

ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 539.374

В.С. БОНДАРЬ, д-р физ.-мат. наук, проф.
профессор кафедры технической механики¹
E-mail: tm@mospolytech.ru

Д.Р. АБАШЕВ, канд. физ.-мат. наук, доц.
доцент кафедры технической механики¹
E-mail: tm@mospolytech.ru

¹Московский политехнический университет, г. Москва, Россия

Поступила в редакцию 15.07.2021.

РЕСУРС КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПОВТОРНЫХ И ДЛИТЕЛЬНЫХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Рассматриваются основные положения и уравнения прикладной теории неупругости, относящейся к классу теорий течения при комбинированном упрочнении. Выделяются материальные функции, замыкающие прикладную теорию неупругости, формулируется базовый эксперимент. Прогнозирование ресурса материала конструкций при неизотермических циклических нагружениях проводится на основе анализа долговечности кромки камеры сгорания поршня дизеля и неохлаждаемого конического насадка сопла при теплосменах. Расчетные оценки ресурса на основе прикладной теории неупругости сопоставляются с результатами экспериментов и традиционными методами оценки ресурса. Рассматриваются также примеры оценки ресурса элемента конструкции долгоресурсной энергетической установки. Показаны режимы нагружения, приводящие к значительному уменьшению ресурса.

Ключевые слова: неупругость, ресурс, долговечность, неизотермические циклические нагружения, накопление повреждений

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-4-57-20-26>

Введение. Обеспечение безопасности эксплуатации ответственных объектов (ядерных и тепловых энергетических установок, объектов химической, газовой, нефтяной промышленности, ракетно-космической и авиационной техники) в течение длительного срока службы (порой нескольких десятилетий) требует достоверной информации о процессах накопления повреждений в конструкционных материалах. При выработке элементами конструкций проектной долговечности возникает задача продления срока службы и обеспечения их безопасной эксплуатации в течение этого срока.

Решение этих проблем возможно только при реализации методологии эксплуатационного мониторинга, одной из основных задач которого

является оценка выработанного ресурса и прогнозирование продлеваемого ресурса материала опасных зон наиболее нагруженных конструктивных элементов на базе математического моделирования процессов накопления повреждений с использованием современных теорий термовязкопластичности или неупругости.

Вопросам построения вариантов теорий термовязкопластичности и неупругости посвящено большое количество работ. Основные направления построения теорий и обширную библиографию по этому вопросу можно найти в монографиях, обзорах и отдельных работах [1–30].

Наибольшее распространение в практических расчетах в настоящее время нашли прикладные

варианты теории течения, базирующиеся на концепции комбинированного упрочнения. Среди этих вариантов теории Бондаря [1–4], Коротких [13–14] и Шабоши [5–9, 30] являются наиболее экспериментально обоснованными и широко применяемыми для расчетов ресурса материалов конструкций при термовязкопластическом деформировании в условиях повторности и длительности термомеханических воздействий.

В настоящей работе рассматриваются основные положения и уравнения прикладной теории неупругости, относящейся к классу теорий течения при комбинированном упрочнении. Прогнозирование ресурса материала конструкций при неизотермических циклических нагружениях проводится на основе анализа долговечности кромки камеры сгорания поршня дизеля и неохлаждаемого конического насадка сопла при теплосменах. Расчетные оценки ресурса на основе прикладной теории неупругости сопоставляются с результатами экспериментов и традиционными методами оценки ресурса. Рассматриваются также примеры оценки ресурса элемента конструкции долгоресурсной энергетической установки. Показаны режимы нагружения, приводящие к значительному уменьшению ресурса.

Основные положения и уравнения прикладной теории неупругости. Материал однороден и начально изотропен. Рассматриваются малые деформации поликристаллических конструкционных сталей и сплавов при температурах, когда нет фазовых превращений, и скоростях деформаций, когда динамическими эффектами можно пренебречь. В процессе неупругого деформирования в материале может возникать только деформационная анизотропия. Далее приводится сводка основных уравнений прикладной теории неупругости:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{ij}^e &= \frac{1}{E} [\dot{\sigma}_{ij} - \nu(3\dot{\sigma}_0\delta_{ij} - \dot{\sigma}_{ij})] + \alpha_{ij}^{eT} \dot{T}; \\ \alpha_{ij}^{eT} &= \alpha_T \delta_{ij} - \frac{1}{E^2} [\sigma_{ij} - \nu(3\sigma_0\delta_{ij} - \sigma_{ij})] \frac{dE}{dT} - \\ &\quad - \frac{1}{E} (3\sigma_0\delta_{ij} - \sigma_{ij}) \frac{d\nu}{dT}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{3}{2}(s_{ij} - a_{ij})(s_{ij} - a_{ij}) - C^2 = 0; \quad (3)$$

