

Научная статья
УДК 621.762.629.78
DOI: 10.34759/vst-2022-2-35-44

ИНТЕГРИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Юрий Петрович Борщев¹ ✉, Валентин Константинович Сысоев²

^{1,2}Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина,
Химки, Московская область, Россия

¹BorshchevIUP@laspace.ru ✉

²sysoev@laspace.ru

Аннотация. Представлена интегрированная методика проектирования и изготовления элементов антенно-фидерных систем космических аппаратов с применением технологии селективного лазерного сплавления. Показан алгоритм данной методики: от анализа технического задания и электродинамического моделирования геометрии элемента до испытаний готового изделия. Важной особенностью данной методики является взаимосвязь технологии изготовления деталей и методов их проектирования. Применение интегрированной методики позволит производить антенно-фидерные системы с высоким качеством и высокой экономической эффективностью.

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, космические аппараты, порошок AlSi10Mg, спиральная коническая антенна, уголки волноводные

Для цитирования: Борщев Ю.П., Сысоев В.К. Интегрированная методика проектирования элементов антенно-фидерных систем космических аппаратов и технологических процессов их изготовления с применением селективного лазерного сплавления // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 2. С. 35-44. DOI: 10.34759/vst-2022-2-35-44

Original article

INTEGRATED TECHNIQUE FOR DESIGNING SPACECRAFT ANTENNA-FEEDER SYSTEMS ELEMENTS AND TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR THEIR MANUFACTURING EMPLOYING SELECTIVE LASER ALLOYAGE

Yurii P. Borshchev¹ ✉, Valentin K. Sysoev²

^{1,2}Lavochkin Research and Production Association,
Khimki, Moscow region, Russia

¹BorshchevIUP@laspace.ru ✉

²sysoev@laspace.ru

Abstract

The article provides a brief analysis of the additive technologies global market development, and bespeaks the need to activate the Russian market segment, which currently occupies no more than 2%. It regards the problems of introducing developments of the new elements of the structures of spacecraft antenna-feeder systems (AFS) and technological processes of their manufacturing employing selective laser alloyage (SLA). This said topic is insufficiently studied, since the conventional techniques are being limited only by the development of the technological process for parts manufacturing with the SLA application. The article presents the technique algorithm from technological analysis of the technical assignment for the SC AFS development to the end product manufacturing and testing. The authors note that the important feature of this technique consists in interrelation of the development process and capabilities of the parts manufacturing technology (SLA). This allows AFS manufacturing with the geometry corresponding to the rated one, which is being determined by the electro-dynamic modeling, without adjusting the part structure to the conventional manufacturing technologies capabilities. Thus, the principle of “from function to the design” is being put into practice. The technique was developed based on the authors’ experience on the SLA technology implementation and analysis of scientific publications on the issue. The authors tested the technique on the example of development and manufacturing, applying the SLA technology, of new structures of the helix antenna and waveguide corners for the spacecraft. The technique includes certification of the newly implemented material, performed according to the industry standard and consisting in conducting tests of necessary operational properties of the new material by the corresponding program.

The following documents were drawn up by the certification results:

- a certificate containing data on the properties of the material, the results of its performance evaluating under conditions as close as possible to operational conditions and recommendations for testing in production and operational conditions;
- technical specifications containing technical requirements for the material of part blanks manufactured by the SLM method.

The technique provides also the development, based on the organization Standard, of the Program for experimental try-out of technological process for parts manufacturing employing the SLA technique,

The results, obtained while developing the feasibility study, such as reduction of mass, material utilization factor, labor intensity, and cost, as well as the SC AFSs elements operational characteristics improvement, including active life increase, and new structures try-out period reduction afford ground to consider the presented article as up-to-date not only for the space industry, but for the radio-electronic industry as well.

Keywords: selective laser alloyage, spacecraft, AlSi10Mg powder, helix cone antenna, waveguide corners

For citation: Borshchev Yu.P., Sysoev V.K. Integrated Technique for Designing Spacecraft Antenna-Feeder Systems Elements and Technological Processes for Their Manufacturing Employing Selective Laser Alloyage. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 2, pp. 35-44. DOI: 10.34759/vst-2022-2-35-44

Введение

В условиях возросшей конкуренции в космической отрасли необходимо сокращать затраты на разработку и производство космических аппаратов (КА) и средств выведения, снижать их массовые характеристики, уменьшать количество воздействующих на качество ручных операций при изготовлении составных частей конструкций. Повышение надежности и эффективности разработки и изготовления изделий возможно только с внедрением в производство современных технологий, из них наибольшим потенциалом обладают аддитивные технологии (АТ) [1–6].

