

Научная статья
УДК 620.18
DOI: 10.34759/vst-2023-1-131-141

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА

Виталий Геннадиевич Смелов¹, Виктория Валерьевна Кокарева^{2✉}, Павел Владимирович Чупин³,
Дмитрий Николаевич Дмитриев⁴

^{1,2} Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва (Самарский университет),

Самара, Россия

^{3,4} ПАО «ОДК-Кузнецов»,

Самара, Россия

¹ pdla_smelov@mail.ru

² charming_carrot@mail.ru ✉

³ pv.chupin@uec-kuznetsov.ru

⁴ dn.dmitriev@uec-kuznetsov.ru

Аннотация. Представлены результаты создания алгоритма проектирования «умных» конструкций (конфигураций) изделий, изготавливаемых по технологии селективного лазерного сплавления жаропрочного сплава ВЖ159, для достижения преимуществ и преодоления ограничений технологии при аддитивном производстве горелочного устройства.

Ключевые слова: аддитивное производство, селективное лазерное сплавление, жаропрочный сплав, конструкция горелочного устройства, конфигурация заготовки, проектирование изделия, проектирование технологического процесса

Финансирование: работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме: «Организация высокотехнологичного производства промышленных ГТД с интеллектуальной системой конструкторско-технологической подготовки для повышения функциональных характеристик» (Соглашение о предоставлении гранта № 075-11-2021-042 от 24.06.2021)

Для цитирования: Смелов В.Г., Кокарева В.В., Чупин П.В., Дмитриев Д.Н. Проектирование технологического процесса селективного лазерного сплавления жаропрочного сплава для изготовления горелочного устройства // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 1. С. 131–141. DOI: 10.34759/vst-2023-1-131-141

Original article

TECHNOLOGICAL PROCESS DESIGN FOR SELECTIVE LASER FUSION OF A HEAT-RESISTANT ALLOY FOR THE BURNER DEVICE MANUFACTURING

Vitalii G. Smelov¹, Viktoriya V. Kokareva²✉, Pavel V. Chupin³, Dmitrii N. Dmitriev⁴

^{1,2} Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev (Samara University), Samara, Russia

^{3,4} UEC-Kuznetsov, Samara, Russia

¹ pdla_smelov@mail.ru

² charming_carrot@mail.ru ✉

³ pv.chupin@uec-kuznetsov.ru

⁴ dn.dmitriev@uec-kuznetsov.ru

Abstract. On the assumption of permanently growing product complexity, stipulated by the requirement toughening to the functional characteristics, additive technologies play the key role in industrialization of the new production methods of aviation engineering. However, the existing barriers caused by limitations of the additive production technologies and powders properties, capabilities of hardware and software are hindering active reengineering of the products to additive production technologies.

Technological process developing for parts manufacturing by the selective laser fusion (SLF) method is a multi-factorial and multivariate task. Decision-making on the SLF technology implementing for manufacturing hot part of the industrial gas turbine engine installations is based on the following criteria definition. They are productivity; level of detail, i.e. the possibility of minute fragments manufacturing; plotting accuracy; work-out labor intensity; geometric parameters stability and reproducibility; reliability and endurance of the additive production; main assemblages lifespan prior to replacement or refurbishment.

However, achieving the above said criteria is being ensured by technological processes optimizing based on parametric and structural methods.

The purpose of this work consists in developing algorithms for creating a “smart” structure (configuration) of the “Burner device” assembly unit when the SLF technology design for the VG159 heat-resistant alloy metal powder. This algorithm for the aircraft engineering products design will allow obtaining “on the first try” a workpiece according to the required quality parameters of the SLF technological process. The article presents the recommended sequence of work in the design of gas turbine engines assembly unit, being manufactured according to the SLF technological process.

The SLF process being developed for the of the “Burner device” assembly unit manufacturing is based on a complex “product-material-process-properties” digital twin, which allows ensuring a “free” geometry with the assembly unit accuracy provision, in contrast to the conventional methods of designing based on the mechanical properties optimization. The algorithm specificity consists in accounting for the values of residual stresses, the magnitude and direction of deformations in the designed workpiece obtained by the SLF technology by modeling the SLF process and predicting the level of residual stresses. The simulation result is corrected 3D model of the workpiece with the geometry, which, after manufacturing according to the SLF, heat treatment, separation from the structuring platform and removal of supports, will ensure minimum deviation of the shape, size and location of surfaces from the specified values, i.e. the “smart” design of the assembly unit.

