

На правах рукописи

Кичаев Петр Евгеньевич

**РАЗРАБОТКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕОЛОГИЧЕСКОГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ
ВИБРОПОЛЗУЧЕСТИ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Самара – 2006

Работа выполнена в Самарском государственном техническом университете

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Радченко Владимир Павлович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор Локощенко Александр Михайлович
кандидат физико-математических наук,
доцент Степанова Лариса Валентиновна

Ведущая организация

Институт Гидродинамики СО РАН (г. Новосибирск)

Защита состоится «___» ноября 2006 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 212.218.06 при Самарском государственном университете по адресу: 443011, г. Самара, ул. Академика Павлова, 1, зал заседаний

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Самарского государственного университета

Автореферат разослан «___» октября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Глушников В.С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Рост рабочих параметров и, соответственно, нагруженности деталей машин, работающих в режиме ползучести при нестационарном температурно-силовом воздействии, требует наиболее полного использования прочностных и деформационных свойств материала конструкции. Это делает необходимым дальнейшее совершенствование расчетных методов, в частности, определяющих соотношений, связывающих внешние температурно-силовые воздействия и деформационные свойства материала, с учетом в них реальных условий работы деталей. Построение таких определяющих соотношений является важным направлением научных исследований механики деформируемого твердого тела.

Реальные условия работы деталей машин сопровождаются вибрационным фоном (вибронагрузкой), который в расчетах часто не учитывается, хотя по известным литературным данным существенно влияет на накопление деформаций ползучести, а, следовательно, и на долговечность конструкции. Именно в таких условиях работают такие промышленные объекты, как диски и лопатки двигателей летательных аппаратов, нефте- и продуктопроводы в нефтехимической промышленности (из-за пульсаций давления), элементы автотранспортной техники (из-за вибраций), здания и сооружения (например, от ветровых, сейсмических и других нагрузок) и многие другие промышленные установки. Поэтому проблема учета в расчетах вибрации, наложенной на статическую нагрузку в условиях повышенных температур, имеет большой научный и практический интерес. Актуальность разработки соответствующих математических моделей не вызывает сомнений.

Цель диссертации. Разработка феноменологической модели виброползучести, позволяющей описывать реологическое деформирование и разрушение конструкционных материалов при совместном действии квазистатических и циклических напряжений. Применение полученных зависимостей для решения некоторых краевых и технологических задач при оценке ресурса элементов конструкций.

Научная новизна.

1. Выполнен системный анализ существующих экспериментальных данных по виброползучести материалов и обоснован энергетический подход к построению соответствующей феноменологической модели виброползучести.

2. На основе энергетической концепции разработана феноменологическая реологическая модель и предложен критерий разрушения конструкционных материалов в условиях виброползучести для сложного напряженного состояния.

3. Получены экспериментальные данные по виброползучести для ряда структурно-стабильных сплавов (ЭИ698, ЭП742 и ВТЗ-1), на основании

которых выполнена проверка адекватности предложенной модели виброползучести.

4. Представлены методики решения краевых задач о напряженно-деформированном состоянии (НДС) валов и дисков в режиме виброползучести и показано, что вибрация ускоряет процесс деформирования и является причиной снижения ресурса по сравнению с квазистатической ползучестью.

5. Теоретически обоснована технология наведения остаточных напряжений в элементах конструкций в режиме виброползучести.

Практическая значимость работы. Разработанная на основании термодинамического подхода модель виброползучести в теоретическом плане обобщает существующие реологические модели квазистатической ползучести и длительной прочности и позволяет на стадии проектирования научно обоснованно учитывать влияние вибрации при определении НДС элементов конструкций, а также на их долговечность и длительную прочность. Предложена и реализована методика решения технологических задач по наведению остаточных напряжений виброползучестью в гладких валах и балках, что вносит определенный вклад в расширение методик повышения их ресурса.

Определенный интерес для экспериментальной практики представляют разработанные приспособления, позволяющие на стандартном оборудовании производить испытания на одноосное растяжение в режиме виброползучести, а также на квазистатическое растяжение и знакопеременный изгибающий момент. Экспериментально получены кривые виброползучести сплава ЭИ698 при температурах 700 °С, 750 °С и 775 °С; сплава ЭП742 при температурах 700 °С и 750 °С; сплава ВТ3-1 при температуре 450 °С; частота циклической компоненты напряжения составляла 50 Гц.

Обоснованность выносимых на защиту научных положений, выводов и рекомендаций, а также достоверность полученных результатов исследований подтверждается:

- адекватностью модельных представлений реальному поведению материалов в условиях виброползучести;
- корректностью использования математического аппарата, законов механики деформируемого твердого тела;
- апробированностью применяемых численных методов и сопоставлением расчетных данных экспериментальным данным;
- точностью и достоверностью опытных данных, которые обеспечивались регламентированным (по ГОСТ) использованием экспериментальной техники и методики обработки данных.

