

На правах рукописи

Овсянкин Евгений Юрьевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
КОНСТРУКЦИЙ В КОНТАКТНЫХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧАХ
ПОЛЗУЧЕСТИ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

САМАРА – 2004

Работа выполнена на кафедре «Прикладная математика и информатика» Самарского государственного технического университета

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор Радченко Владимир Павлович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Клебанов Яков Мордухович
доктор физико-математических наук,
профессор Никитенко Анатолий Федорович

Ведущая организация:

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН
(г. Комсомольск-на-Амуре)

Защита состоится « 23 » декабря 2004 г. в 10 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 « 23 » ноября 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Глушеников В.С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Повышение требований к качеству, надежности, эксплуатационному ресурсу и снижению веса современных элементов конструкции требует от механики деформируемого твердого тела развития методов расчета, позволяющих максимально использовать все прочностные свойства материалов. В связи с этим обстоятельством круг решений краевых задач для ответственных элементов конструкций с учетом деформации ползучести и критериев длительной прочности постоянно расширяется. Кроме этого, явление ползучести широко используется в технологических процессах формоизменения (формообразования) элементов конструкций в обработке металлов давлением (ОМД) в медленных режимах деформирования, причем эти процессы в основном применяют на стадии изготовления деталей. Однако существует ряд задач формоизменения (восстановления геометрических размеров) контактирующих элементов конструкций, уже выработавших свой назначенный ресурс (например, недопустимо большая величина зазора между цилиндрическими парами трения), которые также могут быть решены в режиме ползучести. Создание технологий такого рода должно базироваться на научно-обоснованной платформе, основой которой является разработка методов решения контактных краевых задач для пар трения в режиме ползучести со смешанными кинематическими и силовыми граничными условиями.

Кроме этого требует решения ряд практически важных задач, когда кинетика формоизменения элементов конструкций в условиях ползучести (длящаяся до десятка лет и более) происходит в процессе эксплуатации, причем внешние условия близки по форме к условиям деформирования в режимах обработки металлов давлением: с точки зрения механики – «жестким» образом заданы кинематические граничные условия.

К такого рода конструкциям относятся узлы уплотнений элементов конструкции энергетического оборудования, являющиеся одновременно и узлами трения.

Вышеизложенное и определяет актуальность рассматриваемой в диссертации проблемы.

Целью настоящей работы является разработка методов исследования формоизменения контактирующих элементов конструкций (цилиндрические пары, узлы уплотнения) в условиях ползучести на основе решений контактных краевых задач и феноменологических реологических уравнений.

Научная новизна.

1. Получены решения контактных краевых задач ползучести при смешанных граничных условиях для цилиндрических тел в квадратурах.
2. Разработаны математические модели формоизменения (восстановления геометрических размеров) выработавших свой ресурс цилиндрических элементов конструкций в режиме ползучести.
3. Выполнено экспериментальное исследование реологических характеристик новых материалов (резина 2167, армирующий материал, армирован-

ная резина 2167), на их основе построены соответствующие феноменологические реологические модели и выполнена проверка их адекватности экспериментальным данным.

4. Решена контактная краевая задача ползучести (старения) для манжетного узла уплотнения из чистой и армированной (с различной структурой армирования) резины, на основе которой разработана методика оценки его остаточного ресурса в условиях ползучести (старения) на основе критерия герметичности (величины нормальных контактных напряжений).

На защиту выносятся следующие положения.

1. Решения контактных краевых задач ползучести для цилиндрических тел и схемы формоизменения (восстановления геометрических размеров) в режиме ползучести выработавших ресурс цилиндрических пар трения.

2. Феноменологические реологические модели ряда материалов (резина 2167, армирующий материал) и проверка их адекватности экспериментальным данным (растяжение-сжатие, изгиб пластин в двух плоскостях симметрии) для армированных образцов.

3. Решение контактной краевой задачи ползучести (старения) для манжетного узла уплотнения из чистой и армированной резины со смешанными граничными условиями.

4. Методика оценки остаточного ресурса манжетного уплотнения в условиях ползучести (старения) на основе критерия герметичности (величины нормальных контактных напряжений).