Keywords: additive production, selective laser fusion, heat-resistant alloy, burner device structure, workpiece configuration, product designing, technological process designing

Funding: The work was supported by the Ministry of Education and Science of Russia as part of the comprehensive project on the subject of “Organization of high-tech production of industrial gas turbine engines with an

intelligent system of design and technological preparation to improve functional characteristics” implementation to create high-tech production (Grant Agreement No. 075-11-2021-042 dated 06/24/2021)

For citation: Smelov V.G., Kokareva V.V., Chupin P.V., Dmitriev D.N. Technological Process Design for Selective Laser Fusion of a Heat-Resistant Alloy for the Burner Device Manufacturing. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 1, pp. 131–141. DOI: 10.34759/vst-2023-1-131-141

Введение

Многие конструкторы вовлечены сегодня в процесс внедрения аддитивных технологий при производстве функциональных изделий аэрокосмической техники из отечественных металлических порошков. Однако существующие барьеры, обусловленные ограничениями технологий аддитивного производства и свойствами металлических порошков, возможностями оборудования и программного обеспечения, препятствуют активному реинжинирингу изделий под технологии аддитивного производства. Для преодоления этих барьеров необходимо оценивать технико-экономические возможности технологий при анализе изделий аэрокосмической техники.

Преимущества применения аддитивных технологий, в частности технологии селективного лазерного сплавления (далее — СЛС), при производстве изделий промышленных газотурбинных установок заключаются в снижении себестоимости производства сложных функциональных изделий, локальном производстве по месту требования, сокращении времени изготовления, уменьшении запасов сырья, оптимизации конструкций (облегчение массы, сокращение числа сборочных элементов).

В процессе металлографических исследований образцов, полученных путем СЛС, была выявлена столбчатая структура, которая определяется единичными треками — следами сплавления порошкового материала при помощи лазерного луча. Данные треки формируются согласно выбранной стратегии обработки [1]. Наличие ярко выраженной текстуры поверхности, зависящей в основном от направления сплавляемых треков и ориентации изделия в процессе изготовления, указывает на анизотропию механических свойств [2], что препятствует активному внедрению аддитивных технологий в производство авиационной техники. Дефекты микроструктуры можно классифицировать как поры и раковины. Пористость может объясняться слиянием расплавленных частиц порошкового материала с уменьшением объема и увеличением плотности, а также наличием термокапиллярных сил, образующихся в результате оплавления частиц порошкового материала [3].

Большой объем опубликованных результатов исследований в области изучения влияния параметров селективного лазерного синтеза на параметры качества авиационно-космической техники относится к анализу анизотропии плоских образцов, кратковременной прочности в зависимости от ориентации образцов на столе построения, однако практически отсутствуют данные по влиянию среды синтеза и ориентации образцов на длительную прочность; уделяется недостаточное внимание описанию механизмов воздействия на режимные параметры для обеспечения качества процесса СЛС.

ФГУП «ВИАМ», как основной российский производитель порошковых материалов для СЛС, проводит исследования влияния параметров селективного лазерного синтеза на механические свойства материалов отечественной разработки — жаропрочных и жаростойких сплавов на никелевой основе ЭП648 и ВЖ159. В работах ФГУП «ВИАМ» уделено внимание формированию тонкой трековой структуры, определению причин формирования трещин с ухудшением свариваемости применяемых материалов и оценке механических свойств в зависимости от структурного состояния синтезированного материала. Сплавление порошкового материала при СЛС происходит в виде дорожки (трека), имеющей значительную кривизну профиля поперечного сечения со стороны предыдущего сплавленного слоя, что связано с гауссовским распределением энергии Yb:YAG-лазера [4].

Проводится компьютерное моделирование физических процессов при сплавлении металлического порошка с целью исследования влияния основных технологических параметров (мощность лазерного излучения, скорость сканирования, толщина спекаемого слоя и т.д.) на пористость — для её минимизации. На практике в ходе реализации различных стратегий технологии СЛС были классифицированы дефекты металлических материалов [5].

Внедрение в производство аддитивных технологий приводит к трансформации парадигмы проектирования изделий, заключающейся в необходимости применения принципов оптимизации

конструкции, которые в сочетании с новыми технологическими возможностями дают максимальный синергетический эффект и увеличивают функциональность изделий [6].

На ПАО «НПО «Сатурн» были проведены работы по топологической оптимизации изделия в процессе проектирования деталей газотурбинного двигателя (ГТД) [7]. Здесь, в рамках деятельности специализированного конструкторского бюро, для моделирования поддерживающих структур, адаптации расположения детали на столе используются различные ПО (например, Magics) в сочетании с алгоритмами параметрической многокритериальной оптимизации (IOSO NM) и непосредственным анализом конструкции. Это позволило на 25–50% сократить относительный вес поддерживающих структур и время постобработки.

