



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 1, 2019

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.02

УДК 539.374

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ

В.С. Бондарь, Д.Р. Абашев, В.К. Петров

Московский политехнический университет, Москва, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 03 июля 2018 г.  
Принята: 20 марта 2019 г.  
Опубликована: 30 марта 2019 г.

### Ключевые слова:

теория термопластичности, накопление повреждений, прогнозирование ресурса, простые и сложные нагружения, изотермические и неизотермические нагружения, циклические нагружения.

### АННОТАЦИЯ

Рассматривается математическое моделирование процессов упругопластического деформирования и накопления повреждений материалов при пропорциональных и непропорциональных, изотермических и неизотермических циклических нагружениях на основе варианта теории пластичности, являющегося частным вариантом теории неупругости и относящегося к классу одноповерхностных теорий течения при комбинированном упрочнении. Область применимости варианта теории пластичности ограничивается малыми деформациями начально изотропных металлов при температурах, когда нет фазовых превращений, и скоростях деформаций, когда динамическими и реологическими эффектами можно пренебречь. Приводится набор материальных функций, замыкающих вариант теории пластичности, и базовый эксперимент, по результатам которого определяются материальные функции. На основе интегрирования эволюционного уравнения для микронапряжений (девиатор смещения центра поверхности нагружения) при жестком симметричном циклическом нагружении с постоянным размахом пластической деформации в условиях одноосного напряженного состояния получено уравнение кривой мало-, и многоциклового усталости (от  $10^1$  до  $10^6$  циклов). Для определения параметров, входящих в уравнение кривой мало-, многоциклового усталости, достаточно результатов базового эксперимента. Для нержавеющей стали SS304 построена кривая мало-, многоциклового усталости, которая сопоставлена с экспериментальными данными в диапазоне от  $10^1$  до  $10^6$  циклов до разрушения. Также для нержавеющей стали SS304 анализируются процессы нелинейного суммирования повреждений при двухблочных жестких циклических нагружениях. Показано, что переход с большего размаха деформаций на меньший существенно снижает суммарную долговечность. Результаты расчетов сопоставлены с результатами экспериментов. Далее рассматривается усталость нержавеющей стали SS304 при пропорциональных и непропорциональных жестких циклических нагружениях в диапазоне от  $10^1$  до  $10^6$  циклов до разрушения. Показано, что наибольшим повреждающим эффектом обладает нагружение по траектории деформаций в виде окружности. Расчетные кривые усталости для разных траекторий деформаций сопоставлены с результатами экспериментов. Прогнозирование ресурса материала конструкций при неизотермических циклических нагружениях проводится на основе анализа долговечности кромки камеры сгорания поршня дизеля и неохлаждаемого конического насадка сопла ЖРД при теплосменах. В первом случае на кромке камеры сгорания реализуется одноосное напряженное состояние (простое неизотермическое нагружение), а во втором случае двухосное напряженное состояние (сложное неизотермическое нагружение). Прогнозирование ресурса осуществляется на основе кинетического уравнения накопления повреждений, входящего в уравнение варианта теории пластичности, а также на основе деформационно-кинетического критерия малоциклового усталости. Оценка ресурса на основе деформационно-кинетического критерия дает повышенные результаты (в 5-6 раз) по сравнению с результатами, полученными на основе кинетического уравнения теории пластичности и соответствующими экспериментальными результатами при хорошем соответствии последних.

© ПНИПУ

© Бондарь Валентин Степанович – д.ф.-м.н., проф., зав. каф., e-mail: [tm@mami.ru](mailto:tm@mami.ru)

Абашев Дмитрий Рустамович – к.ф.-м.н., доц., e-mail: [tm@mami.ru](mailto:tm@mami.ru), ID: [0000-0002-1626-0662](https://orcid.org/0000-0002-1626-0662)

Петров Владимир Кириллович – к.т.н., доц., e-mail: [tm@mami.ru](mailto:tm@mami.ru)

Valentin S. Bondar – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Department, e-mail: [tm@mami.ru](mailto:tm@mami.ru)

Dmitry R. Abashev – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,

e-mail: [tm@mami.ru](mailto:tm@mami.ru), ID: [0000-0002-1626-0662](https://orcid.org/0000-0002-1626-0662)

Vladimir K. Petrov – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: [tm@mami.ru](mailto:tm@mami.ru)



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## ON PREDICTING MATERIAL AND STRUCTURAL RESOURCES UNDER CYCLIC LOADING

V.S. Bondar, D.R. Abashev, V.K. Petrov

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

### ARTICLE INFO

Received: 03 July 2018  
Accepted: 20 March 2019  
Published: 30 March 2019

#### Keywords:

theory of thermoplasticity, damage accumulation, resource forecasting, simple and complex loading, isothermal and nonisothermal loading, cyclic loading.

### ABSTRACT

Mathematical modelling of elastoplastic deformation and accumulation of material damage under proportional and non-proportional, isothermal and non-isothermal cyclic loading is considered. On the basis of the version of the theory of plasticity (which is a particular version of the theory of inelasticity and class one-dimensional flow theories) with combined hardening. The range of applicability of the version of the theory of plasticity is limited to small deformations of initially isotropic metals at temperatures when there are no phase transitions and strain rates, when dynamic and rheological effects can be neglected. A set of material functions closing the version of the theory of plasticity is given, and a basic experiment, based on the results of which material functions are determined. On the basis of the integration of the evolution equation for microstresses (deviator of the displacement of the loading surface center) with a rigid symmetrical cyclic loading with a constant swing of plastic deformation under conditions of the uniaxial stress state, the equation of the curve of low-cycle fatigue (from up to cycles) is obtained. To determine the parameters entering the equation of the curve of low-cycle fatigue, the results of the basic experiment are sufficient. For SS304 stainless steel, a low-cycle fatigue curve is constructed, which is compared with the experimental data in the range from up to cycles to failure. Also for SS304 stainless steel, processes of non-linear summation of damages are analyzed for two-block rigid cyclic loads. It is shown that the transition from a larger swing of deformations to a smaller one significantly reduces the overall durability. The results of the calculations are compared with the results of the experiments. Further, the fatigue of SS304 stainless steel is considered under proportional and disproportional hard cyclic loads ranging from up to cycles to failure. It is shown that the greatest damaging effect belongs to loading along the trajectory of deformations in the form of a circle. The calculated fatigue curves for different deformation trajectories are compared with the results of the experiments. Predicting the structural material resource under nonisothermal cyclic loading is carried out on the basis of the durability analysis of the edge of the combustion chamber of the diesel piston and the uncooled conical nozzle of the LPRE nozzle under heat changes. In the first case, a uniaxial stress state (simple non-isothermal loading) is realized at the edge of the combustion chamber, and in the second case a biaxial stress state (complex non-isothermal loading) is realized too. We predicted the resource on the basis of the kinetic equation of damage accumulation, included in the equation of the theory of plasticity, and also on the basis of the deformation-kinetic criterion of low-cycle fatigue. Estimation of the resource on the basis of the deformation-kinetic criterion gives overestimated results (by a factor of 5-6) in comparison with the results obtained on the basis of the kinetic equation of plasticity theory and the corresponding experimental results with a good agreement of the latter.