Первая установка 3D-печати появилась в 1986 году, она была запатентована американским инженером Чаком Халлом, создавшим компанию 3D Systems Corporation, которая до настоящего времени является одним из лидеров в производстве оборудования для АТ. Общепринятое определение термина *аддитивные технологии* звучит как «процесс объединения материалов с целью создания объекта из данных 3D-модели», обычно послойно, в отличие от «вычитающих» традиционных производственных технологий [7].

Основное преимущество АТ — возможность создать сложнопрофильную деталь, в единичном экземпляре, из широкого круга материалов без применения специального технологического оснащения, значительно сокращая при этом стоимость разработки и изготовления по сравнению с «вычитающими» технологиями.

В настоящий момент лидирующие позиции на рынке аддитивных технологий занимают США, Германия, Великобритания, Япония. Франция и другие европейские страны вместе контролируют более 50% объема рынка. Азиатские страны по темпам роста не уступают лидерам, Китай предполагает к 2025 году выйти на второе место на рынке после США. Россия находится по производству и внедрению АТ на 11 месте в мире [8].

В России предпринимаются шаги по обеспечению роста объема российского рынка аддитивных технологий и увеличению его доли на мировом рынке, распоряжением Правительства РФ от 14 июля 2021 г. N 1913-р утверждена Стратегия развития аддитивных технологий в РФ на период до 2030 г.

Цель настоящей работы — расширение области применения АТ при проектировании и изготовлении узлов и деталей КА.

В системах конструкции КА наиболее сложной и наукоемкой является антенно-фидерная система (АФС) и ее элементы: антенны, волноводы, фильтры, переходы и пр. Традиционные технологии проектирования и изготовления этих элементов уже не соответствуют современным технико-экономическим требованиям [9].

Из всех видов АТ наиболее активно развивается технология селективного лазерного сплавления (СЛС), которая позволяет изготавливать изделия из порошков алюминиевых, титановых и жаропрочных сплавов, нержавеющей стали. Суть этой технологии — послойное сплавление лазерным лучом заготовок в соответствии с объемной моделью, разбитой на сечения, и по своим характеристикам (прочность материала, точность геометрических размеров) она наиболее подходит для изготовления новых конструкций антенн и устройств СВЧ.

Изготовлением антенн и устройств СВЧ для АФС различного назначения с применением метода СЛС занимаются многие российские организации — наиболее востребованными устройствами являются антенны, фильтры, сумматоры и волноводы разнообразных конструкций [10–12].

Преимущества использования технологии СЛС:

- сокращение трудоемкости и цикла проектно-конструкторских работ за счет возможности изготовления сборочных узлов одной деталью и отказа от средств технологического оснащения при изготовлении обрабатываемой конструкции;

- снижение массы деталей за счет топологической оптимизации конструкции, в том числе бионического дизайна, что весьма важно для космической техники;

- значительное уменьшение цикла разработки и изготовления изделий в мелкосерийном производстве;

- снижение трудоемкости и стоимости производства вследствие сокращения и упрощения технологических цепочек;

- возможность получения новых функционально-конструктивных особенностей деталей с новым комплексом эксплуатационных свойств;

- улучшение основных радиотехнических характеристик элементов АФС за счет приближения их теоретической формы к изготовленной.

В связи с вышеизложенным разработка интегрированной методики, отражающей взаимосвязь проектирования элементов АФС КА и технологии их изготовления с использованием технологии СЛС отечественного алюминиевого порошка AlSi10Mg, а также включающей информацию о необходимых организационно-технических мероприятиях по внедрению новой технологии, является новой, актуальной задачей.

На рис. 1 показаны образцы заготовок элементов АФС, изготовленных авторами методом СЛС из порошка алюминиевого сплава AlSi10Mg.

Методика

Данная методика позволит, используя возможности технологии СЛС, проектировать цельные сложнопрофильные элементы АФС с геометрией, близкой к электродинамической модели. Структура методики содержит взаимосвязанные организационно-технические мероприятия по внедрению технологии СЛС: от технологического анализа технического задания (ТЗ) на разработку антенно-фидерной системы КА и ее элементов до испытаний их радиотехнических характеристик (РТХ).

Основные блоки методики:

- разработка конструкторской документации (КД), в том числе 3D-модели заготовки, техни-



Рис. 1. Образцы элементов АФС, изготовленные СЛС

ко-экономическое обоснование (ТЭО), паспортизация материала;

- технологический анализ;
- проектирование технологического процесса СЛС заготовки и изготовления детали;
- контроль параметров изготовленной детали;
- разработка технологического процесса изготовления элементов АФС.