Исходя из постоянно возрастающей сложности изделия, обусловленной ужесточением требований к динамическим характеристикам, остаточным напряжениям, аэродинамическому поведению, аддитивные технологии играют ключевую роль в индустриализации новых способов производства отечественной авиационной техники. Так, исследовательский проект EFAM (Engineering For Additive Manufacturing) уже с 2016 года реализует парадигму новых способов конструирования изделий для аддитивного производства и ремонта.

Разработка технологического процесса изготовления деталей методом СЛС является многофакторной и многовариантной задачей. Принятие решений о внедрении технологии СЛС в производство изделий горячей части промышленных газотурбинных установок, на примере горелочного устройства, основывается на определении следующих критериев:

- производительность;
- качество поверхности;
- степень детализации (возможность изготовления мелких фрагментов);
- точность построения;
- трудоемкость постобработки;
- стабильность и воспроизводимость геометрических параметров;
- надежность и долговечность установки аддитивного производства, время жизни основных узлов до замены или ремонта.

Однако достижение указанных выше критериев обеспечивается путем оптимизации технологических процессов на основе параметрических и структурных методов. К первой группе относятся методы изменения исходных значений технологических параметров для определения оптимальной

совокупности механических свойств и характеристик микроструктуры при определенном конструктивном облике детали. Чтобы решить такую задачу, необходимо использование нелинейного либо линейного математического программирования.

Структурная оптимизация связана с подбором геометрической конфигурации (облика) выращиваемой методом СЛС заготовки и работает по принципу подбора и исключения вариантов облика конструкции за счет поиска наилучшего и результативного решения с точки зрения максимального приближения к функциональной конструкции в соответствии с заданными значениями по механическим и иным характеристикам при соблюдении характерных технологических ограничений.

Актуальность решения обозначенных выше проблем: достижение требуемого качества аддитивных технологий по комплексу взаимосвязанных параметров; достижение новой функциональности изделий за счет разработки и верификации новых технологий 3D-печати на базе отработки технологии селективного лазерного сплавления отечественных жаростойких и жаропрочных металлических порошков при изготовлении деталей сложных форм и конфигураций ГТД (например, горелочное устройство, секция соплового аппарата турбины).

Целью данной работы является разработка алгоритмов создания «умной» конструкции (конфигурации) ДСЕ (деталь-сборочная единица) «Горелочное устройство» при проектировании технологии СЛС металлического порошка жаропрочного сплава ВЖ159.

Предлагаемый к практической реализации алгоритм проектирования изделий авиационной техники позволит получать «с первого раза» заготовку по требуемым параметрам качества технологического процесса СЛС.

Особенностью алгоритма является учет значений остаточных напряжений, величины и направления деформаций в проектируемой заготовке, получаемой технологией СЛС за счет моделирования процесса СЛС и прогнозирования уровня остаточных напряжений.

Оборудование, материалы и методы

Ключевыми аспектами при проектировании технологии изготовления ДСЕ методом СЛС являются:

- установление перечня требований (геометрия, свойства материалов) и методологии их подтверждения в процессе аддитивного производства;
- подтверждение данных требований и принятие решения о применении технологического

процесса СЛС при изготовлении ДСЕ (далее — ТП СЛС);

– при серийном производстве ДСЕ добавляются требования по организации производства, подтверждению его стабильности, контролю качества.

Рекомендуемая последовательность работ при проектировании ДСЕ, изготавливаемых по ТП СЛС:

Этап 1. Определение требований к детали:

- конструкторская документация (КД, чертёж) с указанием требований к точности размеров;
- требования к свойствам материала, перечень подтверждаемых показателей (в первую очередь механические характеристики материала);
- требования к подтверждению качества детали, перечень и объём исследований, подтверждающих качество (шероховатость, геометрическую точность, отклонение формы).

Этап 2. Определение параметров технологии СЛС с учётом обеспечения необходимой точности геометрических размеров и свойств материала.

Этап 3. Изготовление заготовок и контрольных образцов (для подтверждения качества) по назначенным технологическим параметрам.

Этап 4. Подтверждение качества образцов-свидетелей.

Этап 5. Принятие решения о применении ТП СЛС при изготовлении ДСЕ.

При серийном производстве ДСЕ также добавляются требования по организации и стандартиза-

ции производства, подтверждению его стабильности, контролю качества. Разнообразие материалов, процессов, режимов, технических требований и сфер применения деталей предполагает значительное количество подходов и методов тестирования и испытаний напечатанных изделий. В каждом случае необходимо формировать индивидуальную программу испытания и квалификационно-достаточное количество тестов для получения требуемых подтверждений соответствия [8].

