

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	9
Список обозначений.....	11
Глава 1. Развитие теории изгиба	15
1.1. Краткий экскурс в историю теории изгиба балок.....	15
1.2. Три преимущества и шесть недостатков испытаний на изгиб.....	21
1.3. Изгиб кривой балки	24
1.4. Методы испытания криволинейных образцов-свидетелей и сегментов колец.....	29
1.5. Сложный изгиб. Косой изгиб. Внецентренное растяжение-сжатие. Центр изгиба.....	32
1.6. Изгиб, кручение тонкостенных стержней.....	41
1.7. Точное решение задачи изгиба изотропной балки	48
1.8. Стержневые системы. Фермы. Сетчатые балки	52
1.9. Анализ эффектов при применении различных МКЭ-моделей.....	56
1.10. Топологическая оптимизация изгибаемых элементов	58
Глава 2. Нелинейные задачи изгиба	61
2.1. Учет разномодульности при растяжении и сжатии	61
2.2. Нелинейная упругость.....	64
2.3. Неупругость, пластический шарнир	74
2.4. Равнопрочная балка	78
2.4.1. Равнопрочная тяжелая балка.....	78
2.4.2. Равнопрочная тяжелая балка, свободно опертая на концах	79
2.4.3. Равнопрочная консольная тяжелая балка постоянной толщины.....	80
2.4.4. Равнопрочная тяжелая балка постоянной ширины и переменной толщины	81
2.4.5. Равнопрочная консольная балка типа констэра	82
2.4.6. Энергетический анализ эффективности равнопрочных балок при разных условиях нагружения.....	99
2.4.7. Заключительные замечания	101
Выводы по разделу 2.4	103
2.5. Изгиб в условиях ползучести.....	103
2.5.1. Определение мгновенной деформации при чистом изгибе стержня симметричного профиля	103
2.5.2. Определение мгновенной деформации при чистом изгибе в плоскости симметрии	105
2.5.3. Установившаяся ползучесть равномерно нагретого стержня, сечение которого имеет две оси симметрии.....	107

2.5.4. Расчеты на ползучесть при изгибе по изохронным кривым	109
2.5.5. Ползучесть статически неопределимых балок.....	110
2.6. Частотные зависимости комплексного модуля и методы восстановления кривой ползучести	111
Глава 3. Изгиб композитных балок и слоистых композитных панелей	121
3.1. Теория упругости анизотропного тела. Обобщенный закон Гука.....	121
3.1.1. Определяющие соотношения и постановка задачи теории упругости анизотропного тела	121
3.1.2. Обобщенный закон Гука в тензорной и матричной формах	122
3.1.3. Классы упругой симметрии и число независимых упругих констант	126
3.1.4. Связь тензорных, матричных и технических постоянных материала.....	130
3.1.5. О задачах теории упругости (дополнительные замечания)	133
3.2. Особенности испытаний композитов на изгиб	137
3.2.1. Учет «сползания» с опор	137
3.2.2. Учет смятия под опорами.....	138
3.2.3. Четырехточечные схемы нагружения	139
3.3. Уточненный анализ касательных напряжений в ортотропной балке	140
3.4. Метод определения межслойного модуля сдвига.....	142
3.4.1. Влияние характера неоднородности межслойных касательных напряжений	144
3.4.2. Вычисление поправки к прогибу с помощью квадратичной аппроксимации эпюры межслойных касательных напряжений	148
3.4.3. МКЭ-расчеты, подтверждающие возможность элементарной оценки поправки к прогибу и возможность определения модуля сдвига	152
3.4.4. Экспериментальная проверка влияния поправки к прогибу на модуль сдвига, измеренный при разной ширине образцов.....	153
Выводы по разделу 3.4	154
3.5. Изгиб многослойных анизотропных пластин.....	154
3.6. Изгиб трехслойных панелей типа сэндвич	157
3.6.1. Основные эффекты и объекты применения трехслойных панелей типа сэндвич	157
3.6.2. Оценки изгибной жесткости трехслойных панелей типа сэндвич	159