На защиту выносятся:

1. Энергетическая модель реологического деформирования и разрушения металлических материалов в условиях виброползучести и методика идентификации ее параметров.

2. Методика и результаты испытания на виброползучесть сплавов ЭИ698, ЭП742, ВТЗ-1.

3. Методика наведения остаточных напряжений в валах и балках в режиме виброползучести при квазистатическом растяжении и знакопеременном изгибающем моменте (численный эксперимент, результаты испытаний).

4. Анализ НДС и долговечности деталей с концентратором при предварительном неупругом деформировании в режимах упругопластического нагружения, ползучести и виброползучести.

5. Методика и результаты расчета диска турбины ГТД с дефлектором и экраном обода с учетом вибраций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5-ти глав, заключения и списка использованных источников из 113-ти наименований. Работа содержит 127 страниц машинописного текста.

Апробация работы. Результаты научных исследований опубликованы в 8 печатных работах и докладывались на Международном симпозиуме «Механика разрушения материалов и конструкций» (г. Августов, Польша, 2001г.), на Второй Всероссийской научной конференции «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 2005 г.), на Шестом Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной математике (г. Сочи, 2005 г.), на Всероссийской конференции по проблемам механики (г. Миасс, 2005), на Третьей Всероссийской научной конференции «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 2006 г.), на Седьмом Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной математике (г. Кисловодск, 2006 г.) .), на научных семинарах «Прикладная математика и механика» кафедры «Прикладная математика и информатика» СамГТУ (руководитель д.ф.-м.н., профессор Радченко В.П., 2003-2006 г.г.).

Работа выполнялась в рамках межвузовского плана госбюджетных НИР по научному направлению «Механика», утвержденного Министерством образования Российской Федерации на 1998-2003 гг. (тема «Надежность механических систем в промышленности, энергетике и на транспорте»), плана НИР СамГТУ (тема «Разработка методов математического моделирования динамики и деградации процессов в механике сплошных сред, технических, экономических, биологических и социальных системах и методов решения неклассических краевых задач и их приложений»), а также министерского гранта Самарской области для молодых ученых (СамГУ, шифр 3.11)

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю профессору, д.ф.-м.н. В. П. Радченко за постоянное внимание к работе. Большую помощь при выполнении диссертационной работы оказала лабораторная экспериментальная база, предоставленная в свое время автору профессором, д.т.н. Ю. А. Ереминым.

Краткое содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определяются цели исследования, излагаются научная новизна и практическая значимость работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации работы и публикациях.

Глава 1. Аналитический обзор и постановка задачи исследований

В главе 1 дан обзор литературы по научным проблемам, близким к теме диссертации, и проведен анализ экспериментальных данных поведения конструкционных материалов при совместном действии ползучести и усталости; представлен анализ феноменологических моделей деформирования и разрушения материалов при виброползучести.

В **пункте 1.1** представлены основные экспериментальные данные по поведению конструкционных материалов при совместном действии ползучести и усталости. Анализ работ отечественных и зарубежных авторов, посвященных исследованию виброползучести, показал, что поведение материалов в этих условиях не поддается описанию обычными классическими подходами с точки зрения неустановившейся ползучести или усталости при несимметричном цикле. Поведение материалов в условиях виброползучести отличается большим разнообразием и зависит от многих факторов, из которых основными являются величины статической (σ_m) и циклической (σ_a) компонент напряжения, частоты (f) и температуры (T), а также фазовое состояние, что подтверждено экспериментальными данными таких авторов, как Видаль Дж., Голуб В.П., Захарова Т.П., Кеннеди А. Дж., Локощенко А. М., Мякотин Е. А., Трощенко В. Г., Цимбалистый Я. И., Шестериков С. А., Jonson A. E., Greenwood T. N., Guarnieri G. T., Lasan B. J., Manjoine M. I., Meleca A. H., Vitovec F. N., и др.

В **пункте 1.2** приведен анализ феноменологических моделей деформирования и разрушения материалов при виброползучести (Видаль Дж., Голуб В. П., Кеннеди А. Дж., Лазан Б. Д., Локощенко А. М., Работнов Ю. Н., Радченко В. П., Тайра С., Шестериков С. А. и др.), который показал, что их можно классифицировать по следующим концепциям:

1. Введение приведенного напряжения, равного такому статическому, при котором долговечность в режиме статической ползучести совпадает с долговечностью в режиме виброползучести. Согласно предлагаемому подходу постулируется подобие кривых ползучести и виброползучести, что не всегда согласуется с экспериментальными данными.