Практическая значимость работы в теоретическом плане заключается в решении контактных краевых задач ползучести для цилиндрических элементов конструкций и узла уплотнения (гидроагрегата), что вносит определенный вклад во внутреннюю завершенность соответствующего раздела механики деформированного твердого тела – формоизменения (формообразования) элементов конструкции в условиях ползучести.

С другой стороны, решен ряд практически важных задач восстановления геометрических размеров цилиндрических тел трения, выработавших свой ресурс, а также разработана комплексная расчетно-экспериментальная схема оценки остаточного ресурса узла манжетного уплотнения гидроагрегата в условиях ползучести (старения).

Определенный интерес для практики представляет выполненный комплекс экспериментальных исследований по определению реологических характеристик новых материалов: резины 2167, армирующего материала, армированной резины 2167.

Обоснованность выносимых на защиту научных положений, выводов и рекомендаций, а также достоверность полученных результатов исследований определяются корректным использованием аппарата механики деформируемого твердого тела, дифференциальных уравнений, уравнений математической физики, апробированностью применяемых численных методов и вычислительных комплексов (типа ANSYS); сопоставлением данных расчетов с экспериментальными данными; непротиворечивостью принятых ги-

потез и математических упрощений реальным физическим процессам. Точность и достоверность опытных данных обеспечивается регламентированным (по ГОСТам) использованием экспериментальной техники и методики обработки данных, повторяемостью результатов в опытах при одних и тех же условиях.

Связь диссертационной работы с планами научных исследований. 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») и плана НИР СамГТУ на 2000 – 2004 гг. согласно теме «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».

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на первой, второй, третьей, четвертой и пятой Международных конференциях молодых ученых «Актуальные проблемы современной науки» (Самара, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004 гг.), на Одиннадцатой межвузовской конференции «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, 2001), на Тринадцатой межвузовской конференции «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, 2003), на Всероссийской конференции «Всероссийская школа-семинар по современным проблемам механики деформируемого твердого тела» (Новосибирск, 2003), на Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы надежности технологических, энергетических и транспортных машин» (Самара, 2003), на Международной научной конференции «Актуальные проблемы математики и механики» (Казань, 2004), на Всероссийской научной конференции «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, 2004), на научном семинаре «Механика и прикладная математика» Самарского государственного технического университета (рук. проф. Радченко В.П., 2002 – 2004 гг.); на научном семинаре «Актуальные проблемы механики сплошных сред» Самарского государственного университета (рук. проф. Астафьев В.И., 2004 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ, список которых приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора. Автору во всех работах, опубликованных в соавторстве, в равной степени принадлежат как постановки задач, так и результаты выполненных исследований.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, общих выводов, списка литературы и двух приложений, в которых приведены результаты экспериментальных исследований. Общий объем диссертации 164 страницы, включая 117 рисунков и 11 таблиц. Библиографический список включает 118 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные направления исследований, приводится структура диссертации.

Глава 1. Аналитический обзор и постановка задачи. Глава 1 носит постановочный характер. Приводится обзор работ по проблеме обработки металлов давлением в режиме ползучести и сверхпластичности. Отмечаются преимущества медленных режимов деформирования перед традиционными квазистатическими применительно к формообразованию деталей. Вопросам изучения особенностей и основных закономерностей деформирования в области сверхпластичности (или близких к ним областях высокотемпературной ползучести) посвящено большое число работ, в том числе Горлача Б.А., Еникеева Ф.У., Кайбышева О.А., Романова К.И., Чудина В.Н. и других. Отмечается большой вклад в это направление, внесенный сибирской школой механиков: Сосниным О.В., Горевым Б.В., Ратничкиным А.А., Любашевской И.В. и другими.

Решению краевых задач формообразования при обработке металлов давлением в режиме ползучести посвящены работы Горева Б.В., Лазаренко Э.С., Малинина Н.Н., Романова К.И., Соснина О.В., Цвелодуба И.Ю. и других.

Отмечается, что задачи формообразования при ползучести стимулировали становление и развитие методов решения обратных краевых задач, которые рассматривались в работах Цвелодуба И.Ю., а также Горева Б.В., Сухорукова И.В., Банщиковой И.А. и других.