$$\dot{C} = q_\varepsilon \dot{\varepsilon}_{u^*}^p + q_T \dot{T} - q_R, \quad \dot{\varepsilon}_{u^*}^p = \left(\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{a}_{ij} &= \frac{2}{3} g \dot{\varepsilon}_{ij}^p + \left(\frac{2}{3} g_\varepsilon \varepsilon_{ij}^p + g_\alpha a_{ij} \right) \dot{\varepsilon}_{u^*}^p + \\ &+ \left(\frac{2}{3} g_\varepsilon^T \varepsilon_{ij}^p + g_\alpha^T a_{ij} \right) \dot{T} - \left(\frac{2}{3} g_\varepsilon^R \varepsilon_{ij}^p + g_\alpha^R a_{ij} \right); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{ij}^p &= \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \dot{\lambda} = \frac{3}{2} \frac{s_{ij}^*}{\sigma_u^*} \dot{\varepsilon}_{u^*}^p, \\ s_{ij}^* &= s_{ij} - a_{ij}, \quad \sigma_u^* = \left(\frac{3}{2} s_{ij}^* s_{ij}^* \right)^{\frac{1}{2}}; \\ \dot{\varepsilon}_{u^*}^p &= \frac{1}{E_*} \left[\frac{3}{2} \frac{s_{ij}^* \dot{\sigma}_{ij}}{\sigma_u^*} - B^T \dot{T} + B^R \right]; \\ \dot{\varepsilon}_{u^*}^p &= \frac{1}{E_* + 3G} \left[3G \frac{s_{ij}^* \dot{\varepsilon}_{ij}}{\sigma_u^*} - B^T \dot{T} + B^R \right]; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} E_* &= q_\varepsilon + g + g_\varepsilon \varepsilon_u^p + g_\alpha a_u^*; \quad B^T = q_T + g_\varepsilon^T \varepsilon_u^p + g_\alpha^T a_u^*; \\ B^R &= q_R + g_\varepsilon^R \varepsilon_u^p + g_\alpha^R a_u^*, \quad \varepsilon_u^p = \frac{s_{ij}^* \varepsilon_{ij}^p}{\sigma_u^*}, \quad a_u^* = \frac{3}{2} \frac{s_{ij}^* a_{ij}}{\sigma_u^*}; \\ \sigma_u^* &< C \cup \dot{\varepsilon}_{u^*}^p \leq 0 \quad \text{— упругость } (\dot{\varepsilon}_{u^*}^p = 0); \\ \sigma_u^* &< C \cup \dot{\varepsilon}_{u^*}^p > 0 \quad \text{— неупругость } (\dot{\varepsilon}_{u^*}^p \neq 0); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\dot{\omega} = \alpha \omega^{\frac{\alpha-1}{\alpha}} \frac{1}{W} (a_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p) - g_\omega \omega; \quad (8)$$

$$\dot{W} = g_W^T \dot{T} - g_W W, \quad (9)$$

где ε_{ij} , ε_{ij}^e , ε_{ij}^p — тензоры полной, упругой и неупругой деформаций соответственно; T — температура; $\sigma_0 = \sigma_{ii} / 3$ — среднее напряжение; δ_{ij} — символ Кронекера; σ_{ij} , ε_{ij} — тензор и девиатор напряжений соответственно; a_{ij} — девиатор смещения (микронапряжений); C — радиус (размер) поверхности нагружения; $\varepsilon_{u^*}^p$ — накопленная неупругая деформация; s_{ij}^* — девиатор активных напряжений; G — модуль сдвига; ω — повреждение ($\omega \in [0; 1]$); W — энергия разрушения.

Определяющие функции q_ε , q_T , q_R , g , g_ε , g_α , g_ε^T , g_α^T , g_ε^R , g_α^R , g_ω , g_W , g_W^T , g_W , α выражаются через материальные функции следующим образом [1–4]:

$$q_\varepsilon = \frac{\partial C_p}{\partial \varepsilon_{u^*}^p}, \quad q_T = \frac{C}{C_p} \frac{\partial C_p}{\partial T}, \quad q_R = q_\varepsilon P_c;$$

$$\begin{aligned} g &= E_a + \beta \sigma_a, \quad g_\varepsilon = \beta E_a, \quad g_\alpha = -\beta; \\ g_\varepsilon^T &= \frac{dE_a}{dT} - \frac{E_a}{\sigma_a} \frac{d\sigma_a}{dT}, \quad g_\alpha^T = \frac{1}{\sigma_a} \frac{d\sigma_a}{dT}; \end{aligned}$$

