

УДК 621.787:539.319

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА МАЛОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

© 2015 А. С. Злобин

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

В статье рассмотрена возможность использования критерия среднеинтегральных остаточных напряжений для оценки циклической долговечности резьбовых деталей в области малоциклового усталости. Выделены особенности разрушения деталей при нагрузках многоциклового и малоциклового характера. Обозначены проблемы применения уравнений и критериев линейной механики в области малоциклового усталости, связанные, прежде всего, с появлением пластически деформированных областей, размеры которых могут существенно превышать размеры трещин. Рассмотрены технологические факторы, влияющие на возникновение и распределение остаточных напряжений. Отмечено, что определяющее влияние оказывают диаметр заготовки под накатывание резьбы, термообработка, усилие и время накатывания. Отражена связь количества циклов до разрушения от величины остаточных напряжений, выраженных через критерий среднеинтегральных остаточных напряжений, при воздействии различных технологических факторов. По результатам испытаний резьбовых деталей на малоцикловую усталость показано, что зависимость количества циклов до разрушения от величины критерия среднеинтегральных остаточных напряжений хорошо аппроксимируется уравнениями квадратичного вида. При этом соответствующие величины достоверности аппроксимации имеют значения не ниже 0,9163.

*Остаточные напряжения, малоцикловая усталость, циклическая долговечность, резьбовая деталь, упрочнение.*

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-118-125

Одним из важных вопросов механики остаточных напряжений является установление связи между остаточными напряжениями и сопротивлением деталей усталости. Особую значимость эта задача приобрела в связи с широким применением на практике различных методов поверхностного упрочнения, приводящих к существенному увеличению характеристик сопротивления усталости, особенно в условиях концентрации напряжений. Наиболее актуально выявление зависимости сопротивления усталости от остаточных напряжений для деталей с концентраторами, так как разрушение этих деталей происходит, как правило, в местах нарушения призматической формы.

В настоящее время достаточно глубоко разработан подход [1-6] к прогнозированию сопротивления усталости деталей с остаточными напряжениями в области многоциклового усталости, предполагающий определение предела

выносливости по разрушению с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$ . 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 предел выносливости детали с остаточными напряжениями определяется по формуле

$$p_R = p_R^0 - \bar{\psi} \bar{\sigma}_{ост}, \quad (1)$$

где  $p_R$  – предел выносливости детали с остаточными напряжениями;  $p_R^0$  – предел выносливости детали без остаточных напряжений;  $\bar{\psi}$  – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости по разрушению.

Критерий  $\bar{\sigma}_{осм}$  определяется по формуле [1]

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

где  $\sigma_z(\xi)$  – осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении детали с концентратором;  $\xi = \frac{y}{t_{кр}}$  – расстояние от дна

надреза до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{кр}$ ;  $t_{кр}$  – критическая глубина не распространяющейся усталостной трещины, возникающей при работе деталей на пределе выносливости.

Использование зависимостей (1) и (2) для определения предела выносливости деталей с остаточными напряжениями показало хорошее совпадение с экспериментальными данными. Поэтому возникла задача поиска возможности распространения данного подхода на область малоциклового усталости. Вначале рассмотрим особенности возникновения и развития трещин при малоцикловом характере нагружения.

Специфической особенностью повреждения при малоциклового усталости, отличающей её от многоциклового усталости, является накопление односторонней макропластической деформации. Способность к накоплению пластической деформации является одним из факторов, определяющих сопротивление малоциклового усталости материалов и конструкций [7].

Разрушение от малоциклового усталости – это разрушение в условиях повторного упругопластического деформирования с числом циклов (к моменту образования макротрещины или окончательному разрушению) до  $5 \cdot 10^4 - 10^5$ , которое является условной границей малоциклового ( $10^0 - 10^5$ ) и многоциклового ( $10^5 - 10^8$ ) усталости для пластичных материалов и определяет среднее число циклов для зоны перехода от упругопластическо-

го к упругому циклическому деформированию. Для высокопрочных материалов переходная зона смещена в сторону большей долговечности, для хрупких – в сторону меньшей долговечности [8].

