

УДК 621.7 (075.8)
ББК 34.441
Л17

Издание доступно в электронном виде по адресу
ebooks.bmstu.press/catalog/41/book1876.html

Факультет «Машиностроительные технологии»
Кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»

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

Авторы:

А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров, Р.С. Третьяков

Л17 **Лазерные аддитивные технологии в машиностроении** : учебное пособие /
[А. Г. Григорьянц и др.] ; под ред. А. Г. Григорьянца. — Москва : Изда-
тельство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. — 278, [2] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4976-7

Представлен значительный объем информации по современным на-
укоемким процессам аддитивных технологий, применяемых в машино-
строении. Особое внимание уделено лазерным аддитивным технологиям
стереолитографии, селективного лазерного плавления и прямого лазерного
осаждения материала. Рассмотрены физические основы процессов, их тех-
нологические особенности и оборудование для промышленной реализации.

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров
15.03.01 «Машиностроение» по профилю «Лазерные аддитивные техно-
логии» и изучающих дисциплины «Лазерные аддитивные технологии вы-
ращивания готовых деталей и узлов коаксиальным лазерным плавлением»,
«Лазерные аддитивные технологии выращивания готовых деталей и узлов
селективным лазерным плавлением», «Оборудование для быстрого прототи-
пирования».

УДК 621.7 (075.8)
ББК 34.441

ISBN 978-5-7038-4976-7

© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Оглавление

Предисловие.....	3
Основные сокращения.....	6
Глава 1. Классификация современных аддитивных технологий	7
Контрольные вопросы	15
Глава 2. Технология лазерной стереолитографии	16
2.1. Физико-химические процессы синтеза полимерных объектов методом лазерной стереолитографии	18
2.2. Состав и принципы работы лазерных стереолитографических установок.....	25
2.2.1. Параметры и принцип работы основных подсистем.....	27
2.2.2. Типы лазеров, применяемых в стереолитографических установках	29
2.2.3. Системы сканирования лазерного излучения относительно поверхности выращиваемой детали.....	32
2.2.4. Система перемещения платформы выращивания.....	35
2.2.5. Система выравнивания поверхности фотополимеризующейся композиции	35
2.2.6. Система регулирования уровня фотополимеризующейся композиции в баке выращивания	37
2.3. Создание компьютерной модели будущего изделия и ее программная подготовка к процессу выращивания.....	38
2.3.1. Построение компьютерных моделей трехмерных объектов по томографическим данным.....	38
2.3.2. Методы бесконтактного формометрирования и фотограмметрии	40
2.3.3. Методы компьютерного моделирования	44
2.3.4. Подготовка компьютерной модели к выращиванию	45
2.4. Промышленные лазерные стереолитографические установки	49
2.5. Применение деталей, полученных лазерной стереолитографией	52
Контрольные вопросы	57
Глава 3. Селективное лазерное спекание и сплавление металлических порошков	58
3.1. Металлические порошки для аддитивных процессов.....	58

3.2. Особенности процесса селективного лазерного выращивания деталей из металлического порошка.....	64
3.3. Механические свойства и структура материалов, полученных селективным лазерным плавлением	77
3.4. Технологические особенности процесса селективного лазерного плавления	85
3.5. Оборудование для осуществления процесса селективного лазерного плавления металлических порошков.....	88
3.5.1. Источники лазерного излучения.....	88
3.5.2. Оптическая система	89
3.5.3. Подложка и подвижный стол	91
3.5.4. Система доставки и разравнивания порошка	91
3.5.5. Защитная камера для обработки.....	93
3.5.6. Сенсоры и датчики.....	94
3.6. Промышленные установки для выращивания деталей методом селективного лазерного плавления.....	96
3.7. Применение технологий селективного лазерного плавления и спекания.....	99
Контрольные вопросы	101

Глава 4. Прямое осаждение порошкового материала с использованием лазерной энергии.....