$$g_\varepsilon^R = g_\varepsilon P_a, \quad g_\alpha^R = (g + g_\alpha a_u) \frac{P_a}{a_u}, \quad a_u = \left(\frac{3}{2} a_{ij} a_{ij} \right)^{\frac{1}{2}};$$

$$g_\omega = \lambda, \quad g_W = \rho, \quad g_W^T = \frac{W}{W_0} \frac{dW_0}{dT};$$

$$a = \left(\frac{\sigma}{\sigma_{au}} \right)^{n_a}, \quad \sigma_{au} = \left[\frac{3}{2} \left(a_{ij} - \frac{2}{3} E_a \varepsilon_{ij}^p \right) \left(a_{ij} - \frac{2}{3} E_a \varepsilon_{ij}^p \right) \right]^{\frac{1}{2}};$$

$$P_c = \exp(b_c) |C - C_{P0}|^{n_c} (1 - \omega)^{-m_\omega}, \quad C_{P0} = C_p(T, 0);$$

$$P_a = \exp(b_a) (a_u)^{n_a} (1 - \omega)^{-m_\omega};$$

$$\lambda = \begin{cases} 0, & \text{если } \sigma_{ii} \geq 0, \\ \exp(b_\lambda) |\sigma_{ii}|^{n_\lambda}, & \text{если } \sigma_{ii} < 0; \end{cases}$$

$$\rho = \exp(b_\rho) (\sigma_u)^{n_\rho}, \quad \sigma_u = \left(\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

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 оказывает 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 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 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 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 (появления макротрещины) на основе прикладной теории неупругости.

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 рисунке 1 приведены экспериментальные изменения температуры T и кольцевой деформации ε_0 кромки, а также расчетные изменения силовой кольцевой деформации ε_{0s} (деформации за вычетом температурной) и неупругой кольцевой деформации ε_0^H для второй программы термонагружения. Стабилизированная циклическая петля для второй программы термонагружения приведена на рисунке 2. Появление обратной петли в области растягивающих напряжений объясняется интенсивным отводом тепла на режиме охлаждения поршня. Размахи неупругой деформации для первой и второй программ составили соответственно 0,00047 и 0,00121. Расчетное число циклов для первой программы составило 1870, а экспериментальное — от 1900 до 2200; для второй программы расчетное — 260, а экспериментальное — 300. Сопо-

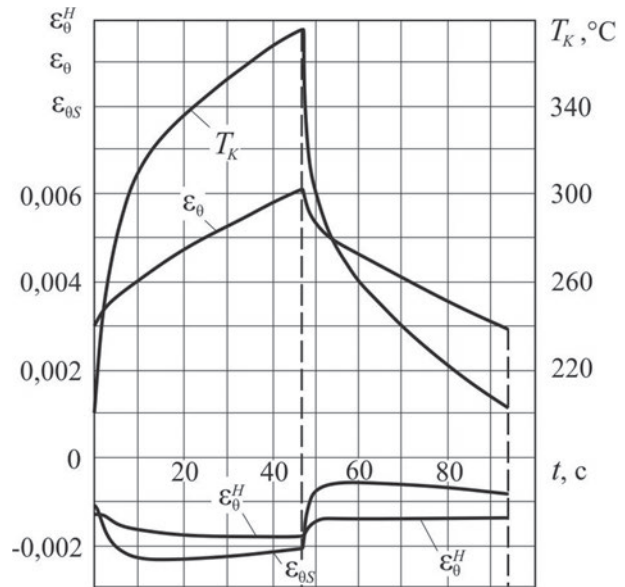


Рисунок 1 — Экспериментальные изменения температуры и кольцевой деформации кромки камеры сгорания
Figure 1 — Experimental changes in temperature and ring strain of the combustion chamber edge

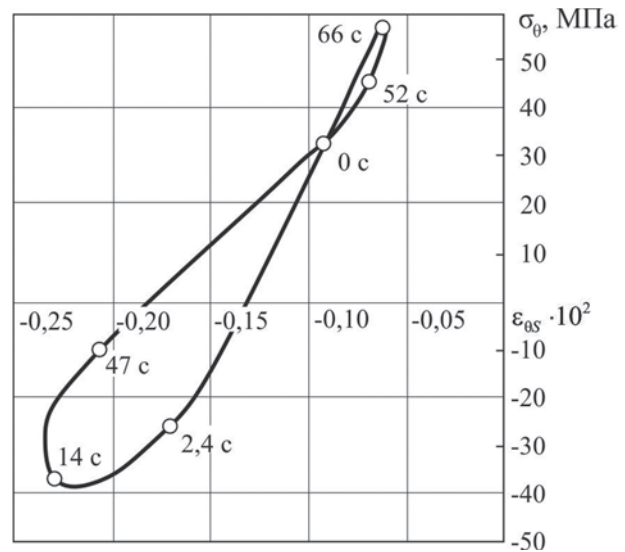


Рисунок 2 — Алюминиевый сплав АЛ-25.
Стабилизированная циклическая петля
Figure 2 — Aluminum alloy АЛ-25 (AL-25). Stable cyclic loop

ставление 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 здесь весьма проблематично, т. к. располагаемая пластичность алюминиевого сплава АЛ-25 сильно зависит от температуры.

