

**Ф. В. ГРЕЧНИКОВ**  
**В. Р. КАРГИН**

**ТЕОРИЯ  
ПЛАСТИЧЕСКОГО  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ  
МЕТАЛЛОВ**

**Ф. В. Гречников, В. Р. Каргин**

# **ТЕОРИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ**

Учебник

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2023

УДК 539.374  
ББК 30.121  
Г81

*Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» в качестве учебника для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 15.03.01 «Машиностроение», 22.03.02 «Металлургия»*

**Рецензенты:**

доктор технических наук, доцент *А. И. Хаймович*;  
кандидат технических наук, доцент *А. П. Быков*

**Гречников, Ф. В.**

**Г81** Теория пластического деформирования металлов : учебник / Ф. В. Гречников, В. Р. Каргин. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 448 с. : ил., табл.  
ISBN 978-5-9729-1195-0

Изложены основные разделы теории пластического деформирования металлов: теории напряжений и деформаций, упругости и пластичности и их приложения к теоретическим и практическим методам расчетов процессов пластического формоизменения. Приведены постановка и методы решения технологических задач.

Для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 22.03.02, 22.04.02 «Металлургия», 15.03.01 «Машиностроение».

УДК 539.374  
ББК 30.121

ISBN 978-5-9729-1195-0

© Гречников Ф. В., Каргин В. Р., 2023  
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2023  
© Оформлен. Издательство «Инфра-Инженерия», 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	9
ГЛАВА 1 ТЕОРИЯ НАПРЯЖЕНИЙ .....	19
1.1 Внешние силы .....	19
1.2 Внутренние силы. Напряжения .....	22
1.3 Индексные обозначения .....	26
1.4 Тензор напряжений .....	28
1.5 Напряжения на наклонной площадке .....	33
1.6 Главные нормальные напряжения .....	36
1.7 Схемы главных нормальных напряжений .....	44
1.8 Октаэдрические напряжения .....	49
1.9 Разложение тензора напряжений .....	51
1.10 Главные (максимальные) касательные напряжения .....	57
1.11 Равновесие сил и моментов .....	63
1.12 Диаграмма напряжений Мора .....	71
1.13 Выводы .....	75
1.14 Задания для самоконтроля .....	76
1.15 Задачи и упражнения .....	78
ГЛАВА 2 ТЕОРИЯ ДЕФОРМАЦИЙ .....	95
2.1 Понятие деформации. Тензор деформаций .....	95
2.2 Геометрические уравнения .....	100
2.3 Уравнения совместности деформаций .....	103
2.4 Главные деформации .....	106
2.5 Схемы главных деформаций .....	109
2.6 Разложение тензора деформаций .....	113
2.7 Объемная деформация .....	115
2.8 Переменные Лагранжа и Эйлера .....	117

2.9	Скорость деформации. Тензор скоростей деформации ..	119
2.10	Большие пластические деформации .....	123
2.10.1	Абсолютные и относительные деформации.....	123
2.10.2	Логарифмические деформации. Коэффициенты деформации.....	124
2.10.3	Смещённый объем. Условие постоянства объема .....	129
2.10.4	Определение числа переходов. Условие постоянства секундных объемов .....	132
2.10.5	Средняя скорость деформации .....	134
2.10.6	Однородная, равномерная и монотонная деформации.....	137
2.11	Механические схемы деформаций.....	139
2.12	Неравномерность деформации .....	150
2.12.1	Неравномерность деформации и дополнительные напряжения .....	150
2.12.2	Причины неравномерности деформаций.....	152
2.12.3	Остаточные напряжения.....	154
2.13	Принцип наименьшего сопротивления деформации.....	157
2.14	Пластичность и разрушение металла.....	160
2.15	Выводы .....	170
2.16	Задания для самоконтроля .....	173
2.17	Задачи и упражнения .....	178
ГЛАВА 3	ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ .....	187
3.1	Обобщенный закон Гука .....	187
3.2	Различные формы записи основного закона упругости..	195
3.3	Удельная потенциальная энергия.....	202
3.4	Постановка задач и способы их решения .....	204
3.5	Частные случаи объемного напряженного состояния.....	211

