

**Бойко Светлана Владимировна**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ  
КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОЙ  
ПОЛЗУЧЕСТИ**

01.02.04 — механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт гидродинамики им М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

**Научный руководитель:** **Ларичкин Алексей Юрьевич**,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
лаборатории статической прочности  
ИГиЛ СО РАН

**Официальные оппоненты:** **Бормотин Константин Сергеевич**,  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры авиастроения  
ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре  
государственный университет» (КнАГУ)

**Арутюнян Александр Робертович**,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник кафедры  
теории упругости ФГБОУ ВО «Санкт-  
-Петербургский государственный университет»  
(СПбГУ)

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Самарский государственный  
технический университет» (СамГТУ)

Защита состоится 28 сентября 2020 года в 14:00 час. на заседании диссертационного совета Д 003.054.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 15. Тел.: (383)333-21-66, Факс: (383)333-16-12, e-mail: kurguzov@hydro.nsc.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, <http://www.hydro.nsc.ru>.

Автореферат разослан                      августа 2020 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук,

Кургузов В.Д.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Для современного развития авиа, машиностроения и кораблестроения актуальной задачей является сохранение ресурса изделия на стадии его изготовления и уменьшение веса конструкции при сохранении эксплуатационных характеристик. Обеспечение пониженного веса и прочности конструкций достигается использованием композиционных материалов и современных легких сплавов из алюминия и титана. Геометрическая оптимизация конструкций по параметрам прочности и веса требует использования алгоритмов для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) с приемлемой для практических целей точностью. Кроме того, моделирование необходимо проводить с учетом изменения остаточного ресурса изделия в случае нестационарных условий нагружения. При моделировании формообразования и эксплуатации конструкций в процессе ползучести необходимо учитывать физическую нелинейность материалов, а также изменение их свойств под действием температурной выдержки и длительного силового воздействия. Получение оптимальных параметров процессов формообразования габаритных изделий является актуальной проблемой для авиастроения и космической отрасли. Решению задач получения оптимальных параметров процессов формообразования и оценки степени поврежденности оребренных конструкций при нестационарных режимах нагружения посвящено данное исследование. Чаще всего в технике используются оребренные панели различной кривизны, поскольку они имеют пониженные весовые характеристики при достаточной прочности конструкции. Оребрение полотна заготовки может иметь различные профили сечения, в том числе, Г-образные, Т-образные профили.

Для моделирования формообразования элементов сложных конструкций необходимо понимать как ведут себя при нагрузках более простые детали, такие как Т-образные профили, балки. Актуальной задачей является моделирование процессов высокотемпературной ползучести и длительной прочности с учетом накопления поврежденности материала и влияния температурно-силовых факторов.

Данное исследование охватывает несколько типов конструкционных сплавов, свойства которых зависят от вида НДС. Рассматриваются задачи чистого изгиба балок различного сечения в условиях ползучести с учетом различных свойств материала при растяжении и сжатии, а также влияние температурно-силовых факторов и накопленной при деформировании поврежденности материала на параметры процесса формообразования.

**Целью** диссертационной работы является разработка методов решения прямых и обратных задач формообразования элементов конструкций с учетом физической нелинейности материала и учетом влияния поврежденности материала на процесс формообразования элементов конструкций.

Достижение поставленной цели связано с решением следующих **задач**:

1. формулировка системы определяющих уравнений с одним скалярным параметром поврежденности для описания процессов деформирования металлических материалов в условиях ползучести без ограничений на значения деформаций ползучести и диссипации энергии в момент разрушения;

2. разработка методов решения прямых и обратных задач формообразования элементов конструкций;

3. исследование влияния поврежденности материала на процесс формообразования элементов конструкций; получение оптимальных параметров процесса деформирования оребренной панели.

### **Научная новизна.**

1. Предложен вариант уточненной системы определяющих уравнений с одним скалярным параметром поврежденности для описания процессов деформирования (вплоть до разрушения) металлических материалов в условиях ползучести без ограничений на значения деформаций ползучести и диссипации энергии в момент разрушения.

2. Разработан метод решения задач знакопеременного изгиба балок различного поперечного сечения в режиме ползучести с учетом температурной выдержки без нагрузки. Численная модель учитывает различие свойств материала на растяжение и сжатие в процессе ползучести, а также наличие накопленных повреждений.

3. Введен параметр поврежденности материала в конечно-элементный пакет MSC.Marc для процессов деформирования (вплоть до разрушения) элементов конструкций в условиях ползучести.

4. Разработана методика определения оптимальных параметров процессов деформирования оребренной панели, основанная на определении и расчетно-экспериментальном исследовании НДС балок различного поперечного сечения в условиях ползучести с учетом поврежденности материала.

**Теоретическая значимость** работы состоит в определении оптимальных параметров процессов формообразования элементов конструкций в условиях ползучести с учетом поврежденности и нелинейности материала.

**Практическая значимость** работы заключается в постановке и решении обратных задач формообразования с учетом влияния температурно-силовых факторов. Разработанные методы реализованы в виде программных модулей, позволяющие оценить остаточный ресурс изделий с учетом различных свойств материала и провести анализ влияния различных процессов на процесс формообразования конструкций.

**Методология и методы исследования.** В диссертации используются подходы и методы механики деформируемого твердого тела для описания необратимых деформаций в теле с учетом упругой разгрузки. Метод решения рассматриваемых задач основывается на использовании теории энергетического варианта теории ползучести и длительной прочности, а также на

методе оптимизации при решении обратных задач деформирования элементов конструкций. Разработанные алгоритмы применяются в пользовательских программах MSC.Marc на языке Fortran и в отдельных программных модулях, разработанных в среде Visual Studio на языке C++.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Уточненная система определяющих уравнений с одним скалярным параметром повреждаемости для описания процессов деформирования (вплоть до разрушения) металлических материалов в условиях ползучести без ограничений на значения деформаций ползучести и диссипации энергии в момент разрушения;

2. Исследование знакопеременного изгиба балок прямоугольного сечения в режиме ползучести, с учетом температурной выдержки без нагрузки и различий свойств материала на растяжение и сжатие, а также наличие накопленных повреждений в материале в процессе ползучести. Проверка адекватности предложенного метода экспериментальными данными.