Основным моментом при разработке техпроцесса СЛС является определение режимов и стратегии построения заготовки, их определение требует проведения экспериментальных исследований. Такие исследования были проведены [13–15] — определены основные параметры построения заготовок деталей, подтверждены при паспортизации материала АСП-40 AlSi10Mg. Результаты использовались при изготовлении элементов АФС КА в дальнейшем.

Анализ научно-технической литературы показал, что представленные многими зарубежными и отечественными учеными методики по АТ ограничиваются разработкой техпроцесса изготовления изделий с применением технологии СЛС для конкретных деталей и сплавов [16, 17].

Входным параметром в этих методиках являются трехмерная геометрическая модель детали и ее чертеж с техническими требованиями, а взаимосвязь проектирования детали с процессом ее изготовления не показана. Проектирование элементов АФС имеет свою специфику и должно быть увязано с возможностями технологии СЛС. Блок-схема интегрированной методики представлена на рис. 2.

Входным параметром (1) при использовании технологии СЛС в процессе производства антенн и элементов СВЧ является ТЗ, в части разработки антенно-фидерной системы КА, как основания для проектирования, разработки КД на АФС и ее элементы.

ТЗ включает в себя следующую основную информацию:

- требуемые радиотехнические характеристики;
- габаритные размеры;
- максимальную массу системы;
- количество изделий и условия эксплуатации.

На основании ТЗ составляется перечень (2) с указанием количества и марки материала деталей и сборочных единиц (ДСЕ), планируемых к переводу на изготовление с использованием технологии СЛС. Согласно ГОСТ 14.003-74 исходным документом для выполнения разработки и необходимой документации является техническое задание на разрабатываемую продукцию или технологический процесс. В данном случае функции заказчика, исполнителя и потребителя выполняет одна организация.

Следующий этап — электродинамическое моделирование (3) элемента АФС. Результатом моделирования является расчетная 3D-модель детали с радиотехническими характеристиками, максимально приближенными к заданным в ТЗ, которая проходит технологический анализ на соответствие требованиям технологии СЛС. При удовлетворительных результатах технологического анализа расчетной геометрии и соответствия радиотехнических характеристик требованиям ТЗ на проектирование АФС переходят к разработке конструкторской документации, включая 3D-модель детали.

Разработка 3D-модели детали и конструкторской документации (4) производится на основе расчетной 3D-модели. При выпуске КД необходимо учитывать следующие моменты: оптимальная детализация полигональной сетки, от которой зависит качество поверхности; назначение геометрических размеров с учетом усадки изго-