2. Описание ползучести при циклически изменяющемся напряжении. В этом случае рассматривается поведение деформации в каждом цикле. Недостатком этого подхода является неучет поврежденности от усталости и отсутствие частоты нагружения в определяющих соотношениях.

3. Феноменологические модели, базирующиеся на гипотезе аддитивности параметров поврежденности от усталости и статической ползучести и принципе линейного (нелинейного) суммирования повреждений.

4. Кинетическая концепция виброползучести, которая строится на основе известных теорий ползучести (старения, течения и упрочнения и др.) и является следствием механического уравнения состояния Работнова – Качанова.

Вопросам конкретизации уравнения состояния для различных условий и материалов посвящены работы Голуба В. П., Лазана Б. Д., Локощенко А. М., Серенсена С. В., Трощенко В. Г. и др. Отметим, что при этом возможна оценка повреждаемости материала и прогноз времени разрушения для нестационарного нагружения при взаимодействии ползучести и усталости. Когда же требуется оценка напряженно-деформированного состояния конструкции, то необходим конкретный концептуальный подход. Одним из возможных подходов является энергетический вариант.

5. Энергетический (работы Соснина О. В., Никитенко А. Ф., Горева Б. В., Радченко В. П., Кичаева Е. К., Симонова А. В. и др.) и примыкающий к нему термодинамический (Киялбаев Д. А., Федоров В. В., Чудновский А. И. и др.) подходы дают приемлемые результаты для структурно-устойчивых материалов, в которых удельная работа рассеяния характеризует эквивалентные состояния с момента приложения нагрузки вплоть до разрушения. По результатам обзора литературных данных сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Глава 2. Разработка энергетической модели деформирования и разрушения материалов в условиях виброползучести и методики идентификации ее параметров

В пункте 2.1 представлено уравнение состояния и критерий разрушения материалов в условиях виброползучести. Неупругая деформация принята в виде суперпозиции пластической деформации, деформации ползучести и виброползучести. В параметр поврежденности дополнительно введено слагаемое, основанное на гипотезе о том, что поврежденность от усталости за цикл нагружения пропорциональна подведенной упругой работе истинных амплитудных напряжений за цикл. Определяющие кинетические соотношения при постоянной температуре в самом общем виде записываются следующим образом:

$$\Phi(\sigma_{ij}^m, \sigma_{ij}^a, p_{ij}, e_{ij}^p, q_1, q_2, \dots, q_n, \omega) = 0, \quad (1)$$

$$dq_k = a_{rs}^k dp_{rs} + b_{rs}^k de_{rs}^p + c_{rs}^k d\sigma_{rs} + d^k dt, k = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

$$d\omega = \gamma(E_2) \sigma_{ij}^m de_{ij}^p + \alpha(S_{m_0}) \sigma_{ij}^m dp_{ij} + g_1(S_{m_0}, S_{a_0}, f) \frac{1}{2} \sigma_{ij}^a e_{ij}^a dN, \quad (3)$$

где e_{ij}^p и p_{ij} – тензоры деформаций пластичности и ползучести; σ_{ij}^m – тензор истинных напряжений от квазистатических нагрузок, а σ_{ij}^a – истинные амплитудные напряжения от циклических нагрузок, связанные с соответствующими номинальными напряжениями соотношениями:

$$\sigma_{ij}^m = \sigma_{ij}^{m_0} (1 + \omega), \quad (4)$$

$$\sigma_{ij}^a = \sigma_{ij}^{a_0} (1 + \omega); \quad (5)$$

e_{ij}^a – упругие деформации, соответствующие тензору σ_{ij}^a :

$$e_{ij}^a = \frac{1 + \nu}{E} \left[\sigma_{ij}^a - \frac{\nu}{1 + \nu} \sigma_{kk}^a \delta_{ij} \right]; \quad (6)$$

ν , E – коэффициент Пуассона и модуль Юнга; $N = ft$ – число циклов нагружения; E_2 – интенсивность пластических деформаций; S_{m_0} , S_{a_0} – интенсивность напряжений для номинальных тензоров $\sigma_{ij}^{m_0}$, $\sigma_{ij}^{a_0}$ соответственно; ω – параметр поврежденности; q_k ($k = \overline{1, n}$) – структурные параметры упрочнения; $\gamma(E_2)$, $\alpha(S_{m_0})$, $g_1(S_{m_0}, S_{a_0}, f)$ – функции, определяемые из эксперимента; Φ – дифференциальный, интегральный или интегро-дифференциальный оператор.