3. Численные реализации решения прямых и обратных задач изгиба балок различного поперечного сечения в условиях ползучести с учетом поврежденности материала.

4. Методика определения оптимальных параметров процессов деформирования в условиях ползучести с учетом поврежденности материала.

**Достоверность.** Проводимые в работе результаты расчетов трехмерно моделирования по формообразованию элементов конструкций в конечно-элементном пакете MSC.Marc сравниваются с соответствующими экспериментальными данными. Используются апробированные алгоритмы расчета НДС в режимах ползучести и пластичности. Адекватность используемых математических моделей деформирования и разрушения элементов конструкций подтверждается реальными экспериментальными данными.

### **Апробация результатов.**

Результаты полученных научных исследований докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: на III Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Ю.Н. Работнова «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций» (Новосибирск, 2014); на IX Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», посвященной 55-летию полета Ю. А. Гагарина (Томск, 2016); на конференции «Краевые задачи и математическое моделирование» (Новокузнецк, 2016); на конференции «Проблемы оптимального проектирования сооружений» (Новосибирск, 2017); на X Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела (Самара, 2017); на Всероссийской конференции с международным участием "Современные проблемы механики сплошных сред и физики взрыва посвященной 60-летию Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новоси-

бирск, 2017); на Всероссийской конференции и школе для молодых ученых, посвященные 100-летию академика Л.В.Овсянникова "Математические проблемы механики сплошных сред"(Новосибирск, 2019); на XII Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019); на XLVI Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения» (Москва, 2020).

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 15 печатных работ, из них 2 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК, а также 3 статьи в журнале, индексированном в информационно — аналитической системе научного цитирования Scopus.

**Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке** Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №15-01-07631, 16-08-00713, 16-31-00460)

**Личный вклад.** Задачи были поставлены научным руководителем. Соискатель разработал методы решения прямых и обратных задач формообразования элементов конструкций в процессе ползучести с учетом физической нелинейности материала. Разработал алгоритм определения параметров ползучести материала для описания трех стадий ползучести с учетом повреждаемости. Численные расчеты и анализ результатов проведены соискателем лично.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Объём диссертации — 133 страницы. Список литературы содержит 100 источников.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность научному руководителю кандидату физико-математических наук А.Ю. Ларичкину за постановку задач, постоянное внимание к работе, а также кандидату физико-математических наук И.В. Любашевской за постоянные консультации в работе.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дано обоснование актуальности диссертации, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен обзор отечественной и зарубежной литературы по исследованию процессов формообразования элементов конструкций в процессе ползучести и пластичности.

В России существует несколько школ, которые занимаются решением задач и разработкой теории ползучести: статистический подход в ползучести разрабатывает Самарская школа ак. Самарина; развитием классического подхода

занимается школа ак. Работнова в Москве; подход с учетом уравнения сохранения массы и изменения плотности материала при накоплении повреждений занимается Санкт-Петербургская школа профессора Арутюняна Р.А.; в Новосибирске экспериментальные исследования проводит школа Соснина О.В. применительно к технологическим процессам обработки материалов давлением и разработке моделей анизотропной ползучести с учетом скалярного параметра поврежденности. За рубежом стоит отметить серию экспериментально-теоретических работ prof. Nayhurst D.R. (Англия), а также группу ученых во главе с prof. Altenbach H. (Германия). Они строят и применяют реологические модели неупругого деформирования для описания обратной ползучести и поврежденности материалов.

Отмечается большое разнообразие подходов к решению прямых задач формообразования в различных режимах. Например, в работах Соснина О.В., Горева Б.В. исследуется поведение чистого изгиба балки прямоугольного сечения на ползучесть и длительную прочность с использованием уравнений энергетического варианта теории ползучести. В работах Кузнецова Е.Б., Леонова С.С. используются параметризованные уравнения в энергетической форме. Численный расчет проводится конечно-разностными схемами. Сравнение численных методов показало, что использование метода продолжения решения по параметру позволяет увеличить шаг интегрирования по времени, уменьшить количество шагов по независимой переменной и время счета. Однако удовлетворительно описывается процесс деформирования балки в условиях ползучести с учетом расчета вплоть до разрушения материала. Другие подходы по решению данной задачи представлены у Локощенко А.М. Рассматривались задачи изгиба круглых балок в режимах ползучести, где определяющие соотношения принимались в виде дробно-степенных функций. При решении задач рассматриваются и другие модели ползучести, например, в работах Радченко В.П. предложена обобщенная стохастическая модель ползучести и длительной прочности балки в условиях чистого изгиба в терминах «обобщенная нагрузка», «обобщенное перемещение», «время».

Моделирование балок таврового сечения проводится в различных конечно-элементных пакетах. Например, в программе ПРИНС, основанной на суперэлементной технологии (Агапов В.П.).

Формообразование панелей в режиме ползучести при температуре старения используется для получения крупногабаритных изделий. В работах Люо Н. данную технологию применяли для получения элементов конструкций самолетов Airbus 330 и 340, придавая кривизну стримерам при помощи кручения и изгиба.

Моделирование НДС панелей и оребренных конструкций при формообразовании требует больших численных затрат ввиду сложности целевых геометрий конструкций и необходимости решения контактных задач. В некоторых случаях, когда изделие состоит из однотипных элементов, геометрию панели можно упростить, рассматривая отдельные ее части и для каждой из них определить

кривизны и по ним определить формоизменение всей детали в целом. В качестве методов исследования используется математическое моделирование, в том числе метод конечных элементов (МКЭ), и приближенные методы решения задач на основе упрощающих допущений, учитывающих геометрические данные образцов и свойства материалов.

