

А.М. Локощенко

**ПОЛЗУЧЕСТЬ
И ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ
МЕТАЛЛОВ**



**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В. ЛОМОНОСОВА**

Научно-исследовательский институт механики

А.М. Локощенко

**ПОЛЗУЧЕСТЬ
И ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ
МЕТАЛЛОВ**



**МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2016**

УДК 539.376

ББК 34.286

Л 73

Локощенко А.М. **Ползучесть и длительная прочность металлов.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. — 504 с. — ISBN 978-5-9221-1645-9.

Настоящая монография посвящена фундаментальному описанию явления ползучести, широко встречающегося при высокотемпературном деформировании металлов. Большое внимание уделено также анализу длительной прочности, которая характеризует напряжение, обеспечивающее неразрушение металла в течение заданного времени.

Монография будет полезна студентам старших курсов, магистрам, аспирантам и научным сотрудникам, занимающимся применением математических методов механики деформируемого твердого тела при исследовании высокотемпературного деформирования металлов.

ISBN 978-5-9221-1645-9

© ФИЗМАТЛИТ, 2016

© А.М. Локощенко, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	12
Введение	14
Глава 1. Ползучесть при одноосном растяжении	16
1.1. Механические свойства металлов при одноосном растяжении . . .	16
1.1.1. Упругость	17
1.1.2. Пластичность	17
1.1.3. Ползучесть	18
1.2. Экспериментальное исследование формоизменения растягиваемых образцов в процессе высокотемпературной ползучести	20
1.3. Простейшие соотношения теории ползучести	23
1.3.1. Теория установившейся ползучести	23
1.3.2. Деформационная теория старения	24
1.3.3. Теория течения	28
1.3.4. Теория упрочнения	28
1.4. Статически неопределимые стержневые системы	30
1.5. Проведение испытаний на ползучесть при постоянном растягивающем напряжении	34
1.6. Применение простейших теорий для описания ползучести в условиях ступенчатого изменения напряжения во времени	35
1.7. Вариант теории ползучести, в котором используется разделение деформаций	38
1.8. Одноосная ползучесть при переменных напряжениях	40
1.9. Кинетическая теория ползучести	41
1.9.1. Вариант теории для описания различия процессов ползучести при увеличивающихся и уменьшающихся напряжениях	42
1.9.2. Вариант теории, основанный на энергетическом подходе	44
1.9.3. Вариант теории для описания неустановившейся стадии ползучести и явления последействия	46
1.9.4. Вариант теории с двумя кинетическими параметрами	47
1.10. Релаксация напряжений	48

1.11. Релаксация неоднородного напряженного состояния в вязкоупругом стержне при использовании степенной модели ползучести . .	51
1.12. Релаксация неоднородного напряженного состояния в вязкоупругом стержне при использовании дробно-степенной модели ползучести	53
1.13. Теория наследственной ползучести	56
1.14. Методы и средства определения характеристик ползучести и релаксации напряжений	60
Глава 2. Длительная прочность при одноосном растяжении	65
2.1. Общие сведения	65
2.2. Методы и средства определения характеристик длительной прочности	65
2.2.1. Форма и размеры образцов	66
2.2.2. Проведение испытаний	66
2.2.3. Результаты испытаний	67
2.3. Вязкое разрушение	69
2.4. Хрупкое разрушение	72
2.5. Смешанное разрушение	74
2.6. Ползучесть стержня при больших деформациях вплоть до разрушения	76
2.7. Соотношения для описания ползучести и длительной прочности с сингулярной составляющей	78
2.8. Моделирование немонотонной зависимости предельной деформации ползучести от напряжения	80
2.9. Моделирование ресурса деформационной способности материала	83
2.10. Взаимосвязанное моделирование скорости установившейся ползучести и времени до разрушения металлов	86
2.10.1. Постановка задачи и основные соотношения	86
2.10.2. Нелинейные несовместные системы уравнений и методы их решения	87
2.10.3. Применение различных методов оптимизации при описании экспериментальных данных	89
2.11. Влияние концентрации напряжений на длительную прочность	90
2.12. Прогнозирование длительной прочности при больших временах до разрушения	93
Глава 3. Влияние структуры металлов на ползучесть и длительную прочность	96
3.1. Поврежденность в металлах и известные методы ее измерения	96
3.2. Определение поврежденности в металле с помощью измерения электрического сопротивления образцов и анализ полученных экспериментальных данных	100
3.2.1. Метод измерения поврежденности металлов в процессе испытания на ползучесть	100

