

УДК 621.05

Р. И. Сольнищев, А. И. Аль-Кисвани
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Быстрое прототипирование в проектировании и производстве прецизионных приборов на основе аддитивной технологии

Особенности прецизионных приборов (навигационные, медицинские, измерительные и др.), в том числе требования по достижению высокой точности при минимальных весе и габаритах, приводят к изготовлению деталей со скрытыми полостями, сложной геометрией, что требует прототипирования. Ввиду специфики приборов рассматриваемого класса применение широко распространяемых в настоящее время АД-технологий требует специальных подходов. В статье приведены результаты анализа и выбора наиболее подходящей аддитивной технологии для проектирования и производства прецизионных приборов, подготовки расходных материалов из пластмассы (фотополимеры, полиамиды, полистиролы), металлических порошков (титан, алюминиевые сплавы и др.), программ, управляющих 3D-принтерами, в том числе переход от 3D-чертежа детали в STL-формат и через Slicer путем преобразования в G-Code, выбор 3D-принтеров, результаты моделирования процессов адаптации аддитивной технологии к прецизионным приборам. Показаны преимущества аддитивной технологии, особенно на этапах конструкторской и технологической подготовки производства, благодаря широким возможностям быстрого прототипирования изготовленных на 3D-принтерах физических моделей компонентов прецизионных приборов. Предварительные технико-экономические оценки показывают перспективность рассматриваемого направления прецизионного приборостроения.

Аддитивные технологии, быстрое прототипирование, проектирование и производство прецизионных приборов, селективное лазерное спекание, 3D-печать, метод конечных элементов, станки с ЧПУ

Возрастающие требования к точностным характеристикам при минимальных массе и габаритах прецизионных приборов вызывают необходимость поиска новых технологий с переходом на сквозное цифровое проектирование и производство (ЦПП).

Аддитивное производство (англ. – additive manufacturing) – цикл технологий, предназначенных для послойного построения трехмерных объектов любой сложности по их компьютерной модели, в отличие от фрезернообрабатывающей технологии, стачивающей лишний материал с заготовки, чаще всего фрезерованием на станках с ЧПУ, точением, сверлением и т. д., что является традиционной мехобработкой материалов.

Быстрое прототипирование с применением аддитивной технологии (АТ) в проектировании, макетировании и производстве компонентов прецизионных приборов имеет следующие преимущества:

– позволяет создавать объекты со скрытыми полостями практически любой сложности;

– сокращает срок производства мелких партий, включая затраты на электрическое питание, уменьшение размеров производственных площадей за счет сокращения ряда технологических операций.

Аппаратно-программный комплекс процесса изготовления деталей. Технология 3D-печати представляет собой хорошо спланированный и подготовленный процесс преобразования виртуальных моделей в физические объекты. Процесс 3D-печати состоит из следующих этапов [1]–[4]:

1. Создание цифровой модели в любом трехмерном редакторе (AutoCad, SolidWorks).

2. Экспорт 3D-модели (обычно в STL-формат, но могут быть и другие форматы).

3. Генерирование машинного кода (G-кода) который содержит информацию о 3D-модели.

4. Подготовка 3D-принтера к работе, включая подготовку расходных материалов и заправку 3D-принтера расходным материалом (пластмассовая проволока, металлический порошок или даже смолы и фотополимеры, которые затвердевают от воздействия УФ-излучения).

5. Печать 3D-объекта, т. е. построение объекта с нуля путем последовательного послойного нанесения материала согласно 3D-модели.

6. Финишная обработка объекта включает удаление лишних опор, построенных для поддержки модели во время печати.

Этап 1. Быстрое прототипирование и производство ПП с применением АТ начинается с разработки 3D-модели изделия с помощью виртуальных редакторов (AutoCad, Compass 3D, SolidWors и др.).

Этап 2. Экспортирование 3D-модели. Когда конструктор разрабатывает 3D-модель изделия, необходимо перевести полученный файл в STL-формат, который распознает большинство современных 3D-принтеров. Данный файл содержит информацию о модели, степени ее детализации и т. д.

Этап 3. Генерирование G-кода. Специализированная компьютерная программа обрабатывает STL-файл с будущим объектом и его управляющий G-код для 3D-принтера, который «разрезает» модель на тонкие слои, затем преобразует в G-код, включающий траекторию движения сопла 3D-принтера или траекторию прохождения лазера в случае с печатью металлом в зависимости от технологии изготовления на 3D-принтере.

Этап 4. Подготовка 3D-принтера к печати. Независимо от того, чем печатает 3D-принтер – пластиковой проволокой, порошковым пластиком, жидкой смолой или порошковым металлом, необходимо подготовить его к процессу трехмерной печати. В зависимости от используемой технологии печати производится заправка расходным материалом.