4.1. Особенности процесса коаксиального лазерного плавления	102
4.2. Формирование валиков при боковой подаче порошка.....	103
4.3. Формирование валиков при коаксиальном лазерном плавлении ..	107
4.4. Элементы установок для коаксиального лазерного плавления	112
4.4.1. Лазеры для реализации процесса коаксиального лазерного плавления	112
4.4.2. Системы перемещения установок для коаксиального лазерного плавления.....	114
4.4.3. Порошковые питатели установок для коаксиального лазерного плавления	116
4.4.4. Лазерные технологические головки для коаксиального лазерного плавления	118
4.4.5. Конструкции выходных сопел и их влияние на технологию коаксиального лазерного плавления	120
4.4.6. Системы контроля процесса коаксиального лазерного плавления.....	122
4.5. Технологические особенности процесса коаксиального лазера плавления	123
4.6. Оборудование для изготовления деталей методом коаксиального лазерного плавления.....	129
4.7. Программное обеспечение установок для коаксиального лазерного плавления	133
4.8. Особенности проектирования технологии коаксиального лазерного плавления и ее применение для изготовления машиностроительных деталей.....	135

4.8.1. Принципы построения технологии выращивания деталей	136
4.8.2. Изготовление деталей из сталей и сплавов	140
4.8.3. Создание деталей со слоистой структурой	141
4.8.4. Создание изделий из композиционных материалов методом коаксиального лазерного плавления	142
4.9. Лазерная полировка деталей, изготовленных методом коаксиального лазерного плавления	157
Контрольные вопросы	162

Глава 5. Моделирование аддитивного технологического процесса выращивания деталей коаксиальным лазерным плавлением

5.1. Общие подходы к математическому моделированию	163
5.2. Методы численного решения и граничные условия	166
5.3. Расчет отдельных элементов разбиения и моделирование многофазных потоков	172
5.4. Пакет компьютерных программ для проведения расчетов и алгоритм решения	176
5.5. Допущения расчетной модели аддитивного технологического процесса выращивания деталей коаксиальным лазерным плавлением	178
5.6. Основные физические уравнения, используемые в расчете	180
5.7. Примеры анализа результатов расчета, полученных при моделировании аддитивного технологического процесса выращивания деталей коаксиальным лазерным плавлением	185
5.7.1. Влияние расхода газа и размера частиц порошка на параметры газопорошковой струи	185
5.7.2. Формирование наплавленного валика	189
5.7.3. Нагрев и охлаждение металла выращиваемой детали	193
Контрольные вопросы	193

Глава 6. Формирование структуры и свойств материала деталей в процессе выращивания лазерным переплавом металлических порошков

6.1. Структура металла формообразующих валиков при переплаве порошков различных составов	194
6.1.1. Структура металла при получении деталей с повышенной износостойкостью	194
6.1.2. Формирование структуры при выращивании и восстановлении деталей из жаропрочных сплавов	210
6.1.3. Структура слоев, полученных переплавом порошка при создании переходных структур инструментальная сталь — медь	218
6.1.4. Структура после лазерного переплава чугуновых порошков	220
6.2. Свойства металла, полученного лазерным переплавом порошка	221
6.2.1. Пористость материалов, полученных лазерным переплавом порошка	221
6.2.2. Статическая прочность и пластичность материала, полученного лазерным переплавом порошка	223

6.2.3. Прочность сцепления наплавленных слоев материала, полученного лазерным переплавом порошка	224
6.2.4. Коррозионная стойкость материала, полученного лазерным переплавом порошка	225
6.2.5. Износостойкость материала, полученного лазерным переплавом порошка	226
6.2.6. Устойчивость материала, полученного лазерным переплавом порошка, против отпуска	227
6.2.7. Высокотемпературная фреттинг-коррозия материалов, полученных лазерным нанесением порошков	228
Контрольные вопросы	229
Глава 7. Трещинообразование в процессе формирования деталей лазерным переплавом порошков	230
7.1. Классификация кристаллизационных трещин	230
7.2. Кристаллизационные трещины, образующиеся при переплаве порошков	231
7.3. Подсолидусные трещины, образующиеся при выращивании деталей переплавом порошков	256
7.4. Трещины повторного нагрева	261
7.5. Холодные трещины	265
Контрольные вопросы	272
Литература	273