При малоцикловом характере нагружения макроскопические деформации образуются не только в зонах вершины трещины, но и за пределами этих зон. В местах конструктивной концентрации напряжений при возникновении термических и остаточных напряжений трещины оказываются в пластически деформированных областях, размеры которых могут существенно превышать размеры трещин. В таких условиях применение уравнений и критериев линейной механики разрушения становится неправомерным. Кроме того, анализ процессов малоциклового разрушения затрудняется ограниченными возможностями применения кинетических уравнений для скоростей роста трещин, достаточно подробно изученных в области многоциклового усталости. Кинетика развития трещин сопряжена как с изменением краевых условий (размеры трещин, номинальная нагруженность, перемещения), так и с проявлением внутренней нестационарности напряжённо-деформированных состояний вследствие изменения параметров уравнений состояния по числу циклов и уровню деформаций. Указанные эффекты становятся более выраженными при переходе в область повышенных температур, когда циклические деформации и повреждения сочетаются с деформациями ползучести и длительными повреждениями [9].

Для количественного описания закономерностей распространения макротрещин статического и малоциклового нагружения используют силовые, деформационные и энергетические критерии [10].

Ввиду описанных особенностей возникают определённые трудности на пути к использованию критерия среднеинтегральных остаточных напряжений для определения характеристик малоциклового усталости. Одна из них выражается в том,

что многоцикловая усталость протекает в упругой зоне, в которой трещина, достигнув критической глубины, не распространяется дальше (при напряжениях, не превышающих предела выносливости). При малоциклового усталости рост трещины происходит с упрочнением материала (накоплением пластических деформаций) вплоть до разрушения детали.

На сегодняшний день исследователями предпринимаются попытки разработать комбинированную модель усталостной долговечности, учитывающую не только составляющие нагружения мало- и многоциклового характера, но и наличие в детали остаточных напряжений. Один из таких случаев рассмотрен в работе [11], посвящённой прогнозированию циклической долговечности лопаток турбины газотурбинного двигателя, получивших повреждения в виде различных забоин после попадания посторонних предметов. В этом случае забоина является концентратором напряжений, к тому же находящимся в поле сжимающих остаточных напряжений. Действующие на лопатку растягивающие напряжения от центробежных сил являются нагрузкой малоциклового характера, в то время как существенно меньшие по величине вибрационные нагрузки носят многоцикловый характер. Авторы развивают подход Китагавы-Такахашы (Kitagawa-Takahashi) к определению области записывания трещины, взяв за основу разработанную диаграмму и дополнив её набором кривых для многоциклового области, который ранжирован по коэффициенту асимметрии цикла нагружения.

Возникновение и распределение остаточных напряжений в поверхностном слое детали зависит от конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. В частности, для резьбовых де-

талей к технологическим факторам можно отнести:

- способ формирования резьбы;
- диаметр заготовки под накатывание резьбы;
- степень пластической деформации в резьбе и заготовке;
- последовательность термообработки;
- упрочнение поверхностным пластическим деформированием;
- применение ионной обработки.

По результатам проведённых испытаний [12] можно установить связь между значением критерия среднеинтегральных остаточных напряжений, выражающим величину остаточных напряжений в поверхностном слое резьбовой детали, и количеством циклов до разрушения.

Так для резьбовых деталей, изготовленных различными способами (накатывание + отжиг, шлифование, нарезание плашкой, отжиг + накатывание, нарезание резцом), наибольшую циклическую долговечность имеют детали с накатанной резьбой (рис. 1). Если такие детали подвергнуть отжигу, то их сопротивление усталости снизится до уровня деталей со шлифованной резьбой. Таким образом, релаксация сжимающих остаточных напряжений приводит к снижению характеристик сопротивления малоциклового усталости.