© PNRPU

### Введение

Математическое моделирование процессов упруго-пластического деформирования и накопления повреждений материалов при пропорциональных и непропорциональных, изотермических и неизотермических циклических нагружениях является до сих пор актуальной задачей при прогнозировании ресурса (выработанного и остаточного) материала конструкций высоких параметров при повторном воздействии термомеханических нагрузок. При этом реальный ресурс материала конструкций существенно зависит от режимов термомеханического нагружения, истории нагружения и других факторов, приводящих к значительному снижению ожидаемого ресурса. В настоящей работе будут приведены и проанализированы некоторые особенности нагружений, приводящих к существенному снижению ресурса, которые не могут быть учтены при прогнозировании ресурса на основе применяемых в настоящее

время методов и критериев (деформационно-кинетический критерий малоциклового прочностного ресурса, принцип линейного суммирования повреждений и т.д.).

В практических расчетах при прогнозировании ресурса материалов в основном применяются варианты теории термопластичности Бондаря [1–6], Коротких [7–11], Шабоша [7, 8]. Вариант теории термопластичности Бондаря прошел верификацию [1, 6, 25] на широком спектре конструкционных сталей и сплавов и программ экспериментальных исследований. Прикладной вариант теории термопластичности замыкается 8 материальными функциями, определяемыми из весьма простого базового эксперимента [1–6]. Вариант теории термопластичности Коротких имеет также обширную верификацию [7–11], но хуже описывает процессы сложного нагружения. Этот вариант теории термопластичности замыкается уже большим числом материальных функций – от 11 до 15, в зависимости от учета монотонного или циклического упрочнения. Причем базовый экспе-

римент уже более трудоемкий. Вариант теории термопластичности Шабоба прошел меньшую верификацию и только для процессов упругопластического деформирования. Прогнозирование ресурса на основе расчетов по этому варианту, по-видимому, проводится на основе обычных деформационных критериев и принципа линейного суммирования повреждений. Для описания процессов упругопластического деформирования (без определения ресурса) для этого варианта теории необходимо 12 материальных функций, определяемых из простого базового эксперимента.

Рассматриваемый здесь вариант теории термопластичности является частным вариантом теории неупругости [1–6], относящейся к классу одноповерхностной теории течения при комбинированном упрочнении. Область применимости варианта теории термопластичности ограничивается малыми деформациями начально изотропных металлов при температурах, когда нет фазовых превращений, и скоростях деформаций, когда динамическими и реологическими эффектами можно пренебречь.

Приводятся основные положения и уравнения теории термопластического деформирования и кинетические уравнения накопления повреждений. Формулируется базовый эксперимент и метод идентификации материальных функций, замыкающих теорию термопластичности. Приводится уравнение мало-, многоциклового усталости, полученное на основе интегрирования уравнений теории термопластичности при одноосном жестком циклическом нагружении. Для нержавеющей стали SS304 построена кривая мало-, многоциклового усталости, которая сопоставлена с экспериментальными данными в диапазоне от  $10^2$  до  $10^6$  циклов до разрушения. Анализируются процессы нелинейного суммирования повреждений при двухблочных жестких циклических нагружениях нержавеющей стали SS304, и результаты расчетов сопоставлены с результатами экспериментов. Рассматривается усталость нержавеющей стали SS304 при пропорциональных и непропорциональных жестких циклических нагружениях в диапазоне от  $10^3$  до  $10^6$  циклов до разрушения по простым и сложным траекториям деформаций. Приводится сопоставление результатов расчетов и экспериментов. Прогнозирование ресурса материала конструкций при неизотермических циклических нагружениях проводится на основе анализа долговечности кромки камеры сгорания поршня дизеля и неохлаждаемого конического насадка сопла ЖРД при теплосменах. Расчетные оценки ресурса на основе теории термопластичности сопоставляются с результатами экспериментов и традиционными методами оценки ресурса.

### 1. Основные положения и уравнения теории термопластичности

Материал однороден и начально изотропен. В процессе упругопластического деформирования в нем может возникнуть только деформационная анизотропия.

Область применимости теории ограничивается малыми деформациями материалов (металлов) при температурах, когда нет фазовых превращений, и при скоростях деформаций, когда динамическими и реологическими эффектами можно пренебречь.