Этап 5. Печать 3D-объекта. После загрузки трехмерной модели и ввода необходимой команды на ПО принтера начинается процесс 3D-печати, как правило, послойно. 3D-принтер с ЧПУ строит модель детали, наплавляя пластиковую проволоку, порошковые смеси по нужной траектории, производит печать первого слоя с заданными настройками точности и заданной в ПО толщиной слоя и степенью детализации трехмерного объекта. Таким образом расходный материал используется только «по месту и по делу».

Этап 6. После завершения 3D-печати производится процесс финишной обработки. Данная процедура очень проста и заключается в удалении дополнительных опор, построенных на этапе подготовки к трехмерной печати или в удалении неспеченного порошка (металлического, пластикового) из камеры 3D-принтера.

Внедрение ЦПП обязательно включает в себя применение аддитивной технологии. Изучение аналогов [1]–[4] показывает, что применение АТ позволяет проектировать и изготавливать прецизионные приборы (ПП), сокращая ряд таких этапов традиционного проектирования и производства, как макетирование, многочисленные операции по механической обработке, принятые при традиционном изготовлении деталей в большом количестве с их последующей сборкой или сваркой. Перечисленные обстоятельства по применению АТ приводят к повышению производительности всего процесса с приближением мелкосерийного производства к серийному производству по экономическим показателям [54]. Однако внедрение АТ на конкретных предприятиях требует тщательного технико-экономического анализа проектных и производственных процедур по оценке эффективности АТ [6]–[8].

Разработка и внедрение АТ в проектирование и производство ПП приводит к необходимости решения следующих задач:

- анализ объектов проектирования и производства (ОП и П) с целью применения АТ «по месту и по делу»;
- выбор и адаптация к ОП и П аддитивной технологии, в том числе алгоритмов и программ экспорта 3D-моделей, генерирования управляющего G-кода и т. д.;
- выбор подходящих 3D-принтеров;
- выбор и исследование расходных материалов, в том числе алгоритмов и программ подготовки таких материалов;
- технико-экономическое обоснование применения АТ.

Применение АТ для проектирования и производства ПП из металлических порошков – титан, спеченная алюминиевая пудра (САП), в том числе из спеченных алюминиевых сплавов (САС), требует обязательного быстрого прототипирования ввиду необходимости подготовки расходных материалов и оборудования.

Для внесения замечаний и поправок конструкторами и технологами целесообразно быстрое прототипирование деталей ПП средствами АТ.

В результате анализа применения АТ к ПП на основе металлопорошков наиболее подходящей оказалась технология селективного лазерного спекания.

Технология селективного лазерного сплавления (СЛС) позволяет изготавливать сложнопрофильные детали не только из драгоценных металлов, таких как титан, золото, серебро, но из специальных порошков на основе алюминия. Алюминий широко применяется из-за его малой

массы и доступной цены. Для обеспечения точностных характеристик изделия важной задачей является получение плотной (с низким содержанием дефектов), мелкодисперсной структуры материала. Одно из возможных решений – выбор оптимальных режимов изготовления деталей методом СЛС. Данный метод представляет собой процесс послойного сплавления деталей из металлического порошкового материала, гранулы которого связываются между собой путем их проплавления при помощи оптоволоконного лазерного луча, движущегося в каждом слое по определенной траектории в соответствии с выбранной стратегией обработки и согласно трехмерной модели изделия в компьютерном срезе (обычно в формате STL), которая была предварительно определенным образом подготовлена (через слайсер) и преобразована в G-код [9], [10].

Реализация *процедур по программированию* в рамках такой технологии включает: формирование компьютерных трехмерных моделей (обычно это формат STL) в качестве «чертежей» для построения физических моделей, при этом готовый «построечный» файл используется как набор чертежей во время печати; цифровую обработку этих моделей для виртуального разделения на слои с толщиной, соответствующей расчетной, которые наносятся печатающим устройством средствами G-кода; управление процессом спекания лазерным лучом, что позволяет применять различные стратегии сканирования лазера (спекания лазером) для получения деталей ПП с требованиями по плотности, пористости и другим характеристикам; построение траектории спекания лазерным лучом порошков из САС, титана и специальных сплавов. Повышение производительности печати возможно за счет использования нескольких лазеров или более мощных единичных лазеров.