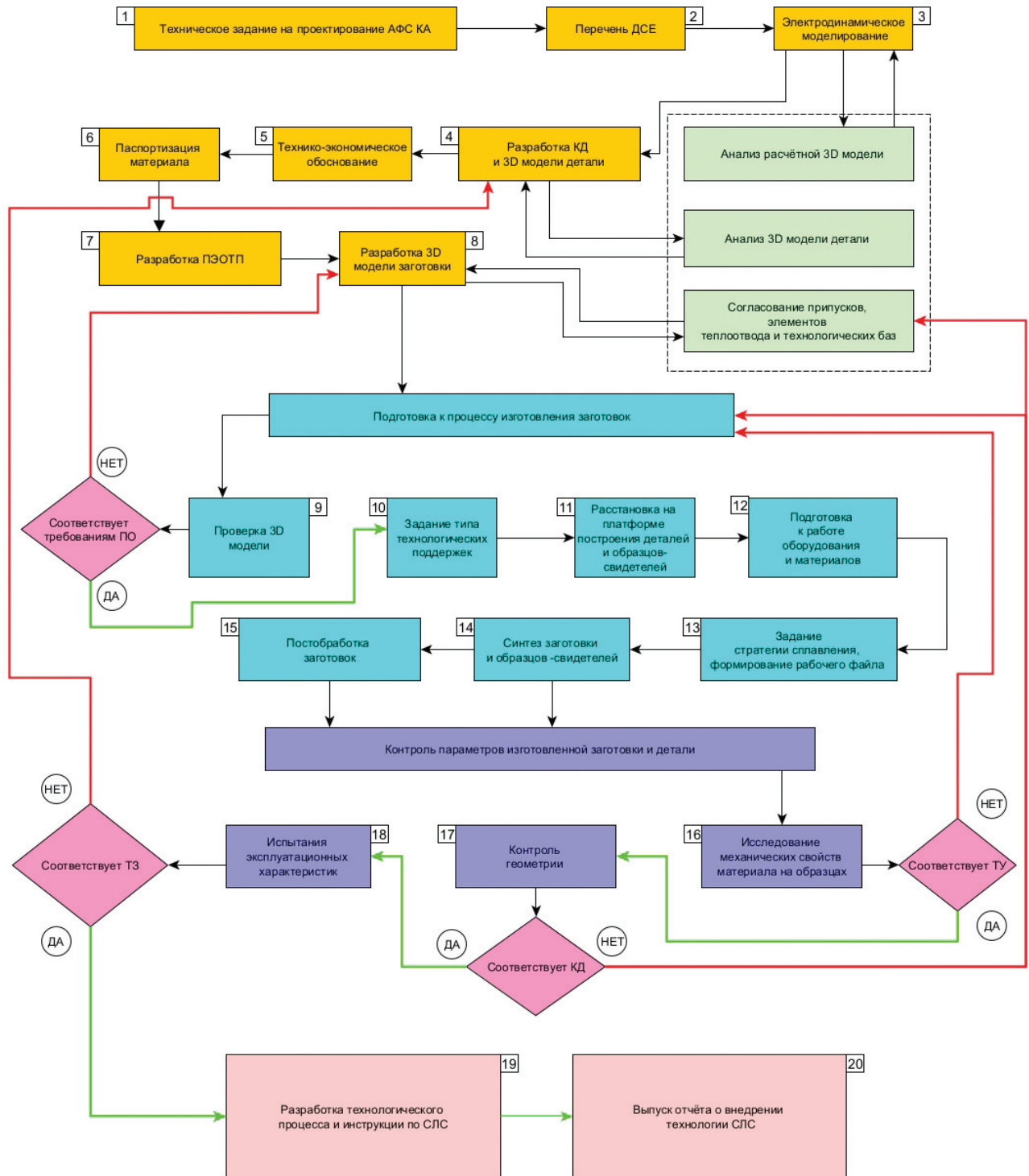


Рис. 2. Блок-схема интегрированной методики проектирования и разработки КД и техпроцесса изготовления элементов АФС КА с применением технологии СЛС

товленной СЛС детали; соответствие размеров и формы элементов конструкции допустимым технологией СЛС. Необходимо учитывать некоторые ограничения технологии СЛС по применяемым конструктивным элементам заготовок деталей.

При технологическом анализе 3D-модели детали определяются исходные данные для технико-экономического обоснования (ТЭО) применения процесса СЛС.

Разработка ТЭО (5) проводится для принятия решения о применении технологии СЛС.

ТЭО содержит сравнительную информацию об экономических и технических преимуществах применения технологии СЛС в сравнении с традиционными технологиями. Для подготовки ТЭО необходима следующая информация по сравнимым технологиям:

- количество порошка для изготовления заготовки и технологических поддержек;
- масса детали;
- цикл проектирования;
- трудоемкость и цикл изготовления детали;
- стоимость материалов;
- эксплуатационные характеристики.

Проведение паспортизации вновь внедряемого материала (6) осуществляется в соответствии с отраслевым стандартом и заключается в проведении испытаний необходимых эксплуатационных свойств нового материала по соответствующей программе. По результатам паспортизации оформляются:

- паспорт, содержащий данные о свойствах материала, результатах оценки его работоспособности в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным, и рекомендации к опробованию в производственно-эксплуатационных условиях;
- технические условия, содержащие технические требования к материалу заготовок деталей, изготовленных методом СЛС.

На основании стандарта организации разрабатывается программа экспериментальной отработки технологического процесса (ПЭОТП) изготовления деталей с применением метода СЛС. Целью отработки технологического процесса (ТП) СЛС является соответствие параметров качества получаемого материала и деталей техническим требованиям ТУ и КД, а также обеспечение параметров производительности и параметров затрачиваемых ресурсов (трудоемкость, материалоемкость, стоимость) за счет оптимизации ТП, в том числе средств технологического оснащения (СТО) и освоения их на рабочих местах (7).