Критерий разрушения получен из термодинамических соображений, согласно которым критическая величина плотности внутренней энергии не зависит от процесса нагружения и является константой материала, и в частном случае при $T = \text{const}$ и $f = \text{const}$ принимает вид:

$$\int_0^{t_*} \frac{\sigma_{ij}^m de_{ij}^p}{A_*^p} + \int_0^{t_*} \frac{\sigma_{ij}^m dp_{ij}}{A_*^c(S_{m_0})} + \int_0^{t_*} \frac{u^y dN}{A_*^y(S_{m_0}, S_{a_0})} = 1. \quad (7)$$

где A_*^p , $A_*^c(S_{m_0})$ и $A_*^y(S_{m_0}, S_{a_0})$ – критические величины работ на деформациях пластичности, ползучести и усталости соответственно; u^y – потенциальная энергия упругих деформаций от амплитудных напряжений σ_{ij}^a .

Таким образом, реологическая модель неупругого деформирования и разрушения материалов в условиях виброползучести состоит из системы уравнений (1) – (7). В настоящей работе конкретизация операторов (1) – (2) для одноосного напряженного состояния принята в виде следующей модели (Самарин Ю. П., Радченко В. П.):

$$\varepsilon = e + e^p + p, \quad \dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E}, \quad \dot{e}^p = \begin{cases} 0, & \sigma(t) \leq \sigma_{np}; \\ \lambda [S(\sigma) - e^p(t)], & S(\sigma) > e^p(t), \\ 0, & S(\sigma) \leq e^p(t), \sigma(t) > \sigma_{np}; \end{cases}$$

$$p = u + v + w;$$

$$u(t) = \sum_{k=1}^s u_k(t), \quad \dot{u}_k(t) = \lambda_k \left[a_k \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma_*} \right)^{n_1} - u_k(t) \right];$$

$$v(t) = \sum_{k=1}^s v_k(t); \quad \dot{v}_k = \begin{cases} \lambda_k \left[b_k \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma_*} \right)^{n_1} - v_k(t) \right], & b_k \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma_*} \right)^{n_1} > v_k(t), \\ 0, & b_k \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma_*} \right)^{n_1} \leq v_k(t); \end{cases}$$

$$\dot{\omega}(t) = c \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma_*} \right)^m, \quad (8)$$

$$\sigma = \sigma_0(1 + \omega), \quad (9)$$

$$\sigma_a = \sigma_{a_0}(1 + \omega), \quad (10)$$

$$\dot{\omega} = \gamma(e^p) \sigma \dot{e}^p + \alpha(\sigma_0) \sigma \dot{p} + g_1(\sigma_0, \sigma_{a_0}, f) \frac{\sigma_a^2}{2E} \dot{N} \quad (11)$$

где ε – полная деформация; e и e^p – упругая и пластическая деформации; p – деформация ползучести; u, v, w – вязкоупругая, вязкопластическая и вязкая составляющие p (соответственно); σ_0 и σ – номинальное и истинное напряжения (соответственно); E – модуль Юнга; $\lambda_k, a_k, b_k, c, n, m, \sigma_*$ – реологические константы материала, при помощи которых описываются первая и вторая стадии ползучести и ее обратимая часть; ω – параметр поврежденности; α и γ – параметры материала, контролирующие процессы разупрочнения; σ_{np} – предел пропорциональности, λ – константа, при этом $\lambda \gg \max_k \{\lambda_k\}$.

Критерий разрушения (7) в одноосном случае ($T = \text{const}, f = \text{const}$) принимает вид

$$\int_0^{t_*} \frac{\sigma de^p}{A_*^p} + \int_0^{t_*} \frac{\sigma dp}{A_*^c(\sigma_0)} + \frac{1}{2E} \int_0^{t_*} \frac{\sigma_a^2 dN}{A_*^y(\sigma_0, \sigma_{a_0})} = 1 \quad (12)$$

В пункте 2.2 приведена методика идентификации параметров энергетической модели виброползучести. Для идентификации параметров предложенной модели в качестве базовых используются следующие одномерные экспериментальные данные:

- диаграмма растяжения материала при постоянной достаточно высокой (максимально возможной для испытательной машины) скорости деформирования;

- серия кривых стационарной ползучести от начала нагружения до момента разрушения при $\sigma_0 = \text{const}$ и $\sigma_{a_0} = 0$;

- серия кривых стационарной циклической ползучести (виброползучести) от начала нагружения до момента разрушения при $\sigma_0 = \text{const}$, $\sigma_{a_0} = \text{const}$, $f = \text{const}$.