Далее приводится сводка основных уравнений теории термопластичности.

$$1. \dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p.$$

$$2. \dot{\varepsilon}_{ij}^e = \frac{1}{E} [\dot{\sigma}_{ij} - \nu(3\dot{\sigma}_o \delta_{ij} - \dot{\sigma}_{ij})] + \alpha_{ij}^{\varepsilon T} \dot{T},$$

$$\alpha_{ij}^{\varepsilon T} = \alpha_T \delta_{ij} - \frac{1}{E} [\sigma_{ij} - \nu(3\sigma_o \delta_{ij} - \sigma_{ij})] \frac{dE}{dT} - \frac{1}{E} (3\sigma_o \delta_{ij} - \sigma_{ij}) \frac{d\nu}{dT}.$$

$$3. f(\sigma_{ij}) = \frac{3}{2} (s_{ij} - a_{ij})(s_{ij} - a_{ij}) - C_p^2 = 0,$$

$$C_p = C_p(T, \varepsilon_{u*}^p).$$

$$4. \dot{a}_{ij} = \frac{2}{3} g \dot{\varepsilon}_{ij}^p + \left( \frac{2}{3} g_\varepsilon \varepsilon_{ij}^p + g_a a_{ij} \right) \dot{\varepsilon}_{u*}^p + \left( \frac{2}{3} g_\varepsilon^T \varepsilon_{ij}^p + g_a^T a_{ij} \right) \dot{T},$$

$$g = E_a + \beta \sigma_a, \quad g_a = \beta \sigma_a, \quad g_a = -\beta,$$

$$g_\varepsilon^T = \frac{dE_a}{dT} - \frac{E_a}{\sigma_a} \frac{d\sigma_a}{dT}, \quad g_a^T = \frac{1}{\sigma_a} \frac{d\sigma_a}{dT}.$$

$$5. \dot{\varepsilon}_{ij}^p = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \lambda = \frac{3}{2} \frac{s_{ij}^*}{\sigma_{u*}^*} \dot{\varepsilon}_{u*}^p,$$

$$s_{ij}^* = s_{ij} - a_{ij}, \quad \sigma_{u*}^* = \left( \frac{3}{2} s_{ij}^* s_{ij}^* \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \dot{\varepsilon}_{u*}^p = \left( \frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p \right)^{\frac{1}{2}}.$$

$$6. \dot{\varepsilon}_{u*}^p = \frac{1}{E_*} \left[ \frac{3}{2} \frac{s_{ij}^* \dot{\sigma}_{ij}}{\sigma_{u*}^*} - B^T \dot{T} \right],$$

$$\dot{\varepsilon}_{u*}^p = \frac{1}{E_* 3G} \left[ 3G \frac{s_{ij}^* (\dot{\varepsilon}_{ij}^e - \alpha_{ij}^{\varepsilon T} \dot{T})}{\sigma_{u*}^*} - B^T \dot{T} \right],$$

$$E_* = q_\varepsilon + g + g_\varepsilon \varepsilon_{u*}^{p*} + g_a a_{u*}^*, \quad B^T = q_T + g_\varepsilon^T \varepsilon_{u*}^{p*} + g_a^T a_{u*}^*,$$

$$\dot{\varepsilon}_{u*}^p = \frac{s_{ij}^* \dot{\varepsilon}_{ij}^p}{\sigma_{u*}^*}, \quad a_{u*}^* = \frac{3}{2} \frac{s_{ij}^* a_{ij}}{\sigma_{u*}^*}, \quad q_\varepsilon = \frac{\partial C_p}{\partial \varepsilon_{u*}^p},$$

$$q_T = \frac{\partial C_p}{\partial T}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$

$$7. \sigma_{u*}^* < C_p \cup \dot{\varepsilon}_{u*}^p \leq 0 - \text{упругость,}$$

$$\sigma_{u*}^* = C_p \cap \dot{\varepsilon}_{u*}^p > 0 - \text{упругопластичность.}$$

$$8. \dot{\omega} = \alpha \omega^{\frac{\alpha-1}{\alpha}} \frac{a_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p}{W_a}, \quad \alpha = \left( \sigma_a / a_{u*}^{(2)} \right)^{n_\alpha},$$

$$a_n^{(2)} = \left( \frac{3}{2} a_{ij}^{(2)} a_{ij}^{(2)} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad a_{ij}^{(2)} = a_{ij} - \frac{2}{3} E_a \varepsilon_{ij}^p.$$

Здесь  $\dot{\varepsilon}_{ij}$ ,  $\dot{\varepsilon}_{ij}^e$ ,  $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$  – тензоры скоростей полной, упругой и пластической деформаций;  $\sigma_{ij}$ ,  $s_{ij}$ ,  $s_{ij}^*$ ,  $a_{ij}$  – тензоры

напряжений, девиаторы напряжений, активных напряжений и микронапряжений;  $\varepsilon_{u*}^p$  – накопленная пластическая деформация;  $\omega$  – поврежденность ( $\omega = \omega_* \approx 1$  – разрушение).

Теорию термопластичности замыкают следующие материальные функции, подлежащие экспериментальному определению:

$E(T), \nu(T), \alpha_T(T)$  – упругие параметры;

$E_a(T), \sigma_a(T), \beta(T)$  – модули анизотропного упрочнения;

$C_p(T, \varepsilon_{u*}^p)$  – функция изотропного упрочнения;

$W_0(T)$  – энергия разрушения;

$n_\alpha(T)$  – параметр нелинейности процесса накопления повреждений ( $n_\alpha = 1,5$  для конструкционных сталей и сплавов).

Метод идентификации материальных функций по данным базовых экспериментов подробно изложен в работах [1–6]. Там же приведены материальные функции рассматриваемых в настоящей работе конструкционных сталей и сплавов.

## 2. Мало-, многоцикловая усталость при пропорциональном циклическом нагружении

На основе интегрирования уравнений теории термопластичности при жестком изотермическом циклическом нагружении получено уравнение кривой мало-, многоцикловой усталости в диапазоне от  $10^1$  до  $10^6$  циклов до разрушения [1–6]. Уравнение кривой усталости имеет следующий вид:

$$N_f = \frac{W_0 \beta}{2 \sigma_a} \left[ \beta \Delta \varepsilon^2 - 2 \frac{1 - \exp(-\beta \Delta \varepsilon^p)}{1 + \exp(-\beta \Delta \varepsilon^p)} \right]^{-1},$$

где  $\sigma_a, \beta, W_0$  – материальные функции теории термопластичности, определяемые на основе базового эксперимента. На рис. 1 приведена расчетная кривая усталости для нержавеющей стали SS304 и экспериментальные результаты [18, 19] в диапазоне от  $10^2$  до  $10^6$  циклов до разрушения. Пунктирной линией на рис. 1 показаны результаты, полученные на основе критерия Коффина-Мэнсона [20].