Полнота профиля резьбы существенно сказывается на уровне и характере распределения остаточных напряжений (рис. 2). Болты с резьбой, накатанной с неполным профилем, имеют высокий уровень циклической долговечности. Увеличение диаметра заготовки с 5,26 до 5,34 мм, обеспечивающего формирование резьбы полного профиля, вызывает снижение сопротивления усталости в связи с уменьшением остаточных напряжений.

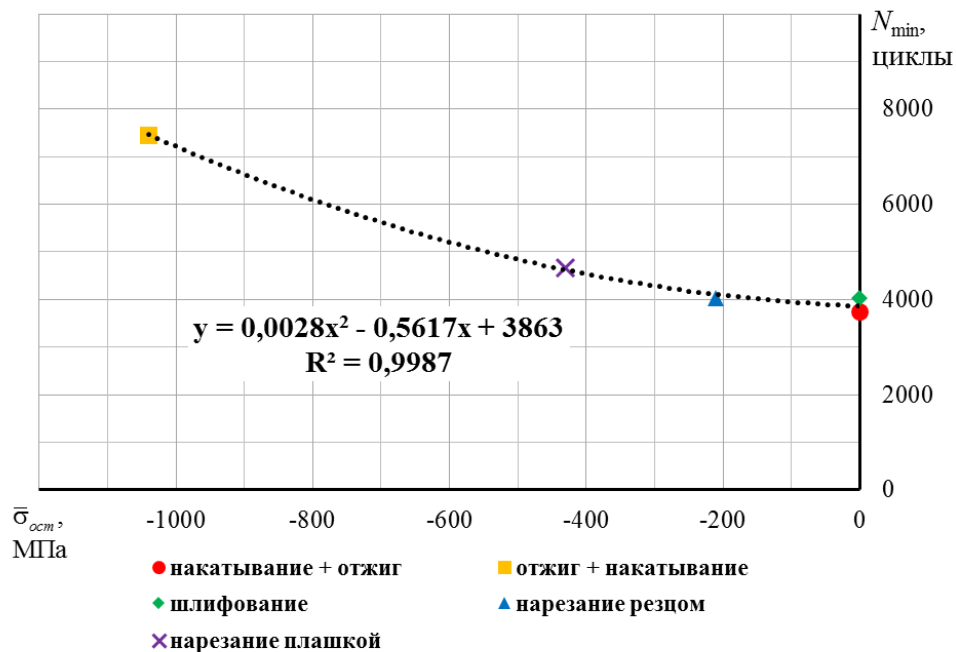


Рис. 1. Количество циклов до разрушения в зависимости от величины критерия среднеинтегральных остаточных напряжений при различных способах формирования резьбы (материал деталей – ВТ16)