В пункте 2.3 приведена модель деформирования и разрушения материалов при циклической ползучести для сложного напряженного состояния. В работе приняты следующие допущения:

- гипотеза несжимаемости пластической деформации и вязкопластической компоненты деформации ползучести;

- расчет пластической и вязкопластической деформации осуществляется в главных осях;

- тензоры напряжений и деформаций соосны.

Для обобщения на случай виброползучести в качестве базового использовался разработанный Самариным Ю. П. и Радченко В. П. энергетический вариант ползучести и длительной прочности для условий квазистатического нагружения. Отмечается, что построение модели для описания неупругой деформации при сложном напряженном состоянии и критерия разрушения не требует дополнительных экспериментальных затрат, так как все параметры модели определяются по результатам одноосных испытаний по методике, изложенной в пункте 2.2.

Глава 3. Экспериментальные и расчетные исследования деформирования и разрушения материалов при совместном действии статических и циклических напряжений.

Проверка адекватности предложенной модели деформирования и разрушения в условиях циклической ползучести произведена специально спланированными экспериментальными исследованиями для сплавов ЭИ698, ЭП742 и ВТ3-1 при одноосном напряженном состоянии. Все испытания проводились на унифицированных образцах с отношением начальной длины (50 мм) к диаметру (5 мм) равным 10. Разработана специальная геометрия головок образца, чтобы обеспечить его надежное и жесткое крепление в захватах. Вибронагрузка создавалась инерционным механическим вибратором направленного действия. Вибратор представляет собой одноступенчатый редуктор с двумя одинаковыми цилиндрическими зубчатыми колесами, имеющими дисбалансы, вращение которых осуществляется в противофазе. При этом создается циклическая нагрузка частотой 50 Гц, изменяющаяся по синусоидальному закону в направлении оси образца. Изменение величины переменного усилия достигалось путем замены дисбалансов. Статическое усилие создавалось системой рычагов с навесными грузами, при этом максимальное напряжение могло быть 1500 МПа, для циклической компоненты – $\sigma_{a_{max}} < 150$ МПа. Для сплава ЭИ698 испытания проводились при трех уровнях температур: 700, 750, 775 °С; сплава ЭП742: T=650, 750 °С, а сплава ВТ3-1 – T=450 °С. Температура обеспечивалась трехсекционной муфельной печью, управляемой высокоточным регулятором температуры ВРТ-3. Замер температуры производился тремя платино-платино-радиевым термомпарами ПП. Разброс ее по длине образца не превышал $\pm 1,5$ °С.

Измерение деформации испытуемого образца производилось по перемещению двух пар экстензометров с помощью электромагнитной системы замера линейных перемещений. Значение деформации ползучести записывались на потенциометр КСП-4. Точность измерения составляли ± 1 мкм. Амплитудное значение деформаций фиксировалась на осциллографе типа С1-83. Заготовки образцов для сплавов ЭИ698 и ЭП742 вырезались из дисков роторов газотурбинных двигателей и обрабатывались по штатной технологии. Образцы из сплава ВТ3-1 вытачивались из прутка. На

каждом из режимов испытывалось по три образца, затем данные испытаний усреднялись. Программа испытаний включала нижеследующие этапы.

1. Испытания на растяжение для получения кривых мгновенного упругопластического деформирования. Согласно ГОСТ 1497-73 скорость активного захвата составляла 24 l_0 /час. В качестве меры использовалась логарифмическая деформация.

2. Испытания на стационарную ползучесть при $\sigma_{m_0} = \text{const}$ и $T = \text{const}$ для определения реологических коэффициентов.

3. Испытания на виброползучесть при $\sigma_{m_0} = \text{const}$ и $T = \text{const}$; $\sigma_{a_0} = \text{const}$ и определение параметров по методике, описанной во второй главе.

Необходимо отметить, что только для сплава ЭП742 проведен полный факторный эксперимент, который предполагает результаты испытаний для не менее двух уровней σ_{m_0} , T и σ_{a_0} . Для сплава ЭИ698 экспериментальные данные получены для одного уровня σ_{m_0} и разных значений T и σ_{a_0} . Для сплава ВТЗ-1 при одном уровне σ_{m_0} и температуры T испытания проводились для двух уровней σ_{a_0} .