В настоящее время существует мало работ (Бормотин К.С., Аунг В., Банщикова И.А., Горев Б.В. и др.), посвященных решению обратных задач формообразования элементов конструкций в процессе ползучести.

В результате проведенного анализа литературы можно сделать вывод об актуальности построения уточненных моделей ползучести и алгоритмов решения прямых и обратных задач формообразования элементов конструкций с учетом всех свойств материала.

**Во второй главе** сформулирована уточняющая модель для описания процессов ползучести и длительной прочности материалов с использованием скалярного параметра поврежденности. Предложенный вариант кинетических уравнений в энергетической форме позволяет обобщить энергетический вариант теории длительной прочности О.В. Соснина на случай, когда энергетическое условие длительной прочности не выполняется:  $A_*(\sigma) \neq const$ .

Изложена методика идентификации параметров модели ползучести и повреждаемости материала. Выполнено сравнение результатов использования метода с экспериментальными данными по ползучести и длительной прочности для образцов из стали марки 45, титанового сплава ВТ9 и стали 09Г2С при стационарных и нестационарных условиях нагружения. На рис. 1 приведены диаграммы ползучести для нестационарных условиях нагружения для сплава ВТ9 (а) и стали 09Г2С (б). Точками обозначены экспериментальные данные, а кривыми расчетные. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

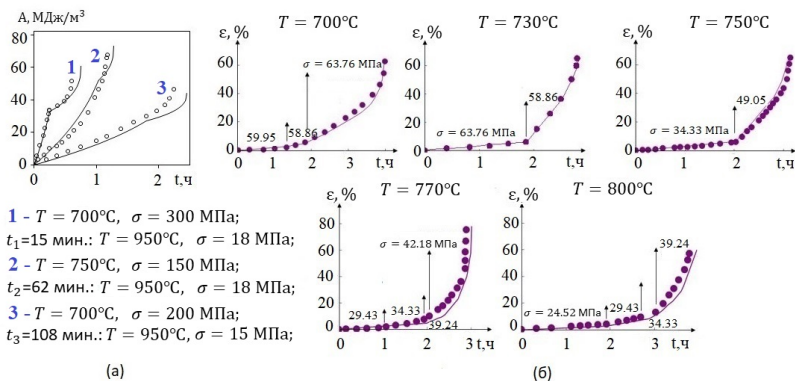


Рис. 1. Диаграммы ползучести при различных значениях  $\sigma$  и  $T$  для (а) титанового сплава ВТ9; (б) стали 09Г2С.



Проведены численные расчеты для задач о чистом изгибе балки прямоугольного сечения с одинаковыми и различными характеристиками на растяжение и сжатие. Изучено влияние поврежденности материала на процесс деформирования элементов конструкций. Численная реализация проводилась в программе Visual Studio на языке C++ (VS C++), в конечно-элементном комплексе MSC.Marc. Показано, что для полного описания процесса деформирования в условиях ползучести необходимо учитывать повреждаемость материала.

Ниже представлены расчеты с использованием метода Рунге-Кутты-Мерсона (РКМ) для сплава Д16 при  $T = 250^{\circ}C$  (рис. 2а) и для сплава АК4-1 при  $T = 200^{\circ}C$  (рис. 2б). На рис. 2а показан график изменения кривизны по оси балки в различные моменты времени для сплава, имеющие одинаковые характеристики на растяжение и сжатие в процессе ползучести — Д16 при  $T = 250^{\circ}C$ . Штрих-пунктирная кривая — данные, полученные в работе [1]<sup>1</sup>.

Использовался метод Рунге-Кутты с постоянным приращением рассеянной энергии и расчет проводился вплоть до разрушения. Точками обозначены экспериментальные значения, представленные в работе [1].

Решение задачи для материала, имеющего разные свойства ползучести при растяжении и сжатии, показано для сплава АК4-1 при  $T = 200^{\circ}C$  (рис. 2б). Стоит отметить, что если проводить моделирование деформирования балки с характеристиками ползучести на растяжение и поврежденностью (кривая 1), на сжатие с поврежденностью (кривая 2), то процесс формообразования не достоверно описывается — по времени или по скорости процесса деформирования. Штрих-пунктирная кривая (кривая 3) — данные, полученные в работе [2]<sup>2</sup>. Расчет проводился вплоть до разрушения. Точками (кривая 5) обозначены экспериментальные значения [2].

Достаточно точно описывает процесс изгиба балки с учетом всех свойств материала — растяжения, сжатия и поврежденностью (кривая 4), что является подтверждением достоверности численного результата и процесса перераспределения внутренних напряжений и накопления повреждений в балке вплоть до разрушения.

Расчет также был проведен в конечно-элементном пакете MSC.Marc с использованием пользовательской подпрограммы. Был реализован алгоритм для учета поврежденности материала. Параметр поврежденности вводился как скалярная величина. Модель материалов учитывает разные свойства при растяжении сжатии, а также повреждаемость материала.

Для материала АК4-1 при  $T = 200^{\circ}C$  удельная работа рассеяния в конеч-

---

<sup>1</sup>Соснин О.В., Горев Б.В., Никитенко А.Ф. Энергетический вариант теории ползучести. — Новосибирск: Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, 1986. — 96 с.

<sup>2</sup>Горев Б.В. К расчету на неустановившуюся ползучесть изгибаемого бруса из материала с разными характеристиками на растяжение и сжатие // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. — 1973. — Вып. 14. — С. 44-51.