Расчетам НДС и оценке длительности до разрушения элементов конструкций при повышенных температурах посвящен ряд основополагающих работ Астафьева В.И., Еремина Ю.А., Кадашевича Ю.И., Качанова Л.М., Клебанова Я.М., Лепина Г.Ф., Локощенко А.М., Малинина Н.Н., Никитенко А.Ф., Работнова Ю.Н., Радченко В.П., Романова К.И., Самарина Ю.П., Соснина О.В., Шестерикова С.А., Цвелодуба И.Ю. и других.

Далее в главе отмечается, что подавляющее большинство существующих на сегодняшний день научных работ в области формоизменения в режиме ползучести ориентированы на моделирование технологических процессов на стадии изготовления элементов конструкций. Однако наряду с этой задачей большое значение в машиностроении придается разработке новых методов и технологий восстановительного ремонта (восстановления геометрических размеров) ответственных элементов конструкций, уже отработавших свой нормативный ресурс (например, цилиндрических пар трения). Указывается, что для таких конструктивных элементов могут быть применены технологии формоизменения в режиме ползучести. Разработка математических моделей для таких процессов является одной из целей диссертационной работы.

Кроме этого, требует решения ряд практически важных задач, когда медленные формоизменения (длящиеся до десятка и более лет) элементов конструкций в условиях ползучести происходят в процессе эксплуатации, и за счет «жестких» кинематических граничных (внешних) условий режимы их эксплуатации близки к режимам обработки материалов давлением.

В конце главы по результатам обзора формулируются задачи и методы исследования.

Глава 2. Разработка математической модели формоизменения контактирующих цилиндрических элементов конструкций в режиме ползучести.

В пункте 2.1 дается постановка задачи. Отмечается, что многие элементы конструкции энергетического и аэрокосмического оборудования, двигателей внутреннего сгорания работают в условиях сопряжения деталей, что при длительной эксплуатации приводит к износу (за счет трения) контактирующих поверхностей. Типичным представителем такого рода конструкций является плунжерная пара двигателя внутреннего сгорания, состоящая из штока (1), который в дальнейшем моделируется составным цилиндрическим стержнем с разными диаметрами, и камеры (2), которая моделируется толстостенной трубой (см. рис. 1). Стирание поверхностей деталей сопряжения приводит к недопустимому увеличению зазора Δ между штоком и камерой, что имеет свои отрицательные последствия: падение тяги, снижение мощности двигателя, перерасход топлива и т.д. Существующие на сегодняшний день способы восстановления геометрических размеров носят в основном механический характер, например, наваривание металла на контактирующие поверхности с дальнейшей механической доработкой до необходимых размеров.

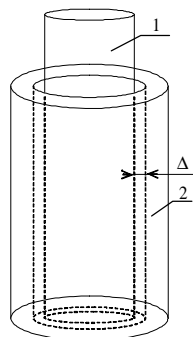


Рис 1. Схематическое изображение пары трения

В настоящей работе предлагается способ восстановления геометрических размеров пар трения при помощи формоизменения деталей в режиме ползучести (без механического вмешательства). Уменьшать величину зазора между штоком и камерой можно за счет увеличения площади поперечного сечения составного стержня либо за счет уменьшения внутреннего радиуса толстостенного цилиндра.

Пункт 2.2 посвящен восстановлению геометрических размеров цилиндрических узлов трения в режиме ползучести в условиях установившегося температурного поля в предположении, что образец (составной цилиндр или толстостенная труба) прогреваются мгновенно от температуры T_0 до заданной температуры T , при которой материал обладает свойством ползучести.

Рассмотрены схемы восстановления размеров составного стержня, ограниченного жесткой заделкой по торцевым сечениям, а также за счет его сжатия осевой силой. Показано, что предпочтительнее вторая схема, поскольку при жесткой заделке по торцам происходит быстрая релаксация термоупругих напряжений и накопленная поперечная деформация ползучести незначительна. Приведены модельные расчеты для рассмотренных вариантов.