4. Адекватность предложенных определяющих соотношений произво-

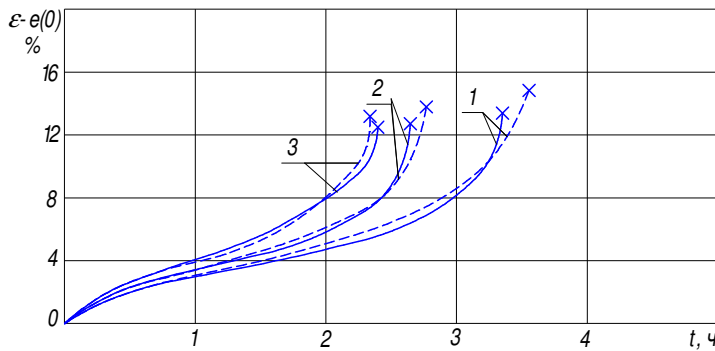


Рис.1 Расчетные (пунктирные линии) и экспериментальные (сплошные линии) кривые виброползучести сплава ЭП742 при $T=750$ °С и $\sigma_{m_0} = 580$ МПа:

1 – $\sigma_{a_0} = 0$; 2 – $\sigma_{a_0} = 25$; 3 – $\sigma_{a_0} = 50$ МПа.;

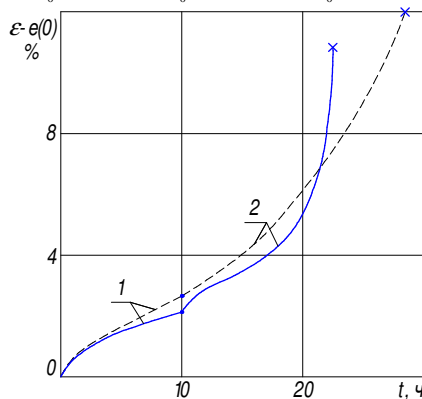


Рис. 2 Кривая виброползучести сплава ЭП 742 при $T=750$ °С и $\sigma_{m_0} = 580$ МПа:

1 – $\sigma_{a_0} = 0$; 2 – $\sigma_{a_0} = 50$ МПа; x – разрушение

дидась при сравнении прогноза и экспериментальных данных при ступенчатом изменении статической и циклической компонент нагружения.

На рис. 1–3 приведены типичные экспериментальные и расчетные по модели (1) – (12) кривые виброползучести для сплавов ЭП 742 при $T=750$ °С как при $\sigma_{m_0} = \text{const}$ и $\sigma_{a_0} = \text{const}$, так и при ступенчатом изменении статической и циклической компонент нагружения.

Приведенные примеры (рис. 1 – 3) показывают хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных.

Анализ экспериментальных данных позволяет выделить два основ-

ных эффекта циклической ползучести для всех трех испытанных сплавов при выбранных режимах испытаний: ускорение процесса ползучести и уменьшение накопленной неупругой деформации в момент разрушения по сравнению с квазистатической ползучестью. Кроме того, как следует из экспериментальных данных, наложение циклических напряжений на квазистатическую составляющую интенсифицирует вязкую компоненту деформации ползучести (вторую стадию ползучести), практически не влияя на вязкопластическую составляющую (первую стадию ползучести).