Малоцикловая прочность конического насадка сопла. Объект исследования представляет собой однослойную усеченную коническую оболочку (рисунок 3). Для придания требуемой жесткости срез оболочки подкреплен кольцом жесткости. Толщина стенки оболочки равна 1,0 мм, материал конструкции — жаропрочная сталь

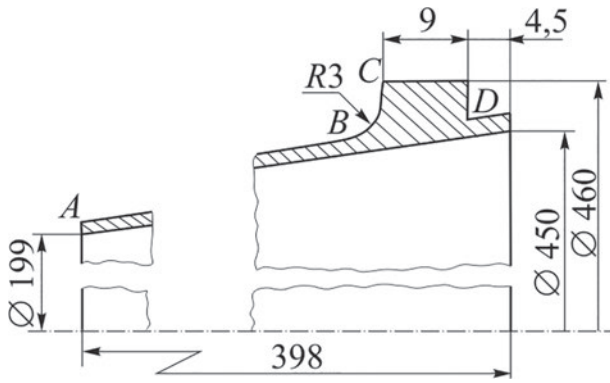


Рисунок 3 — Геометрия насадки сопла ЖРД
Figure 3 — Geometry of the liquid-propellant rocket tip

ВЖ-100. Конструкция подвергалась в лабораторных условиях многократному интенсивному нагреву (погружением в расплавленную соль) и последующему охлаждению (обдувом воздухом и погружением в жидких азот). На рисунке 4 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 прикладной теории неупругости проведен расчет кинетики напряженно-деформированного состояния и дана оценка малоциклового прочностии насадка сопла. На рисунке 5 изображена расчетная траектория неупругих 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

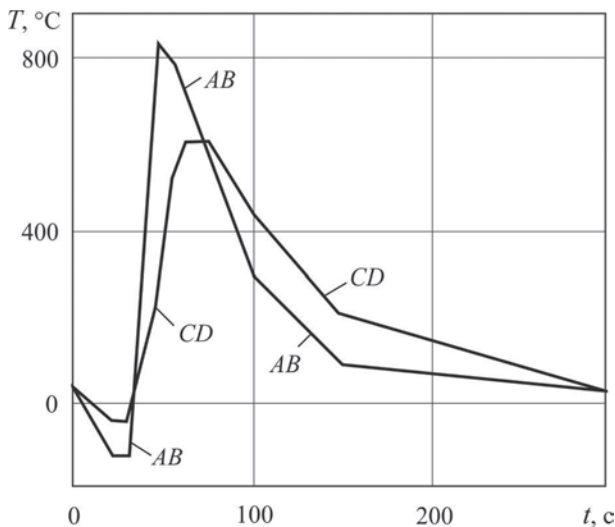


Рисунок 4 — Экспериментальные изменения температур участков насадка
Figure 4 — Experimental changes in the temperature of the tip sections

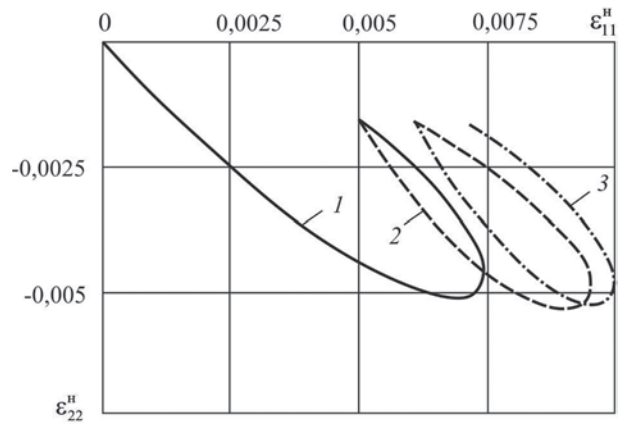


Рисунок 5 — Жаропрочный сплав ВЖ-100.
Расчетная траектория неупругих деформаций
Figure 5 — Heat-resistant alloy VZh-100 (VZh-100).
Calculated trajectory of inelastic deformations

до разрушения на основе критерия Новожилова–Рыбакиной дает 33 цикла, а на основе деформационно-кинетического критерия — 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 2 раза) и завышенное (практически в 5 раз) число циклов до разрушения. Расчет же на основе прикладной теории неупругости удовлетворительно соответствует эксперименту.