Кроме того, в этом пункте решены задачи восстановления геометрических размеров толстостенного цилиндра. Основная идея состоит в том, что необходимо задать «жесткие» кинематические граничные условия по внешней боковой поверхности толстостенного цилиндра и по его торцевым сечениям. Тогда при прогреве цилиндра с температуры T_0 до T за счет появления термоупругих напряжений и вызванной ими ползучести происходит увеличение внутреннего радиуса толстостенного цилиндра. Решены краевые задачи для случаев абсолютно жесткой оправки по боковой поверхности камеры и жесткой заделки по одному или двум торцевым сечениям, абсолютно жесткой оправки и осевой силы; случая, когда камера находится внутри другого толстостенного цилиндра, у которого механические характеристики более «жесткие», чем у камеры, при этом рассмотрены варианты с жесткими заделками по одному или двум торцевым сечениям.

С математической точки зрения эти задачи свелись к решению ряда краевых задач ползучести толстостенной трубы (или системы двух скрепленных цилиндров) для случаев плосконапряженного и плоскодеформированного напряженных состояний со смешанными граничными условиями. Во всех случаях получены решения в квадратурах. Например, решение краевой задачи для толстостенной трубы с кинематическими граничными условиями на боковой поверхности $U(R_2, t) = 0$ (U – перемещение, R_1 и R_2 – внутренний и внешний радиусы) и жесткой заделкой по обоим торцам имеет вид

$$\begin{cases} s_r = \frac{1}{2} \left(I_1 - \frac{1}{r^2} I_2 \right) + C + \frac{1}{r^2} D, \\ s_q = \frac{1}{2} \left(I_1 - \frac{1}{r^2} I_2 \right) + C - \frac{1}{r^2} D, \\ s_z = n(s_r + s_q) - Ea\Delta T - Ep_z, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\begin{cases} C = -\frac{R_2^2}{R_1^2 + (1-2n)R_2^2} \left[H + \frac{1}{2} I_1^* (1-2n) + \frac{1}{2R_2^2} I_2^* \right] \\ D = -R_1^2 C, \end{cases} \quad (2)$$

$$H = Ea\Delta T + \frac{E}{1+n} (p_q(R_2, t) + np_z(R_2, t)), \quad (3)$$

$$I_1 = \int_{R_1}^r g(r, t) dr, \quad I_2 = \int_{R_1}^r g(r, t) r^2 dr, \quad I_1^* = \int_{R_1}^{R_2} g(r, t) dr, \quad (4)$$

$$I_2^* = \int_{R_1}^{R_2} g(r,t)r^2 dr, \quad g(r,t) = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{p_r - p_\theta}{r} - \frac{\partial p_\theta}{\partial r} - \nu \frac{\partial p_z}{\partial r} \right) \quad (5)$$

p_θ, p_r, p_z – окружная, радиальная и осевая компоненты деформации ползучести; E и ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно.

Выполнен ряд модельных вариативных расчетов. В качестве основной модели использовался энергетический вариант теории ползучести и длительной прочности, разработанный Ю.П. Самариным и В.П. Радченко. Показано, что наиболее предпочтительной является схема с жесткой заделкой по боковой поверхности и осевой силой.

В силу того, что в реальных условиях прогревание идет не мгновенно, в пункте 2.3 решен ряд нестационарных задач теплопроводности для сплошного цилиндра с граничными условиями третьего рода на боковой поверхности; для неограниченного полого цилиндра с граничными условиями третьего рода на внутренней и первого рода на внешней поверхностях, а также задача нагрева двух неограниченных вложенных и скрепленных цилиндров с граничными условиями третьего рода на внутренней поверхности внутреннего цилиндра и внешней – для внешнего цилиндра и граничным условием четвертого рода на стыке цилиндров.

Результаты модельных расчетов показали, что для высокопрочных конструкционных сталей и сплавов полное прогревание цилиндров (выход к стационарному решению) происходит за 1÷2 часа.

В пункте 2.4 решены те же задачи, что и в пункте 2.2, но для нестационарного температурного поля на основе уравнений неизотермической ползучести. Задачи решались в несвязной постановке: сначала решалась температурная задача, а затем задача термоупругоползучести, где температура T входила в определяющие уравнения как параметр. Учет переменной температуры существенных различий в конечные параметры формоизменений не дал, однако существенно снизился пик термоупругих напряжений в моменты температурной нагрузки и разгрузки по сравнению со случаем мгновенного прогрева элементов конструкций.

