

УДК 621.73; 621.77.01  
ББК 34.623  
К64

Издание доступно в электронном виде по адресу  
[ebooks.bmstu.press/catalog/48/book2083.html](http://ebooks.bmstu.press/catalog/48/book2083.html)

Факультет «Машиностроительные технологии»  
Кафедра «Технологии обработки давлением»

Авторы:

*А.В. Власов, С.А. Стебунов, С.А. Евсюков,  
Н.В. Биба, А.А. Шитиков*

*Рекомендовано Научно-методическим советом  
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебного пособия*

**Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки** : учебное пособие / [А. В. Власов и др.] ; под ред. А. В. Власова. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — 383, [1] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-5101-2

Приведена методика использования метода конечных элементов при разработке технологических процессовковки и объемной штамповки. Значительное место уделено особенностям реализации метода конечных элементов в программе QForm — одном из наиболее востребованных программных продуктов для моделирования технологических процессов обработки давлением объемных заготовок. Показаны источники возможных ошибок при моделировании. Рассмотрены средства анализа результатов моделирования и интерпретации результатов расчета, настройки параметров расчета, примеры моделирования с использованием программы QForm. Приведены базовые материалы по основам физики и механики пластической деформации, технологииковки и объемной штамповки, технологическим особенностям кузнечно-штамповочного оборудования. В конце каждого раздела пособия даны вопросы и задания для самоконтроля.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям «Проектирование технологических машин и комплексов», «Машиностроение»; также может представлять интерес для инженеров-технологов, занимающихся проектированием технологических процессовковки и штамповки с использованием в качестве инструмента проектирования численных методов математического моделирования.

УДК 621.73; 621.77.01  
ББК 34.623

ISBN 978-5-7038-5101-2

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019  
© Оформление. Издательство  
МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Принятые сокращения .....	5
Введение .....	6
1. Пластическая деформация металлов и сплавов .....	10
1.1. Механизм и последствия пластической деформации .....	10
1.1.1. Строение металлов и механизм пластической деформации .....	11
1.1.2. Механизм пластической деформации .....	23
1.1.3. Процессы разупрочнения деформированных металлов и сплавов при нагреве .....	25
1.1.4. Пластическая деформация при повышенных температурах .....	27
1.1.5. Изменение структуры и свойств металлов и сплавов при пластической деформации .....	30
1.2. Напряжения, деформации, скорости деформаций .....	36
1.2.1. Напряжения .....	36
1.2.2. Перемещения, деформации, скорости деформаций .....	43
1.3. Переход в пластическое состояние .....	60
1.3.1. Одноосное растяжение .....	61
1.3.2. Общий случай нагружения .....	63
1.4. Сопrotивление деформированию при ковке и объемной штамповке .....	66
1.5. Пластичность и деформируемость .....	77
1.6. Модели трения при анализе пластических деформаций .....	81
1.6.1. Законы трения .....	81
1.6.2. Экспериментальное определение параметров трения .....	83
Вопросы для самоконтроля .....	86
2. Численные методы расчета и их применение для анализа пластических деформаций .....	88
2.1. Общие сведения .....	88
2.2. Особенности численных методов расчета .....	89
2.3. Основные положения метода конечных элементов .....	91
2.4. Пример применения конечно-элементного моделирования для анализа процесса горячей объемной штамповки .....	94
Вопросы для самоконтроля .....	103
3. Технологические процессыковки и объемной штамповки .....	105
3.1. Факторы, влияющие на формoизменение в операциях ковки и штамповки .....	105