Для возможности выполнения технических требований к конструктивным элементам чертежа ДСЕ, которые не могут быть выполнены технологией СЛС (резьбовые соединения, точные посадочные размеры, поверхности с высокой чистотой), производится, на основе 3D-модели детали, разработка 3D-модели заготовки (8). 3D-модель заготовки разрабатывается с учетом технологических баз для постобработки, припус-

ков на чистовую обработку точных поверхностей, элементов теплоотвода. Для сплава АСП-40 AlSi10Mg шероховатость поверхностей заготовки, в зависимости от их расположения, при построении варьируется от Ra 6 мкм – при горизонтальном расположении и более грубым на поверхностях с поддержками. При необходимости получения шероховатости менее Ra 6 мкм на эти поверхности назначаются припуски под последующую обработку. Если первоначальный формат 3D-модели заготовки отличается от формата stl, то сначала поверхности 3D-модели аппроксимируются множеством треугольников. Этот процесс, называемый триангуляцией, происходит при переводе 3D-модели в стандартный формат stl. (Подробнее см. ГОСТ Р 57590-2017 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Ч. 3. Общие требования».)

Затем производится проверка 3D-модели поверхности заготовки (9) – выявление и устранение возможных дефектов полигональной сетки модели в программе Magics20.04. или аналогичной; она должна быть цельной, герметичной и не содержать полостей и разрывов в стенках. Далее проверенная и исправленная 3D-модель располагается на виртуальной платформе построения, где и происходит ориентация модели детали относительно платформы построения.

После этого задаются количество и тип технологических поддержек (10) и мест их крепления к основному материалу заготовки. При моделировании поддержек следует учитывать, что одним из основных факторов при построении поддержек является угол наклона выращиваемых поверхностей заготовки. Оптимально спроектированные технологические поддержки позволяют свести к минимуму коробление заготовки в процессе СЛС.

Расстановка заготовок на платформе построения (11) и при необходимости образцов-свидетелей производится с учетом рекомендаций по минимальному расстоянию между изготавливаемыми заготовками. Достаточное расстояние между заготовками минимизирует их тепловое взаимодействие. Экспериментальным путем установлено, что заготовки с прямоугольным сечением нужно располагать под углом около 30° относительно рекоутера; тонкостенные поверхности желательно располагать перпендикулярно направлению перемещению рекоутера. Выполнение этих рекомендаций позволяет минимизировать взаимное воздействие при соприкосновении

разравнивающего резинового элемента и спавленной поверхности заготовки, что повышает качество и надежность процесса сплавления.

Подготовка оборудования и порошка к работе (12) производится в соответствии с инструкцией по эксплуатации оборудования и технологической инструкции по подготовке порошка. Подготовка 3D-принтера – очистка камеры построения и оптической системы сканирования, позиционирование и нагрев платформы построения, заполнение камеры построения инертным газом. Подготовка порошка – измерение влажности и текучести, сушка, просеивание.

Следующий этап – задание режимов сплавления порошка (13). Одним из самых трудоемких этапов изготовления заготовок деталей технологией СЛС является определение рациональных технологических параметров. Этот этап может быть пропущен в том случае, если технологические параметры уже известны (данные предоставил производитель аддитивной установки, поставщик металлического порошка или данные были уже определены). Конечные свойства выбранного материала изготавливаемой заготовки будут непосредственно зависеть от выбора режимов лазерного сплавления. Основными параметрами непрерывного лазерного излучения являются мощность P и скорость сканирования лазерного луча v , влияющие на процесс плавления частиц металлического порошка, а также направление и тип траектории сканирования лазерным лучом (штриховка), расстояние между треками лазера. Для оптимизации параметров процесса СЛС необходимо достичь наиболее близкой к 100% плотности получаемого материала с максимальной скоростью печати. Для выбора параметров, обеспечивающих наибольшую эффективность, необходимо учитывать особенности алюминиевых порошков: устойчивая оксидная пленка на поверхности гранул, низкая текучесть, высокая отражающая способность и теплопроводность [18–20]. Затем формируется рабочий файл для изготовления заготовки, который переносится на компьютер установки.

Перед началом синтеза заготовки методом селективного лазерного сплавления (14) необходимо указать толщину слоя порошка и время остывания сплавленного слоя. Процесс изготовления заготовок деталей технологией СЛС включает в себя нагрев и плавление материала движущимся источником тепла и его дальнейшее остывание. Во время работы 3D-принтера необходимо контролировать следующие компоненты

процесса: состояние фильтров очистки нейтрального газа, качество наносимого слоя порошка, своевременно менять заполненные емкости с отработанным порошком и заполнять емкость подачи подготовленным порошком.

После окончания процесса получения заготовки производится очистка платформы построения от излишков порошка и осуществляется постобработка заготовки деталей и образцов-свидетелей (15). В постобработку входят: термообработка, снятие заготовок с платформы, отделение поддержек, механическая обработка.

