

СВЯЗЬ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОЦИКЛОВОЙ И МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЕЙ С ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

© 2018

А. С. Злобин аспирант кафедры сопротивления материалов;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
as.zlobin@mail.ru

Рассмотрены зависимости характеристик малоциклового и многоциклового усталости от критерия среднеинтегральных остаточных напряжений. Обозначена существенная роль данных характеристик в обеспечении надёжности авиационной техники. Исследование проводилось для болтов М6 из титанового сплава ВТ6 при различных способах наведения остаточных напряжений. Во всех случаях зависимости носят квадратичный характер. Дальнейший анализ показал, что при изменении остаточных напряжений между приращениями циклической долговечности и предельной амплитудой цикла существует линейная зависимость. Данный вывод справедлив для всех рассмотренных способов наведения остаточных напряжений. Указанные приращения являются линейными функциями от критерия среднеинтегральных остаточных напряжений. Приведена методика определения приращения предельной амплитуды цикла с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений. Особое внимание уделено способу нахождения коэффициента влияния остаточных напряжений на предельную амплитуду цикла при постоянном среднем напряжении. Обоснован подход к определению приращения циклической долговечности по известному значению приращения предельной амплитуды цикла, определяемому с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений.

Остаточные напряжения; малоцикловая усталость; многоцикловая усталость; циклическая долговечность; предельная амплитуда цикла; резьбовая деталь; упрочнение.

Цитирование: Злобин А.С. Связь характеристик малоциклового и многоциклового усталости резьбовых деталей с остаточными напряжениями // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 1. С. 128-136. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-128-136

Введение

Резьбовые соединения являются типичными элементами авиационных конструкций. В практике эксплуатации авиационной техники встречаются разрушения резьбовых соединений, приводящие к выходу из строя узлов.

Анализ отказов соединений ряда отечественных двигателей показывает, что наиболее часто разрушения происходят в резьбовых соединениях опор, коробок отбора мощности, редукторов, а также в агрегатах и элементах крепления коммуникаций масляных и топливных систем. В таких узлах соединения подвержены воздействию значительных постоянных и переменных усилий, а разрушения имеют главным образом усталостный характер [1].

Поэтому важной является задача обеспечения и повышения надёжности резьбовых деталей, особенно их долговечности (как одного из основных свойств надёжности).

При воздействии переменных нагрузок долговечность, как правило, определяется характеристиками сопротивления усталости: циклической долговечностью N (в области малоциклового усталости) и предельной амплитудой цикла σ_{Ra} (в области многоциклового усталости). Поэтому при разработке авиационных конструкций должны проводиться достоверные оценки данных характеристик, учитывающие весь комплекс условий работы, а также технологическую наследственность (особенности изготовления) деталей.

На практике для повышения характеристик сопротивления усталости (соответственно и надёжности) широко применяется метод поверхностного упрочнения деталей. Наибольший эффект от его использования достигается в условиях концентрации напряжений (характерной для резьбовых соединений) с учётом того, что разрушение происходит, как правило, в местах нарушения призматической формы. Таким образом, возникает необходимость установить связь между остаточными напряжениями и сопротивлением усталости для указанной группы деталей.

Задача исследования

В настоящее время поставленная задача с большой степенью успеха решена в области многоциклового усталости [2-7]. Разработана методика прогнозирования сопротивления усталости деталей с остаточными напряжениями, позволяющая определить предельную амплитуду цикла σ_{Ra} с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ocm}$. С точки зрения физического смысла данный критерий представляет собой остаточные напряжения на дне трещины с точностью до постоянного коэффициента, зависящего от радиуса у дна трещины и её глубины.

В этом случае предельная амплитуда цикла для детали с остаточными напряжениями определяется по формуле

$$\sigma_{Ra} = \sigma_{Ra}^0 - \bar{\psi}_{\sigma}^{(m)} \bar{\sigma}_{ocm}, \quad (1)$$

где σ_{Ra} – предельная амплитуда цикла для детали с остаточными напряжениями; σ_{Ra}^0 – предельная амплитуда цикла для детали без остаточных напряжений; $\bar{\psi}_{\sigma}^{(m)}$ – коэффициент влияния остаточных напряжений на предельную амплитуду цикла при среднем напряжении σ_m .