В пункте 2.5 отмечается, что при нагревании тел (в силу быстрого выхода температурного поля к асимптотическому значению) с жесткими кинематическими ограничениями в радиальном и осевом направлениях мгновенные термоупругие напряжения могут достигать величин, сопоставимых с временным пределом сопротивлений (не говоря уже о пределе текучести). Данная проблема может быть решена введением зазора между образцом и элементом, ограничивающим его перемещения в радиальном и осевом направлениях.

В этом случае схема нагружения задается так: образец без кинематических ограничений нагревается от начальной температуры T_0 до температуры T^* такой, что образец, расширяясь, исчерпает зазор, и затем образец продол-

жают нагреваться до рабочей температуры T_c уже с учетом кинематических граничных условий.

При этом конечная величина $\Delta T = T_c - T_0$ может быть (за счет выбора величины зазора Δ) задана любой. Поэтому можно подобрать ΔT таким образом, чтобы термоупругие напряжения не превышали заданной величины (например, предела текучести).

Решены те же самые краевые задачи, что и в пунктах 2.2. и 2.4, с учетом зазора. Решения также получены в квадратурах, причем с течением времени на границах происходит смена силовых граничных условий на кинематические.

В конце сделаны выводы по главе 2.

Глава 3. Математическое моделирование формоизменения узла уплотнения гидротурбины в условиях ползучести (старения).

В предыдущей главе рассмотрена задача формоизменения контактирующих элементов конструкций, когда ползучесть играет «позитивную» роль, поскольку за счет явления ползучести удастся восстановить геометрические размеры деталей до нужных величин.

Однако в ряде контактирующих элементов конструкций, таких как различного рода уплотнительные узлы, ползучесть играет «негативную» роль, поскольку в процессе ползучести материалов происходит процесс перераспределения напряжений в зоне контакта, существенное изменение формы контактирующих деталей и увеличение площади контакта. Это, в свою очередь, приводит к снижению величин контактных напряжений и, как следствие этого, к разгерметизации узла уплотнения, поскольку критерии герметичности включают в себя, как правило, пороговую величину контактных напряжений. Кроме прямой ползучести, в материалах наблюдаются эффекты старения, которые в математическом плане (при решении соответствующих краевых задач) можно свести к задачам ползучести.

Кинетика напряженно-деформированного состояния и формоизменения элементов конструкций такого рода (узлы уплотнения) в условиях ползучести (длящаяся до десятка лет и более) происходит в процессе эксплуатации. В настоящей работе контактные задачи такого типа решаются на примере манжетного уплотнения лопасти рабочего колеса гидроагрегата.

Типичное штатное манжетно-сальниковое уплотнение представлено на рис. 2. Однако сальниковый шнур в процессе эксплуатации (за счет ползучести и старения) существенно изменяет свою форму. Изменение его формы, а также ползучесть (старение) материала манжеты приводят к существенному формоизменению конструкции всего узла уплотнения. Во-первых, увеличивается площадь зоны контакта AB между манжетой (1) и уплотняемым кольцом (4) (см. рис. 2), что приводит в конечном итоге к потере герметичности узла уплотнения. Во-вторых, в результате ползучести резиновой манжеты зазор Δ между манжетой и краем ванны (участок CA , рис. 2) выбирается,

манжета упирается в боковую поверхность ванны и приподнимается. И здесь образуется масляный клин, который распространяется в направлении AB (к центру) (см. рис. 2), что также не способствует герметичности всего узла.

Одним из решений модернизации штатного манжетно-сальникового уплотнения является следующее: вместо сальникового шнура (который подвержен разрушению) использовать жесткое металлическое центральное тело (см. рис. 3), а вместо манжеты из чистой резины использовать армированную манжету (это позволяет свести до минимума удлинение Δ незашемленного торцевого сечения манжеты AB , см. рис. 3). Таким образом, в отличие от задач, рассмотренных в главе 2, здесь критерием работоспособности является условие $u(t) < \Delta$, где $u(t)$ – перемещение вдоль направления BC . Однако внедрению такого рода новых конструктивных решений должна предшествовать серьезная теоретическая, расчетная и экспериментальная проработка многих вопросов с позиций математического моделирования и механики деформированного твердого тела.