Процедуры *аппаратной реализации* следующие: порошковый материал подается в рабочую камеру в количествах, необходимых для нанесения одного слоя. Специальный валик выравнивает поданный и удаляет лишний материал из камеры, после чего лазерная головка спекает частицы порошка между собой и с предыдущим слоем согласно контурам (граням), определенным разработкой цифровой моделью конкретной детали ПП. После завершения изготовления слоя, процесс повторяется: валик подает свежий материал, и лазер начинает спекать следующий слой.

Особенностью применяемых процедур выбранной АТ является отсутствие необходимости построения опор для нависающих элементов конструкции. Неспеченный порошок не удаляется во время печати, а остается в рабочей камере. Таким образом, каждый последующий слой имеет опорную поверхность. Кроме того, неизрасходованный материал может быть собран из рабочей камеры по завершении печати и использован заново. АТ позволяет сделать производство фактически безотходным, что немаловажно при использовании дорогих материалов.

Такая технология практически не имеет ограничений по геометрической сложности построения, а получение средствами управляющих программ достижимой точности исполнения минимизирует необходимость механической обработки напечатанных изделий. АТ позволяет создавать несколько моделей одновременно лишь с ограничением по размеру рабочей камеры. Одним из основных показателей качества изделий, изготовленных методом селективного лазерного спекания, является наличие показателей удельной и усталостной прочности, которые не уступают по своим значениям аналогичным показателям деталей, изготовленных методом традиционной обработки из заготовок, полученных ковкой или литьем.

Распространенный формат камеры 3D-принтера составляет $250 \times 250 \times 250$ мм, трехмерные принтеры большего формата, естественно, будут стоить дороже.

Выбранная технология используется для быстрого прототипирования, что снижает время проектирования и производства, ведет к сокращению себестоимости мелких партий и упрощению сборки изделий сложной геометрической формы.

Следует отметить, что применение АТ при проектировании и производстве ПП более выгодно, чем традиционный процесс литья, который занимает до нескольких месяцев с учетом полного производственного цикла. С другой стороны, детали, произведенные лазерным спеканием, не обладают монолитностью и потому могут не достигать тех же показателей прочности, что и отлитые образцы или детали, произведенные субтрактивными методами. В этой связи перспективна гибридная технология, сочетающая АТ и субтрактивную обработку. В этом случае быстрое прототипирование особенно полезно при выборе

Параметр	Характеристики
Рабочая камера	250 × 250 × 215 мм
Толщина слоя	< 20 мкм
Диаметр фокуса	100 мм
Интерфейс CAD	STL (опционально конвертер для всех стандартных форматов)
Потребляемая мощность	максимальная 8.5 кВт / обычная 3.2 кВт
Рекомендуемое место для установки	минимум 4800 м × 3600 мм × 2900 мм
Сжатый воздух	7000 гПа; 20 м ³ /ч
Специализация	Аэрокосмическая промышленность
Тип лазера	Оптоволоконный 400 Вт
Требования по электропитанию	32 А
Программное обеспечение	EOS RP Tools; EOSTATE; EOSPRINT; MaterialiseMagicsRPe SG+ и другие дополнительные модули
Скорость печати	7.2–72.0 см ³ /ч

сочетания АТ-прецизионный станок для механической обработки деталей после их изготовления на 3D-принтере.

Достижение требуемых технологических характеристик (шероховатость, коллинеарность и т. п.) с помощью прецизионных станков с ЧПУ на примере гибридных станков DMG MORE LASERTEC 3D hybrid: аддитивное производство с использованием сопла подачи порошка и традиционной обработки резанием на одном станке и серия станков аддитивной печати по металлу LASERTEC SLM приводит к решению задач перехода от АД-технологии и традиционной механической обработки к гибридной технологии.

Выбор наиболее подходящего принтера проводился среди 3D-принтеров, применяющихся для изготовления деталей из специальных сплавов для прецизионных приборов медицинской, авиационной и аэрокосмической отраслей [6], [11], [12], [16]. Требуемые для изготовления деталей ПП ориентировочные характеристики принтера приведены в табл. 1.

3D-принтер должен быть рассчитан на применение следующих металлопорошковых композиций:

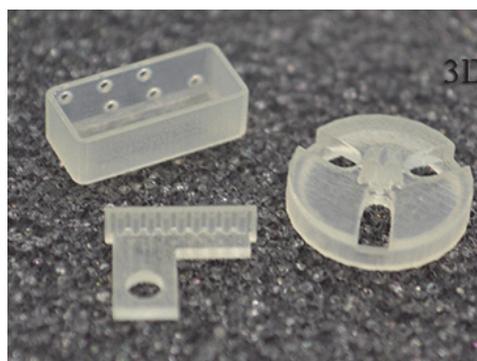
- алюминиевые сплавы;
- сплавы титана;
- нержавеющие стали;
- сплав Inconel (жаропрочный сплав на никелевой основе);
- сплав кобальт-хром (CoCr);
- инструментальные стали.