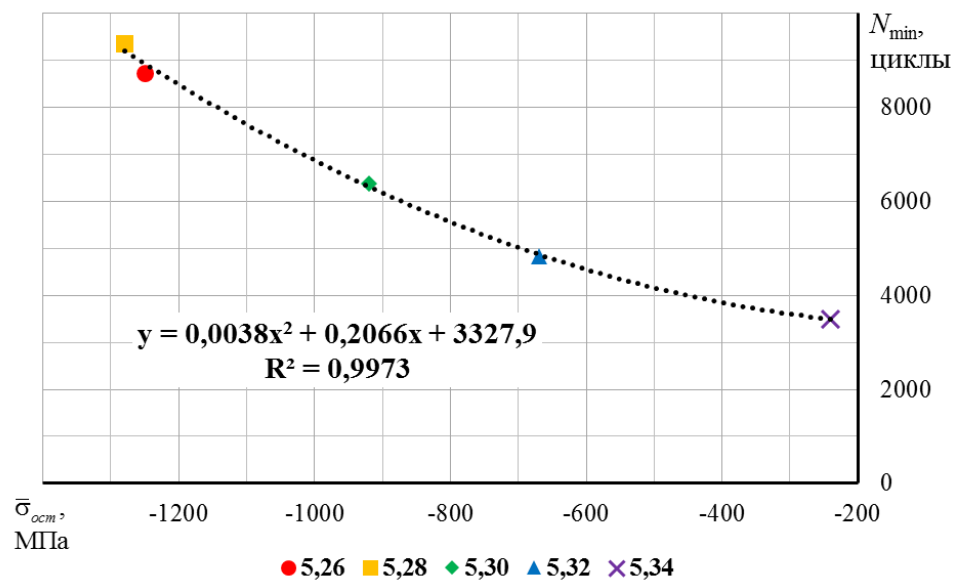


Рис. 2. Количество циклов до разрушения в зависимости от величины критерия среднеинтегральных остаточных напряжений для различных диаметров заготовок (мм) под накатывание резьбы (материал болтов – ВТ16)

Однозначной зависимости между степенью пластической деформации в резьбе и циклической долговечностью резьбовых деталей по результатам экспериментов в [12] не установлено. Установ-

ленное изменение долговечности связано с изменением величины и характера распределения остаточных напряжений во впадинах резьбы.

Влияние последовательности термообработки на циклическую долговечность резьбовых деталей изучалось на болтах М6 из сталей ЭИ696, ЭИ961, ВНС17, 16ХСН. Болты подвергались термообработке после накатывания резьбы. Термообработка накатанных болтов привела к

существенному снижению циклической долговечности – в 2–11 раз, что связано с релаксацией остаточных напряжений (рис. 3). Наибольшее снижение долговечности наблюдалось у болтов из стали 16ХСН, наименьшее – из стали ВНС17.

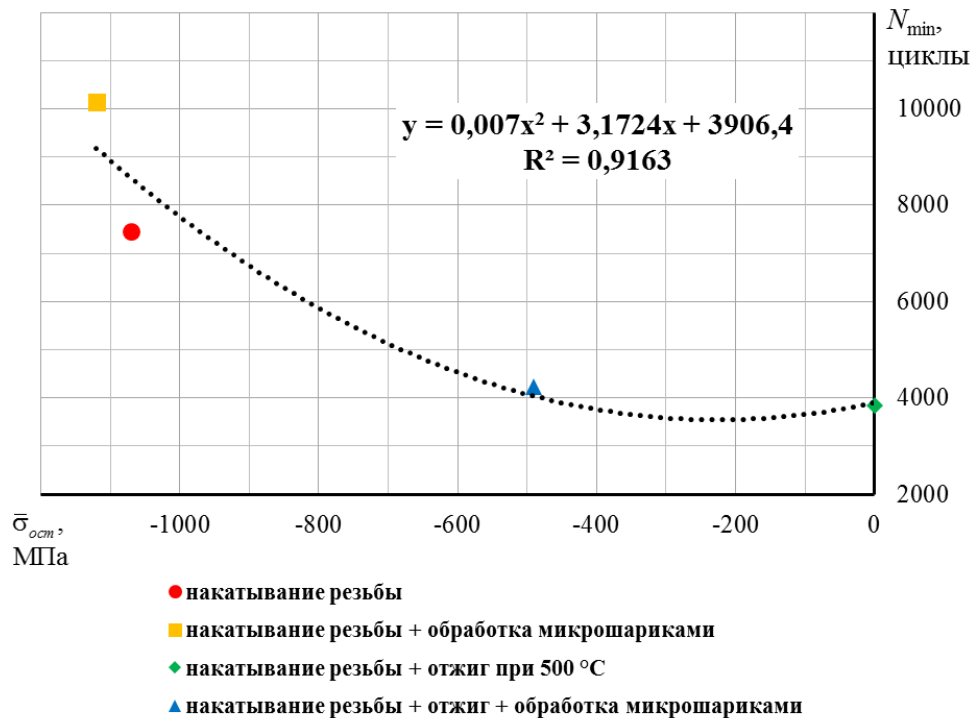


Рис. 3. Количество циклов до разрушения болтов М6 в зависимости от величины критерия среднеинтегральных остаточных напряжений для различных способов упрочнения поверхности пластическим деформированием