Из этих результатов следует, что в данном случае критерий Коффина-Мэнсона (показатель степени равен 0,5) удовлетворительно соответствует эксперименту в диапазоне числа циклов до разрушения от  $2 \cdot 10^2$  до  $5 \cdot 10^3$  циклов. Экспериментальные результаты и расчетная кривая усталости также показывают, что при  $N_f < 2 \cdot 10^5$  циклов имеет место критерий усталости с показателем степени, равным 1, а при  $N_f > 5 \cdot 10^3$

циклов показатель степени равен 1/3. Этот вывод подтверждается экспериментальными результатами [18–21] для ряда конструкционных сталей и сплавов.

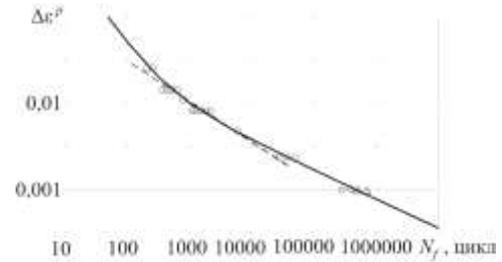


Рис. 1. Нержавеющая сталь SS304. Кривая усталости

Fig. 1. Stainless steel SS304. Fatigue curve

А во всем диапазоне числа циклов до разрушения (от  $10^1$  до  $10^7$  циклов, эксперимент [18–21]) уравнение кривой мало-, многоцикловой усталости достаточно достоверно описывает экспериментальные результаты. При числе циклов  $N_f > 10^7$  долговечность снижается [21], так как начинает сказываться охрупчивание материала из-за длительности (более  $10^3$  часов) процесса циклического нагружения. Следует отметить, что для получения уравнения кривой мало-, многоцикловой усталости достаточно иметь экспериментальные данные о петле пластического гистерезиса и числе циклов до разрушения при размахе пластической деформации  $\Delta \varepsilon^p = 0,015 \dots 0,02$  либо экспериментальные результаты при  $N_f$  порядка  $10^2$  и  $N_f$  порядка  $10^5$  циклов.

## 3. Нелинейное суммирование повреждений

Анализ результатов экспериментальных исследований [18, 22] усталости конструкционных сталей и сплавов как при стационарных (одноблочных, регулярных), так и при нестационарных (многоблочных, нерегулярных) пропорциональных циклических нагружениях показывает, что процессы накопления повреждений являются существенно нелинейными. Причем нелинейность процесса накопления повреждений возрастает с уменьшением размаха деформации. При нестационарных (многоблочных, нерегулярных) режимах пропорционального циклического нагружения история нагружения оказывает существенное влияние на усталостную долговечность. Это приводит к существенному нарушению правила линейного суммирования повреждений, применяемого в практических расчетах.

Нелинейный процесс накопления повреждений при различных размахах деформации одноблочного циклического нагружения, полученной на основе уравнений теории термопластичности для нержавеющей стали SS304 приведен на рис. 2. Анализ результатов показывает, что с увеличением размаха деформаций процесс накопления повреждений приближается к линейному

без первой стадии накопления повреждений. По мере уменьшения размаха деформаций на начальном этапе появляется первая стадия накопления повреждений, на которой повреждение пренебрежимо мало. Продолжительность первой стадии накопления повреждений увеличивается с уменьшением размаха деформаций, увеличивается и нелинейность процесса накопления повреждений. Таким образом, при значительных размахах деформаций применение правила линейного суммирования повреждений возможно. Все эти выводы согласуются с результатами экспериментальных исследований [7, 18].

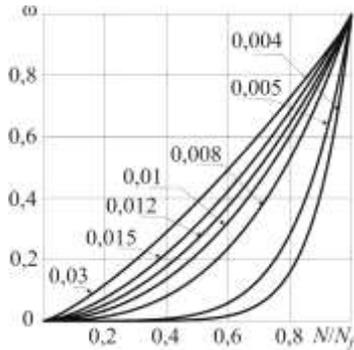


Рис. 2. Нелинейный процесс накопления повреждений

Fig. 2. Non-linear process of damage accumulation

Нарушение правила линейного суммирования повреждений при многоблочном изменении размаха деформации и различной истории предварительного циклирования приведено в работе [23], где теоретические исследования на основе теории термопластичности сопоставляются с результатами экспериментальных исследований.

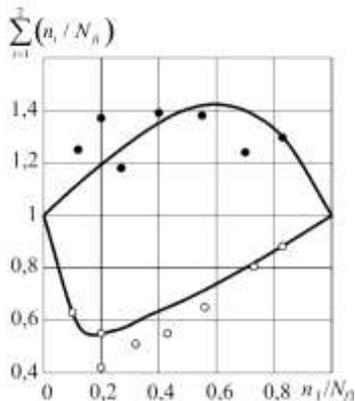


Рис. 3. Нержавеющая сталь SS304. Нелинейное суммирование повреждений

Fig. 3. Stainless steel SS304. Non-linear summation of damages

На рис. 3 приведены результаты расчетов и экспериментов [18] при двухблочном изменении размаха деформации, где результаты расчетов изображены сплошными линиями, а результаты экспериментов – темными кружками при возрастании размаха деформации

(0,005 → 0,015) и светлыми кружками при убывании размаха деформации (0,015 → 0,005). Наблюдается существенное отклонение от правила линейного суммирования повреждений. Причем прогноз ресурса на основе правила линейного суммирования повреждений может привести к значительному завышению долговечности на втором блоке при убывании размаха деформации на втором блоке и значительному занижению долговечности на втором блоке при возрастании размаха деформации на втором блоке.