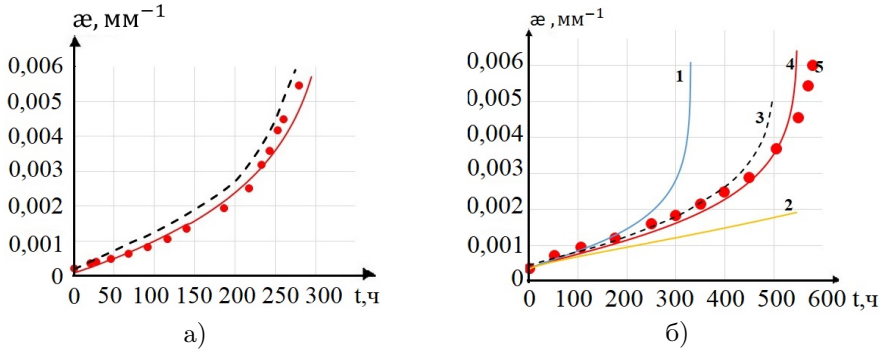


Рис. 2. Кривизна балки в различные моменты времени для сплавов: а) Д16; б) АК4-1.

ный момент времени  $A_* = 1$ , деформация в конечный момент времени  $\varepsilon_* = 1/\sigma$ . В случае одноосных испытаний параметр поврежденности  $\omega = \bar{\varepsilon}^c \cdot \sigma_e$ , где  $\sigma_e \equiv \sqrt{\frac{3}{2} \sum_{i,j=1}^3 s_{kl} s_{kl}}$  – эффективное напряжение,  $s_{ij} \equiv \sigma_{ij} - \frac{1}{3} (\sum_{i=1}^3 \sigma_{ii}) \delta_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$  – компоненты напряжений,  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера.

Приращение эффективной деформации ползучести определяется следующим образом

$$\Delta \bar{\varepsilon}^c = \frac{1}{2} [B_1 \sigma_e^{n_1} (1 - \sin 3\theta) / (1 - \bar{\varepsilon}^c \cdot \sigma_e)^{m_1} + B_2 \sigma_e^{n_2} (1 + \sin 3\theta) / (1 - \bar{\varepsilon}^c \cdot \sigma_e)^{m_2}] \Delta t,$$

где  $B_i$ ,  $n_i$ ,  $k_i$  – константы материала в процессе ползучести ( $i = 1, 2$ ),  $\Delta t$  – шаг по времени.

На рис. 3а показаны кривые кривизны от времени для разносопротивляющегося материала без учета повреждаемости, полученные в расчетах с использованием равномерной сетки трехмерных восьмиузловых гексогональных элементов hex8 (2,3 на рис. 3а) и двадцатиузловых гексогональных элементов hex20 (1 на рис. 3а), а также решение в общей лагранжевой формулировке уравнений механики деформируемого твердого тела (МДТТ) – TL (кривая 2 на рис. 3а) и текущей – UL (кривая 3 на рис. 3а) с адаптивным шагом по времени.

Вводя скалярный параметр поврежденности в пользовательскую подпрограмму `sprlaw.f` и проводя расчет с адаптивным шагом по времени, были получены результаты с константами [2] (2 на рис. 3б) и [3]<sup>3</sup> (3 на рис. 3б). Кривая 1 на рис. 3б была получена в результате численного расчета в VS C++.

<sup>3</sup>Соснин О.В., Горев Б.В., Рубанов В.В. Кручение квадратной пластинки из материала, разносопротивляющегося растяжению и сжатию при ползучести // Расчеты прочности судовых конструкций и механизмов: сб. тр. / Министерство речного флота РСФСР, Новосибирский институт инженеров водного транспорта. – Новосибирск. – 1976. – Вып. 117. – С. 78-88.

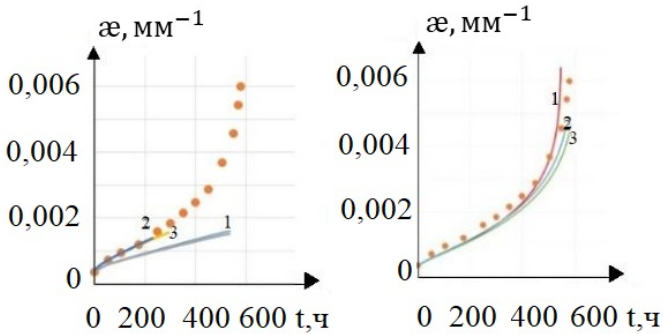


Рис. 3. Зависимость кривизны от времени.

Стоит отметить, что алгоритм учета разнсопротивляемости в пакете MSC. Marc чувствителен по времени расчета процесса, что отображено на рис. 3а.

Поврежденность в конечный момент времени достигла значения 0,86, что говорит о практическом разрушении материала в процессе ползучести.

Наблюдается соответствие данных расчета, полученных при решении прямых задач формообразования, с существующими экспериментальными данными и данными расчётов из независимых источников.

Рассматривались процессы знакопеременного изгиба балок прямоугольного сечения в процессе ползучести, а также процесс релаксации.

Проведено экспериментальное исследование и разработана методика моделирования знакопеременного чистого изгиба балок с учетом длительности пребывания. Выполнена проверка для материала АБВТ-20 при температуре  $750^{\circ}C$ . В ходе испытаний была определена зависимость (по I балке), отражающая падение скорости прогиба в зависимости от длительности пребывания при температуре. Данная зависимость была учтена при модификация параметров в модели ползучести. Расчет скорости деформаций ползучести производился с учетом зависимости параметра  $B_A$  от времени по зависимости:

$$B_A(t) = -0,019\ln(t) + 0,0274.$$

Это позволило с удовлетворительной точностью описать знакопеременный изгиб балок с постоянным изгибающим моментом с учетом разнсопротивляемости и поврежденности материала. Алгоритм решения задачи реализован в программном модуле в пакете VS C++. Далее производился расчет для II балки, где изгибающие моменты на каждом этапе были различными (рис. 4). Тем самым данные этого испытания являются проверочными для рассматриваемой модели ползучести. Точками обозначены экспериментальные данные, сплошными линиями – расчетные зависимости с учетом разнсопротивляемости, поврежденности и влияния температурной выдержки. Из диаграмм видно, что полученная модель описывает уменьшение скорости прогиба с увеличением

времени выдержки при температуре. Это позволило приблизить расчетные данные к экспериментальным (ошибка на каждом этапе нагружения не превосходит 2%) знакопеременного чистого изгиба прямоугольной балки II.