Заключительным этапом изготовления заготовки является контроль материала в соответствии с ГОСТ Р 57910-2017 «Материалы для аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний металлических материалов сырья и продукции».

Контроль микроструктуры, механических свойств, пористости полученного материала осуществляется на образцах-свидетелях (16), при этом свойства могут определяться в различных направлениях относительно плоскости сплавления порошка. При несоответствии свойств паспортным значениям необходимо проанализировать условия и параметры построения заготовки и образцов.

При контроле геометрических параметров (17) (размеры, качество поверхностей) изготовленной детали в случае отклонения параметров от требований КД и выявления причин проводится анализ 3D-модели заготовки и параметров процесса СЛС.

Контроль эксплуатационных характеристик (18) на соответствие ТЗ осуществляется по разработанным программам и методикам (используется анализатор цепей PNA-LN5230C). Причины выявленных несоответствий устраняются корректировкой 3D-моделей детали и заготовки.

Блок технологического анализа включает в себя анализ технической возможности изготовления элементов АФС методом СЛС с целью улучшения конструкции, максимально приближая ее к расчетной, исходя из возможностей метода СЛС, а также включает анализ условий работы детали с целью установления технических требований к процессу СЛС. Технологический анализ проводится на следующих этапах процесса создания изделий:

- этап технического предложения – определение технической возможности изготовления;

- этап электродинамического моделирования элемента или группы элементов — на соответствие требованиям технологии СЛС;

- этап выпуска КД и 3D-модели детали — технологический анализ проводится по точности размеров, формы и расположения поверхностей, по шероховатости наружных и внутренних поверхностей, по направлению выращивания детали. На этом этапе рассматриваются возможности оптимизации конструкции ДСЕ с целью снижения массы и уменьшения количества технологических операций по сравнению с традиционным методом изготовления;

- этап разработки 3D-модели заготовки детали — анализируется расположение материала подержек и мест их крепления к материалу заготовки, достаточность дополнительных припусков и теплоотводов, правильность назначения технологических баз для операций постобработки.

Разработка технологического процесса изготовления ДСЕ (19) с применением метода СЛС, в котором указываются: основные технологические параметры СЛС, расположение на платформе построения, последовательность постобработки заготовки детали и применяемое оборудование, методы контроля.

В качестве исходной информации для разработки технологического процесса должны быть использованы:

- в качестве базовой информации — технические требования, содержащиеся в конструкторской документации, а также 3D-модель детали;

- в качестве руководящей информации — стандарты, регламентирующие использование технологии СЛС при изготовлении заготовок деталей, технические условия на материал;

- в качестве справочной информации — технологические инструкции по назначению параметров процесса СЛС, инструкция по эксплуатации аддитивной установки SLM280HL.

По результатам отработки техпроцесса составляется акт об отработке ТП, на основании которого выпускается отчет по ПЭОТП (20).

Выводы

1. Таким образом, в данной работе представлена интегрированная методика проектирования и разработки КД и техпроцесса изготовления элементов АФС КА с применением технологии СЛС, содержащая информацию о необходимых организационно-технических мероприятиях,

допускающих изготовление элементов АФС на штатные изделия КА.

2. В процессе разработки методики были детально исследованы характеристики порошкового материала AlSi10Mg АСП-40, установлены требования к допустимому диапазону дисперсности частиц и определена оптимальная стратегия построения, методом СЛС, элементов АФС КА.

3. Проведена апробация разработанной методики на примере проведения опытных работ по разработке и изготовлению новых конструкций спиральной антенны и волноводных уголков для КА. Применение технологии СЛС обеспечило снижение массы, трудоемкости, стоимости и улучшение эксплуатационных характеристик элементов АФС КА, в том числе увеличение срока активного существования, уменьшение сроков отработки новых конструкций.

Практическая значимость данной работы заключена в принятии решения об организации производства изготовления элементов АФС на штатные КА.

