

УДК 621.7.048.7:621.378.826(075.8)
ББК 34.58я73
Л79

Лосев В.Ф.

Л79 Физические основы лазерной обработки материалов: учебное пособие / В.Ф. Лосев, Е.Ю. Морозова, В.П. Ципилев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 199 с.

ISBN 978-5-4387-0052-4

В пособии изложены физические основы лазерных технологических операций, связанных с обработкой материалов (сварка, резка, термоупрочнение, и др.), в том числе биотканей (коагуляция, резание, силовая и низкоэнергетичная терапия). Анализируются физические процессы, протекающие в материалах, принципы моделирования нагрева вещества лазерным излучением, режимы лазерной обработки материалов на технологических установках, приводятся примеры применения лазеров в медицине и соответствующая лазерная медицинская техника.

Предназначено для студентов направления 200400 «Оптотехника».

УДК 621.7.048.7:621.378.826(075.8)
ББК 34.58я73

Рецензенты

Доктор технических наук
профессор СПб НИУ ИТМО
Л.А. Губанова

Доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник ИСЭ СО РАН
В.М. Орловский

ISBN 978-5-4387-0052-4

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2011
© Лосев В.Ф., Морозова Е.Ю., Ципилев В.П.,
2011
© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
РАЗДЕЛ 1	
ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ, СПЛАВОВ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ	8
1.1. Тепловая модель взаимодействия лазерного излучения с материалами	8
1.1.1. Процессы передачи энергии лазерного излучения веществу	8
1.1.2. Приближенные оценки температуры нагрева	12
1.2. Феноменология нагрева и разрушения металлов при неподвижном источнике теплоты	15
1.2.1. Диаграмма режимов лазерной обработки металлов и критические потоки	15
1.2.2. Уравнения теплового баланса для неподвижного источника	19
1.2.3. Простейшая модель нагрева металлов при низких и высоких плотностях потоков лазерного излучения	20
1.3. Модель нагрева и разрушения металлов при движущемся источнике теплоты	23
1.3.1. Характерные зоны разогрева материала и распределение энергии	23
1.3.2. Уравнения теплового баланса для движущегося источника	25
1.3.3. Глубокое проплавление	26
1.3.4. Объемное испарение	27
1.4. Способы повышения эффективности лазерного воздействия	27
1.4.1. Эффективный коэффициент поглощения	27
1.4.2. Поглощающие покрытия	29
1.4.3. Глубина проплавления	30
1.4.4. Влияние плазмы на эффективный коэффициент поглощения	30
1.4.5. Влияние струи газа	31
1.4.6. Влияние условий фокусировки и режима обработки	35
1.5. Физические процессы при лазерной обработке неметаллических материалов	37
РАЗДЕЛ 2	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА И РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ	41
2.1. Уравнение теплопроводности при лазерном источнике теплоты	42
2.1.1. Закон Фурье	42

2.1.2. Уравнение теплопроводности	43
2.1.3. Уравнение теплопроводности при лазерном источнике теплоты	44
2.1.4. Постановка краевых задач теории теплопроводности	45
2.2. Методы решения уравнения теплопроводности	46
2.2.1. Метод преобразования Лапласа	47
2.2.2. Метод мгновенных источников	48
2.2.3. Метод конечных разностей (метод сеток)	50
2.3. Инженерные расчеты задач нагрева материалов лазерным излучением	52
2.3.1. Нагрев материала поверхностным источником теплоты	53
2.3.2. Нагрев материала объемным источником теплоты	56
2.3.3. Нагрев в окрестности поглощающего включения, присутствующего в матрице прозрачного материала	58
2.4. Следствия и выводы из частных решений уравнения теплопроводности	63
2.4.1. Определение глубины прогретого слоя	63
2.4.2. Определение критических потоков	64
2.4.3. Определение скоростей нагрева и остывания	64
2.5. Роль гидродинамических, газодинамических и плазменных явлений	65
2.5.1. Моделирование гидродинамических, газодинамических и плазменных явлений	65
2.5.2. Оценки воздействия по методу баланса энергий	67
РАЗДЕЛ 3	
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ	
ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ	69
3.1. Лазерное термоупрочнение (закалка) материалов	69
3.2. Лазерное легирование и газопорошковая наплавка	76
3.3. Лазерная сварка материалов	79
3.3.1. Энергетические характеристики лазерной сварки	79
3.3.2. Техничко-экономические характеристики лазерной сварки	79
3.3.3. Сварка деталей малых толщин	81
3.3.4. Сварка с глубоким проплавлением	82
3.3.5. Технологические особенности лазерной сварки конструкционных материалов	84
3.4. Резка металлических и неметаллических материалов	86
3.4.1. Лазерная резка металлов	86
3.4.2. Лазерная резка неметаллов	91
3.5. Размерная обработка	95
3.5.1. Сверление отверстий в металлах одиночным импульсом	95
3.5.2. Сверление отверстий в металлах в импульсно-периодическом режиме излучения твердотельных лазеров	97

