

Л. В. БЕЛЯЕВ
А. В. АБОРКИН

ВВЕДЕНИЕ В АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Л. В. Беляев, А. В. Аборкин

ВВЕДЕНИЕ В АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Допущено Федеральным учебно-методическим объединением в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 15.00.00 «Машиностроение» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлению подготовки бакалавриата, магистратуры в группе специалитета 15.00.00 «Машиностроение»

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2025

УДК 621.9:004.9

ББК 34.5-5-05

Б44

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, доцент, проректор по научной работе и цифровому развитию Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

А. О. Кучерик;

кандидат технических наук, член-корреспондент Российской академии ракетных и артиллерийских наук, советник генерального директора Всероссийского научно-исследовательского института «Сигнал»

С. И. Филиппов

Беляев, Л. В.

Б44 Введение в аддитивные технологии : учебное пособие / Л. В. Беляев, А. В. Аборкин. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 220 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-2625-1

Рассмотрены основы аддитивного производства и дано описание основных принципов аддитивных технологий, показана ретроспектива их появления. Описаны терминология и классификация аддитивного формообразования. Представлены основные принципы и этапы аддитивного производства прототипов и функциональных образцов промышленных изделий различного назначения, освещены вопросы, связанные с подготовкой аддитивного производства, а также особенностями проектирования изделий для их получения на основе аддитивных технологий.

Для студентов вузов, обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлению подготовки бакалавриата, магистратуры в группе специалитета 15.00.00 «Машиностроение».

УДК 621.9:004.9

ББК 34.5-5-05

ISBN 978-5-9729-2625-1

© Беляев Л. В., Аборкин А. В., 2025

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2025

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2025

Оглавление

Введение	6
Глава 1. ИСТОРИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОЯВЛЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	7
Контрольные вопросы	21
Глава 2. ОБЩЕЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ПРОЦЕССЕ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА	22
2.1. Сущность процесса, термины и определения	22
2.2. Классификация аддитивных технологий	28
2.3. Категории построения изделий на основе аддитивных технологий	35
2.3.1. Экструзия материала	35
2.3.2. Струйное распыление основного материала	37
2.3.3. Струйное распыление связующего материала	40
2.3.4. Листовое ламинирование	41
2.3.5. Фотополимеризация в ванне	43
2.3.6. Сплавление порошкового материала в заранее сформированном слое	45
2.3.7. Осаждение материала с помощью прямого подвода энергии	47
2.3.8. Гибридные технологии БПИ	49
Контрольные вопросы	49
Глава 3. МЕТОДЫ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ	51
3.1. Методы фотополимеризации	51
3.1.1. Векторно-сканирующее отверждение	51
3.1.2. Отверждение проекцированием	53
3.1.3. Печать с фотохимическим отверждением	55
3.1.4. Механизм фотополимеризации	56
3.1.5. Взаимодействие актиничного излучения с фотополимеризующимися композициями	58
3.1.6. Погрешности, возникающие в процессе фотополимеризации	60
3.1.7. Стратегии формирования сечений	64
3.1.8. Нанесение фотополимеризующейся композиции	68
3.2. Методы слияния порошковых оснований	72
3.2.1. Механизмы слияния частиц порошков	73
3.2.2. Селективное лазерное спекание	78
3.2.3. Электронно-пучковое плавление	79
3.2.4. Селективное спекание с послойной схемой формирования	82

3.2.5. Нанесение слоев порошкового материала	86
3.2.6. Косвенное формирование изделий	88
3.3. Методы листового ламинирования.....	89
3.3.1. Технология изготовления объектов методом ламинирования	90
3.3.2. Технология бумажного ламинирования.....	93
3.3.3. Способы листового ламинирования «форма – закрепление».....	94
3.3.4. Ультразвуковая консолидация	99
3.4. Методы послойной экструзии	101
3.4.1. Моделирование методом послойного наплавления	101
3.4.2. Типы кинематических схем установок аддитивного производства, основанных на FDM-технологии получения изделий	103
3.4.3. Экструдеры для FDM-принтеров.....	107
3.4.4. Поддерживающие структуры	117
3.4.5. Материалы для процесса моделирования методом послойного наплавления	118
3.4.6. Альтернативные FDM-методы послойной экструзии.....	132
3.5. Методы послойного синтеза печатью	137
3.5.1. Синтез баллистическими частицами	137
3.5.2. Трехмерная печать	138
3.5.3. Трехмерная аэрозольная печать	144
3.6. Методы послойной наплавки	148
3.6.1. Способы подачи строительного материала.....	148
3.6.2. Параметры процесса послойной лазерной наплавки	150
3.6.3. Технологии послойной лазерной наплавки	151
Контрольные вопросы	153

Глава 4. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА..... 155

4.1. Структура технологического процесса послойного синтеза.....	155
4.1.1. Этап подготовки цифровой модели изделия.....	155
4.1.2. Этап подготовки процесса послойного синтеза	164
4.1.3. Этап формирования изделий	165
4.1.4. Этап постобработки изделий.....	166
4.2. Преимущества и недостатки послойного синтеза	167
4.3. Распространенные приемы повышения эффективности процессов послойного синтеза.....	168
4.3.1. Формирование изделий с адаптивной толщиной слоя.....	169
4.3.2. Формирование изделий с аппроксимацией высших порядков..	172
4.3.3. Разнонаправленное рассечение	173
Контрольные вопросы	174

Глава 5. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТОДАМИ БПИ	175
5.1. Использование технологий БПИ для повышения ценности изготавливаемого продукта	177
5.2. Общие правила по проектированию изделий для их изготовления на основе технологий БПИ	177
5.2.1. Правило № 1. Учет конструктивных особенностей изделия и технологических возможностей оборудования	177
5.2.2. Правило № 2. Оценка целесообразности применения технологий БПИ	178
5.2.3. Правило № 3. Учет эстетических требований к изделию	179
5.2.4. Правило № 4. Отсутствие острых кромок	179
5.2.5. Правило № 5. Учет ориентации модели на платформе построения	180
5.2.6. Правило № 6. Минимизация количества используемого материала	181
5.2.7. Правило № 7. Минимизация объема материала «поддержки»	181
5.3. Проектирование конструкций, позволяющих избежать анизотропии	182
5.4. Экономический аспект аддитивного производства	183
5.5. Конструирование с целью минимизации времени изготовления	189
5.6. Проектирование с учетом минимизации последующей обработки	192
5.7. Выбор конструкционного материала	203
5.8. Оптимизация топологии и решетчатые структуры	204
5.9. Консолидация деталей в сборке	207
Контрольные вопросы	211
Заключение	213
Библиографический список	214
Принятые сокращения	218