Одним из основных ограничений применения ТП СЛС является обеспечение повторяемости параметров качества при одинаковых технологических режимах. Обеспечение качества аддитивного производства осуществляется на этапе планирования печати и мониторинга процесса печати; взаимосвязи технологических режимов и параметров качества изготавливаемого изделия формируют систему управления с обратной связью [9–10].

Качество ДСЕ, изготавливаемого по ТП СЛС, определяет не только точность его геометрических параметров и формы, но и обеспечение функциональных свойств. Качество аддитивного технологического процесса можно выразить через точность геометрии, шероховатость поверхности, свойства материала (прочность, долговечность, твердость и т.п.). Каждый из этих параметров качества зависит от режимных параметров печати, в том числе от свойств исходного порошкового материала [11].

Во время печати детали параметры ее качества формируются под действием различных факторов



Рис. 1. Факторы, влияющие на образование дефектов при ТП СЛС

технологического процесса. В основном проблемы с необеспечением качества изделия возникают при отсутствии понимания влияния температуры, степени охлаждения, толщины слоя на геометрическую точность, отклонение формы, а также влияния расположения детали на платформе построения, режимных параметров (мощность и скорость) — на плотность изделия [12].

На рис. 1 приведены обобщенные факторы, влияющие на образование дефектов во время ТП СЛС, приводящие к искажению геометрии ДСЕ, в виде диаграммы Исикавы.

Актуальным остается вопрос прогнозирования параметров ТП СЛС на основе распределения температуры, остаточного напряжения и деформаций [13]. Полученные экспериментальным путем значения параметров качества при различных комбинациях входных параметров и граничных условий являются основой для базы знаний цифровой модели управления качеством ТП СЛС и создания «умной» конструкции (конфигурации) ДСЕ.

Разрабатываемый ТП СЛС для изготовления ДСЕ «Горелочное устройство» основывается на комплексном цифровом двойнике «изделие-материал-процесс-свойства», который и позволяет получить «свободную» геометрию с обеспечением всех заданных прочностных характеристик ДСЕ, что сделать традиционными методами либо невозможно, либо очень трудоемко и ресурсозатратно.

Цель реализации цифровой технологии моделирования процесса ТП СЛС в том, чтобы предложить комбинированный аналитически-численный подход для расчета геометрии и тепловых полей, термических напряжений и подводов, наблюдаемых в ТП СЛС, учитывая в качестве входных данных не только основные технологические параметры (мощность лазера W (Вт), скорость сканирования V (ms^{-1}), расстояние между параллельными проходами лазерного луча (шаг сканирования, мм) и диаметр пятна лазера), но и особенности конструкции (геометрия, форма) изделия, свойства исходного металлического порошка [14–17].

За счет цифрового моделирования ТП СЛС можно получить «свободную» геометрию и снижение веса при сохранении прочностных характеристик. При этом проектирование самого изделия осуществляется в парадигме «умная аддитивная конструкция» — конструкция ДСЕ, одновременно учитывающая свойства материалов, функционально-конструкторские и технологические (аддитивные) ограничения для формирования оптимальной формы, топологии, заданной геометрии и характеристик ДСЕ [18–19].

В результате цифрового моделирования ТП СЛС:

- оцениваются деформации заготовки ДСЕ, устраняется искажение формы в процессе ТП СЛС;
- анализируются и минимизируются остаточные напряжения в процессе ТП СЛС;
- определяются оптимальная стратегия и технологические режимы ТП СЛС;
- определяется оптимальная поддерживающая структура заготовок ДСЕ;
- выбирается способ удаления от платформы построения и поддерживающих структур;
- прогнозируются микроструктура и механические свойства;
- минимизируется расход материалов, времени и стоимости производства.

Предиктивная аналитика на базе формируемых цифровых теней ТП СЛС позволяет определить оптимальный набор технологических параметров, обеспечивающий заданные функциональные характеристики ДСЕ [20].

Алгоритм создания «умной» конструкции ДСЕ

Алгоритм создания «умной» конструкции (конфигурации) ДСЕ «Горелочное устройство», изготавливаемых по ТП СЛС металлического порошка жаропрочного сплава, представлен на рис. 2.

Концепция «умной» геометрии реализуется на этапе подготовки задания на печать (в виде файла stl) после определения остаточных напряжений на калибровочных образцах и коррекции геометрии заготовки ДСЕ. Остаточные напряжения определяются в цифровой модели ТП СЛС, которые хранятся в библиотеке, учитывают свойства материала и характерные особенности геометрии заготовок ДСЕ. При этом «оптимальная» геометрия заготовки ДСЕ помещается в библиотеку, чтобы при изготовлении серии и последующих ДСЕ использовать уже эту геометрию и файл печати, которые учитывают остаточные напряжения и позволяют с первого раза получить «точную» заготовку.