Из (1) следует выражение для определения приращения $\Delta\sigma_{Ra}$ предельной амплитуды цикла:

$$\Delta\sigma_{Ra} = \bar{\psi}_{\sigma}^{(m)} \left| \bar{\sigma}_{ocm} \right|. \quad (2)$$

В свою очередь, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ocm}$ определяется по формуле [2]

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

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении детали с концентратором; $\xi = \frac{y}{t_{кр}}$ – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся усталостной трещины, возникающей при работе деталей на пределе выносливости [6].

Использование зависимости (2) для определения приращения предела выносливости деталей с остаточными напряжениями показало хорошее совпадение с экспериментальными данными. Поэтому возникла задача поиска возможности распространения данного подхода на область малоциклового усталости.

Результаты исследования

В работе [8] показано, что при постоянном среднем напряжении цикла σ_m для резьбовых деталей существует квадратичная зависимость (рис. 1) между циклической долговечностью N и критерием среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, уровень которых, в свою очередь, определялся способом формирования резьбы.

Дальнейший анализ результатов испытаний [9] на многоцикловую усталость болтов М6 из сплава ВТ16 показал, что зависимость между предельной амплитудой цикла σ_{Ra} и критерием среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ также носит квадратичный характер при постоянном среднем напряжении цикла σ_m (рис. 2).

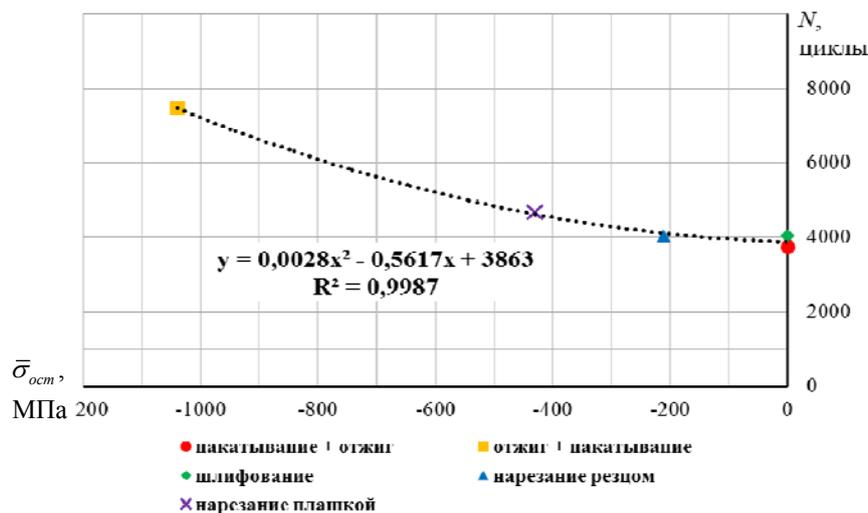


Рис. 1. Зависимость циклической долговечности $N(y)$ болтов М6 из сплава ВТ16 от критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}(x)$ при различных способах формирования резьбы и среднем напряжении цикла $\sigma_m = 350$ МПа