Испытания на усталость болтов М6 из сплава ВТ16, изготовленных с упрочнением микрошариками на роторной установке, показали, что среднее значение остаточных напряжений практически не изменилось ввиду исчерпания материалом пластичности при изготовлении резьбы накатыванием. Однако рассеяние величины циклической долговечности уменьшилось, вследствие чего повысилась её нижняя граница. Это является важной особенностью, так как в ОСТ 1 00152-74 на приём-сдаточные испытания оговорена именно нижняя граница циклической долговечности, равная 4000 циклам. Кроме того, обработка микрошариками также повышает среднее значение и нижнюю границу циклической долговечности отожжённых болтов.

На рис. 1–3 пунктирными линиями показаны описанные по экспериментальным точкам аппроксимирующие зависимости числа циклов до разрушения от величины критерия среднеинтегральных остаточных напряжений и приведены соответствующие данным зависимостям уравнения. Через  $y$  выражено число циклов до разрушения, через  $x$  – критерий среднеинтегральных остаточных напряжений,  $R^2$  – достоверность аппроксимации (коэффициент детерминированности). По значениям  $R^2$ , полученным для рассмотренных случаев, видно, что зависимости квадратичного вида хорошо согласуются с экспериментальными данными. Следовательно, прослеживается определённая закономерность между изменением числа циклов до разрушения резьбовых деталей

в малоцикловой области и величиной критерия среднеинтегральных остаточных напряжений, что указывает на принципиальную возможность использования данного критерия для оценки малоцикловой усталости.

По результатам анализа влияния технологических факторов на малоцикловую усталость резьбовых деталей следует отметить, что определяющее влияние оказывают диаметр заготовки под накатывание резьбы, термообработка, усилие и время накатывания, то есть факторы, оказывающие наибольшее влияние на уровень и характер распределения остаточных напряжений. Во всех рассмотренных случаях увеличение уровня сжимающих остаточных напряжений приводит к увеличению циклической долговечности.

Таким образом, можно сделать вывод: рассмотренные экспериментальные данные показывают наличие связи между величиной критерия среднеинтегральных остаточных напряжений и числом циклов до разрушения в малоцикловой области. Однако непосредственное применение этого критерия для определения малоцикловой усталости затруднено тем, что имеет место перераспределение пластических деформаций и трещина продолжает развиваться вплоть до разрушения детали. Поэтому следует прогнозировать усталостную долговечность при комбинированном мало- и многоцикловом нагружении с учётом остаточных напряжений как перспективного подхода на базе среднеинтегральных остаточных напряжений.

### Библиографический список

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. Радченко В.П., Афанасьева О.С. Методика расчёта предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурных выдержках в условиях ползучести // Вестник СамГТУ. Сер. Физ.-мат. науки. 2009. № 2 (19). С. 264-268. doi: 10.14498/vsgtu733

3. 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.

4. 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. 2012. № 5 (36), ч. 1. С. 95-99.

5. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивле-

ния усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. 125 с.

6. Вакулюк В.С., Кирпичёв В.А., Павлов В.Ф., Сазанов В.П. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов с концентраторами напряжений // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 1(54). С. 45-49.

7. Кудрявцев П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины. М.: Машиностроение, 1982. 171 с.

8. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Ч. 1: Критерии прочности и ресурса. Новосибирск: Наука, 2005. 494 с.

9. Махутов Н.А., Бурак М.И., Гаденин М.М. Механика малоциклового разрушения. М.: Наука, 1986. 264 с.

10. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчёт элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.