Список источников

1. Bremen S., Meiners W., Diatlov A. Selective Laser Melting. A manufacturing technology for the future? // *Laser Technik Journal*. 2012. Vol. 9. No. 2, pp. 33–38. DOI: 10.1002/latj.201290018
2. Sercombe T.B., Li X. Selective laser melting of aluminium and aluminium metal matrix composites: review // *Materials Technology*. 2016. Vol. 31. No. 2, pp. 77–85. DOI: 10.1179/1753555715Y.0000000078
3. Дынин Н.В., Иванова А.О., Хасиков Д.В., Оглодков М.С. Селективное лазерное сплавление алюминиевых сплавов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2017. № 8(56). С. 12–23. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-8-2-2
4. Балякин А.В., Скуратов Д.Л., Хаймович А.И., Олейник М.А. Применение прямого лазерного сплавления металлических порошков из жаропрочных сплавов в двигателестроении // *Вестник Московского авиационного института*. 2021. Т. 28. № 3. С. 202–217. DOI: 10.34759/vst-2021-3-202-217
5. Борщев Ю.П., Сысоев В.К., Юдин А.Д. Анализ применения технологии селективного лазерного сплавления для изготовления структурных конструкций наноспутников CubeSat // *Вестник Московского авиационного института*. 2020. Т. 27. № 3. С. 219–228. DOI: 10.34759/vst-2020-3-219-228
6. Расулов З.Н., Калугина М.С., Ремшев Е.Ю., Афильтин Г.О., Аветисян А.Р., Елфимов П.В. Исследование режимов изостатического прессования образцов, изготавливаемых методом SLM, для производства новых компонентов корпуса камеры сгорания // *Вестник Московского авиационного*

- института. 2021. Т. 28. № 1. С. 161-174. DOI: 10.34759/vst-2021-1-161-174
7. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. 2013. URL: <http://web.mit.edu/2.810/www/files/readinfs/AdditiveManufacturingTerminologies.pdf>
 8. Характеристика технологий 3D-печати и их роль в технологическом развитии. 2021. URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-tekhnologiy-3d-pechati-v-rossii-i-mire-perspektivnyvnedreniya-additivnykh-tekhnologiy-v-proizv/>
 9. Бушминский И.П. Изготовление элементов конструкций СВЧ. Волноводы и волноводные устройства: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1974. – 304 с.
 10. Нисан А. Цифровые технологии производства: печать металлопорошковыми композициями // Вектор высоких технологий. 2017. № 5. С. 30-41.
 11. Харалгин С.В., Куликов Г.В., Котельников А.Б., Снастин М.В., Добычина Е.М. Прототипирование СВЧ-устройств с заданными электродинамическими характеристиками по технологии 3D-печати // Российский технологический журнал. 2019. Т.7. №1. С. 80-101. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-1-80-101
 12. Ермаков А.С., Калинин В., Нисан А., Потапов Е., Фролова А. Опыт 3D-печати элементов волноводных СВЧ-трактов и рупорных антенн диапазона 8,5-31 ГГц // Вектор высоких технологий. 2019. № 1(41). С. 8-19.
 13. Иванов И.Р., Селезнев В.Д. Моделирование и исследование лазерного плавления в методе 3D-печати на примере порошка алюминия // Физика. Технологии. Инновации: сборник научных трудов. – Екатеринбург: Изд-во Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2015. С. 89-95.
 14. Дынин Н.В., Заводов А.В., Оглодков М.С., Хасиков Д.В. Влияние параметров процесса селективного лазерного сплавления на структуру алюминиевого сплава системы Al-Si-Mg // Труды ВИАМ. 2017. № 10(58). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-1-1
 15. Ананьев А.И., Борщев Ю.П., Квардаков М.Ю. и др. Формирование сложнопрофильных деталей космических аппаратов методом селективного лазерного сплавления // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2017. № 1(35). С. 87-92.
 16. Ананьев А.И., Борщев Ю.П., Шибалов М.В. и др. Инновационные технологии – в космическую отрасль // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2017. № 4(38). С. 134-137.
 17. Сотов А.В., Проничев Н.Д., Смелов В.Г. и др. Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления деталей ГТД методом селективного лазерного сплавления порошка жаропрочного сплава ВВ751П // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19. № 4. С. 96- 104.
 18. Милуков И.А., Роголёв А.Н., Соколов В.П. Подходы к интеграции конструирования и технологического проектирования // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 4. С. 59-70. DOI: 10.34759/vst-2020-4-59-70
 19. Aversa A., Lorusso M., Cattano G., Manfredi D. A study of the microstructure and the mechanical properties of an Al–Si–Ni alloy produced via selective laser melting // Journal of Alloys and Compounds. 2017. Vol. 695, pp. 1470–1478. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.10.285
 20. 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, pp. 139–146. DOI: 10.1016/j.msea.2016.04.092
 21. Reschetnik W., Brüggemann J.-P., Aydinöz M.E., Grydin O. Fatigue crack growth behavior and mechanical properties of additively processed EN AW-7075 aluminium alloy // Procedia Structural Integrity. 2016. Vol. 2, pp. 3040-3048. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.380