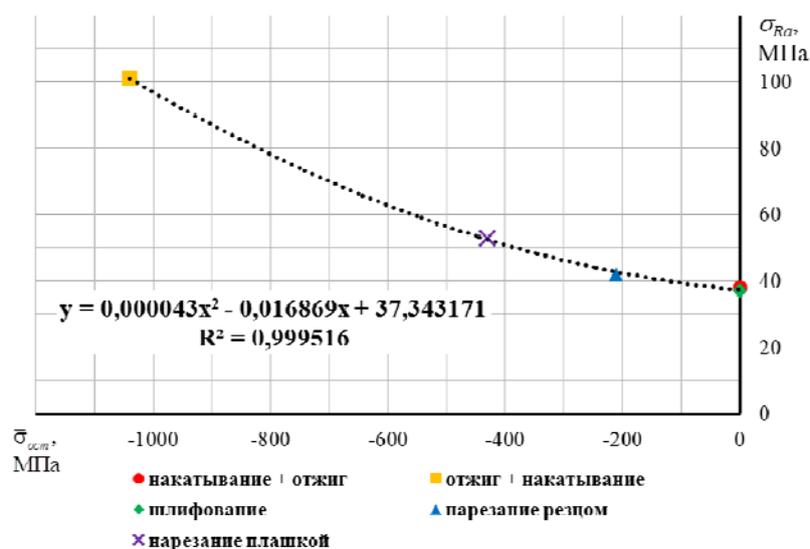


Рис. 2. Зависимость предельной амплитуды цикла $\sigma_{Ra}(y)$ болтов М6 из сплава ВТ16 от критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}(x)$ при различных способах формирования резьбы и среднем напряжении цикла $\sigma_m = 350$ МПа

Таким образом, на основании проведённых исследований [8; 9] получаем зависимости для циклической долговечности N и предельной амплитуды σ_{Ra} следующего вида:

$$\begin{aligned} N(\bar{\sigma}_{ocm}) &= a_N \bar{\sigma}_{ocm}^2 + b_N \bar{\sigma}_{ocm} + c_N; \\ \sigma_{Ra}(\bar{\sigma}_{ocm}) &= a_\sigma \bar{\sigma}_{ocm}^2 + b_\sigma \bar{\sigma}_{ocm} + c_\sigma, \end{aligned} \quad (4)$$

где $a_N, b_N, c_N, a_\sigma, b_\sigma, c_\sigma$ – некоторые константы.

Тогда для приращений циклической долговечности ΔN и предельной амплитуды цикла $\Delta \sigma_{Ra}$ получим линейные функции:

$$\begin{aligned} \Delta N &= \frac{dN(\bar{\sigma}_{ocm})}{d\bar{\sigma}_{ocm}} = a_N \bar{\sigma}_{ocm} + b_N; \\ \Delta \sigma_{Ra} &= \frac{d\sigma_{Ra}(\bar{\sigma}_{ocm})}{d\bar{\sigma}_{ocm}} = a_\sigma \bar{\sigma}_{ocm} + b_\sigma. \end{aligned} \quad (5)$$

В то же время на основании результатов испытаний [9] можно построить график зависимости циклической долговечности N от предельной амплитуды цикла σ_{Ra} (рис. 3). Из графика видно, что данная зависимость носит линейный характер.

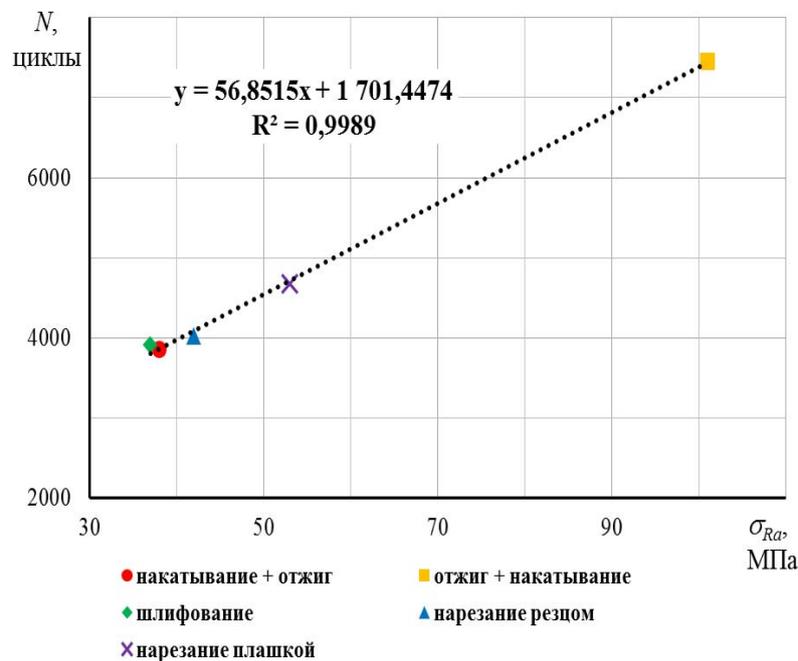


Рис. 3. Зависимость циклической долговечности $N(y)$ болтов М6 из сплава ВТ16 от предельной амплитуды цикла $\sigma_{Ra}(x)$ при различных способах формирования резьбы и среднем напряжении цикла $\sigma_m = 350$ МПа

Аналогичные результаты получены для рассмотренных в работе [8] случаев, когда уровень остаточных напряжений определялся диаметром d заготовки под накатывание резьбы (высотой профиля резьбы) и способом упрочнения поверхностным пластическим деформированием (рис. 4, 5 соответственно).