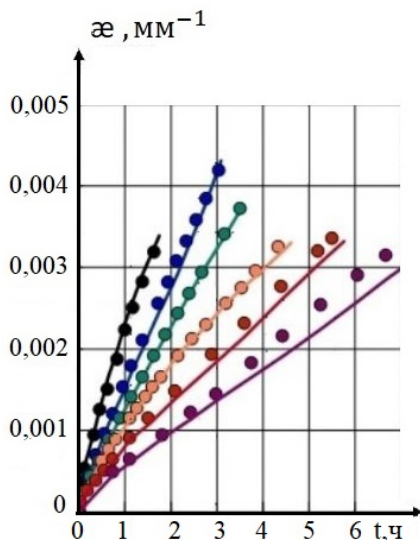


Рис. 4. Зависимость модуля прогиба от длительности испытания в виде экспериментальных (точки) и расчетных данных (сплошные линии) и под действием моментов на каждом этапе.

Помимо учета температурной выдержки на формообразование элементов конструкций в процессе ползучести необходимо учитывать также и процесс релаксации. На рис. 5 представлены релаксационные кривые для сплава В-1461 в диапазоне температур  $420 - 470^{\circ}\text{C}$ . Точками отмечены экспериментальные данные [4]<sup>4</sup>, а кривыми – численный расчет, полученный в результате решения задач о чистом изгибе балки прямоугольного сечения с учетом релаксации напряжений. Расчет проводился с использованием метода РКМ. Алгоритм решения задачи реализован в программном модуле в пакете VS C++. Для описания процесса ползучести использовался степенной закон Норта.

В результате сравнений данных, представленных на рис. 5, по численному методу РКМ (сплошные кривые), по аналогу Максвелла [4] (штриховая кривая) и экспериментально (точки), получено, что численный расчет максимально точно описывает процесс релаксации.

<sup>4</sup>Raevskaya G.A., Zakharchenko K.V., Larichkin A. Yu. Determination of optimum parameters of the technological process for plates forming from V95 and V-1461 alloys in creep applied in aircrafts constructed by “Sukhoi design bureau” // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2017. – Vol. 894. – P. 012078.

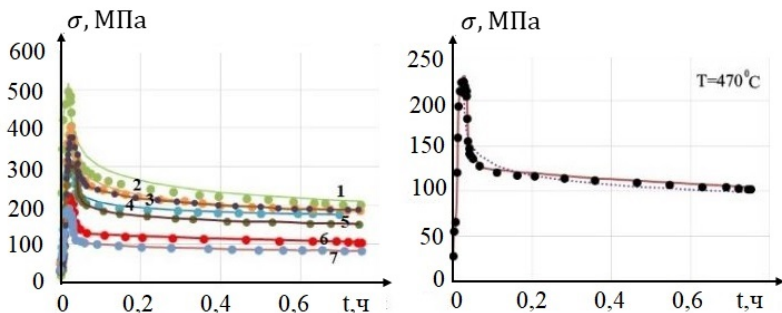


Рис. 5. Зависимость напряжений от времени алюминитиевого сплава В-1461 в диапазоне температур: 1 –  $T = 420^\circ\text{C}$ , 2 –  $T = 430^\circ\text{C}$ , 3 –  $T = 440^\circ\text{C}$ , 4 –  $T = 450^\circ\text{C}$ , 5 –  $T = 460^\circ\text{C}$ , 6 –  $T = 470^\circ\text{C}$ , 7 –  $T = 480^\circ\text{C}$ .

**Третья глава.** Решение обратной задачи для формообразования элементов конструкций.

Для решения обратной задачи формообразования оребренной панели проводится серия решений последовательных прямых задач, для отдельных ее составляющих определяются кривизны детали при заданных внешних усилиях.

Составные элементы конструкции оребренной панели — тавровые балки. Расчет прямой задачи, как тестовой, проведен для балок таврового сечения для высокопрочного сплава ВТ5-1 (Ti-Al-Sn-V) при температуре, близкой к сверхпластичности ( $T = 700^\circ\text{C}$ ), с различной постоянной нагрузкой.

На рис. 6 изображены зависимости кривизны от времени под действием постоянного изгибающего момента  $M$  для балок таврового сечения, полученные с использованием оценочных методов: 1) по характеристической точке (1); 2) по средней по объёму мощности рассеяния (2), а также численным путем с учетом комбинации свойств ползучести на растяжение и сжатие и повреждаемости материала (3). Точками отмечены экспериментальные данные на чистый изгиб тавра с ребром на растяжение (рис. 6а) и с ребром на сжатие (рис. 6б).

Было получено, что кривизна тавровой балки, полученная с использованием оценки по характеристической точки и оценки средней по объёму мощности рассеяния, отличается в среднем на 31,75 и 11,75% от данных эксперимента соответственно.

Абсолютное отклонение между результатами численного анализа и экспериментом составило 1,19%, что говорит о хорошем описании процесса ползучести при моделировании изгиба тавра с учетом разносопротивляемости и повреждаемости материала. Однако, влияние поврежденности в данном расчете мало в силу низкого уровня накопленных деформаций ползучести, но сам параметр заложен в численном расчете.