#### 4. Пропорциональные и непропорциональные циклические нагружения

Расчетные [25] и экспериментальные [19] исследования усталостного разрушения при пропорциональных и непропорциональных циклических нагружениях в условиях растяжения-сжатия и (или) знакопеременного кручения проводились на нержавеющей стали SS304 при изотермическом нагружении ( $T = 20^\circ\text{C}$ ). На рис. 4 приведены результаты расчетов (сплошные кривые) и экспериментов (крестики, светлые и темные кружки, темные треугольники, ромбы и квадраты), показаны траектории деформаций циклических нагружений. Первые три траектории являются пропорциональными (простыми), а последние три – непропорциональными (сложными). Экспериментальные результаты при пропорциональном циклическом нагружении (первые три траектории нагружения) соответствуют единой расчетной кривой усталости.

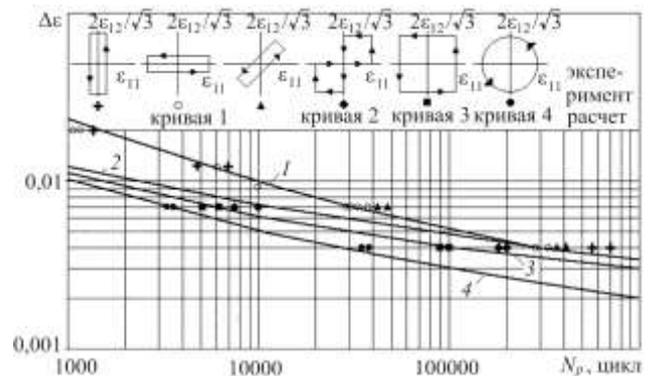


Рис. 4. Нержавеющая сталь SS304. Кривые усталости при пропорциональных и непропорциональных нагружениях

Fig. 4. Stainless steel SS304. Fatigue curves under proportional and non-proportional loadings

Расчетные и экспериментальные результаты при непропорциональных циклических нагружениях показывают снижение долговечности по сравнению с пропорциональными, наибольшим повреждающим эффектом обладает траектория деформаций в виде окружности – снижение долговечности возможно практически на порядок. Следует также отметить, что траектории деформаций двойной квадрат и квадрат имеют одина-

ковый размах длины траектории деформаций на цикле, но долговечность при нагружении по траектории деформаций в виде двойного квадрата может превышать долговечность при нагружении в виде квадрата практически в четыре раза.

### 5. Долговечность камеры сгорания поршня дизеля

Опыт эксплуатации показывает, что рост мощности дизелей приводит к случаям преждевременного выхода из строя поршней по причине их растрескивания. Рост трещин, направленных перпендикулярно к кромке камеры сгорания, характерен для глубоких камер. Превалирующее влияние на разрушение камеры сгорания поршней оказывают переменные тепловые нагрузки, обусловленные нестационарностью режимов работы дизелей. На стадии разработки новых конструкций поршней целесообразно проводить ускоренные испытания их опытных образцов на безмоторных стендах. Безмоторный тепловой стенд [1] осуществляет нагрев поршней лучистой энергией (галогенные лампы), а охлаждение кромок камеры сгорания поршней обеспечивается обдувом сжатым воздухом.

Анализ результатов расчетов напряженно-деформированного состояния поршней дизелей [26] позволил сделать вывод, что на кромках камер сгорания, где зарождаются трещины, реализуется практически одноосное напряженное состояние. При этом кольцевые напряжения почти на два порядка больше остальных компонент напряженного состояния.

Все сказанное выше позволило разработать расчетно-экспериментальный метод [1] прогнозирования долговечности кромок камер сгорания, заключающийся в экспериментальном определении температуры и радиального перемещения (кольцевой деформации) кромки как функций времени на цикле термонагружения, а также расчетном определении кинетики напряженно-деформированного состояния и числа циклов до разрушения (появление макротрещины) на основе теории термопластичности.

Рассматривались две программы термонагружения поршня из алюминиевого сплава АЛ-25, отличающиеся продолжительностью нагрева и охлаждения. Длительность нагрева и охлаждения в первой программе составляла  $47+47=94$  с, а во второй программе  $72+72=144$  с. На рис. 5 приведены экспериментальные изменения температуры и кольцевой деформации кромки, а также расчетные изменения силовой кольцевой деформации (деформации за вычетом температурной) и пластической кольцевой деформации для второй программы термонагружения. Стабилизированная циклическая петля для второй программы термонагружения приведена на рис. 6. Появление обратной петли в области растягивающих напряжений объясняется интенсивным отводом тепла на режиме охлаждения поршня. Размахи пластической деформации для первой и второй программ со-

ставили соответственно 0,00047 и 0,00121. Расчетное число циклов для первой программы составило 1870, а экспериментальное – от 1900 до 2200; для второй программы расчетное число – 260 циклов, а экспериментальное – 300. Сопоставление результатов расчетов и экспериментов по числу циклов до появления трещин в условиях неизотермического нагружения кромки камеры сгорания показывает их удовлетворительное соответствие. Следует отметить, что прогнозирование долговечности на основе критерия Коффина-Менсона здесь весьма проблематично, так как располагаемая пластичность алюминиевого сплава АЛ-25 сильно зависит от температуры.

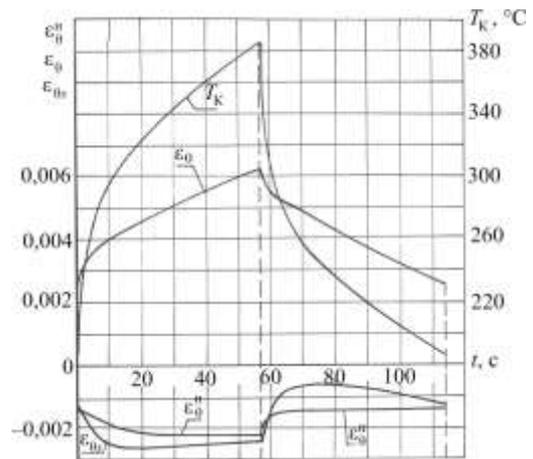


Рис. 5. Экспериментальные изменения температуры и кольцевой деформации кромки камеры сгорания

Fig. 5. Changes of the experimental temperature and ring deformation of the combustion chamber edge