Моделирование позволяет спрогнозировать уровень остаточных напряжений, возникающих в процессе ТП СЛС, а также после термической обработки, отделения заготовки от платформы построения и удаления поддержек. В результате такого моделирования определяются уровень остаточных напряжений, величина и направление деформаций и другие параметры.

Результатом моделирования является скорректированная 3D-модель заготовки детали с такой геометрией, которая после изготовления по ТП СЛС, термической обработки, отделения

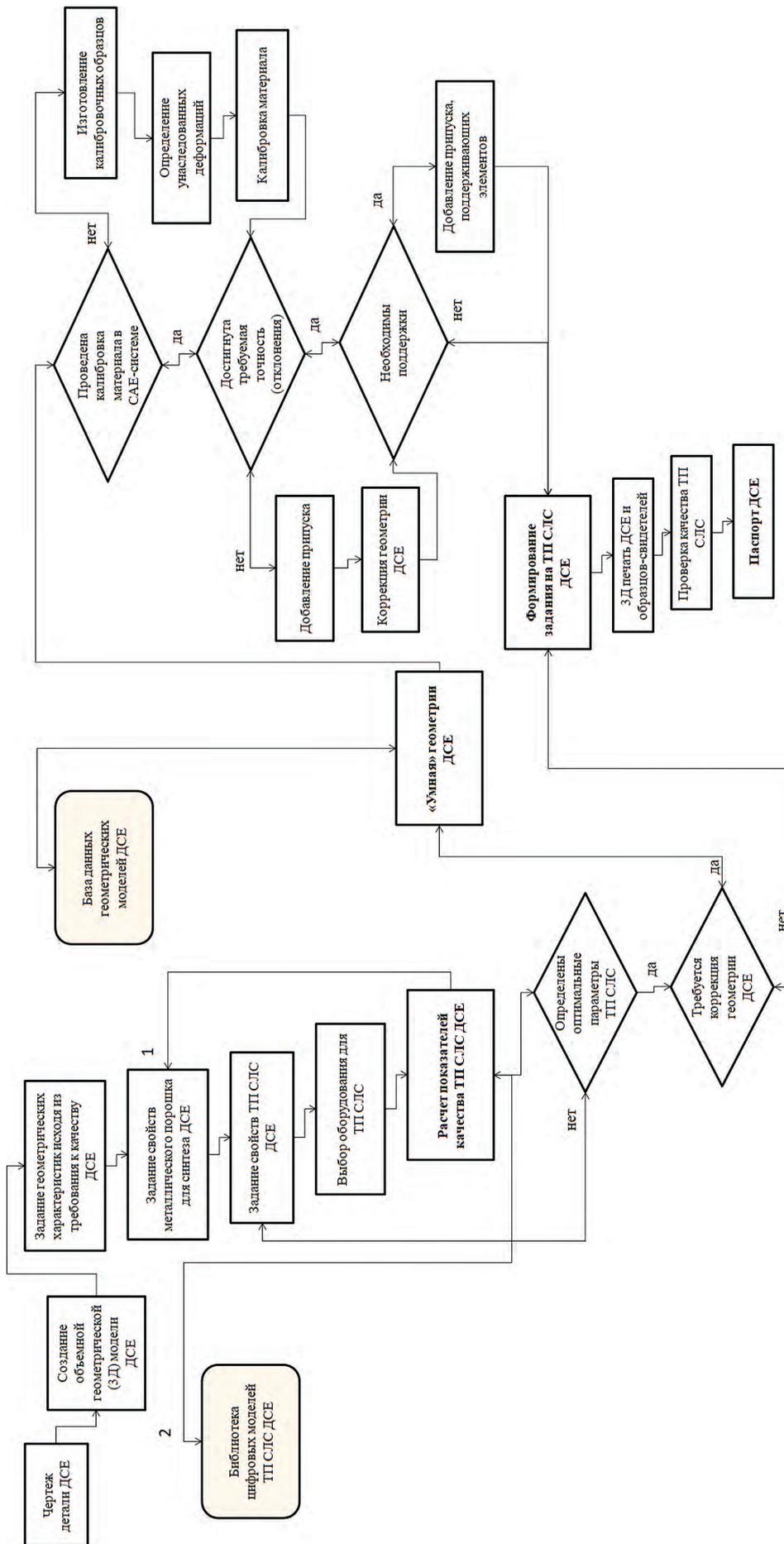


Рис. 2. Алгоритм создания «умной» конструкции (конфигурации) ДСЕ, изготавливаемых по ТП СЛС: 1 — не удалось достичь требуемых геометрических параметров из-за неверных технологических режимов ТП СЛС; 2 — наполнение базы данных ТП СЛС результатами печати

от платформы построения и удаления поддержек обеспечит минимальное отклонение формы, размеров и расположения поверхностей от заданных значений — т.е. «умная» конструкция ДСЕ.

