

Ю. Н. Работнов

Ползучесть
элементов
конструкций





РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ОТДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИКИ, МАШИНОСТРОЕНИЯ,
МЕХАНИКИ И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ

Ю.Н. Работнов

Ползучесть элементов конструкций

Второе издание, стереотипное



МОСКВА НАУКА 2014

УДК 531/534
ББК 22.2
P13

Работнов Ю.Н.

Ползучесть элементов конструкций / Ю.Н. Работнов ; Отд. энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН. – 2-е изд., стереотипное. – М. : Наука. 2014. – 752 с. – ISBN 978-5-02-038473-6 (в пер.).

Книга выходит к 100-летию выдающегося ученого-механика Ю.Н. Работнова, внесшего принципиальный вклад в развитие теории пластичности, теории оболочек и устойчивости упруго-вязкопластических систем. Ему принадлежат фундаментальные результаты в механике разрушения, механике поврежденности, механике композитных материалов, он был инициатором разработок новых методов и стандартов расчетов конструкций и деталей машин на прочность. Настоящая монография занимает главное место в ряду многих книг ученого.

Для ученых-механиков, специалистов по прочности.

Научное издание

Юрий Николаевич Работнов

ПОЛЗУЧЕСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

2-е издание, стереотипное

*Утверждено к печати Отделением энергетики,
машиностроения, механики и процессов управления
Российской академии наук*

Художник *Ю.И. Духовская*. Художественный редактор *В.Ю. Яковлев*

Подписано к печати 15.01.2014. Формат 60 × 90 ¹/₁₆. Гарнитура Обыкновенная новая
Печать офсетная. Усл.печ.л. 47,0. Уч.-изд.л. 44,6. Тип. зак. 3015.

Издательство “Наука” 117997, Москва, Профсоюзная ул., 90

E-mail: secret@naukaran.ru www.naukaran.ru

Первая Академическая типография “Наука”
199034, Санкт-Петербург, 9-я линия, 12/28

ISBN 978-5-02-038473-6

© Работнов Ю.Н., 1966

© Российская академия наук, 2014

© Редакционно-издательское оформление.
Издательство “Наука”, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	9
Введение	11
Глава I	
Основные понятия механики твердого тела	16
§ 1. Тензоры в трехмерном евклидовом пространстве	17
§ 2. Свертывание тензоров. Инварианты	22
§ 3. Взаимный базис. Ковариантные и контравариантные составляющие тензора	25
§ 4. Дифференциальные операции	30
§ 5. Теория деформаций в сплошной среде	36
§ 6. Теория напряжений	38
§ 7. Декартовы координаты. Определение перемещений	41
§ 8. Некоторые дальнейшие свойства тензора напряжений	44
§ 9. Тензор скоростей деформации. Инварианты тензоров деформации и скоростей деформации	50
§ 10. Упругое тело	54
§ 11. Изотропное упругое тело	58
Глава II	
Теория пластичности	62
§ 12. Деформационная теория пластичности	63
§ 13. Деформационная теория при пропорциональном нагружении	68
§ 14. Постулат упрочнения Друкера	70
§ 15. О возможных границах применимости деформационной теории пластичности	73
§ 16. Двумерная модель упрочняющегося тела	78
§ 17. Теории течения при гладкой поверхности нагружения. Изотропное упрочнение	86
§ 18. Теории течения с трансляционным упрочнением	89
§ 19. Сингулярные поверхности нагружения	91
§ 20. Теория скольжения	96
§ 21. Модель плоского тела	101
§ 22. Течение с сингулярной поверхностью нагружения	105
Глава III	
Линейные вязко-упругие среды	108
§ 23. Простейшие вязко-упругие тела	109
§ 24. Дифференциальные законы деформирования более общего вида	114
§ 25. Наследственно-упругое тело	119

§ 26.	Условие замкнутого цикла Вольтерра	122
§ 27.	Сингулярные ядра наследственности	124
§ 28.	Экспоненциальные операторы произвольного порядка	126
§ 29.	Теорема умножения для \mathcal{E}_α -операторов	129
§ 30.	Асимптотические формулы для \mathcal{E} -функций	132
§ 31.	Общая задача теории наследственной упругости. Принцип Вольтерра	134
§ 32.	Применение трансформации Лапласа к задачам теории наследственной упругости	137
§ 33.	Ядра более общего вида	140
§ 34.	Линейная ползучесть бетона	144
§ 35.	Дальнейшие приложения принципа Вольтерра	147
§ 36.	Простейшие динамические задачи	149
§ 37.	Комплексные модули	151
§ 38.	Функции ползучести и релаксации	153
§ 39.	Задачи о подвижной нагрузке. Малые скорости	156
§ 40.	Движение штампа по границе вязко-упругой среды	159
§ 41.	Некоторые экспериментальные данные по ползучести пластмасс	162