Прогнозирование ресурса энергетической установки. Расчеты ресурса материала энергетической установки в наиболее нагруженной точке оболочечной конструкции из конструкционной нержавеющей стали проводились для двух режимов сложного неизотермического нагружения. Законы изменения двух компонент напряжений (мягкое нагружение) и температуры, соответствующие первому режиму показаны на рисунке 6. В данном режиме нагружения конструкция за 1 ч выводится на форсированный режим, длительность которого составляет 1 год, затем за 2 ч уровни напряжений и температуры снижаются и расчет продолжается на номинальном режиме до разрушения материала-

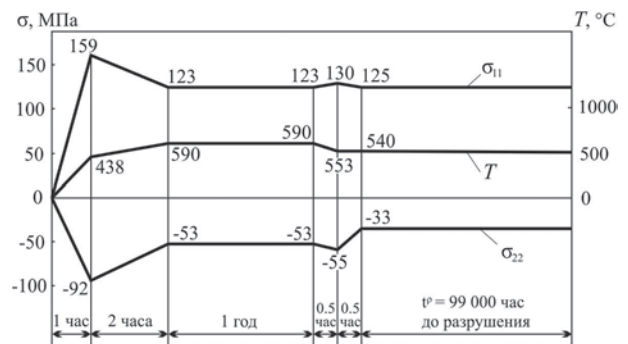


Рисунок 6 — Первый режим нагружения
Figure 6 — The first loading mode

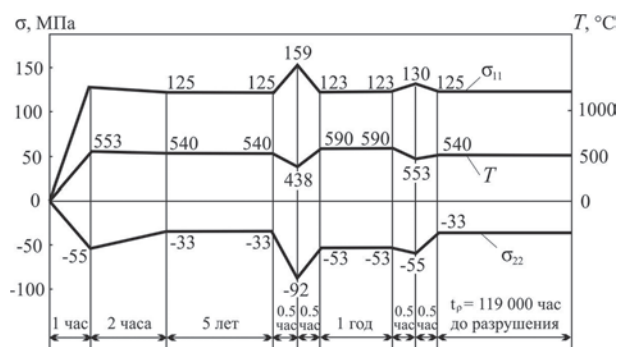


Рисунок 7 — Второй режим нагружения
Figure 7 — The second loading mode

ла конструкции. Суммарное время до разрушения при этом составило 99 000 ч (11,3 года).

Второй режим определяется законами изменения напряжений и температуры, представленными на рисунке 7. Материал конструкции сначала в течение 5 лет находится на номинальном режиме нагружения, затем за 1 ч выводится на форсированный режим, который продолжается 1 год, после чего нагрузки опять соответствуют номинальному режиму. Разрушение материала конструкции наступило через 119 000 ч (13,6 года), т. е. наблюдается существенное увеличение ресурса конструкции.

Из расчетов следует, что накопление повреждения материала носит нелинейный характер и зависит от порядка следования форсированного и номинального режимов. Очевидно, что оценка ресурса по правилу линейного суммирования при нагружениях по законам, изображенным на рисунках 6 и 7, даст одинаковый результат, т. к. они отличаются друг от друга только различным порядком следования форсированного и номинального режимов. Существенная разница во времени до разрушения, полученная по различным программам нагружения, обусловлена нелинейным характером накопления повреждений материала конструкции.

Заключение. Анализируя расчетные и экспериментальные результаты оценки и прогнозирования ресурса материалов и конструкций при повторных и длительных термомеханических нагружениях в условиях неупругого деформирования, можно выделить некоторые особенности нагружений, приводящие к снижению ресурса:

- неизотермичность нагружения накладывает значительную неопределенность 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;
- вывод долгоресурсной установки вначале на форсированный режим существенно снижает ре-

сурс на последующем номинальном режиме по сравнению с выводом на форсированный режим после предварительной работы на номинальном.

Рассматриваемый в настоящей работе прикладной вариант теории неупругости позволяет адекватно прогнозировать ресурс материалов и конструкций при повторном и длительном воздействии термомеханических нагрузок.