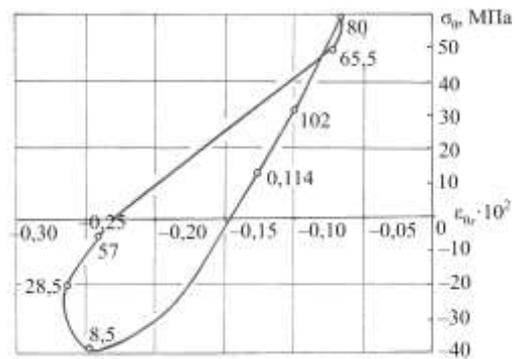


Рис. 6. Алюминиевый сплав АЛ-25. Стабилизированная циклическая петля

Fig. 6. Aluminum alloy AL-25. Stabilized cyclic loop

### 6. Малоцикловая прочность конического насадка сопла ЖРД

Объект исследования представляет собой однослойную усеченную коническую оболочку (рис. 7). Для придания требуемой жесткости срез оболочки подкреплен кольцом жесткости. Толщина стенки оболочки равна 1,0 мм, материал конструкции – жаропрочная сталь

ВЖ-100. Конструкция подвергалась в лабораторных условиях многократному интенсивному нагреву (погружением в расплавленную соль) и последующему охлаждению (обдувом воздухом и погружением в жидкий азот).

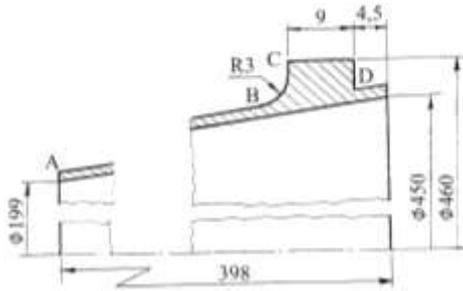


Рис. 7. Геометрия насадка сопла ЖРД

Fig. 7. Geometry of the rocket nozzle tip

На рис. 8 приведены экспериментальные кривые изменения температур оболочки (участок *AB*) и кольца жесткости (участок *CD*) в процессе полного цикла теплосмен. Наблюдается существенный знакопеременный градиент температур по образующей конструкции на участке *BC* перехода оболочки к кольцу жесткости. На основе теории термопластичности проведен расчет кинетики напряженно-деформированного состояния и дана оценка малоциклового прочностного насадка сопла ЖРД.

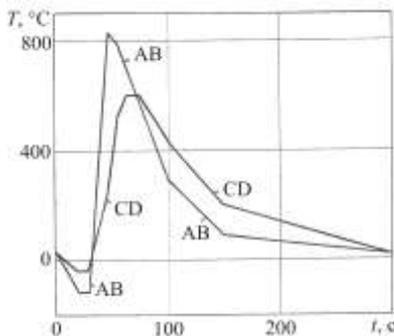


Рис. 8. Экспериментальные изменения температур участков насадка

Fig. 8. Experimental temperature changes of the nozzle tip areas

На рис. 9 изображена расчетная траектория пластических деформаций в процессе трех циклов теплосмен для точки *B* конструкции, где произошло разрушение (отделение кольца жесткости от оболочки). Расчетное разрушение конструкции произошло через 50 циклов теплосмен, а экспериментальные разрушения происходили в диапазоне от 46 до 53 циклов теплосмен. Оценка числа циклов до разрушения на основе критерия Новожилова-Рыбакиной [27–29] дает 33 цикла, а на основе деформационно-кинетического критерия [30–31] – 250 циклов. Приведенные исследования показывают, что нагружение в рассматриваемой точке конструкции носит сложный неизотермический характер и оценки

долговечности на основе критерия Новожилова-Рыбакиной и деформационно-кинетического критерия дают соответственно заниженное (практически в два раза) и завышенное (практически в пять раз) число циклов до разрушения. Расчет же на основе теории термопластичности удовлетворительно соответствует эксперименту. Отличие по числу циклов до разрушения не превышает 10 %.

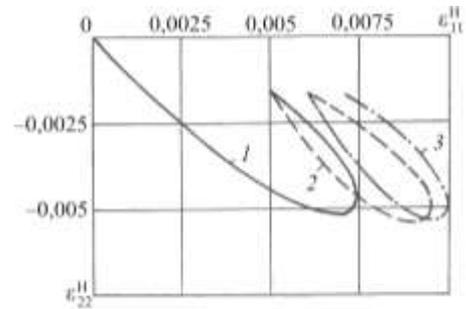


Рис. 9. Жаропрочный сплав ВЖ-100. Расчетная траектория пластических деформаций

Fig. 9. Heat-resistant alloy VZh-100. The estimated trajectory of plastic deformations

## Заключение

Анализируя расчетные и экспериментальные результаты оценки ресурса конструкционных сталей и сплавов при пропорциональных и непропорциональных, изотермических и неизотермических циклических нагружениях, можно выделить следующие особенности нагружений, приводящих к существенному снижению ресурса по сравнению с пропорциональным ресурсом на основе применяемых в настоящее время методов и критериев:

- при нестационарных циклических нагружениях с убывающим размахом деформаций происходит значительное снижение суммарного ресурса;

- при непропорциональных циклических нагружениях ресурс материала существенно зависит от меры сложности траектории деформаций. Наибольшим повреждающим эффектом обладает траектория деформаций в виде окружности – возможно снижение ресурса на порядок;

- неизотермичность нагружения приводит к значительной неопределенности при прогнозировании ресурса, особенно если располагаемая пластичность материала существенно зависит от температуры;

- сложное неизотермическое нагружение вызывает наибольшие затруднения при прогнозировании ресурса. И здесь без адекватного моделирования процессов деформирования и накопления повреждений прогнозирование ресурса не будет достаточно достоверным.

Рассматриваемый в настоящей работе вариант теории термопластичности позволяет адекватно описывать кинетику напряженно-деформированного состояния

и процесс накопления повреждений материалов при повторном воздействии термомеханических нагрузок в условиях произвольного сложного неизоэтермического нагружения. Отличие расчетных и экспериментальных значений числа циклов до разрушения не превышает

30 %. Приведенное здесь уравнение кривой мало-, многоциклового усталости позволяет построить кривую усталости в диапазоне от  $10^1$  до  $10^6$  циклов при минимальном эксперименте.