Для реализации способа компенсации деформаций от воздействия остаточных напряжений первоначально определяются поля напряжений и деформаций путем изготовления и исследования калибровочных образцов в виде консольных балок. По результатам исследования калибровочных образцов определяются начальные деформации. Затем на основании расчета унаследованных деформаций, возникающих от действия термических напряжений, происходит коррекция трехмерной геометрической модели заготовки ДСЕ детали на величину этих деформаций, взятых с обратным знаком. И уже эта скорректированная трехмерная геометрическая модель используется при формировании рабочего файла ДСЕ.

Преобразование трехмерной геометрической модели заготовки ДСЕ «Горелочное устройство» в реальные технологические команды для установки селективного лазерного сплавления М350 состоит из нескольких этапов.

Если первоначальный формат 3D-модели заготовки отличается от формата .stl, то сначала поверхности 3D-модели аппроксимируются множеством треугольников. Этот процесс *триангуляции* происходит при переводе 3D-модели в стандартный формат stl. (Подробнее описание процесса см. в ГОСТ Р 57590-2017 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Ч. 3. Общие требования».) Затем 3D-модель заготовки детали загружается в специализированный программный продукт в формате .stl. После нескольких этапов триангуляций 3D-модель может содержать различ-

ного рода ошибки. Для их исправления требуется произвести «ремонт» .stl файла заготовки.

Затем исправленная 3D-модель располагается на виртуальной платформе построения, и происходит ориентация модели детали относительно виртуальной платформы построения.

Далее генерируются структуры поддержек и специальные элементы (теплоотводы), после чего оператор выбирает и назначает соответствующие технологические параметры. Затем происходит разбиение подготовленной 3D-модели на слои определенной толщины.

После указанных действий специализированный программный продукт генерирует траекторию движения лазерного луча для каждого отдельно созданного слоя. Данное ПО имеет встроенный постпроцессор, который обеспечивает, чтобы файл (.slm), содержащий информацию о траектории движения лазерного луча и о технологических параметрах обработки, содержал требуемые машинные спецификации команд.

Затем данные о траектории движения лазерного луча и о технологических параметрах (в формате .slm) передаются на установку селективного лазерного сплавления М350 для начала процесса изготовления.

Обсуждение результатов

Для выбора «умной» конфигурации ДСЕ «Горелочное устройство» — C и геометрических параметров ДСЕ — G при выборе материала M и соответствующих требований по параметрам качества Q необходимо:

– из базы данных параметров ТП СЛС, металлических порошков выбрать режимы ТП СЛС ВЖ159, обеспечивающие 3D-печать заготовки ДСЕ