Список литературы

1. Бондарь, В.С. Неупругое поведение и разрушение материалов и конструкции при сложном неизотермическом нагружении: дис. ... д-ра физ.-мат. наук / В.С. Бондарь. — М.: Изд-во МАМИ, 1990. — 314 с.
2. Бондарь, В.С. Неупругость. Варианты теории / В.С. Бондарь. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 144 с.
3. Бондарь, В.С. Пластичность. Пропорциональные и непропорциональные нагружения / В.С. Бондарь, В.В. Даншин. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 176 с.
4. Bondar, V.S. Inelasticity. Variants of the theory / V.S. Bondar. — New York: Begell House, 2013. — 194 p.
5. Chaboche, J.L. On the plastic an viscoplastic constitutive equations / J.L. Chaboche, G. Rousselier // J. of Pres. Vessel Techn. — 1983. — Vol. 105, iss. 2. — Pp. 153–164.
6. Chaboche, J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity / J.L. Chaboche // Inter. J. of Plasticity. — 1989. — Vol. 5, iss. 3. — Pp. 247–302.
7. Chaboche, J.L. Thermodynamically based viscoplastic constitutive equations: theory versus experiment / J.L. Chaboche // ASME Winter Annual Meeting, Atlanta, 1991. — Pp. 1–20.
8. Chaboche, J.L. Cyclic viscoplastic constitutive equations / J.L. Chaboche // J. of Applied Mechanics. — 1993. — Vol. 60, iss. 4. — Pp. 813–828.
9. Chaboche, J.L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories / J.L. Chaboche // Int. J. of Plasticity. 2008. — Vol. 24, iss. 10. — Pp. 1642–1693.
10. Качанов, Л.М. Теория ползучести / Л.М. Качанов. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 1960. — 455 с.
11. Ильюшин, А.А. Пластичность. Основы общей математической теории / А.А. Ильюшин. — М.: Изд. АН СССР, 1963. — 271 с.
12. Ильюшин, А.А. Механика сплошной среды / А.А. Ильюшин. — М.: Изд-во МГУ, 1990. — 310 с.
13. Волков, И.А. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями / И.А. Волков, Ю.Г. Коротких. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 424 с.
14. Волков, И.А. Прикладная теория вязкопластичности / И.А. Волков, Л.А. Игумнов, Ю.Г. Коротких. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского гос. ун-та, 2015. — 317 с.
15. Krempl, E. The influence of state of stress on low-cycle fatigue of structural materials: a literature survey and interpretive report / E. Krempl // ASTM. Spec. Techn. Publ. — 1974. — No. 549. — Pp. 1–46.
16. Krempl, E. The Hardening and Dependent Behavior of Fully Annealed AISI Type 304 Stainless Steel Under Biaxial in-Phase and Out-of-Phase Strain Cycling at Room Temperature / E. Krempl, H. Lu // Journal of Engineering Materials and Technology. — 1984. — Vol. 106, iss. 4. — Pp. 376–382.
17. Krieg, R.D. A Practical Two Surface plasticity Theory / R.D. Krieg // Journal of Applied Mechanics. — 1975. — Vol. 42, iss. 3. — Pp. 641–646.
18. Krieg, R.D. A physically based internal variable model for rate-dependent plasticity / R.D. Krieg, J.C. Swearingen, R.W. Rhode // Inelastic behavior of pressure vessel and piping components / ASME/CSME PVP Conference. — 1978. — Pp. 15–28.
19. Constitutive modeling for isotropic materials (HOST). Second annual status report / U.S. Lindholm [et al.] // NASA CR 174980. — 1985. — 185 p.
20. Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. — М.: Машиностроение, 1975. — 400 с.
21. Miller, A.K. A unified approach to predicting interactions among creep, cyclic plasticity, and recovery / A.K. Miller // Nuclear Eng. and Design. — 1978. — Vol. 51, iss. 1. — Pp. 35–43.
22. Miller, K.J. Multiaxial fatigue: a brief review / K.J. Miller, M.W. Brown // Adv. Fract. Res. Proc. 6th Int. Conf., New Delhi, Dec. 4–10, 1984. — Vol. I. — NY: Pergamon Press. — Pp. 31–56.