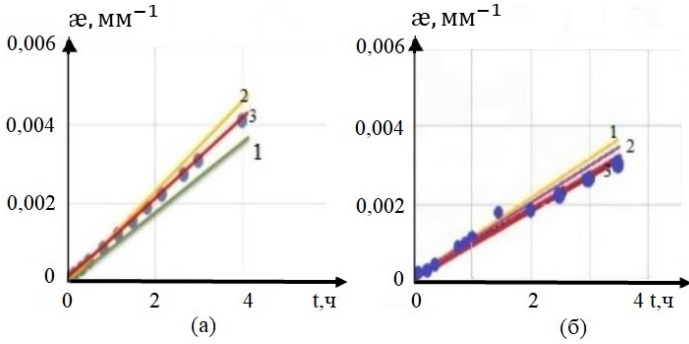


Рис. 6. Зависимости кривизны балки при установившейся ползучести от времени для балок таврового сечения — ребро на растяжение (а), ребро на сжатие (б).

Приводится решение обратной задачи формообразования балок таврового сечения. Определяется какой изгибающий момент  $M$  нужно прикладывать к балке во время процесса деформации в ползучести, чтобы при разгрузке в момент времени  $t$  получить целевую кривизну  $\varkappa$  детали.

В результате было получено, что расхождения между точной экспериментальной зависимостью и приближенным численным решением составляет около 2,3%.

На основе такого подхода можно переходить к моделированию формообразования оребренных конструкций и решать как прямые, так и обратные задачи.

Помимо этого проводится приближенный расчет геометрии оснастки для формообразования панелей в режиме ползучести. Расчет геометрии панели основывается на расчетах балок таврового сечения с учетом пластичности, ползучести и релаксации.

Задавалась следующая геометрия балки:  $b_1 = 1080$  мм,  $b_2 = 7,5$  мм,  $h_1 = 2$  мм,  $h_2 = 23$  мм. Материал АК4-1 при  $T = 195^{\circ}\text{C}$ . Для численного расчета методом РКМ использовались зависимости и характеристики материала с разупрочняющимся участком ползучести:

$$\varepsilon = \sigma/E + K|\sigma|^{k-1}\sigma,$$

$E = 60000$  МПа;  $K_1 = 1,795 \cdot 10^{-16}$  МПа $^{-m_1}$ ,  $m_1 = 10$  — для растяжения;  $K_2 = 1,01 \cdot 10^{-13}$  МПа $^{-m_2}$ ,  $m_2 = 8$  — для сжатия.

Скорости деформации ползучести второго и третьего участка описываются по зависимостям в энергетической форме:

$$d\varepsilon^{cr}/dt = B|\sigma|^{n-1}\sigma/(A_* - A)^r, \quad A = \int_0^{\varepsilon^{cr}} \sigma d\varepsilon^{cr}, \quad A_* = const,$$

где  $A_* = 20$  МПа;  $B_1 = 8,96 \cdot 10^{-11}$  МПа $^{n_1-r_1}$  ч $^{-1}$ ,  $n_1 = 7$ ,  $r_1 = 7$  — для растяжения;  $B_2 = 3,125 \cdot 10^{-11}$  МПа $^{n_2-r_2}$  ч $^{-1}$ ,  $n_2 = 6$ ,  $r_2 = 5$  — для сжатия.

В результате моделирования были получены эпюры прорелаксированных напряжений тавра в различные моменты времени (рис. 7а).

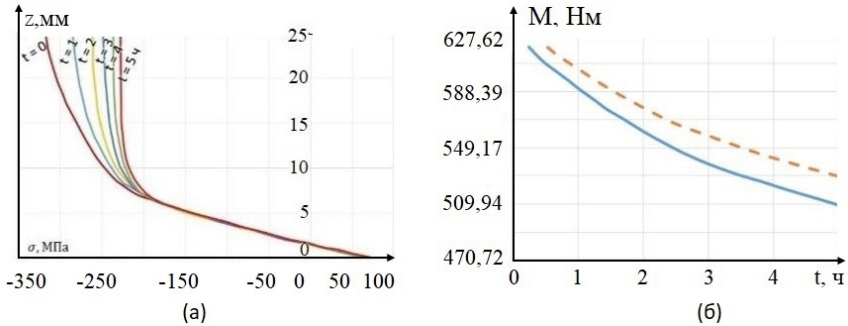


Рис. 7. (а) Эпюры прорелаксированных напряжений по сечению тавра; (б) Релаксация изгибающего момента

На рис. 7б сплошной линией получен расчет по методу РКМ, а штриховой – по характеристической точке (ХТ). Разница между численным расчетом и по ХТ составила 3%.

Проведенные расчеты и экспериментальное сопоставление полученных результатов подтверждают приближенные расчеты, которые достаточно надежны для оценки процессов ползучести и релаксации напряжений в оробренных панелях одинарной кривизны.

Процесс моделирования цилиндрического изгиба оробренной панели проводился для сплава АК4-Т при  $T = 200^{\circ}C$ . Необходимо было определить какие изгибающие моменты надо приложить к трем балкам таврового сечения для того, чтобы получить целевую кривизну детали радиуса  $R = 2000$  мм. Целевая форма панели достигалась, как в условиях пластичности, что потребовало больше приложить усилий, при этом сам процесс достаточно короткий по времени, так и в ползучести (усилия в разы ниже). Однако, время до завершения формообразования в этом случае существенно увеличивается.

Для поиска необходимых усилий использовался модуль оптимизации Нелдера-Мида. В результате решения прямой задачи формообразования балок таврового сечения было получено, что для получения целевого радиуса кривизны детали при пластичности необходимо прикладывать усилия  $M_1 = M_2 = -718,53$  Нм для первого и второго тавра,  $M_3 = -666,65$  Нм для третьего тавра, а в случае ползучести  $M_1 = M_2 = -273,47$  Нм,  $M_3 = -256,4$  Нм в течении 270 ч. (рис. 8).