### Библиографический список

1. Бондарь В.С. Неупругое поведение и разрушение материалов и конструкции при сложном неизоэтермическом нагружении: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – М.: Изд-во МАМИ, 1990. – 314 с.
2. Бондарь В.С. Неупругость. Варианты теории. – М.: Физматлит, 2004. – 144 с.
3. Bondar V.S. Inelasticity. Variants of the theory. – New York: Begell House, 2013. – 194 p.
4. Бондарь В.С., Даншин В.В., Кондратенко А.А. Вариант теории термопластичности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 2. – С. 21–35. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.2.02
5. Бондарь В.С., Даншин В.В., Кондратенко А.А. Вариант теории термовязкопластичности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 1. – С. 39–56.
6. Макаров Д.А. Математическое моделирование процессов неизоэтермического неупругого деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М.: Изд-во МАМИ, 2005. – 108 с.
7. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. – М.: Физматлит, 2008. – 424 с.
8. Прикладная теория пластичности / Ф.М. Митенков, И.А. Волков, Л.А. Игумнов, А.В. Каплиенко, Ю.Г. Коротких, В.А. Панов. – М.: Физматлит, 2015. – 282 с.
9. Волков И.А., Игумнов Л.А., Коротких Ю.Г. Прикладная теория вязкопластичности: моногр. – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. университета, 2015. – 317 с.
10. Волков И.А., Игумнов Л.А. Введение в континуальную механику поврежденной среды. – М.: Физматлит, 2017. – 299 с.
11. Волков И.А., Казаков Д.А., Коротких Ю.Г. Экспериментально-теоретические определения параметров уравнений механики поврежденной среды при усталости и ползучести // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2012. – № 2. – С. 50–78.
12. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity // Inter. J. of Plasticity. – 1989. – Vol. 5. – No. 3. – P. 247–302.
13. Chaboche J.L. Thermodynamically based viscoplastic constitutive equations: theory versus experiment // ASME Winter Annual Meeting. – Atlanta, GA (USA). – 1991. – P. 1–20.
14. Chaboche J.L. Cyclic viscoplastic constitutive equations, parts I and II. // ASME J. of Applied Mechanics 60. – 1993. – P. 813–828.
15. Chaboche J.L., Rousselier G. On the plastic and viscoplastic constitutive equations // ASME J. of Pres. Vessel Techn. – 1983. – Vol. 105. – P. 153–164.
16. Chaboche J.-L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories // Int. J. of Plasticity. – 2008. – Vol. 24. – P. 1642–1692.
17. Нелинейная механика материалов / Ж. Бессон, Ж. Каето, Ж.-Л. Шабоши, Т.С. Форест. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 397 с.
18. Бернард-Конноли, Бью Куок, Бирон. Усталость коррозионно-стойкой стали 304 при испытаниях в условиях многоступенчатой контролируемой деформации // Теор. основы инж. расчетов. – 1983. – № 3. – С. 47–53.
19. Socie D. Multiaxial fatigue damage models // ASME. – 1988. – Vol. 3. – P. 9–21.
20. Мэнсон С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость. – М.: Машиностроение, 1974. – 344 с.
21. Трошенко В.Т., Лебедев А.А., Стрижало В.А. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. – Киев: Логос, 2000. – 571 с.
22. Savalle S., Caenat G. Vicroanureage, micropropagation et endommagement // La Rescherche Aerospatiale. – 1982. – Vol. 6. – P. 395–411.
23. Бондарь В.С., Даншин В.В., Макаров Д.А. Математическое моделирование процессов деформирования и накопления повреждений при циклических нагружениях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 2. – С. 125–152.
24. Бондарь В.С., Даншин В.В., Семенов П.В. Нелинейные процессы накопления повреждений при нестационарных циклических нагружениях // Проблемы прочности и пластичности. – 2012. – Вып. 75. – Ч. 2. – С. 96–104.
25. Бондарь В.С., Даншин В.В. Пластичность. Пропорциональные и непропорциональные нагружения. – М.: Физматлит, 2008. – 176 с.
26. Аверченков Е.А., Донченко А.С., Егоров В.И. О поведении материала поршня при термомеханическом нагружении // Повышение топливной экономичности и долговечности автомобильных двигателей. – М.: Изд-во МАМИ, 1983. – Вып. 5. – С. 59–68.
27. Новожилов В.В., Рыбакина О.Г. О перспективах построения критерия прочности при сложном нагружении // Прочность при малом числе циклов нагружения. – М.: Наука, 1969. – С. 71–80.
28. Новожилов В.В. О сложном нагружении и перспективах феноменологического подхода к исследованию микронапряжений // ПММ. – 1964. – Т. 28. – Вып. 3. – С. 393–400.
29. Новожилов В.В., Кадашевич Ю.И. Микронапряжения в конструкционных материалах. – Л.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
30. Гусенков А.П. Прочность при изотермическом и неизоэтермическом малоцикловом нагружении. – М.: Наука, 1979. – 295 с.
31. Гусенков А.П., Котов П.И. Малоцикловая усталость при неизоэтермическом нагружении. – М.: Машиностроение, 1983. – 240 с.