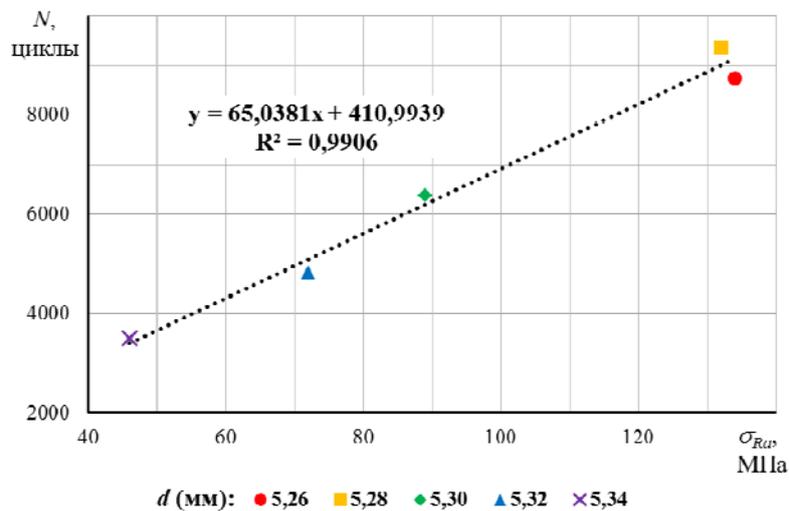


Рис. 4. Зависимость циклической долговечности $N(y)$ болтов М6 из сплава ВТ16 от предельной амплитуды цикла $\sigma_{Ra}(x)$ при различных диаметрах d заготовок под накатывание резьбы и среднем напряжении цикла $\sigma_m = 350$ МПа

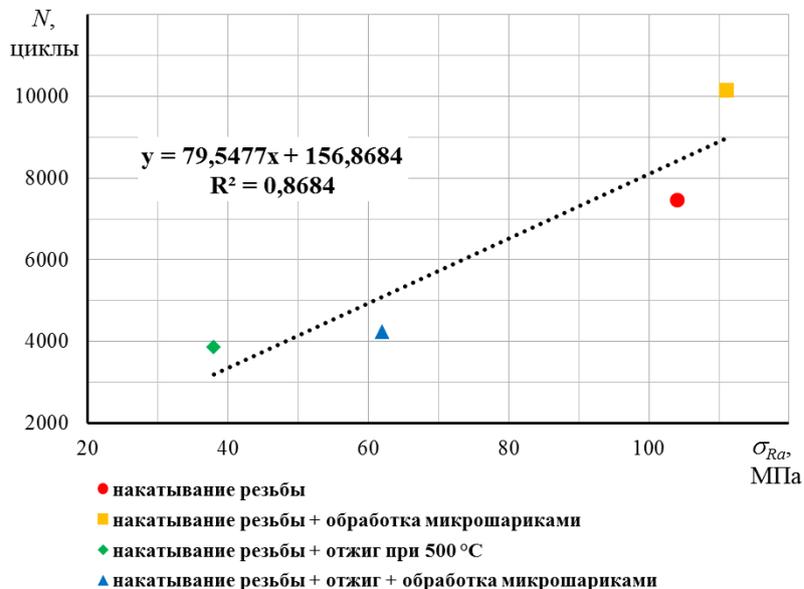


Рис. 5. Зависимость циклической долговечности $N(y)$ болтов М6 из сплава ВТ16 от предельной амплитуды цикла $\sigma_{Ra}(x)$ при различных способах упрочнения поверхностным пластическим деформированием и среднем напряжении цикла $\sigma_m = 350$ МПа

Следовательно, результаты проведённого анализа (рис. 3-5) дают основания полагать, что приращение циклической долговечности ΔN исследуемых деталей может быть определено по формуле

$$\Delta N = \bar{\psi}_N^{(m)} \Delta \sigma_{Ra}, \quad (6)$$

где $\bar{\psi}_N^{(m)}$ – коэффициент влияния остаточных напряжений на циклическую долговечность N при среднем напряжении σ_m .