3.5.1 Плоское напряженное состояние.....	211
3.5.2 Плоское деформированное состояние .....	217
3.5.3 Осесимметричное напряженное состояние .....	220
3.6 Выводы .....	227
3.7 Задания для самоконтроля .....	228
3.8 Задачи и упражнения .....	230
ГЛАВА 4 ТЕОРИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ .....	237
4.1 Условие перехода металла из упругого состояния в пластическое состояние.....	237
4.2 Условие постоянства максимального касательного напряжения.....	239
4.3 Условие постоянства энергии формоизменения.....	243
4.4 Условие пластичности анизотропных сред.....	252
4.5 Экспериментальная проверка условий пластичности.....	256
4.6 Условие упрочнения.....	258
4.7 Простое и сложное нагружение.....	263
4.8 Разгрузка. Остаточные напряжения и деформации.....	265
4.9 Постулат Друкера .....	273
4.10 Ассоциированный закон течения .....	275
4.11 Теория малых упругопластических деформаций .....	277
4.12 Теория пластического течения .....	281
4.13 Теория Сен-Венана – Леви – Мизеса .....	285
4.14 Выводы .....	286
4.15 Задания для самоконтроля .....	289
4.16 Задачи и упражнения.....	292
ГЛАВА 5 ВНЕШНЕЕ ТРЕНИЕ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ МЕТАЛЛОВ.....	297

5.1 Понятие внешнего трения .....	297
5.2 Роль внешнего трения в процессах пластического деформирования.....	298
5.3 Виды внешнего трения .....	302
5.4 Законы трения .....	305
5.5 Основные факторы, влияющие на трение .....	311
5.6 Определение коэффициентов трения.....	314
5.7 Выводы .....	318
5.8 Задания для самоконтроля .....	320

## ГЛАВА 6 РАСЧЕТ УСИЛИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ МЕТАЛЛОВ .. 322

6.1 Основные положения расчета деформирующего усилия .....	322
6.2 Пример расчета деформирующего усилия .....	326
6.3 Метод совместного решения приближенных уравнений равновесия и пластичности.....	327
6.3.1 Основные положения метода.....	328
6.3.2 Упрощенное уравнение равновесия для плоского деформированного состояния .....	330
6.3.3 Упрощенное уравнение равновесия для осесимметричного напряженного состояния .....	332
6.3.4 Упрощенное уравнение равновесия для плоского напряженного состояния .....	334
6.3.5 Алгоритм решения практических задач.....	337
6.3.6 Пример использования метода .....	338
6.4 Метод линий скольжения.....	341
6.4.1 Основные понятия линий скольжения .....	341
6.4.2 Основные свойства линий скольжения.....	347
6.4.3 Виды полей линий скольжения .....	350

6.4.4 Пример использования метода .....	352
6.5 Сопротивление материалов пластическим деформациям .....	355
6.5.1 Основные положения метода.....	355
6.5.2 Пример использования метода .....	356
6.6 Метод работ.....	359
6.6.1 Основные положения метода.....	359
6.6.2 Пример использования метода .....	360
6.7 Вариационные методы .....	362
6.7.1 Основные положения метода.....	362
6.7.2 Пример использования метода .....	366
6.8 Метод конечного элемента .....	371
6.8.1 Основные положения метода.....	371
6.8.2 Пример использования метода .....	376
6.9 Выводы .....	379
6.10 Задания для самоконтроля .....	382
6.11 Задачи и упражнения .....	386

<b>ГЛАВА 7 ТЕМПЕРАТУРНЫЕ, СКОРОСТНЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ .....</b>	<b>394</b>
7.1 Классификация видов пластической деформации.....	394
7.2 Тепловой эффект деформации.....	396
7.3 Выбор температурного интервала горячей пластической деформации .....	399
7.4 Сопротивление металлов при пластической деформации .....	401
7.5 Выводы .....	406
7.6 Контрольные вопросы .....	408
7.7 Задачи и упражнения .....	409



ГЛАВА 8 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ .....	413
8.1 Метод координатной делительной сетки .....	413
8.2 Метод визиопластичности .....	415
8.3 Метод линий тока .....	416
8.4 Определение нормальных контактных напряжений .....	420
8.5 Закон подобия .....	425
8.6 Моделирование процессов деформирования .....	431
8.6.1 Основные положения.....	431
8.6.2 Пример компьютерного моделирования.....	433
8.7 Выводы .....	439
8.8 Контрольные вопросы .....	440
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	442
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	446