Рис. 3. ДСЕ «Горелочное устройство», изготовленное по ТП СЛС ВЖ159

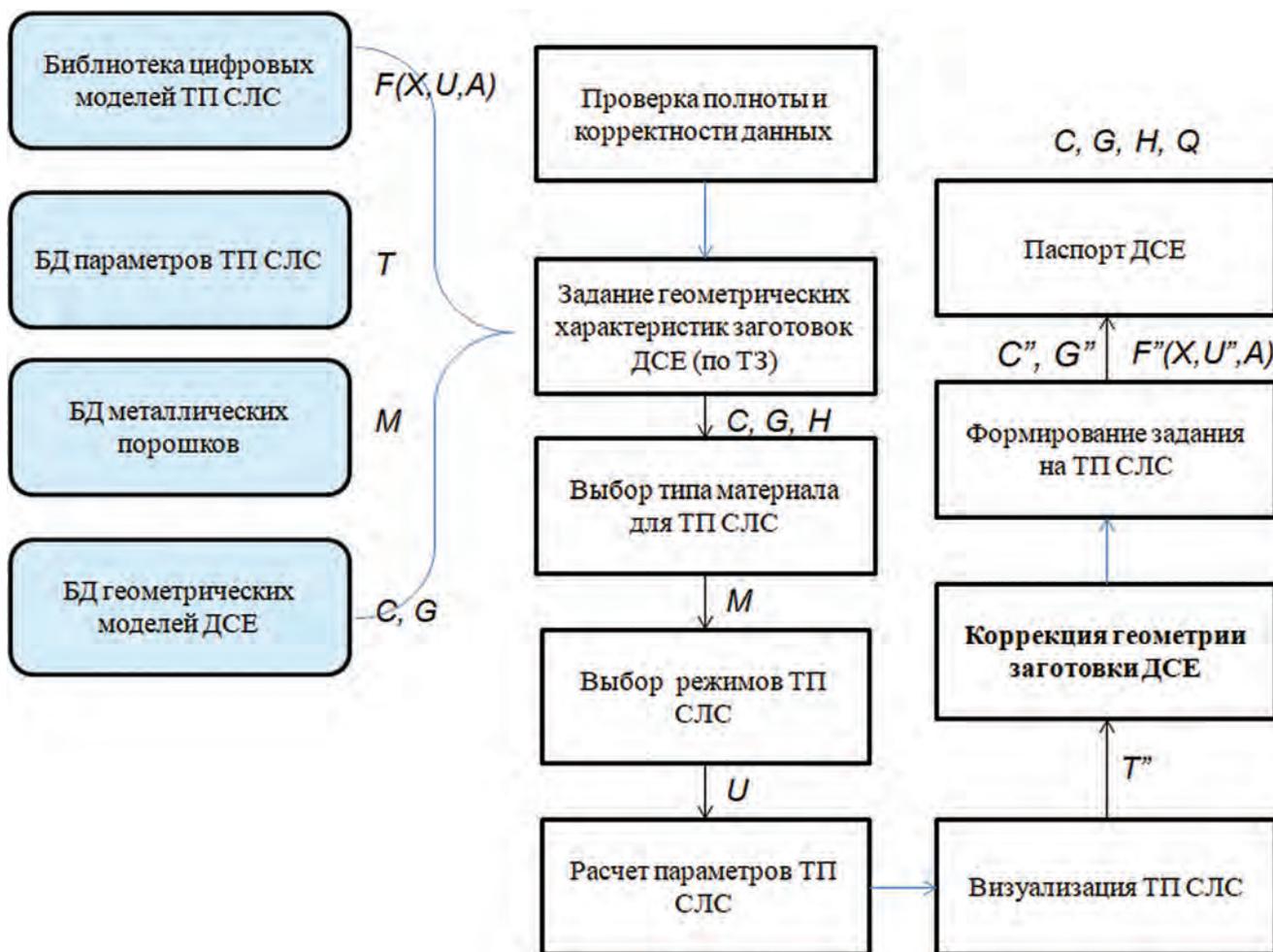


Рис. 4. Схема формирования конфигурации и геометрии ДСЕ при ТП СЛС

«Горелочное устройство» с характеристиками C и G из материала M ;

- используя цифровую модель ТП СЛС — $M = F(X, U, A)$ по технологии T , варьируя технологические режимы X, U, A , определить такой технологический режим ТП СЛС — U , который обеспечит выполнение Q и получение геометрических параметров G из материала M со свойствами H ;

- сформировать задание на 3D-печать — $Z = (C, G, T, U, Q)$;

- сформировать цифровой паспорт заготовки ДСЕ, включающий карты контроля геометрии и протоколы испытаний по проверке свойств H , рис. 4.

Для изготовления ДСЕ «Горелочное устройство» по ТП СЛС жаропрочного сплава ВЖ159 были определены следующие технологические режимы: плотность энергии $E = 63$ Дж/мм², мощность лазерного излучения $P = 187$ Вт, шаг сканирования $h = 0,11$ мм, обеспечивающие критерии прочности (предел прочности 1060 МПа) и однородности микроструктуры изделия.

Выводы

При проектировании технологического процесса селективного лазерного сплавления металлического порошка жаропрочного сплава ВЖ159 изготовления ДСЕ «Горелочное устройство» был применен алгоритм создания «умной» конструкции (конфигурации) ДСЕ.

ТП СЛС для изготовления ДСЕ «Горелочное устройство» основывается на комплексном цифровом двойнике «изделие-материал-процесс-свойства», который и позволяет создать «умную» геометрию, учитывающую свойства материалов, все функциональные, технологические и конструкторские ограничения, и получить оптимальную форму, топологию, геометрию и характеристики изделий.

Список источников

1. Волосова М.А., Ожунькова А.А. Пути оптимизации процесса селективного лазерного плавления при помощи выбора стратегии обработки лазерным лучом // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4(2). С. 587–591.