Анализ и выбор расходных материалов для применения АТ ПП проводится на основе моделирования процессов подготовки этих материалов.

В качестве исходных данных для моделирования подготовки расходных материалов строится так называемая цифровая модель порошка [8], [12], [13], которая содержит следующие характеристики: материал порошка, количество частиц, плотность, коэффициент сохранения импульса, коэффициент трения, грансостав, максимальный и минимальный размеры частиц, средний размер частиц.

Анализ существующих средств моделирования показал, что наиболее подходящей является программа PMPlabs [11], которая позволяет по перечисленным исходным данным методом моделирования определить пригодность металлопорошка к изготовлению деталей ПП на 3D-принтере.

В качестве примера быстрого прототипирования при проектировании прецизионных приборов на фото показаны готовые изделия из фотополимера. В табл. 2 приведены примеры элементов навигационного прибора, изготовленных из пластмассы и фотополимера на принтере 3D-systems по технологии MJM (полиструйная технология), из акрилового фотополимера и других видов пластика по технологии SLS (порошковое лазерное спекание) и методом послойного наплавления FDM [14], [15]. В табл. 2 даны примеры исследуемых



деталей гироскопического прибора, габариты, масса и материал изготовления. Данные детали были изготовлены с применением АТ из пластмассы.

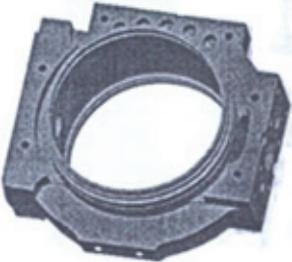
В заключение укажем задачи и перспективы рассматриваемого в статье научно-технического направления на ближайшее время:

1) разработка специальных управляющих программ для 3D-принтеров и формирование требова-

ний к конструкторской документации на перспективу в части адаптации 3D-моделей деталей ПП к программному обеспечению 3D-принтера;

2) быстрое прототипирование путем изготовления из дешевых материалов образцов изделий для проверки их характеристик и отработки технологических процессов сборки и монтажа до начала основного производства;

Таблица 2

Наименование	Габариты, мм	Масса, кг	Материал	Изображение
Рама	35.7 × 36 × 19	0.021	Титан	
Рама	35.7 × 36 × 19	0.024	Титан	
Рама	Ø17.8 × 24	0.005	Титан	
Плата	135.5 × 166 × 170	1.2	Титан	
Плата	135.5 × 166 × 177.5	1.29	Титан	

3) разработка программного обеспечения для моделирования технологии 3D-печати деталей ПП из металлопорошков для применения в производстве, в том числе с целью уменьшения массы деталей (с возможностью выполнения полых деталей) и увеличения жесткостных характеристик (с возможностью выполнения внутренних ребер жесткости);

4) расширение БД аддитивной технологии ПП в соответствии с перспективными ПП средствами АТ.

Приведенные в данной статье результаты по применению АТ можно распространить на широкий класс прецизионных приборов. Внедрение и использование аддитивных технологий в проектировании и производстве ПП представляется актуальной задачей, поскольку при этом достигается высокий технико-экономический эффект.

Предварительный анализ перехода от изготовления деталей прецизионных приборов стандартным способом к изготовлению на основе ад-

дитивных технологий показал, что повышение коэффициента использования материалов приводит к существенному сокращению производственных издержек.

Аддитивные технологии позволяют значительно снизить затраты на расходные материалы, уменьшить временные и финансовые затраты. Появляется возможность получить конечные детали высокого качества благодаря наличию этапа моделирования опытного образца из дешевого материала, выявлению и устранению недостатков. И только после этого можно осуществить печать из дорогостоящих материалов.

Таким образом, применение аддитивных технологий для проектирования и производства компонентов прецизионных приборов можно считать весьма перспективным и своевременным направлением повышения производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гринфилд Дж., Шорт К. Фабрики разработки программ. Поточковая сборка типовых приложений, моделирование, структуры и инструменты / пер. с англ. М.: ООО «И. Д. Вильямс», 2007. 592 с.

2. Зленко М. А., Попович А. А., Мутылина И. Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 221 с.

3. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» / *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–10.

4. Шевченко Д. Ю. Аддитивные технологии в машиностроении // *Комплексные проблемы развития науки, образования и экономики региона*. 2015. № 2 (7). С. 89–97.

5. Additive Manufacturing aluminum parts by indirect selective laser sintering and post processing / K. Shahzad, J. Deckers, J.-P. Kruth, J. Vleugels // *J. of materials proc. technology*. 2013. № 9. P. 1484–1494.