3.6.3. Изгибная жесткость и прочность трехслойных панелей типа сэндвич	161
Глава 4. Разрушение при изгибе	163
4.1. Послойный метод расчета слоистых панелей	163
4.1.1. Традиционный послойный метод (ply-by-ply)	163
4.1.2. Упрощенный послойный метод	167
4.1.3. Метод для пар слоев и метод конечного слоя	169
4.2. Критерии прочности волокнистых композитов	171
4.2.1. Предмет механики деформируемого твердого тела	171
4.2.2. Виды потери несущей способности	172
4.2.3. «Теории» предельных состояний	179
4.2.4. Предельные поверхности в пространстве напряжений	188
4.2.5. Модификация критериев для анизотропных материалов	191
4.2.6. Предельные поверхности для упругопластических композитных структур	203
4.2.7. Критерии прочности типа Кулона–Мора, учитывающие направленный характер разрушения волокнистых композитов	207
4.3. Расслоения композитных балок при изгибе	215
4.3.1. Критерий расслоения при изгибе	216
4.3.2. Межслойная прочность при циклическом изгибе	220
4.3.3. Анализ влияния неоднородности касательных напряжений на межслойную прочность	222
Выводы по разделу 4.3	226
4.4. Масштабный эффект при разрушении расслоением	227
4.5. Расслоение при изгибе и кручении	227
4.5.1. Расслоение при кручении	230
4.5.2. Расслоение при изгибе с кручением	232
4.6. Множественное расщепление при изгибе надрезанных образцов	233
4.6.1. Модель чередующегося разрушения при растяжении пластины из однонаправленного композита с боковыми надрезами	233
4.6.2. Отклонение трещины расщепления	235
4.6.3. Чередующееся разрушение надрезанных балок при изгибе	236
4.7. Поворот трещины при изгибе композитной балки	238
4.7.1. Применение линейной механики разрушения к волокнистым композитам	238
4.7.2. Измерение трещиностойкости композитов	238
4.7.3. Анализ локальных напряжений, вызывающих расщепление	241

4.7.4. Замечание об устойчивости малой трещины расщепления	244
4.7.5. Экспериментальное определение КИН при повороте трещины	246
4.7.6. Условие равного сопротивления расщеплению и разрушению	249
4.7.7. Оценка прочности по условию множественного расщепления	250
4.8. Методы определения удельной работы расслоения при изгибе двухконсольных образцов и расслоенных композитных балок	254
4.8.1. Отдираание слоя	254
4.8.2. Плоский двухконсольный образец	255
4.8.3. Метод площадей	258
4.8.4. Изгиб образцов с межслойной трещиной	259
4.8.5. Растяжение образцов с расслоением	260
4.9. Модель накопления повреждений при изгибе	260
4.9.1. Параметр поврежденности Работнова–Качанова	260
4.9.2. Замедленное разрушение при изгибе	263
4.9.3. Критерий накопления повреждений в вершине трещины	266
Глава 5. Биомеханические принципы создания элементов, работающих на изгиб	270
5.1. Ветвящиеся равнопрочные структуры. Правило Леонардо	270
5.1.1. Изгибная податливость разветвляющейся структуры с равной суммарной площадью сечения ветвей	271
5.1.2. Об одном парадоксе при расчете прогиба равнопрочных балок	276
5.1.3. Ветвление стержня с квадратным сечением	278
5.1.4. Ветвление с равнопрочным изменением размеров сечений	279
5.1.5. Примеры ветвления дерева с сохранением правила Леонардо	281
Выводы по разделу 5.1	283
5.2. Оваллизация труб и стеблей бамбука при изгибе	284
5.2.1. Изгиб тонкостенных ортотропных труб	285
5.2.2. Разрушение тонкостенных ортотропных труб	289
5.2.3. Оптимизация формы и анизотропии трубы: диаграммы разрушения	292
5.2.4. Применение расчетов к строению стебля бамбука	300
5.2.5. Заключительные замечания о влиянии жесткости на разрушение растений	301
5.2.6. Энергетический критерий расщепления при оваллизации сечения звена бамбука	302