3.2. Подготовительные операции .....	107
3.2.1. Материалы дляковки и штамповки .....	107
3.2.2. Штамповые стали .....	111
3.2.3. Разделка исходного материала на заготовки .....	112
3.2.4. Температурный интервал, нагрев и охлаждение заготовок .....	117
3.2.5. Подготовка поверхности исходного металла .....	125
3.3. Ковка .....	128
3.3.1. Основные особенности и область примененияковки .....	128
3.3.2. Технологические операцииковки .....	130
3.4. Объемная штамповка .....	141
3.4.1. Основные особенности и область применения .....	141
3.4.2. Особенности штамповки на различных видах кузнечно-штамповочного оборудования .....	152
Вопросы для самоконтроля .....	167
4. Кузнечно-штамповочное оборудование при конечно-элементном моделировании технологических процессовковки и штамповки.....	169
4.1. Влияние параметров кузнечно-штамповочного оборудования на процессыковки и штамповки .....	169
4.2. Основные типы кузнечно-штамповочного оборудования и модели их приводов в программе QForm .....	177
4.2.1. Молоты .....	178
4.2.2. Гидравлические прессы .....	184
4.2.3. Механические прессы .....	189
4.2.4. Винтовые прессы .....	199
4.3. Специализированное оборудование и его модели.....	202
4.3.1. Машины для поперечной и продольной вальцовки (прокатки) ....	202
4.3.2. Раскатные машины .....	204
4.3.3. Радиально-обжимные (ковочные) машины .....	206
4.3.4. Машины для сферодвижной штамповки .....	208
4.3.5. Модели «Универсальный привод» и «Силовой прижим».....	210
4.3.6. Дополнительные возможности моделей привода инструмента.....	213
Вопросы для самоконтроля.....	214
5. Механика пластического деформирования металла и тепловые эффекты при пластической деформации.....	215
5.1. Физические уравнения связи напряженного и деформированного состояний .....	215
5.1.1. Упругие деформации .....	216
5.1.2. Малые упругопластические деформации .....	216
5.1.3. Большие упругопластические деформации .....	218
5.1.4. Большие пластические деформации .....	218
5.1.5. Некомпактные (пористые) материалы.....	219
5.2. Система разрешающих уравнений механики пластического деформирования .....	220
5.3. Энергетические соотношения и вариационные принципы.....	221
5.4. Тепловые эффекты при пластической деформации. ....	223
Вопросы для самоконтроля.....	227

6. Метод конечных элементов и его реализация в программе QForm .....	228
6.1. Конечные элементы и аппроксимация полей .....	228
6.1.1. Функции формы конечного элемента .....	229
6.1.2. Аппроксимация поля скоростей деформаций и средних напряжений в конечном элементе .....	233
6.1.3. Дискретизация среды для анализа теплообмена .....	235
6.2. Разрешающие уравнения метода конечных элементов для различных сред .....	236
6.2.1. Моделирование вязкопластических деформаций .....	236
6.2.2. Моделирование упругопластических деформаций заготовки .....	240
6.2.3. Моделирование некомпактных материалов .....	243
6.2.4. Моделирование упругопластических деформаций инструмента .....	245
6.2.5. Система уравнений для тепловой задачи .....	247
6.3. Граничные условия и модификация системы уравнений .....	251
6.3.1. Взаимодействие с кузнечно-штамповочным оборудованием ....	251
6.3.2. Моделирование нескольких деформируемых тел .....	253
6.3.3. Совместная деформация заготовки и инструмента .....	256
6.3.4. Учет жестких зон для жесткопластической задачи .....	257
6.3.5. Граничные условия при решении тепловой задачи .....	258
6.4. Решение основной системы уравнений в программе QForm .....	262
6.4.1. Пошагово-итерационная процедура решения системы нелинейных уравнений .....	263
6.4.2. Алгоритмы пошаговой процедуры (явный и неявный методы) .....	265
6.4.3. Алгоритм итерационного решения задачи на шаге интегрирования .....	268
6.4.4. Численное интегрирование матричных произведений .....	274
6.5. Настройка параметров расчета .....	275
6.5.1. Параметры настройки дискретизации заготовки и инструмента ....	276
6.5.2. Дополнительные методы улучшения сетки конечных элементов...	281
6.5.3. Методы увеличения точности расчета деформированного состояния .....	287
6.5.4. Дополнительные настройки модели заготовки .....	290
Вопросы для самоконтроля .....	293
7. Совершенствование технологических процессовковки и штамповки с использованием инструментов QForm .....	296
7.1. Результаты моделирования и их использование для совершенствования технологического процесса .....	296
7.1.1. Выбор технологического оборудования и проектирование переходов .....	299
7.1.2. Соблюдение температурного интервалаковки и штамповки. ....	310
7.1.3. Влияние упругой деформации инструмента на точность штамповки .....	311
7.1.4. Прогнозирование поверхностных дефектов .....	314
7.1.5. Прогнозирование разрушения заготовки .....	323

---

7.2. Расчет штампов и прогнозирование разрушения инструмента .....	329
7.2.1. Прогнозирование износа штампов .....	329
7.2.2. Прогнозирование усталостного разрушения штампов .....	332
7.3. Термическая обработка .....	337
7.3.1. Моделирование термической обработки в программе QForm ....	340
7.3.2. Математическая модель процесса термической обработки в программе QForm .....	358
7.4. Сквозное проектирование техпроцесса от литья до поковки .....	369
7.5. Пользовательское программирование .....	372
Вопросы для самоконтроля .....	376
Литература .....	378