23. Miller, A.K. NONSS: A new method for integrating unified constitutive equations under complex histories / A.K. Miller, T.G. Tanaka // *J. Eng. Mater. and Technol.* — 1988. — Vol. 110, iss. 3. — Pp. 205–211.
24. Новожилов, В.В. Микронапряжения в конструкционных материалах / В.В. Новожилов, Ю.И. Кадашевич. — Л.: Машиностроение, 1990. — 224 с.
25. Ohno, N. A constitutive model of cyclic plasticity with a non-hardening strain region / N. Ohno // *J. Appl. Mech.* — 1982. — Vol. 49, iss. 4. — Pp. 721–727.
26. Ohno, N. Recent topics in constitutive modeling of cyclic and viscoplasticity / N. Ohno // *Appl. Mech. Rev.* — 1990. — Vol. 43, iss. 11. — Pp. 283–295.
27. Ohno, N. Transformation of a nonlinear kinematics hardening rule to a multisurface form under isothermal and nonisothermal conditions / N. Ohno, J.D. Wang // *Int. Journal of Plasticity.* — 1991. — Vol. 7, iss. 8. — Pp. 879–891.
28. Ohno, N. Kinematics hardening rule with critical state of dynamic recovery N. Ohno, J.D. Wang // *Int. Journal of Plasticity.* — 1993. — Vol. 9, iss. 3. — Pp. 375–403.
29. Работнов, Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций / Ю.Н. Работнов. — М.: Физматгиз, 1966. — 752 с.
30. Нелинейная механика материалов / Ж. Бессон [и др.]. — СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — 397 с.
31. Темис, Ю.М. Моделирование пластичности и ползучести конструкционных материалов ГТД / Ю.М. Темис // Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных научных кадров: материалы 49-й междунар. науч.-техн. конф. ААИ. Школа-семинар «Современные модели термовязкопластичности», Москва / МАМИ. — М., 2005. — Ч. 2. — С. 25–76.
32. Васин, Р.А. Экспериментально-теоретическое исследование определяющих соотношений в теории упругопластических процессов: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Р.А. Васин. — М.: МГУ, 1987. — 36 с.

BONDAR Valentin S., D. Sc. in Phys. and Math., Prof.

Professor of the Department of Technical Mechanics¹

E-mail: tm@mospolytech.ru

ABASHEV Dmitriy R., Ph. D. in Phys. and Math., Assoc. Prof.

Associate Professor of the Department of Technical Mechanics¹

E-mail: tm@mospolytech.ru

¹Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Received 15 July 2021.

LIFETIME OF HIGH-PARAMETER STRUCTURES UNDER REPEATED AND PROLONGED THERMOMECHANICAL INFLUENCES

The article considers the main provisions and equations of the applied theory of inelasticity, which belongs to the class of flow theories under combined hardening. The material functions that close the applied theory of inelasticity are distinguished, and a basic experiment is formulated. The prediction of the material lifetime of structures under non-isothermal cyclic loads is carried out on the basis of the analysis of the durability of the combustion chamber edge of the diesel piston and the uncooled conical nozzle tip during heat changes. Calculated lifetime estimates based on the applied theory of inelasticity are compared with the results of experiments and traditional methods of lifetime estimation. Examples of estimating the lifetime of a structural element of a long-term lifetime power unit are also considered. The loading modes leading to a significant reduction in the lifetime are shown.

Keywords: inelasticity, lifetime, durability, non-isothermal cyclic loads, damage accumulation

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-4-57-20-26>

References

1. Bondar V.S. *Neuprugoe povedenie i razrushenie materialov i konstruktsii pri slozhnom neizotermicheskom nagruzenii*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Inelastic behavior and destruction of materials and structure under complex non-isothermal loading. D. Sc. Thesis]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 1990. 314 p. (in Russ.).
2. Bondar V.S. *Neuprugost. Varianty teorii* [Inelasticity. Variants of the theory]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004. 144 p. (in Russ.).
3. Bondar V.S., Danshin V.V. *Plastichnost. Proportionalnye i neproportionalnye nagruzeniya* [Plasticity. Proportional and disproportionate loads]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2008. 176 p. (in Russ.).
4. Bondar V.S. *Inelasticity. Variants of the theory*. New York, Bell House, 2013. 194 p.
5. Chaboche J.L., Rousellier G. On the plastic and viscoplastic constitutive equations. *Journal of pressure vessel technology*, 1983, vol. 105, iss. 2, pp. 153–164.
6. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *International journal of plasticity*, 1989, vol. 5, no. 3, pp. 247–302.
7. Chaboche J.L. Thermodynamically based viscoplastic constitutive equations: theory versus experiment. *Proc. ASME Winter Annual Meeting*. Atlanta, 1991, pp. 1–20.
8. Chaboche J.L. Cyclic viscoplastic constitutive equations. *Journal of applied mechanics*, 1993, vol. 60, iss. 4, pp. 813–828.
9. Chaboche J.L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories. *International Journal of Plasticity*, 2008, vol. 24, iss. 10, pp. 1642–1693.