Принимая во внимание выражения (5), имеем:

$$\bar{\psi}_N^{(m)} = \frac{a_N \bar{\sigma}_{ocm} + b_N}{a_\sigma \bar{\sigma}_{ocm} + b_\sigma}. \quad (7)$$

С учётом формулы (2) получим:

$$\Delta N = \bar{\psi}_N^{(m)} \bar{\psi}_\sigma^{(m)} |\bar{\sigma}_{ocm}|. \quad (8)$$

Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma^{(m)}$ также учитывает асимметрию цикла и может быть определён экспериментально с использованием зависимости (2) или вычислен по формуле работы [9]:

$$\bar{\psi}_\sigma^{(m)} = \bar{\psi}_\sigma - \frac{\sigma_{-1p} (\sigma_m - \sigma_m^T)}{S_k |\bar{\sigma}_{ocm}|}. \quad (9)$$

Здесь $\bar{\psi}_\sigma$ – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости резьбовой детали при симметричном цикле растяжения-сжатия; σ_{-1p} – предел выносливости материала при симметричном цикле в случае растяжения сжатия; σ_m^T – среднее напряжение, при котором начинается локальная текучесть; S_k – сопротивление материала разрыву.

Выражение (9) справедливо для случая $\sigma_m > \sigma_m^T$. При $\sigma_m \leq \sigma_m^T$ следует принять $\bar{\psi}_\sigma^{(m)} = \bar{\psi}_\sigma$.

Величина σ_m^T определяется по зависимости работы [9]:

$$\sigma_m^T = \frac{S_k (\sigma_T) - \sigma_{-1p} \frac{\alpha_\sigma}{K_\sigma}}{\alpha_\sigma (S_k - \sigma_{-1p})}, \quad (10)$$

где σ_T – предел текучести материала; K_σ – эффективный коэффициент концентрации напряжений; α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

В работе [4] показано, что для вычисления величины $\bar{\psi}_\sigma$ можно использовать следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_\sigma &= 0,612 - 0,081\alpha_\sigma; \\ \bar{\psi}_\sigma &= 0,514 - 0,065K_\sigma. \end{aligned} \quad (11)$$

Выводы

Характеристики малоцикловой и многоцикловой усталости, а именно циклическая долговечность N и предельная амплитуда цикла σ_{Ra} , возрастают пропорционально квадрату критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ и связаны между собой линейной зависимостью. Зная величину $\bar{\sigma}_{ост}$, можно определить приращение $\Delta\sigma_{Ra}$ и далее, при известном значении $\bar{\psi}_N^{(m)}$, вычислить приращение циклической долговечности ΔN .

Дальнейшие исследования должны быть направлены на поиск методов определения коэффициента влияния остаточных напряжений на циклическую долговечность $\bar{\psi}_N^{(m)}$. Одним из таких методов может являться определение искомой величины приращения циклической долговечности ΔN с использованием зависимости (8) при экспериментальном определении $\bar{\sigma}_{ост}$ и вычислении $\bar{\psi}_\sigma^{(m)}$ согласно (9).