3.2.2. Экспериментальное исследование ползучести и длительной прочности цилиндрических медных образцов при растяжении	102
3.2.3. Металлографическое исследование структуры образцов	106
3.2.4. Аналитическое описание процессов ползучести и накопления поврежденности	108
3.3. Влияние структуры титанового сплава ВТ6 с предварительно внедренным водородом на его ползучесть и длительную прочность	112
3.3.1. Подготовка образцов к испытаниям	112
3.3.2. Механические испытания	112
3.3.3. Изучение структуры образцов после испытаний	113
3.3.4. Описание экспериментальных данных	114
Глава 4. Описание длительной прочности при переменных напряжениях	
4.1. Длительная прочность при ступенчатом нагружении	117
4.2. Описание одностороннего отклонения от равенства $S = 1$ при условии разрушения $\text{тах}(\omega_1, \omega_2) = 1$	121
4.3. Описание одностороннего отклонения от равенства $S = 1$ при условии разрушения $(\omega_1^* + \omega_2^*) = 1$	126
<i>4.4. Описание двухстороннего отклонения от равенства $S = 1$ с помощью учета мгновенного накопления поврежденности</i>	<i>128</i>
4.5. Описание двухстороннего отклонения от равенства $S = 1$ с помощью двух взаимосвязанных параметров поврежденности	131
Глава 5. Ползучесть металлов при сложном напряженном состоянии	135
5.1. Общие сведения	135
5.2. Характеристики напряженно-деформированного состояния	136
5.2.1. Напряженное состояние	136
5.2.2. Деформированное состояние	137
5.2.3. Скорости деформаций	138
5.3. Уравнения ползучести при сложном напряженном состоянии	140
5.3.1. Уравнения установившейся ползучести	141
5.3.2. Уравнения теории старения	142
5.3.3. Уравнения теории течения и теории упрочнения	142
5.3.4. Переход к максимальному касательному напряжению	143
5.3.5. Уравнения ползучести при учете мгновенных деформаций	143
5.4. Растяжение и кручение тонкостенных образцов	146
5.5. Экспериментальная проверка основных гипотез	147
5.6. Энергетический вариант теории ползучести	149
5.7. Соотношения ползучести и длительной прочности при использовании дробно-степенных соотношений	150
5.8. Виброползучесть металлов при одноосном и сложном напряженном состоянии	151

5.8.1. Испытания при добавлении малого циклического растяжения к статическому растяжению или кручению	152
5.8.2. Испытания при постоянных растягивающих и циклических касательных напряжениях	153
5.8.3. Аналитическое описание эффекта виброползучести	155
5.9. Релаксация напряжений при однородном сложном напряженном состоянии	160
5.10. Релаксация напряжений при неоднородном сложном напряженном состоянии	161
5.11. Релаксация напряжений в диске	163
5.12. Ползучесть стержня круглого сечения при кручении	168
5.13. Установившаяся ползучесть вращающихся дисков.	171
5.14. Тонкостенные цилиндрические оболочки.	176
5.15. Установившаяся ползучесть толстостенной трубы	178
5.16. Линейные и нелинейные наследственные теории	182
Глава 6. Длительная прочность при сложном напряженном состоянии (кинетический подход)	184
6.1. Краткий обзор исследований с позиции кинетической теории длительной прочности	184
6.1.1. Введение	184
6.1.2. Монографии	185
6.1.3. Обзоры	186
6.1.4. Экспериментальные исследования	187
6.1.5. Скалярный параметр поврежденности	188
6.1.6. Векторный параметр поврежденности	189
6.1.7. Тензорный параметр поврежденности	191
6.2. Векторный параметр поврежденности в модели Л. М. Качанова	192
6.3. Векторный параметр поврежденности в модели И. В. Наместниковой и С. А. Шестерикова	195
6.4. Сравнение результатов испытаний при одноосном и равноосном плоском напряженном состоянии	197
6.4.1. Учет мгновенной поврежденности для изотропного материала	198
6.4.2. Учет мгновенной поврежденности в случае анизотропного материала	199
6.4.3. Учет анизотропии материала и взаимозависимости компонент вектора поврежденности	199
6.5. Влияние пути кратковременного нагружения на длительную прочность	201
6.5.1. Экспериментальные данные	201
6.5.2. Моделирование накопления поврежденности в процессе нагружения	202
6.5.3. Моделирование длительной прочности	209
6.6. Длительная прочность металлов при двухосном растяжении	210