10. Kachanov L.M. *Teoriya polzuchesti* [Creep theory]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 1960. 455 p. (in Russ.).
11. Ilyushin A.A. *Plastichnost. Osnovy obshchey matematicheskoy teorii* [Plasticity. Fundamentals of general mathematical theory]. Moscow, AN SSSR Publ., 1963. 271 p. (in Russ.).
12. Ilyushin A.A. *Mekhanika sploshnoy sredy* [Continuum mechanics]. Moskovskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 1990. 310 p. (in Russ.).
13. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. *Urvneniya sostoyaniya vyazkoprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniyami* [Equations of state for damaged viscoelastoplastic media]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2008. 424 p. (in Russ.).
14. Volkov I.A., Igumnov L.A., Korotkikh Yu.G. *Prikladnaya teoriya vyazkoprugoplastichnosti* [Applied theory of viscoplasticity]. Nizhny Novgorod, Nizhegorodskogo gosudarstvennogo universiteta Publ., 2015. 317 p. (in Russ.).
15. Krempl E. *The influence of state of stress on low-cycle fatigue of structural materials: a literature survey and interpretive report*. ASTM Special Technical Publication, no. 549, 1974.
16. Krempl E., Lu H. The hardening and dependent behavior of fully annealed AISI Type 304 stainless steel under biaxial in-phase and out-of-phase strain cycling at room temperature. *Journal of engineering materials and technology*, 1984, vol. 106, iss. 4, pp. 376–382.
17. Krieg R.D. A practical two surface plasticity theory. *Journal of applied mechanics*, 1975, vol. 42, iss. 3, pp. 641–646.
18. Krieg R.D., Swearingen J.C., Rhode R.W. A physically based internal variable model for rate-dependent plasticity. *Inelastic behavior of pressure vessel and piping components*, 1978, pp. 15–28.
19. Lindholm U.S., Chan K.S., Bodher S.R., Weber R.M., Walker K.P., Cassenti B.N. *Constitutive modeling for isotropic materials (HOST)*. Second annual status report, NASA CR 174980, 1985.
20. Malinin N.N. *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti* [Applied plasticity and creep theory]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1975. 400 p. (in Russ.).
21. Miller A.K. A unified approach to predicting interactions among creep, cyclic plasticity, and recovery. *Nuclear engineering and design*, 1978, vol. 51, iss. 1, pp. 35–43.
22. Miller K.J., Brown M.W. Multiaxial fatigue: a brief review. *Advances in fracture research. Proc. 6th International Conference*. New Delhi, 1984, vol. I, pp. 31–56.
23. Miller A.K., Tanaka T.G. NONSS: A new method for integrating unified constitutive equations under complex histories. *Journal of engineering materials and technology*, 1988, vol. 110, iss. 3, pp. 205–211.
24. Novozhilov V.V., Kadashevich Yu.I. *Mikronapryazheniya v konstruktsionnykh materialakh* [Micro-stresses in structural materials]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1990. 224 p. (in Russ.).
25. Ohno N. A constitutive model of cyclic plasticity with a non-hardening strain region. *Journal of applied mechanics*, 1982, vol. 49, iss. 4, pp. 721–727.
26. Ohno N. Recent topics in constitutive modeling of cyclic and viscoplasticity. *Applied mechanics reviews*, 1990, vol. 43, iss. 11, pp. 283–295.
27. Ohno N., Wang J.D. Transformation of a nonlinear kinematics hardening rule to a multisurface form under isothermal and nonisothermal conditions. *International journal of plasticity*, 1991, vol. 7, iss. 8, pp. 879–891.
28. Ohno N., Wang J.D. Kinematics hardening rule with critical state of dynamic recovery. *International journal of plasticity*, 1993, vol. 9, iss. 3, pp. 375–403.
29. Rabotnov Yu.N. *Polzuchest elementov konstruktsiy* [Creep of structural elements]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1966. 752 p. (in Russ.).
30. Besson J., Cailletaud G., Chaboche J.-L., Forest S. *Mécanique non linéaire des matériaux*. Hermès – Lavoisier, 2001. 446 p.
31. Temis Yu.M. Modelirovaniye plastichnosti i polzuchesti konstruktsionnykh materialov GTD [Modeling of plasticity and creep of structural materials of gas turbine engines]. *Priortety razvitiya otechestvennogo avtotraktorostroyeniya i podgotovki inzhenernykh nauchnykh kadrov. Materialy 49 Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii AAI. Shkola-seminar "Sovremennye modeli termovязkoprugoplastichnosti"* [Priorities of development of domestic automotive industry and training of engineering scientific personnel. Proc. 49th International Scientific and Technical Conference of Association of Automotive Engineers. School-seminar "Modern models of thermovisco-plasticity"]. Moscow, 2005, p. 2, pp. 25–76 (in Russ.).
32. Vasin R.A. *Ekspperimentalno-teoreticheskoe issledovanie opredelyayushchikh sootnosheniy v teorii uprugoplasticheskikh protsessov*. Avtoref. diss. d-ra fiz.-mat. nauk [Experimental and theoretical study of the determining relations in the theory of elastic-plastic processes. Extended Abstract of D. Sc. Thesis]. Moscow, 1987. 36 p. (in Russ.).