11. Oakley S.Y., Nowell D. Prediction of the combined high- and low-cycle fatigue performance of gas turbine blades after foreign object damage // International Journal of Fatigue. 2007. V. 29, Iss. 1. P. 69-80.

doi: 10.1016/j.ijfatigue.2006.02.042

12. 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. 170 с.

### Информация об авторе

**Злобин Андрей Сергеевич**, аспирант кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследова-

тельский университет). E-mail: [as.zlobin@mail.ru](mailto:as.zlobin@mail.ru). Область научных интересов: динамика и прочность деталей ГТД, циклическая долговечность деталей с остаточными напряжениями.

## ESTIMATION OF RESIDUAL STRESS INFLUENCE ON THE LOW-CYCLE FATIGUE OF THREADED PARTS

© 2015 A. S. Zlobin

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The possibility of using the criterion of average integral residual stresses to estimate the cyclic life of threaded parts in the area of low-cycle fatigue is examined in the article. The peculiarities of fracture under high-cycle and low-cycle stresses are pointed out. The problems of using equations and criteria of linear mechanics in the low-cycle fatigue area are specified. These problems are mostly related to the origination of plastic deformation regions; the sizes of the latter may be significantly greater than those of the cracks. Technological factors affecting the origination and distribution of residual stresses are considered. It is noted that the diameter of the workpiece for thread rolling, heat treatment, the force and time of rolling are of the greatest importance. The connection between the number of cycles prior to fracture and the residual stress value, expressed in terms of the average integral residual stress criterion under the influence of different technological factors is illustrated. According to the results of low-cycle fatigue tests of threaded parts it has been shown that the dependence of the number of cycles prior to fracture on the value of the average integral residual stress criterion is approximated closely by equations of the quadratic form. The appropriate magnitudes of approximation reliability are not lower than 0.9163.

*Residual stresses, low-cycle fatigue, cyclic life, threaded parts, hardening.*

### References

1. 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.)
2. Radchenko V.P., Afanacieva O.S. Calculation Procedure of a Fatigue Point for Strengthened Cylindrical Specimen with Pressure Concentrators at Temperature Endurances in the Creep Conditions. *Vestnik SamGTU. Seriya: Fiziko-Matematicheskie Nauki*. 2009. No. 2 (19). P. 264-268. (In Russ.). doi: 10.14498/vsgtu733
3. 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. No. 4 (44). P. 81-85. (In Russ.)
4. 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. № 5 (36), part 1. P. 95-99. (In Russ.)

5. 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.
6. 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, №1 (54). P. 45-49. (In Russ.)
7. Kudryavtsev P.I. *Nerasprostranyayushchiesya ustalostnye treshchiny* [Nonpropagating fatigue cracks]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1982. 171 p.
8. Makhutov N.A. *Konstruksionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost'*. Chast' 1: *Kriterii prochnosti i resursa* [Structural strength, service life and technogenic safety. Part 1: Criteria of strength and service life]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2005. 494 p.
9. Makhutov N.A., Burak M.I., Gadenin M.M. *Mekhanika malotsiklovogo razrusheniya* [Mechanics of low-cycle fatigue failure]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 264 p.
10. Makhutov N.A. *Deformatsionnye kriterii razrusheniya i raschet elementov konstruktsiy na prochnost'* [Deformation failure criterion and strength calculation of structural elements]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 272 p.
11. Oakley S.Y., Nowell D. Prediction of the combined high- and low-cycle fatigue performance of gas turbine blades after foreign object damage. *International Journal of Fatigue*. 2007. V. 29, Iss. 1. P. 69-80. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2006.02.042
12. 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. 170 p.

#### About the author

**Zlobin Andrey Sergeevich**, postgraduate student of the Department of Strength of Materials, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail:

[as.zlobin@mail.ru](mailto:as.zlobin@mail.ru). Area of Research: dynamics and strength of gas turbine engine parts, cyclic life of parts under residual stresses.