Численное решение, полученное из модуля (желтая кривая), для случая пластического деформирования оробренной детали с последующей разгрузкой детали представлено на рис. 9. Штрих и штрих-пунктирные кривые зависимости кривизны от времени были получены с использованием трехмерных восьмиузловых гексагональных элементов HEX8 в программе MSC.Marc.

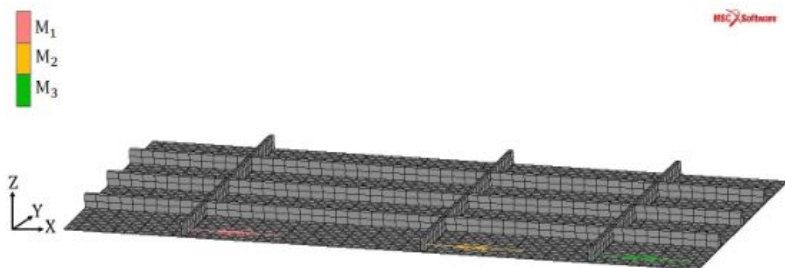


Рис. 8. Конечно-элементная сетка с квадратичными элементами HEX8.

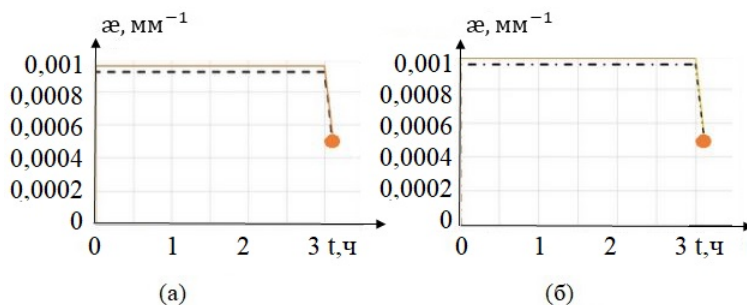


Рис. 9. Изменение кривизны с течением времени в процессе пластичности для первого тавра (а) и третьего тавра (б).

Расчет трехмерного моделирования формообразования оребренной панели в процессе ползучести (черная штрих-пунктирная кривая), приведен на рис. 10. Красная кривая – расчетные данные с использованием программного модуля.

Сравнивая расчетные значения кривизн, полученных из двух программ, можно сделать вывод, что относительная погрешность между полученными данными составила 4,14%. При этом итоговая кривизна оребренной панели равняется  $0,0005 \text{ мм}^{-1}$  (круглый маркер на рис. 9, 10). При заданных трех моментах и последующей разгрузке панели был получен требуемый радиус кривизны равный 2000 мм.

На рис. 11 показано, что изгибные напряжения в продольном направлении близки к нулю и процессы в соседних поперечных ребрах жесткости протекают независимо.

Оценка поврежденности материала в конечный момент времени в процессе ползучести достигла значения 0,24, а при пластичности – 0,56. Значения остаточных напряжений при пластическом деформировании превосходят таковые после процесса ползучести примерно в 2,5 раза.



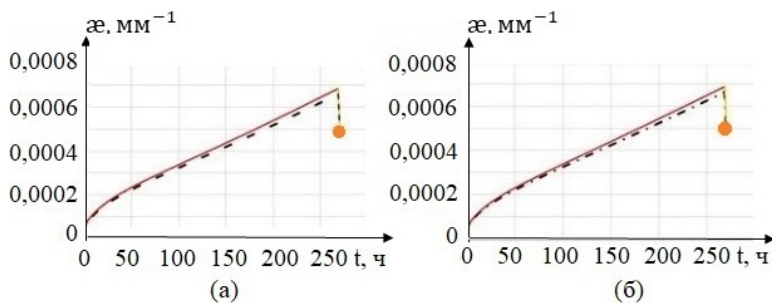


Рис. 10. Изменение кривизны с течением времени в процессе ползучести для первого тавра (а) и третьего тавра (б).

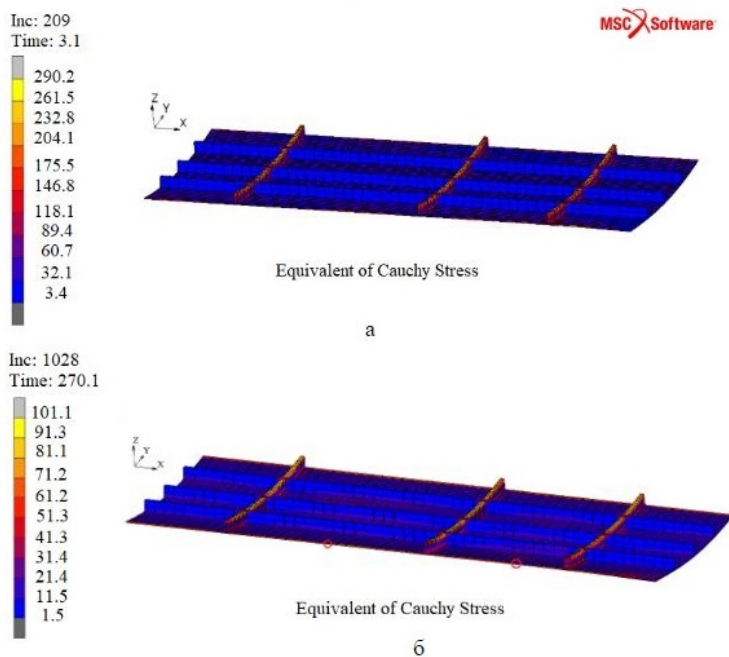


Рис. 11. Максимальные главные значения напряжений для ребренной панели: (а) в процессе пластичности; (б) в процессе ползучести.

### Заключение.

Основные выводы и научные результаты, полученные в рамках диссертационной работы.

1. Предложен вариант уточненной системы определяющих уравнений с одним скалярным параметром поврежденности для описания процессов дефор-

мирования (вплоть до разрушения) металлических материалов в условиях ползучести без ограничений на значения деформаций ползучести и диссипации энергии в момент разрушения.