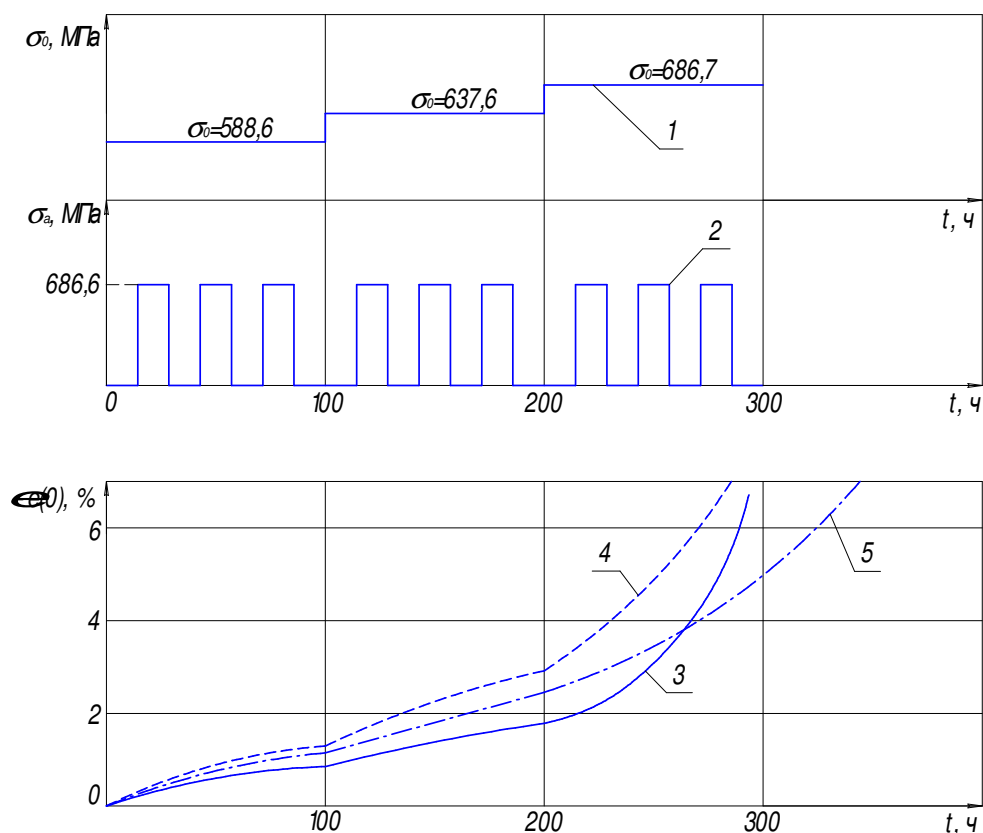


Рис. 3 Программа нагружения (1 – статическая, 2 – циклическая компоненты) и кривые неупругой деформации при циклической ползучести сплава ЭП 742 при $T=650$ °С (3 – эксперимент; 4 – расчет по модели при заданных законах σ_0 , σ_{a_0} ; 5 – расчет по модели при заданном законе σ_0 и $\sigma_{a_0}=0$).

Глава 4. Некоторые технологические задачи в режиме виброползучести

В данной главе рассматриваются некоторые математические модели и краевые задачи технологических процессов в режиме неупругого реологического деформирования (включая виброползучесть), позволяющие создавать «благоприятное» (начальное) поле остаточных напряжений.

В пункте 4.1 приведена методика наведения остаточных напряжений в валах и балках в режиме предварительной виброползучести с целью повышения их выносливости. Методика проиллюстрирована на примере вращающегося вала круглого сечения под действием квазистатического

растягивающего усилия и знакопеременного изгибающего момента. Краевая задача решается численно путем разбиения вала на n концентрических колец, в каждом из которых в любой момент времени напряжение считается неизменным, а при переходе к соседнему кольцу оно меняется скачком. Задача виброползучести решается известным в теории ползучести методом – «шагами» по времени.

Анализ численных решений для круглого вала и балки прямоугольного сечения из сплава ЭП742 при $T=750$ °С показал, что глубина проникновения сжимающих остаточных напряжений составляет до 30% от радиуса вала или поперечного сечения балки. Подобная глубина не может быть получена ни какими другими методами термомеханического упрочнения. Провести экспериментальную проверку полученных полей остаточных напряжений достаточно сложно. Однако это можно сделать косвенно, установив факт ускорения ползучести в осевом направлении при наложении знакопеременных изгибных напряжений. Проверка этого факта произведена на усталостной машине УВМ, оснащенной дополнительным устройством, создающим во вращающемся вале кроме чистого знакопеременного изгиба статическую осевую нагрузку. Как и прогнозировалось, результаты испытаний валов из сплава ЭП742 показали ускорение ползучести при наложении циклической изгибной компоненты. Аналогичный алгоритм применим и для оценки НДС балки.

В пункте 4.2 представлены результаты анализа влияния предварительного неупругого деформирования в виде мгновенных пластических деформаций, деформаций ползучести и виброползучести на дальнейшую долговечность деталей с концентратором. Рассмотрен концентратор в виде круговой выточки с коэффициентом концентрации 2,2. Работа проводилась в два этапа. На первом этапе определялось НДС в зоне концентратора при различных значениях неупругих деформаций методом конечных элементов. Необходимо отметить, что перераспределение напряжений при ползучести происходит при значительно меньших напряжениях по сравнению с мгновенным пластическим деформированием. Вторым этапом являлась экспериментальная оценка влияния предварительного неупругого деформирования на выносливость образцов с концентратором их сплавов ЭП742 и ВТЗ-1. В таблице представлены результаты сравнительных испытаний образцов с концентратором.

Режимы упрочнения		Пластичность $R = 0,25 R^*$	Ползучесть $R = 0,25 R^*$	Виброползучесть $R = 0,25 R^*$
Увеличение предела выносливости, %	ВТЗ-1	15,6	18,3	14,2
	ЭП742	19,4	4,92	0
R^* – ресурс пластичности				

Глава 5. Расчет неупругого реологического деформирования диска турбины с дефлектором и экраном обода при совместном действии квазистатических и циклических нагрузок.

В пункте 5.1 представлена постановка задачи для расчета НДС диска газотурбинного двигателя с дефлектором и экраном обода с двумя видами концентраторов в виде круговой выточки между диском и дефлектором, а также выточки в теле диска.

В пункте 5.2 рассмотрены примеры решения задачи в упругой и упруго-пластической областях и проведен анализ НДС диска.