3.5.3. Сверление отверстий в диэлектриках	100
3.5.4. Технологические особенности размерной обработки	103
3.6. Маркировка и аморфизация поверхности	105
3.6.1. Лазерная аморфизация (остекловывание)	105
3.6.2. Лазерная маркировка (гравировка и надписи)	106
РАЗДЕЛ 4	
УСТАНОВКИ И КОМПЛЕКСЫ	
ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ	108
4.1. Общая характеристика технологического лазера и систем на его основе	108
4.2. ЛТУ для размерной обработки в массовом машиностроении	110
4.2.1. Многофункциональные установки	110
4.2.2. ЛТУ для резки и раскроя	113
4.2.3. ЛТУ для сварки и поверхностного термоупрочнения	114
4.3. ЛТУ для прецизионной обработки в приборостроении, электронике, специальном машиностроении, ювелирной промышленности и т. п.	115
4.4. ЛТУ для маркировки и гравировки	121
4.5. Другие лазерные технологические установки	124
РАЗДЕЛ 5	
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРАПИИ И ХИРУРГИИ	
5.1. Действие излучения на биологические ткани	131
5.2. Теплофизические и термодинамические свойства ткани	139
5.3. Термическое действие ЛИ	144
5.4. Нетермическое действие ЛИ на биологические ткани	147
5.5. Физические основы лазерной терапии	149
5.5.1. Процессы при низкоэнергетическом воздействии ЛИ на биоткани	149
5.5.2. Механизмы терапевтического действия НЛИ	151
5.6. Физические основы лазерной хирургии	155
5.6.1. Тепловая хирургия	155
5.6.2. Нетепловая лазерная микрохирургия	158
5.7. Лазеры, применяемые в хирургии	158
РАЗДЕЛ 6	
ЛАЗЕРНЫЕ МЕДИЦИНСКИЕ УСТАНОВКИ	
6.1. Установки лазерной хирургии и силовой терапии	162
6.1.1. Универсальные и многоцелевые установки для лазерных хирургических операций и силовой терапии	162
6.1.2. Специализированные лазерные хирургические установки для дерматологии и косметологии	166

6.1.3. Специализированные лазерные установки для кардиохирургии	168
6.1.4. Специализированные лазерные установки для онкологии	169
6.1.5. Специализированная лазерная аппаратура для офтальмологии	171
6.1.6. Лазерные перфораторы кожи (скарификаторы) и установки для транскутанного введения лекарств	175
6.1.7. Специализированные лазерные установки для стоматологии	176
6.2. Лазерная терапевтическая аппаратура	177
6.2.1. Терапевтические аппараты на основе He-Ne-лазеров	177
6.2.2. Терапевтические аппараты на основе других газовых лазеров	179
6.2.3. Терапевтические аппараты на основе полупроводниковых лазеров и светодиодов	180
6.2.4. Терапевтические аппараты на основе твердотельных лазеров и лазеров на красителях	183
6.2.5. Лазерные аппараты для облучения крови	184
6.2.6. Лазерные лечебные аппараты и тренажеры для офтальмологии	185
6.2.7. Лазерная аппаратура для диагностики крови, кровотока и прочих биоструктур	187
6.3. Системы доставки излучения (аппликаторы) и оптические наконечники при обработке биоткани	188
6.3.1. Шарнирные и оптоволоконные манипуляторы	188
6.3.2. Фокусирующие наконечники для YAG:Nd ³⁺ -лазеров	191
6.3.3. Контактные аппликаторы	192
6.3.4. Контактные наконечники	193
6.3.5. Наконечники для рассеечения	194
6.3.6. Наконечник для испарения ткани	195
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	197
ПРИЛОЖЕНИЕ	198