostroeniya*. 1963. No. 1. P. 51-55. (In Russ.)

About the author

Sazanov Vyacheslav Petrovich, Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Department of Strength of Materials, Samara State Aerospace Universi-

ty, Samara, Russian Federation. E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of Research: residual stresses mechanics.