References

1. Bremen S., Meiners W., Diatlov A. Selective Laser Melting. A manufacturing technology for the future? *Laser Technik Journal*, 2012, vol. 9, no. 2, pp. 33-38. DOI: 10.1002/latj.201290018
2. Sercombe T.B., Li X. Selective laser melting of aluminium and aluminium metal matrix composites: review. *Materials Technology*, 2016, vol. 31, no. 2, pp. 77–85. DOI: 10.1179/1753555715Y.0000000078
3. Dynin N.V., Ivanova A.O., Khasikov D.V., Oglodkov M.S. *Trudy VIAM*, 2017, no. 8(56), pp. 12-23. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-8-2-2
4. Balyakin A.V., Skuratov D.L., Khaimovich A.I., Oleinik M.A. Direct laser fusion application for powders from heat resistant alloys in engine building. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 3, pp. 202-217. DOI: 10.34759/vst-2021-3-202-217
5. Borshchev Y.P., Sysoev V.K., Yudin A.D. Analysis of selective laser fusion technology application for the CubeSat nano-satellites skeleton structures manufacturing. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 3, pp. 219-228. DOI: 10.34759/vst-2020-3-219-228
6. Rasulov Z.N., Kalugina M.S., Remshev E.Y., Afim'in G.O., Avetisyan A.R., Elfimov P.V. Studying isostatic pressing of samples being produced by the SLM method for new components manufacturing of the combustion chamber housing. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 1, pp. 161-174. DOI: 10.34759/vst-2021-1-161-174
7. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, 2013. URL: <http://web.mit.edu/2.810/>

- www/files/readinfs/AdditiveManufacturingTerminologies.pdf
8. *Kharakteristika tekhnologii 3D-pechati i ikh rol' v tekhnologicheskoy razvitiy, 2021. URL: https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-tekhnologiy-3d-pechati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tekhnologiy-v-proizv/*
 9. Bushminskii I.P. *Izgotovlenie elementov konstruksii SVCh. Volnovody i volnovodnye ustroystva* (Microwave structures elements manufacturing. Waveguides and waveguide devices), Moscow, Vysshaya shkola, 1974, 304 p.
 10. Nisan A. *Vektor vysokikh tekhnologii*, 2017, no. 5, pp. 30-41.
 11. Kharalgin S.V., Kulikov G.V., Kotel'nikov A.B., Snastin M.V., Dobychnina E.M. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 80-101. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-1-80-101
 12. Ermakov A.S., Kalinichev V., Nisan A., Potapov E., Frolova A. *Vektor vysokikh tekhnologii*, 2019, no. 1(41), pp. 8-19.
 13. Ivanov I.R., Seleznev V.D. *Fizika. Tekhnologii. Innovatsii: sbornik statei*, Ekaterinburg, Ural'skii federal'nyi universitet im. pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2015, pp. 89-95.
 14. Dynin N.V., Zavodov A.V., Oglodkov M.S., Khasikov D.V. *Trudy VIAM*, 2017, no. 10(58). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-1-1
 15. Anan'ev A.I., Borshchev Yu.P., Kvardakov M.Yu. et al. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2017, no. 1(35), pp. 87-92.
 16. Anan'ev A.I., Borshchev Yu.P., Shibalov M.V. et al. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2017, no. 4(38), pp. 134-137.
 17. Sotov A.V., Pronichev N.D., Smelov V.G. et al. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2017, vol. 19, no. 4, pp. 96-104.
 18. Milyukov I.A., Rogalev A.N., Sokolov V.P. Approaches to design engineering and technological designing integration. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 4, pp. 59-70. DOI: 10.34759/vst-2020-4-59-70
 19. Aversa A., Lorusso M., Cattano G., Manfredi D. A study of the microstructure and the mechanical properties of an Al-Si-Ni alloy produced via selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 695, pp. 1470-1478. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.10.285
 20. 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, pp. 139-146. DOI: 10.1016/j.msea.2016.04.092
 21. Reschetnik W., Brüggemann J.-P., Aydinöz M.E., Grydin O. Fatigue crack growth behavior and mechanical properties of additively processed EN AW-7075 aluminium alloy. *Procedia Structural Integrity*, 2016, vol. 2, pp. 3040-3048. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.380

Статья поступила в редакцию 01.03.2022; одобрена после рецензирования 04.03.2022; принята к публикации 21.03.2022.

The article was submitted on 01.03.2022; approved after reviewing on 04.03.2022; accepted for publication on 21.03.2022.