Глава IV

Ползучесть металлов. Основные опытные факты и феноменологические теории	166	
§ 42.	Основные сведения о ползучести	166
§ 43.	Эмпирические формулы для кривых ползучести	169
§ 44.	Подобие кривых ползучести	172
§ 45.	Температурные зависимости	177
§ 46.	Релаксация напряжений	183
§ 47.	Простейшие теории ползучести	185
§ 48.	Теории старения	190
§ 49.	Гипотеза уравнения состояния	196
§ 50.	Аналитические выражения для закона упрочнения	200
§ 51.	Связь ползучести и релаксации по теории упрочнения	205
§ 52.	Наследственная теория ползучести	209
§ 53.	Экспериментальная проверка гипотезы упрочнения при переменных нагрузках	213
§ 54.	Другие исследования ползучести при переменных нагрузках на основе гипотезы упрочнения	218
§ 55.	Кинетические уравнения ползучести	223
§ 56.	Разупрочнение при ползучести	229
§ 57.	Ползучесть и мгновенная пластическая деформация	233
§ 58.	Кратковременная ползучесть. Основные факты	238
§ 59.	Кратковременная ползучесть. Зависимость для скорости	243
§ 60.	Ползучесть при сжатии. Реверсирование нагрузки	246
§ 61.	Малые отклонения от основного состояния	249
§ 62.	Динамическая ползучесть	252

Глава V

Ползучесть при сложном напряженном состоянии	255	
§ 63.	Установившаяся ползучесть	256
§ 64.	Изотропная ползучесть	258
§ 65.	Потенциал ползучести	261
§ 66.	Специальные формы закона ползучести	266
§ 67.	Обработка опытов на растяжение с кручением	271
§ 68.	Квазилинейные уравнения установившейся ползучести	274
§ 69.	Анизотропная ползучесть	281
§ 70.	Определение параметров анизотропии	286

§	71. Неустановившаяся ползучесть	288
§	72. Теории ползучести деформационного типа	291
§	73. Теории течения	295
§	74. Обобщение теории упрочнения	298
§	75. Квазуюстановившаяся ползучесть	299
§	76. Экспериментальная проверка теорий ползучести при сложном напряженном состоянии. Ранние работы	303
§	77. Ползучесть при сложном напряженном состоянии и постоянных нагрузках. Опыты Джонсона	306
§	78. Дальнейший анализ опытов Джонсона	314
§	79. Экспериментальные исследования ползучести при сложном напряженном состоянии (продолжение)	325
§	80. Исследования Наместникова	331
§	81. Ползучесть при сложном напряженном состоянии и переменных нагрузках	334
§	82. Релаксация напряжений в сложном напряженном состоянии	339
Глава VI		
	Длительное разрушение при высоких температурах	344
§	83. Основные сведения о длительной прочности	344
§	84. Температурно-временные зависимости длительной прочности	347
§	85. Вязкое разрушение	351
§	86. Разрушение, сопровождающееся охрупчиванием	357
§	87. Смешанное разрушение. Гипотеза Качанова	360
§	88. Более общая гипотеза разрушения. Хрупкий случай	363
§	89. Смешанное разрушение. Кратковременная ползучесть	366
§	90. Разрушение при циклических нагрузках	370
§	91. Опытное исследование длительной прочности при сложном напряженном состоянии	372
§	92. Простейшие критерии длительной прочности	376
§	93. Общие представления о длительном разрушении при сложном напряженном состоянии	379
§	94. О возможности построения более общей теории длительного разрушения	383
Глава VII		
	Установившаяся ползучесть. Общая теория и простейшие задачи	386
§	95. Единственность в малом и устойчивость	386
§	96. Вариационный принцип Лагранжа	390
§	97. Вариационный принцип Кастильяно	392
§	98. Некоторые следствия вариационных принципов	393
§	99. Частные формы уравнений установившейся ползучести	396
§	100. Моделирование установившейся и квазуюстановившейся ползучести	399
§	101. Степенной закон ползучести. Теорема Келледайна и Друкера	401
§	102. Установившаяся ползучесть ферм	405
§	103. Применение поверхностей постоянной мощности диссипации к расчету ферм	412
§	104. Кинематический способ расчета ферм. Примеры	416
§	105. Способ Качанова	421
Глава VIII		
	Установившаяся ползучесть. Изгиб и кручение	423
§	106. Установившаяся ползучесть при чистом изгибе	423
§	107. Общий случай чистого изгиба	429

108.	Тонкостенные стержни открытого профиля	432
109.	Приближенный способ исследования изгиба тонкостенных стержней	437
110.	Деформация балок и рам при изгибе	441
111.	Ползучесть при кручении	447
112.	Кручение тонкостенных стержней замкнутого профиля	450
113.	Кручение тонкостенных стержней открытого профиля	454
114.	Вариационные методы решения задач о кручении	456
115.	Изгиб и кручение тонкостенных стержней замкнутого профиля	458
116.	Изгиб стержней при наличии продольной силы	461
117.	Стержень идеального двутаврового сечения	464
118.	Простейшие задачи продольно-поперечного изгиба	466