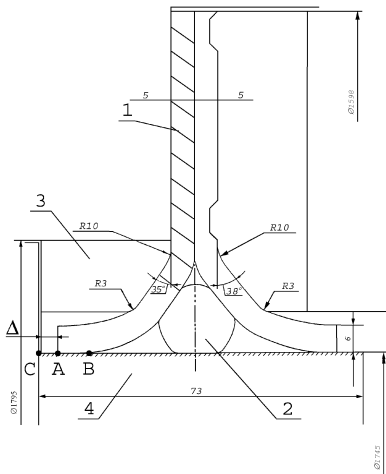


Рис. 2. Геометрические характеристики элементов штатного узла уплотнения гидротурбины: 1 – резиновая манжета; 2 – графитированный сальниковый шнур; 3 – упорное кольцо; 4 – уплотняемое кольцо

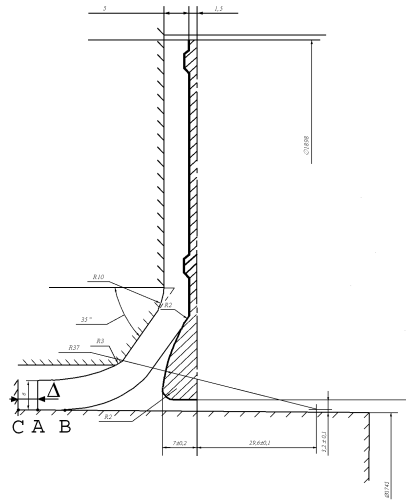


Рис. 3. Манжетное уплотнение с центральным металлическим кольцом: 1 – резиновая манжета; 2 – центральное тело; 3 – упорное кольцо; 4 – уплотняемое кольцо

Для решения поставленной комплексной задачи был выполнен ряд экспериментальных исследований для компонент армированной манжеты (резина марки 2167, армирующий материал – хлопчатобумажная ткань) и решены следующие теоретические задачи.

1. Выполнен цикл экспериментальных исследований по определению упругих характеристик резины 2167, армирующего материала и армированной резины 2167.

2. Выполнен цикл экспериментальных исследований на ползучесть при растяжении резины 2167, которые показали, что существует критическое (пороговое) напряжение $\sigma_0 \cong 9,3 \div 9,8$ МПа, выше которого наблюдается неограниченная ползучесть, заканчивающаяся разрушением одноосного образца, а ниже его наблюдается асимптотически затухающая ограниченная ползучесть, причем ее величина составляет $6 \div 10\%$ от упругой деформации, соответствующей напряжению испытания.

3. На основании экспериментальных данных построены феноменологические модели упругости для резины 2167 и армирующегося материала, а также модели ползучести и старения для резины 2167 для малых деформаций.

4. Выполнена экспериментальная проверка адекватности упругих и реологических моделей резины 2167 и армирующегося материала экспериментальным данным в области малых деформаций.

5. Разработан метод решения контактной краевой задачи ползучести для узла уплотнения на основании метода конечных элементов, программного вычислительного комплекса ANSYS, а также феноменологических реологических моделей для материалов узла уплотнения.

6. Выполнена серия расчетов по оценке кинетики напряженно-деформированного состояния в манжете и контактных давлений в зоне контакта манжеты и уплотнительного кольца, а также изменения геометрических параметров манжеты за период времени до 11,4 года. Были исследованы узлы уплотнения с полностью, частично армированными и не армированными манжетами из резины 2167. Анализ данных этих расчетов позволил сделать следующие выводы:

- распределение контактного давления в плоскости контакта манжеты и уплотняемого кольца за 11,4 года практически не изменяется (точнее, изменяется незначительно, см. рис. 4 и 5);

- для всех конструктивных решений в начале нагружения ($t = 0$) и через 11,4 года имеется зона контакта, в которой контактное давление превышает внешнее рабочее давление от масла $P = 0,35$ МПа (см. рис. 4 и 5), причем эта зона составляет $54 \div 76\%$ от всей длины контакта манжеты и уплотняемого кольца (при этом величина среднего интегрального (эффективного) давления по этой зоне за 11,4 года практически не изменяется);

- удлинения торцевого незащемленного сечения у армированной и частично армированной манжеты за 11,4 года практически не происходит

(величина Δ не изменяется), а у манжеты из чистой резины 2167 оно составляет 1 мм.