В пункте 5.3 представлено решение задачи в области неупругого реологического деформирования, при этом приведены алгоритмы решения задач пластичности, ползучести и виброползучести, а также сравнительные результаты расчета конкретного диска из сплава ЭП742.

Анализ результатов расчета НДС диска показал, что наложение вибрационных нагрузок незначительно меняет его характер. В то же время вибрация ускоряет процесс деформирования диска и служит причиной снижения его ресурса по сравнению с результатами прогноза его долговечности в режиме квазистатической ползучести.

Основные результаты выполненных исследований состоят в следующем:

1. С термодинамических позиций предложен и обоснован критерий разрушения материалов в условиях циклической ползучести (виброползучести) для одноосного и сложного напряженных состояний.

2. Предложена реологическая модель неупругого деформирования разупрочняющихся сред в условиях совместного действия статических и циклических нагрузок и методика идентификации ее параметров.

3. Разработана и реализована методика наведения остаточных напряжений в поверхностных слоях гладких валов и балок в условиях виброползучести.

4. Произведен численный эксперимент для выявления закономерностей перераспределения напряжений и деформаций в зоне концентратора типа круговой выточки при наведении остаточной деформации (и остаточных напряжений) пластичностью, ползучестью и виброползучестью, реализованный методом конечного элемента, и влияния созданных полей на долговечность образца.

5. Модифицирована методика расчета НДС диска газовой турбины с дефлектором в режимах ползучести и виброползучести и выполнен анализ полученных результатов, который показал, что виброползучесть практически не изменяет характера поля напряжений, однако существенно интенсифицирует процесс ползучести в материале диска.

Основные результаты диссертации, опубликованные в рецензируемых сборниках:

1. *Кичаев, П. Е.* Влияние предварительного неупругого деформирования на выносливость деталей с концентратором напряжений [Текст] / П. Е. Кичаев // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. «Физ.-мат. науки»*. — 2003. — № 19. — С. 173–176.

2. *Кичаев, П. Е.* Вариант термодинамического критерия разрушения материала в условиях виброползучести [Текст] / В. П. Радченко, П. Е. Кичаев // *Обозрение прикладной и промышленной математики* / Мат. Шестого Всерос. симп. по прикладной и промышленной математике. — М.: ОПиПМ. — 2005. — Т. 12, Вып. 3. — С. 762–763. (авт. 1 с.).

3. *Кичаев, П. Е.* Моделирование и анализ напряженно-деформированного состояния концентратора напряжения в условиях реологического деформирования при квазистатическом и циклическом нагружении [Текст] / П. Е. Кичаев // *Обозрение прикладной и промышленной математики* / Мат. Шестого Всерос. симп. по прикладной и промышленной математике. — М.: ОПиПМ. — 2005. — Т. 12, Вып. 3. — С. 496.

4. *Кичаев, П. Е.* Уравнения состояния и критерий разрушения материалов в условиях циклической ползучести [Текст] / В. П. Радченко, П. Е. Кичаев, В.С. Гагаринский // *Известия вузов. Машиностроение*. — 2006. — № 5. — С. 9–18. (авт. 6 с.).

В других сборниках:

5. *Кичаев, П. Е.* Виброползучесть как способ наведения остаточных напряжений [Текст] / Ю. А. Еремин, П. Е. Кичаев // *Механика разрушения материалов и конструкций. Тр. междунар. конф. (Августов, Польша)* — Августов, 2001. — С. 179–183. (авт. 3 с.).

6. *Кичаев П. Е.* Экспериментальное исследование неупругого деформирования сплавов ЭИ698, ЭП742 и ВТЗ-1 в режимах пластичности, ползучести и виброползучести [Текст] / Е. К. Кичаев, П. Е. Кичаев // *Тр. Всерос. конф. по проблемам механики*. — Миасс, 2005. — С. 235–243. (авт. 4 с.).

7. *Кичаев П. Е.* Сравнительный анализ теории накопления повреждаемости материалов при ползучести [Текст] / П. Е. Кичаев // *Мат. Моделирование и краевые задачи. Тр. Второй Всерос. научной конф.* — Ч. 1. — Самара: СамГТУ, 2005. — С. 149–151.

8. *Кичаев П. Е.* Приспособление для испытания образцов на виброползучесть [Текст] / П. Е. Кичаев // *Мат. моделирование и краевые задачи. Тр. Третьей Всерос. научной конф.* — Ч. 1. — Самара: СамГТУ, 2006. — С. 102–105.

Подписано в печать « 03 » октября 2006 г.
Заказ № 1496. Тираж 100 экз. Отпечатано на ризографе.
Самарский государственный технический университет.
Отдел типографии и оперативной полиграфии.
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244