Глава IX

Плоские осесимметричные задачи теории установившейся ползучести		471
119.	Основные уравнения плоской задачи	471
120.	Толстостенные трубы	475
121.	Чистый изгиб части кругового цилиндра	479
122.	Вращающиеся диски	486
123.	Ползучесть сплошного диска постоянной толщины	488
124.	Ползучесть диска с центральным отверстием	492
125.	Прямое численное интегрирование уравнений ползучести вращающегося диска	494
126.	Диск равного сопротивления	496
127.	Расчет дисков по методу последовательных приближений	500
128.	Другой вариант метода последовательных приближений	506
129.	Концентрация напряжений около отверстия в равномерно растягиваемой пластинке	509
§ 130.	Диск гиперболического профиля, нагруженный радиальными силами	515

Глава X

Установившаяся ползучесть пластин и оболочек		517
131.	Изгиб пластин. Основные уравнения линейной теории	517
132.	Потенциал усилий и моментов. Основные уравнения ползучести пластин	521
133.	Частично линеаризованные уравнения ползучести пластин	523
134.	Ползучесть пластинок при изгибе	526
135.	Ползучесть круглых пластин по теории типа Мизеса	530
136.	Применение вариационных методов к расчету пластин	536
137.	Расчет пластин на ползучесть при критерии Греска	537
138.	Более сложные виды нагрузок	542
139.	Изгиб пластины распределенной нагрузкой	544
140.	Некруглые пластины	547
141.	Ползучесть оболочек	549
142.	Безмоментная теория оболочек	551
143.	Безмоментная теория оболочек — определение деформаций и перемещений	555
144.	Безмоментные оболочки вращения	558
145.	Многослойные оболочки с жестко связанными слоями	560
146.	Двухслойная модель оболочки	563
147.	Уравнения теории оболочек	568
148.	Техническая теория оболочек	571
149.	Техническая теория ползучести двухслойных оболочек	577

§ 150. Уравнения осесимметричной ползучести круговой цилиндрической оболочки	581
§ 151. Степенной закон ползучести. Приближенное исследование краевого эффекта	585
§ 152. Полубесконечная оболочка с шарнирно закрепленным краем	589
§ 153. Полубесконечная оболочка с защемленным краем	592
§ 154. Распространение технической теории на случай $T_{11} \neq 0$	595
§ 155. Цилиндрическая оболочка, сжатая осевой силой	597
§ 156. Краевой эффект в цилиндрической оболочке, нагруженной распределенным давлением и осевой силой	598
§ 157. Приближенные выражения потенциала скоростей для произвольной оболочки	601

Глава XI

Неустановившаяся ползучесть	602
§ 158. Применение гипотезы упрочнения к расчетам на неустановившуюся ползучесть	602
§ 159. Неустановившаяся ползучесть при изгибе	605
§ 160. Численное решение задачи о неустановившейся ползучести стержня	608
§ 161. Неустановившаяся ползучесть дисков	613
§ 162. Неустановившаяся ползучесть дисков. Случай 2, 3, 4	618
§ 163. Ползучесть вращающегося цилиндра и трубы	621
§ 164. Вариационный принцип Качанова в теории неустановившейся ползучести	626
§ 165. Вариационный принцип Уанга и Прагера	629
§ 166. Приближенное решение релаксационных задач. Метод Шестерикова	632
§ 167. Смешанный вариационный принцип	634
§ 168. Применение смешанного вариационного принципа к задаче изгиба	637
§ 169. Изгиб стержня при ползучести с упрочнением	640
§ 170. Неустановившаяся ползучесть пластин	643
§ 171. Общий прием исследования неустановившейся ползучести на основе теории упрочнения	645
§ 172. Применение теории старения к расчетам на неустановившуюся ползучесть	648
§ 173. Определение времени до разрушения	651
§ 174. Уточненное определение времени хрупкого разрушения вращающегося диска	654

Глава XII

Геометрически-нелинейные задачи теории ползучести. Критическое время	660
§ 175. Простейшие геометрически-нелинейные задачи ползучести	660
§ 176. Гибкая нить	662
§ 177. Изгиб балки с шарнирно закрепленными концами	665
§ 178. Критическое время сжатого стержня	670
§ 179. Учет мгновенной пластической деформации при определении критического времени	677
§ 180. Критическое время сжатого стержня. Некоторые дальнейшие результаты	681
§ 181. Смешанный вариационный принцип в применении к задачам выпучивания	687

§ 182. Выпучивание сжатого стержня. Применение вариационного метода	689
§ 183. Устойчивость арки	693
§ 184. Некоторые исследования устойчивости оболочек при ползучести	698
§ 185. Осесимметричное выпучивание коротких цилиндрических оболочек	704
§ 186. Приближенный метод решения задач выпучивания в нелинейной постановке	704
§ 187. Устойчивость сжатого вязко-упругого стержня	708
§ 188. Устойчивость сжатого стержня, материал которого следует закону упрочнения	713
§ 189. Условные линеаризованные критерии устойчивости	715
§ 190. Применение линеаризованных уравнений к задаче выпучивания	719
§ 191. Линеаризованные уравнения ползучести с упрочнением	722
§ 192. Выпучивание пластин по линеаризованной теории	724
Библиография	727
Указатель имен	743
Предметный указатель	745