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет не только эффективно решать контактные краевые задачи для узла уплотнения, но и служит действенным инструментальным средством для оптимизации условий его функционирования.

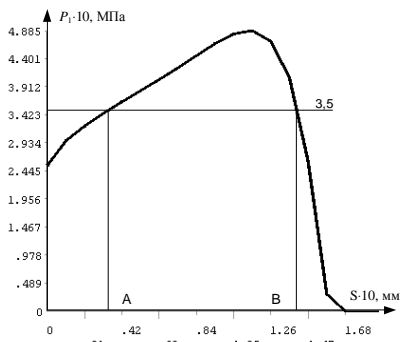


Рис. 4. Распределение контактных давлений по длине полностью армированной манжеты вдоль ее контакта с плоскостью уплотняемого кольца в начальный момент при $t=0$

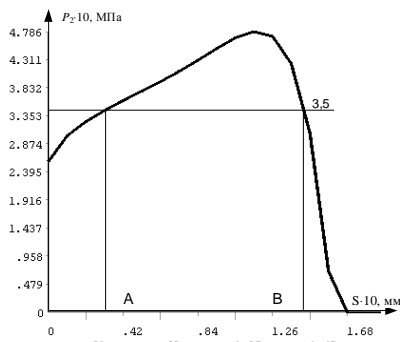


Рис. 5. Распределение контактных давлений по длине полностью армированной манжеты вдоль ее контакта с плоскостью уплотняемого кольца в начальный момент при $t = 11,4$ года

Основные результаты выполненных исследований состоят в следующем.

1. Разработана математическая модель формоизменения (восстановления геометрических размеров) в режиме ползучести выработавших ресурс цилиндрических пар трения.

2. Решен ряд контактных краевых задач ползучести для цилиндрических элементов конструкций со смешанными граничными условиями в условиях стационарного и нестационарного температурных полей.

3. На основе численного эксперимента выполнен анализ схем формоизменения цилиндрических элементов конструкций в условиях ползучести и указаны оптимальные (с математической точки зрения) схемы их формоизменения.

4. Разработана математическая модель формоизменения узла уплотнения (на примере узла уплотнения гидроагрегата) в условиях ползучести (старения), включившая в себя решение следующих задач:

- моделирование внешних сил и граничных условий, внутренней геометрии конструкции и начальных (монтажных) напряжений;
- проведение цикла экспериментальных исследований материалов узла уплотнения (резина, армирующий материал, армированная резина) для определения их упругих и реологических характеристик; построение соответст-

вующих феноменологических реологических моделей и проверка их адекватности экспериментальным исследованиям;

- разработку метода решения контактных краевых задач ползучести (старения) со смешанными граничными условиями для узла уплотнения;

- разработку методики оценки остаточного ресурса узла уплотнения в процессе ползучести (старения) материала по критерию герметичности на основании анализа кинетики контактных (нормальных) напряжений на длительные временные базы (до 10 лет и более).

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Овсянкин Е.Ю. Решение смешанной краевой задачи термовязкопластичности для толстостенной трубы в условиях ползучести // Актуальные проблемы современной науки. Тезисы докладов международной конференции молодых ученых. Часть 1. Самара: СамГТУ, 2000. С. 29.

2. Овсянкин Е.Ю. Математические модели процессов формообразования деталей в режиме ползучести // Актуальные проблемы современной науки. Тезисы докладов 2-й Международной конференции молодых ученых. Часть 1. Самара: СамГТУ, 2001. С. 46.

3. Овсянкин Е.Ю. Математические модели технологических процессов формообразования изделий в режиме ползучести с учетом поля температур // Актуальные проблемы современной науки. Труды 3-й Международной конференции молодых ученых. Математика. Механика. Самара: СамГТУ, 2002. С. 62 – 63.