6.7. Анализ длительного разрушения цилиндрической оболочки	212
6.8. Описание длительной прочности с помощью комбинации скалярного и векторного параметров поврежденности	214
Глава 7. Длительная прочность при сложном напряженном состоянии (критериальный подход)	216
7.1. Введение	216
7.2. Постановка задачи	217
7.3. Анализ результатов испытаний при четырех базовых эквивалентных напряжениях	219
7.4. Определение эквивалентного напряжения при исключении из рассмотрения случайных опытных данных	226
7.5. Анализ результатов испытаний с помощью усложненных эквивалентных напряжений	228
7.6. Анализ длительной прочности при сложном напряженном состоянии с учетом анизотропии материала	231
7.6.1. Введение коэффициента прочностной анизотропии тонкостенных труб	231
7.6.2. Метод определения коэффициента анизотропии материала тонкостенных труб	233
7.6.3. Анализ анизотропии материала тонкостенных труб (первый подход)	235
7.6.4. Анализ анизотропии материала тонкостенных труб (второй подход)	237
7.6.5. Экспериментальная проверка достоверности полученных результатов	240
Глава 8. Ползучесть и длительная прочность металлов в агрессивных средах	243
8.1. Приближенные методы решения уравнения диффузии	244
8.2. Приближенное решение одномерного уравнения диффузии в декартовых координатах	245
8.3. Решение уравнения диффузии при условии массообмена на поверхности стержня	251
8.4. Решение уравнения диффузии в осесимметричной постановке	254
8.5. Сравнение характеристик диффузионных процессов, соответствующих различным условиям	257
8.6. Приближенное решение двумерного уравнения диффузии	258
8.7. Моделирование запирающего эффекта диффузионного процесса	261
8.8. Длительная прочность длинного тонкого стержня в случае постоянного значения концентрации среды на фронте разрушения	265
8.9. Длительная прочность толстостенной трубы при одноосном растяжении	271
8.10. Связанная задача определения длительной прочности растягиваемого стержня в агрессивной среде	274

8.11. Анализ влияния окружающей среды на длительную прочность при учете деформаций ползучести	276
8.12. Анализ поверхностных эффектов с позиций физики твердого тела	279
8.13. Коэффициенты диффузии газов в твердых металлах при высоких температурах	280
8.13.1. Коэффициенты диффузии водорода в металлах	281
8.13.2. Коэффициенты диффузии других газов в металлах	282
Глава 9. Вероятностная модель ползучести и длительной прочности металлов в агрессивных средах	283
9.1. Введение	283
9.2. Постановка задачи	283
9.3. Длительная прочность	286
9.4. Упрощенный критерий длительной прочности	287
9.5. Ползучесть и длительная прочность растягиваемого стержня, погруженного в агрессивную среду	288
9.5.1. Основные уравнения	288
9.5.2. Разрушение стержня	290
9.5.3. Численное моделирование	290
9.5.4. Постоянная концентрация агрессивной среды	291
9.5.5. Описание длительной прочности металлов без учета агрессивной среды	295
9.6. Чистый изгиб длинного тонкого стержня	298
9.6.1. Основные уравнения	298
9.6.2. Постоянная концентрация	301
9.7. Толстостенная труба под внутренним давлением	304
9.8. Стационарное распределение концентрации агрессивной среды в тонкостенной цилиндрической оболочке	307
Глава 10. Влияние масштабного фактора на ползучесть и длительную прочность металлов	312
10.1. Краткий анализ результатов известных испытаний	312
10.1.1. Результаты испытаний плоских и трубчатых образцов	312
10.1.2. Результаты испытаний цилиндрических образцов	316
10.1.3. Сравнение результатов испытаний цилиндрических и трубчатых образцов	316
10.1.4. Результаты испытаний при сложном напряженном состоянии	318
10.2. Моделирование масштабного фактора с помощью кинетического подхода	320
10.2.1. Постановка задачи	320
10.2.2. Описание слабого масштабного эффекта	321
10.2.3. Описание сильного масштабного эффекта	322
10.2.4. Влияние масштабного фактора на характеристики ползучести	324

10.3. Моделирование влияния агрессивной окружающей среды на ползучесть и длительную прочность	325
10.3.1. Применение модели, основанной на введении диффузионного фронта	325
10.3.2. Описание масштабного фактора длительной прочности с помощью вероятностной модели	327
10.3.3. Ползучесть и длительная прочность цилиндрических образцов различного радиуса поперечного сечения	329
10.4. Введение средней толщины поверхностного разрушенного слоя.	331
10.4.1. Методы оценки средней толщины поверхностного разрушенного слоя	331
10.4.2. Влияние формы образцов на длительную прочность	333
10.4.3. Длительная прочность тонкостенных образцов при сложном напряженном состоянии	334
10.4.4. Учет зависимости толщины разрушенного слоя от напряжения	334
Глава 11. Ползучесть стержней и пластин вплоть до разрушения при чистом изгибе	338
11.1. Краткий обзор известных решений задач о чистом изгибе балок при ползучести	338
11.2. Ползучесть стержня и релаксация напряжений в нем при чистом изгибе.	340
11.3. Ползучесть стержня при чистом изгибе с учетом поврежденности материала	345
11.4. Чистый изгиб стержня при установившейся ползучести с разными свойствами материала при растяжении и сжатии	348
11.4.1. Чистый изгиб стержня прямоугольного поперечного сечения	348
11.4.2. Чистый изгиб стержня круглого поперечного сечения	351
11.4.3. Сравнение решений задач об изгибе стержней квадратного и круглого поперечных сечений	352
11.5. Чистый изгиб стержня при ползучести с учетом поврежденности и разных свойств материала при растяжении и сжатии	353
11.5.1. Постановка задачи и метод решения	353
11.5.2. Результаты расчетов	356
11.6. Ползучесть стержня вплоть до разрушения при изгибе в агрессивных средах	358
11.7. Длительное разрушение пластины при переменных изгибающих моментах в присутствии агрессивной среды.	361
Глава 12. Выпучивание цилиндрической оболочки под действием внешнего гидростатического давления	363
12.1. Деформирование кольца из упруго-идеально-пластического материала при малых перемещениях.	364
12.2. Деформирование кольца из вязкоупругого идеально пластического материала при малых перемещениях.	368