2. Изложена методика идентификации параметров материала. Выполнена проверка ее адекватности экспериментальными данными по ползучести и длительной прочности для образцов из стали марки 45, титанового сплава ВТ9 и стали 09Г2С при стационарных и нестационарных условиях нагружения. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Разработан метод решения прямых задач формообразования знакопеременного изгиба балок прямоугольного сечения для материала с разными свойствами на растяжение и сжатие в режиме ползучести, с учетом температурной выдержки без нагрузки и учетом поврежденности материала. Показано, что для достоверного описания формообразования деталей в условиях ползучести необходимо учитывать влияние поврежденности материала и температурной выдержки.

3. Показано, что необходимо учитывать процесс релаксации для получения более точных моделей для описания формообразования деталей в условиях ползучести. Проведено моделирование процесса деформирования балок прямоугольного сечения в процессе ползучести с учетом процесса релаксации и повреждаемости. Выполнена проверка на алюмолитиевом сплаве В-1461.

4. Введен параметр поврежденности материала в конечно-элементный пакет MSC.Marc для процессов деформирования (вплоть до разрушения) элементов конструкций в условиях ползучести.

5. Реализованы алгоритмы для решения прямых и обратных задач формообразования элементов конструкций различного поперечного сечения для случая чистого изгиба балок в условиях пластичности и ползучести.

6. Разработан метод решения задач формообразования цилиндрического изгиба оребренной панели для получения целевой формы изделия в процессе пластичности и ползучести с учетом распружинивания детали при снятии нагрузки. Численная модель учитывает различие свойств материала на растяжение и сжатие, а также наличие накопленных повреждений в материале в процессе ползучести.

7. Разработана методика определения оптимальных параметров процессов деформирования оребренной панели, основанная на определении и расчетно-экспериментальном исследовании НДС балок различного поперечного сечения в условиях ползучести с учетом поврежденности материала.

**Основные результаты диссертационной работы отражены в следующих публикациях:**

в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Горев Б.В., Любашевская И.В., Панамарев В.А., **Иявойнен С.В.** Описание процесса ползучести и разрушения современных конструкционных ма-

териалов с использованием кинетических уравнений в энергетической форме // ПМТФ. — 2014. — Т.55, №6. — С. 132–144.

2. **Иявойнен С.В.**, Ларичкин А.Ю., Колодезев В.Е. Численное и экспериментальное исследование чистого изгиба балок из титанового сплава АБВТ-20 в условиях ползучести с учетом различных свойств на растяжение и сжатие // Вестник СамГТУ. — 2018. — Т.22., №3. — С.430–446.

индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus:

3. **Iyavoynen S.V.**, Banshchikova I.A. , Lubashevskaya I.V. and Legan M.A. High temperature creep of steel 09G2S under non-stationary loading // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Vol.894. — P. 012123.

4. Banshchikova I.A., **Iyavoynen S.V.**, Larichkin A.Yu. On rational modes of forming an axisymmetric shell of steel under creep // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Vol. 1268. — P. 012009.

5. **Iyavoynen S.V.** Deformation of T-shaped beams under creep conditions with different properties in tension and compression // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. - V. 1268. — P. 012028.

публикации в других печатных изданиях:

6. Любашевская И.В., Иявойнен С.В. Исследование процесса поврежденности в стержневых элементах конструкции при их деформировании в условиях ползучести // Сборник материалов III Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Ю.Н. Работнова «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций». – Новосибирск. 26-30 мая 2014 г. С.61.

7. Иявойнен С.В., Любашевская И.В. Описание нестационарных процессов ползучести с учетом повреждаемости материала //IX Всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», посвященная 55-летию полета Ю. А. Гагарина. Томск, 21-25 сентября 2016 г. С.279-280.

8. Банщикова И.А., Иявойнен С.В., Ларичкин А.Ю., Леган М.А., Любашевская И.В. Рациональные режимы формообразования полусферической оболочек из стали 09Г2С-12 в условиях ползучести // Краевые задачи и математическое моделирование : тем. сб. науч. ст. – Новокузнецк, 2017. – С. 40–47. – 500 экз. – ISBN 978-5-8353-1965-7.

9. Иявойнен С.В., Ларичкин А.Ю., Любашевская И.В. Моделирование балок таврового сечения в условиях ползучести из разносопротивляющегося материала // Проблемы оптимального проектирования сооружений: доклады 4-й Всероссийской конференции (Новосибирск , 11-13 апреля 2017 г.) Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2017. С.116-123.

10. Иявойнен С.В., Ларичкин А. Ю., Колодезев В. Е. Чистый изгиб балок из титанового сплава АБВТ20 с различными свойствами на растяжение и

сжатие в условиях ползучести // Материалы X Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела (18-22 сентября 2017г., Самара, Россия): в 2-х томах. Т.1./ под ред. Н.Ф. Морозова, А.В. Манжирова, В.П. Радченко. – Самара: СамГТУ, 2017. – С. 271-273.

11. Иявойнен С.В. Сравнительный анализ моделей разносопротивляющихся растяжению и сжатию при ползучести материалов // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 19-24 авг. 2019 г.): сборник трудов в 4 томах. Т. 3: Механика деформируемого твердого тела. Уфа: РИЦ БашГУ, 2019.—1534. С.313–315.

12. Бойко С.В., Ларичкин А.Ю. Моделирование формообразования орбренных панелей // Международной молодежной научной конференции "XLV Гагаринские чтения"(14-17 апреля 2020г., Москва, Россия): сборник трудов секции “Механика и моделирование материалов и технологий” – Москва, 2020. (принята в печать)

Выход в свет. Заказ № 272

Формат 60×84/16. Объем 1 п.л. Тираж 75 экз.

Отпечатано в Институте гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН  
630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15.