6. Математическое моделирование лазерного спекания двухкомпонентных порошковых смесей / А. В. Колдоба и др. // *Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша*. 2009. № 38. 15 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2009-38> (дата обращения: 01.03.2018).

7. EOSM 290. URL: <https://www.eos.info/eos-m290> (дата обращения: 13.07.2017).

8. Панченко В. Я., Низьев В. Г. Математическое моделирование в задачах аддитивных технологий // *Вестн. кибернетики*. 2016. № 2 (22). С. 71–82.

9. Каблов Е. Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // *Интеллект и технологии*. 2015. № 2 (11). С. 52–55.

10. Maskery I., Aboulkhai N. T., Aremu A. O. A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting // *Materials Science & Engineering A*. 2016. Vol. 670. P. 264–274.

11. Прототипирование и технология послойного синтеза в современном компьютеризированном производстве / О. С. Сироткин, Ю. М. Тарасов, С. Б. Рыцев, Р. И. Гирш // *Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение*. М.: ОАО «НИЦАСК», 2008. С. 123–124.

12. Buchbinder D. High Power Selective Laser Melting of Aluminum Parts // *Physics Procedia*. 2011. Vol. 12. P. 271–278.

13. Библиотека ObjectListView. URL: <http://objectlistview.sourceforge.net/cs/index.html> (дата обращения: 07.03.2018).

14. Aboulkhai N. T., Maskery I., Tuck C. The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment // *Materials Science & Engineering A*. 2016. Vol. 667. P. 139–146.

15. Read N., Wang W., Essa K. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development // *Materials and Design*. 2015. Vol. 65. P. 417–424.

16. Биомеханические исследования состояния структур стенозирванного аортального клапана при баллонной дилатации / П. А. Квиндт, А. Л. Овсепьян, А. И. Аль-Кисвани, П. И. Бегун // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2018. № 1. С. 77–82.

R. I. Solnitsev, A. I. Al-Kiswani
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

RAPPID PROTOTYPING IN DESIGN AND MANUFACTURE OF PRECISION DEVICES BASED ON ADDITIVE TECHNOLOGY

The features of precision instruments (navigation, medical, measuring, etc.), including the requirements for achieving high accuracy with minimal weight and dimensions, leads to the manufacture of parts with hidden cavities, complex geometry, which requires prototyping. The article presents the results of the analysis and selection of the most appropriate additive technology for the design and production of precision instruments, the preparation of consumables from plastics (photopolymers, polyamides, polystyrenes), metal powders (Titanium, aluminum alloys, etc.), programs managing 3D printers, including the transition from the 3D drawing of the details in the .stl format and through the Slicer by converting to G-Code, the selection of 3D printers, the results of modeling the adaptation processes of additive technology to precision instruments. Advantages of additive technology are shown, especially at the stages of design and technological preparation of production.

Additive technologies, rapid prototyping, design and manufacture of precision instruments, selective laser sintering, 3D printing, finite element method, CNC machines

УДК 681.5

Д. Х. Имаев, М. Ю. Шестопалов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

С. В. Квашнин
АО «НПФ „Система-Сервис“»

Топологический синтез селективно-инвариантных систем управления

Обсуждаются способы обеспечения селективной инвариантности систем управления с произвольной причинно-следственной топологией. Рассматриваются линейные стационарные модели топологического, структурного и параметрического рангов неопределенности в форме сигнальных графов. Условием независимости установившейся реакции системы от возмущения является наличие в графе внутренней модели среды дуги, нули или полюсы передаточной функции которой равны спектру возмущения. Топологическая формула для передаточной функции сигнального графа, преобразованная к полиномиальной форме, позволяет получить условия локализации дуги относительно пути в сильно связанном графе. Поскольку требования к инвариантности и устойчивости оказываются противоречивыми, решается задача декомпозиции процедуры синтеза. Приведен иллюстративный пример коррекции инвариантной системы в комплексно-частотной области.

Система управления, топология, структура, сигнальный граф, селективная инвариантность, возмущение, спектр, синтез

Целью управления большинством промышленных объектов является поддержание заданных технологических режимов в условиях неконтролируемых воздействий среды. Независимость переменных от возмущений в терминах классической теории управления называется *инвариантностью*. Свойство, когда *установившаяся*

реакция системы не зависит от конкретных типов воздействий, называют *селективной* (избирательной) инвариантностью. Различные формы инвариантности и селективной инвариантности являются первичными требованиями к системам управления. Хотя проблеме устойчивости традиционно уделяется особое внимание, следует заме-