4. Овсянкин Е.Ю. Решения задач формоизменения элементов конструкций в режиме ползучести // Актуальные проблемы современной науки. Труды 5-й Международной конференции молодых ученых. Механика. Машиностроение. Ч. 3 и 4. Самара: СамГТУ, 2004. С. 73 – 74.

5. Овсянкин Е.Ю., Саушкин М.Н. Расчет релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном слое толстостенной трубы при ползучести // Вестник СамГТУ. Серия: Физико-математические науки. Вып. 16. Самара: СамГТУ, 2002. С. 62 – 72. (личный вклад автора – 6 страниц).

6. Овсянкин Е.Ю., Саушкин М.Н. Построение закона ползучести для резины 2176 // Актуальные проблемы современной науки. Труды 4-й Международной конференции молодых ученых. Ч. 1-3. Математика. Математическое моделирование. Механика. Самара: СамГТУ, 2003. С. 108 – 112. (авт. – 3 с.).

7. Овсянкин Е.Ю., Саушкин М.Н. Построение закона старения для резины 2176 // Актуальные проблемы современной науки. Труды 4-й Международной конференции молодых ученых. Ч. 1-3. Математика. Математическое моделирование. Механика. Самара: СамГТУ, 2003. С. 105 – 108. (авт. – 2 с.).

8. Радченко В.П., Овсянкин Е.Ю., Краснощеков И.Л., Карташов В.И., Саушкин М.Н. Экспериментальное исследование механических свойств материалов узла уплотнения лопасти рабочего колеса поворотной лопастной гидротурбины // Математическое моделирование и краевые задачи. Труды

тринадцатой межвузовской конференции. Часть I. Самара: СамГТУ, 2003. С. 228 – 235. (авт. – 3 с.).

9. Радченко В.П., Овсянкин Е.Ю., Логинов О.А., Саушкин М.Н. Решение контактной краевой задачи реологии для узла уплотнения рабочего колеса гидротурбины // Всероссийская школа-семинар по современным проблемам механики деформируемого твердого тела. Сборник докладов. Новосибирск. 2003. С. 175 – 179. (авт. – 2 с.).

10. Радченко В.П., Овсянкин Е.Ю., Саушкин М.Н. Численные методы решения контактных задач формоизменения элементов конструкций при ползучести // Актуальные проблемы математики и механики. Материалы международной научной конференции. Казань. 2004. С. 207 – 208. (авт. – 1 с.).

11. Радченко В.П., Овсянкин Е.Ю., Морозов В.Н., Карташов В.И., Саушкин М.Н. Экспериментальное исследование износостойкости пар трения узла уплотнения лопасти рабочего колеса поворотной-лопастной гидротурбины // Математическое моделирование и краевые задачи. Труды тринадцатой межвузовской конференции. Часть I. Самара: СамГТУ, 2003. С. 157 – 163. (авт. – 2 с.).

12. Радченко В.П., Овсянкин Е.Ю., Саушкин М.Н. Расчетно-экспериментальная оценка ресурса узла уплотнения рабочего колеса гидротурбины // Актуальные проблемы надежности технологических, энергетических и транспортных машин. Сборник трудов международной научно-технической конференции Т. 2. М.: Машиностроение. 2003. С. 189 – 194. (авт. – 2 с.).

13. Радченко В.П., Овсянкин Е.Ю., Саушкин М.Н. Феноменологическая модель изнашивания резины по стальной поверхности в условиях их контактного взаимодействия в воде // Математическое моделирование и краевые задачи. Труды Всероссийской научной конференции. Часть I. Самара: СамГТУ, 2004. С. 178 – 188. (авт. – 4 с.).

14. Радченко В.П., Овсянкин Е.Ю. Математическая модель формообразования толстостенного цилиндра в условиях ползучести // Математическое моделирование и краевые задачи. Труды одиннадцатой межвузовской конференции. Часть I. Самара: СамГТУ. 2001. С. 134 – 140. (авт. – 4 с.).

Подписано в печать 15 ноября 2004 г.
Заказ № 720. Тираж 100 экз. Отпечатано на ризографе.
Самарский государственный технический университет.
Отдел типографии и оперативной полиграфии.
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.