12.2.1. Деформирование кольца, материал которого при $t = 0$ находится в упругом состоянии	369
12.2.2. Деформирование кольца, материал которого при $t = 0$ находится в упруго-идеально-пластическом состоянии с одной пластической областью	374
12.2.3. Деформирование кольца, материал которого при $t = 0$ находится в упруго-идеально-пластическом состоянии с двумя пластическими областями	375
12.3. Деформирование кольца из упругопластического материала при больших перемещениях	375
12.3.1. Линейно упругий материал	378
12.3.2. Упруго-идеально-пластический материал	380
12.3.3. Упругопластический материал с линейным упрочнением	381
12.3.4. Результаты вычислений	382
12.4. Сплющивание нелинейно упругого кольца.	383
12.4.1. Первый этап деформирования	385
12.4.2. Второй этап деформирования	387
12.5. Деформирование кольца в условиях установившейся ползучести материала	389
12.6. Ползучесть кольца с одной осью симметрии	395
12.7. Деформирование кольца, находящегося в состоянии неустановившейся ползучести	402
12.8. Деформирование кольца из материала, описываемого дробно-степенной моделью ползучести	404
12.8.1. Постановка задачи	404
12.8.2. Деформирование кольца сплошного сечения	405
12.8.3. Деформирование двухслойного кольца	407
12.8.4. Аппроксимация искомых функций при малых значениях овальности двухслойного кольца	409
12.9. Деформирование кольца под действием внешнего гидростатического давления и агрессивной окружающей среды	412
12.10. Цилиндрические оболочки конечной длины.	413
12.11. Экспериментальное исследование деформирования оболочек в условиях внешнего гидростатического давления при ползучести	415
12.11.1. Первая экспериментальная серия	416
12.11.2. Вторая экспериментальная серия	418
12.11.3. Третья экспериментальная серия	419
Глава 13. Осадка цилиндров в условиях ползучести	423
13.1. Краткий обзор исследований осадки цилиндров при комнатной и высоких температурах.	423
13.2. Исследование осадки круговых цилиндров при ползучести.	426
13.2.1. Постановка задачи	426
13.2.2. Решение задачи А	427
13.2.3. Решение задачи Б	430
13.2.4. Анализ результатов	430

13.3. Оптимальная программа нагружения цилиндра при осадке	433
13.4. Осадка полого цилиндра в стесненных условиях	437
13.4.1. Осадка полого цилиндра при отсутствии перемещения на его внутренней поверхности	437
13.4.2. Осадка полого цилиндра при допущении перемещения на его внутренней поверхности	439
13.4.3. Осадка полого цилиндра с жестким внешним ограниче- нием	441
13.5. Экспериментальное исследование осаживания сплошных цилин- дров при ползучести	441
Глава 14. Ползучесть мембран в свободных и стесненных усло- виях	446
14.1. Краткий обзор исследований деформирования пластин и оболочек при больших деформациях	446
14.2. Свободное деформирование длинной прямоугольной мембраны . .	447
14.2.1. Постановка задачи	447
14.2.2. Первая стадия	449
14.2.3. Вторая стадия	449
14.3. Ползучесть длинной прямоугольной мембраны внутри клиновид- ной матрицы	450
14.4. Ползучесть длинной прямоугольной мембраны внутри криволи- нейной матрицы	455
14.4.1. Идеальное скольжение	458
14.4.2. Прилипание	458
14.4.3. Скольжение с учетом трения	459
14.4.4. Анализ результатов вычисления характеристик деформи- рованной мембраны внутри криволинейной матрицы	459
14.5. Ползучесть длинной прямоугольной мембраны внутри П-образ- ной матрицы	460
14.5.1. Идеальное скольжение	461
14.5.2. Прилипание	462
14.6. Круглая вязкоупругая мембрана под действием поперечного дав- ления	463
Приложение П1. Значения материальных констант в моделях установившейся и неустойчивой ползучести.	468
Приложение П2. Коэффициенты диффузии газов в твердых ме- таллах при высоких температурах	470
Литература	473