## References

1. Bondar' V.S. Neuprugoe povedenie i razrushenie materialov i konstrukcii pri sloznom neizotermicheskom nagruzhennii: dis. ... d-ra fiz.-mat.nauk. – M.: Izd-vo MAMI, 1990. – 314 p.
2. Bondar' V.S. Neuprugost'. Varianty teorii. – M.: FIZMATLIT, 2004. – 144 p.
3. Bondar V.S. Inelasticity. Variants of the theory. – New York: Begell House, 2013. – 194 p.
4. Bondar' V.S., Danshin V.V., Kondratenko A.A. Variant teorii termoplastichnosti // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. *Mehanika*.-2015.- # 2.- P.21-35. DOI: 10.15593 / perm.mech /2015.2.02.
5. Bondar' V.S., Danshin V.V., Kondratenko A.A. Variant teorii termovjazkoplastichnosti // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. *Mehanika*. 2016. – P. 39-56.
6. Makarov D.A. Matematicheskoe modelirovanie protsessov neizotermicheskogo neuprugogo deformirovaniia i nakopleniia povrezhdenii v konstruktsionnykh materialakh [Mathematical modeling of non-isothermal processes of inelastic deformation and damage accumulation in structural materials]: Ph.D. thesis. Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet «MAMI», 2005, 108 p.
7. Volkov I.A., Korotkih Ju.G. Uravnenija sostojanija vjazko-uprugoplasticheskikh sred s povrezhdenijami. – M.: FIZMATLIT, 2008. – 424 p.
8. Mitenkov F.M., Volkov I.A., Igumnov L.A., Kaplienko A.V., Korotkih Ju.G., Panov V.A. Prikladnaja teorija plasticnosti. M.: FIZMATLIT, 2015. – 282 p.
9. Volkov I.A., Igumnov L.A., Korotkih Ju.G. Prikladnaja teorija vjazkoplastichnosti. Monografija.- Nizhnij Novgorod: Izd-vo Nizhegorodskogo gos.universiteta, 2015. – 317 p.
10. Volkov I.A., Igumnov L.A. Vvedenie v kontinual'nuju mehaniku povrezhdennoj sredy.- M. FIZMATLIT, 2017. – 299 p.
11. Volkov I.A., Kazakov D.A., Korotkih Ju.G. Jeksperimental'noteoreticheskie opredelenija parametrov uravnenij mehaniki povrezhdennoj sredy pri ustalosti i polzuchesti [Theoretical and experimental determination of the parameters of the equations of mechanics of damaged environment with fatigue and creep]. PNRPU Mechanics Bulletin, 2012, no. 2, pp. 50-78.
12. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *Inter. J. of Plasticity*. Vol. 5. № 3, 1989, P. 247-302.
13. Chaboche J.L. Thermodynamically based viscoplastic constitutive equations: theory versus experiment. ASME Winter Annual Meeting, Atlanta, GA (USA), – 1991, – P. 1-20.
14. Chaboche J.L. Cyclic viscoplastic constitutive equations, parts I and II. *ASME J. of Applied Mechanics* 60. – 1993. – P. 813-828.
15. Chaboche J.L., Rousselier G. On the plastic an viscoplastic constitutive equations // *ASME J. of Pres. Vessel Techn.* - 1983. Vol. 105. – P. 153-164.
16. Chaboche J.-L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories. *Int. J. of Plasticity*. 2008. V.24. P.1642-1692.
17. Besson Zh., Kaeto Zh., Zh.-L. Shaboshi, Forest T.S. Nelinejnaja mehanika materialov. – Sankt-Peterburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2010. – 397 s.
18. Bernard-Konnoli, B'iu Kuok, Biron. Ustalost' korrozionno-stoikoistali 304 priispytaniakh v usloviakh mnogostupenchatoi kontroliruemoi deformatsii. [Fatigue of corrosion-resistant steel 304 in the test multistage controlled deformation]. *Teoreticheskie osnovy inzhenernyh raschjotov*, 1983, no. 3, pp. 47-53.
19. Socie, D. Multiaxial fatigue damage models. *ASME*, 1988, vol. 3, pp. 9-21.
20. Menson S. Temperaturnye napriazheniia i malotsiklovaia ustalost' [Thermal stress and low cycle fatigue]. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 344 p.
21. Troshchenko V.T., Lebedev A.A., Strizhalo V.A.. Mekhanicheskoe povedenie materialov pri razlichnykh vidakh nagruzhenniia [Mechanical behavior of materials under different types of loading]. Kiev: Logos, 2000, 571 p.
22. Savalle S., Caienatd G. Microanureage, Micropropagation et Endommage-mant. *La Resherche Aerospatiale*, 1982, vol. 6, pp. 395-411.
23. Bondar' V.S., Danshin V.V., Makarov D.A. Matematicheskoe modelirovanie processov deformirovanija i nakoplenija povrezhdenij pri ciklicheskih nagruzhenijah // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. *Mehanika*.-2014.- #2.- P.125-152.
24. Bondar' V.S., Danshin V.V., Semenov P.V. Nelinejnye processy nakoplenija povrezhdenij pri nestacionarnykh ciklicheskih nagruzhenijah // *Problemy prochnosti i plasticnosti*.- 2012.- Vyp. 75, Ch.2. –P.96-104.
25. Bondar' V.S., Danshin V.V. Plasticnost'. Proporcional'nye i neproporcional'nye nagruzheniya. – M.: FIZMATLIT, 2008. – 176 p.
26. Averchenkov E.A., Donchenko A.S., Egorov V.I. O povedenii materiala porshnja pri termomechanicheskom nagruzhennii // *Povyshenie toplivnoj jekonomicnosti i dolgovechnosti avtomobil'nyh dvigatelej*. M.: MAMI, 1983, Vyp. 5. – P. 59-68.
27. Novozhilov V.V. Rybakina O.G. O perspektivakh postroeniya kriteriya prochnosti pri sloznom nagruzhennii [Design of the strength criterion for complex loading]. *Moscow. Nauka, Prochnost pri malom chisle tsiklov nagruzheniya*, 1969, pp. 71-80.
28. Novozhilov V.V. O sloznom nagruzhennii i perspektivah fenomenologicheskogo podhoda k issledovaniju mikronaprjazhenij [About complex loading and prospects of the phenomenological approach to the study of microstresses]. *PMM*, 1964, vol. 28 (3), pp. 393-400.
29. Novozhilov V.V., Kadashevich Ju.I. Mikronaprjazhenija v konstrukcionnykh materialah. – L.: Mashinostroenie, 1990. 224 p.
30. Gusenkov A.P. Prochnost' pri izotermicheskom i neizotermicheskom malotsiklovom nagruzhennii. [Strength under isothermal and nonisothermal low-cycle loading] Moscow: Nauka, 1979, 295 p.
31. Gusenkov A.P.. Kotov P.I. Malociklovaja ustalost' pri neizotermicheskom nagruzhennii.- M.: Mashinostroenie, 1983. – 240 p.