Библиографический список

1. Мавлютов Р.Р. Концентрация напряжений в элементах авиационных конструкций. М.: Наука, 1981. 141 с.
2. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1986. № 8. С. 29-32.
3. Радченко В.П., Афанасьева О.С. Методика расчёта предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурных выдержках в условиях ползучести // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физ.-мат. науки. 2009. № 2 (19). С. 264-268. DOI: 10.14498/vsgtu733
4. Кирпичёв В.А., Букатый А.С., Филатов А.П., Чирков А.В. Прогнозирование предела выносливости деталей при различной степени концентрации напряжений // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2011. Т. 15, № 4 (44). С. 81-85.
5. Кирпичёв В.А., Саушкин М.Н., Сазанов В.П., Семёнова О.Ю. Остаточные напряжения и сопротивление усталости образцов с V-образными надрезами из стали ВНС40 // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 5 (36), ч. 1. С. 95-99.
6. 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.
7. Вакулук В.С., Кирпичёв В.А., Павлов В.Ф., Сазанов В.П. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов с концентраторами напряжений // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2013. Т. 17, № 1 (54). С. 45-49.
8. Злобин А.С. Влияние остаточных напряжений на малоцикловую усталость резьбовых деталей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2015. Т. 14, № 4. С. 118-125. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-118-125
9. 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.

RELATION BETWEEN CHARACTERISTICS OF LOW-CYCLE AND HIGH-CYCLE FATIGUE OF THREADED PARTS AND RESIDUAL STRESSES

© 2018

A. S. Zlobin Postgraduate Student of the Department of Strength of Materials;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
as.zlobin@mail.ru

The dependence of low-cycle and high-cycle fatigue characteristics of threaded parts on the criterion of average integral residual stresses is examined in the article. These characteristics play an essential role in ensuring reliability of aeronautical equipment. The study was carried out using titanium-alloy M6 bolts with various ways of producing residual stresses. In all the cases the dependences are quadratic. Further analysis showed linear dependence between the increment of cycle life and the limiting cycle amplitude under changes of residual stresses. This conclusion holds for all examined ways of producing residual stresses. The increments mentioned are linear functions of the criterion of average integral residual stresses. A procedure for determining the increment of the limiting cycle amplitude with the use of the criterion of average integral stresses is presented. Special attention is given to the method of finding the coefficient of residual stress influence on the limiting cycle amplitude for the constant mean stress. The approach to determining the increment of cycle life by a known value of the increment of the limiting cycle amplitude calculated with the use of the criterion of average integral residual stresses is validated.

Residual stresses; low-cycle fatigue; high-cycle fatigue; cycle life; limiting cycle amplitude; threaded part; hardening.

Citation: Zlobin A.S. Relation between characteristics of low-cycle and high-cycle fatigue of threaded parts and residual stresses. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 1. P. 128-136.
DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-128-136

References

1. Mavlyutov R.R. *Kontsentratsiya napryazheniy v elementakh aviatsionnykh konstruksiy* [Stress concentration in elements of aircraft structures]. Moscow: Nauka Publ., 1981. 141 p.
2. Pavlov V.F. On connection between residual stresses and the endurance limit under bending in stresses concentration conditions. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 1986. No. 8. P. 29-32. (In Russ.)
3. Radchenko V.P., Afanas'eva O.S. Calculation procedure of a fatigue point for strengthened cylindrical specimen with pressure concentrators at temperature endurance in the creep conditions. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiz.-mat. nauki*. 2009. No. 2 (19). P. 264-268. DOI: 10.14498/vsgtu733. (In Russ.)
4. Kirpichev V.A., Bukatyi 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.)
5. Kirpichev V.A., Saushkin M.N., Sazanov V.P., Semyonova O.Yu. Residual stresses and endurance strength in the specimens with V-shaped notches made of BHC40 steel. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012. No. 5 (36), part 1. P. 95-99. (In Russ.)
6. Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Vakulyuk V.S. *Prognozirovanie soprotivleniya ustalosti poverkhnostno uprochnennykh detaley po ostatochnym napryazheniyam* [Prediction of fatigue strength of surface hardened components by residual stresses]. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsentr RAN Publ., 2012. 125 p.
7. Vakulyuk V.S., Kirpichev V.A., Pavlov V.F., Sazanov V.P. Forecasting the limits of endurance surface hardening of specimens with stress. *Vestnik UGATU*. 2013. V. 17, no. 1 (54). P. 45-49. (In Russ.)

8. Zlobin A.S. Estimation of residual stress influence on the low-cycle fatigue of threaded parts. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2015. V. 14, no. 4. P. 118-125. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-118-125. (In Russ.)

9. 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.