2. *Yadroitsev I., Shishkovsky I.V., Bertrand Ph., Smurov I.* Strategy Manufacturing of fine structured 3D porous filter elements by selective laser melting // *Applied Surface Science*. 2008. Vol. 255. No. 10, pp. 5523–5527. DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.07.154
3. *Pavlov M., Novichenko D., Doubenskaia M.* Optical Diagnostics of Deposition of Metal Matrix Composites by Laser Cladding // *Physics Procedia*. 2011. Vol. 12. No. 5, pp. 674–682. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.084
4. *Кисель В., Гулевич А.* Иттербиевые твердотельные лазерные системы // *Фотоника*. 2011. № 2(26). С. 20–24.
5. *Мурашов В.В., Григорьев М.В., Лантев А.С., Краснов И.С.* Классификация дефектов металлических материалов, синтезированных методом селективного лазерного сплавления и методы неразрушающего контроля деталей, полученных по аддитивным технологиям // *Аддитивные технологии: настоящее и будущее: Сборник трудов II Международной конференции (16 марта 2016; Москва)*. — М.: Изд-во ВИАМ, 2016. С. 37.
6. *Bonham E., McMaster K., Thomson E., et al.* Designing and Integrating a Digital Thread System for Customized Additive Manufacturing in Multi-Partner Kayak Production // *Systems*. 2020. Vol. 8. No. 4: 43. DOI: 10.3390/systems8040043
7. *Виноградов К.А., Пятунин К.Р., Федосеев Д.В. и др.* Применение инновационных методов проектирования и изготовления деталей ГТД // *Аддитивные технологии: настоящее и будущее: сборник трудов III Международной конференции (23 марта 2017; Москва)*. — М.: Изд-во ВИАМ, 2017. С. 3.
8. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2020. — 12 с.
9. *Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е. и др.* Ресурсосберегающие технологии выплавки перспективных литейных и деформируемых супержаропрочных сплавов с учетом переработки всех видов отходов // *Электрометаллургия*. 2016. № 9. С. 30–41.
10. *Федотов А.В.* Новые технологии порошковой металлургии // *Материалы в машиностроении*. 2012. № 1(76). С. 53–56.
11. *Каблов Е.Н.* Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1(34). С. 3–33.
12. *Паршуков Л.И., Ефремов Н.А.* Исследование структуры и свойств сварного шва жаропрочного сплава ВЖ159-ИД // *Труды ВИАМ*. 2019. № 3(75). С. 27–34. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-27-34
13. *Mahamood R.M., Akinlabi E.T.* Effect of laser power on surface finish during laser metal deposition process // *World Congress on Engineering and Computer Science (22–24 October 2014; San Francisco, USA)*.
14. *Shukla M., Mahamood R.M., Akinlabi E.T., Pityana S.L.* Effect of Laser Power and Powder Flow Rate on Properties of Laser Metal Deposited Ti6Al4V // *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*. 2012. Vol. 6. No. 11, pp. 2475–2479.
15. *Mahamood R.M., Akinlabi E.T., Shukla M., Pityana S.L.* Effect of Laser Power on Material Efficiency, Layer Height and Width of Laser Metal Deposited Ti6Al4V // *World Congress on Engineering and Computer Science (24–26 October 2012; San Francisco, USA)*. Vol II WCECS 2012. <http://hdl.handle.net/10204/6898>
16. *Dye D., Hunziker O., Reed R.C.* Numerical analysis of the weldability of superalloys // *Acta Materialia*. 2001. Vol. 49. No. 4, pp. 683–697. DOI: 10.1016/S1359-6454(00)00361-X
17. *Sames W.J.* Additive manufacturing of Inconel 718 using electron beam melting: Processing, post-processing, & mechanical properties. Doctor's thesis. — Texas A&M University, 2015. — 313 p.
18. *Алексеев В.В., Бобров А.Н., Калугин К.С.* Исследование комплексных прочностных характеристик моделей газовых турбин, изготовленных аддитивными методами // *Вестник Московского авиационного института*. 2019. Т. 26. № 2. С. 43–50.
19. *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
20. *Расулов З.Н., Калугина М.С., Ремиев Е.Ю., Афимьян 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

References

1. *Volosova M.A., Okun'kova A.A.* *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 4(2), pp. 587–591.
2. *Yadroitsev I., Shishkovsky I.V., Bertrand Ph., Smurov I.* Strategy Manufacturing of fine structured 3D porous filter elements by selective laser melting. *Applied Surface Science*, 2008, vol. 255, no. 10, pp. 5523–5527. DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.07.154
3. *Pavlov M., Novichenko D., Doubenskaia M.* Optical Diagnostics of Deposition of Metal Matrix Composites by Laser Cladding. *Physics Procedia*, 2011, vol. 12, no. 5, pp. 674–682. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.084
4. *Kisel' V., Gulevich A.* *Fotonika*, 2011, no. 2(26), pp. 20–24.
5. *Murashov V.V., Grigor'ev M.V., Laptev A.S., Krasnov I.S.* *Materialy II Mezhdunarodnoi konferentsii "Additivnye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee"* (16 March 2016; Moscow), Moscow, VIAM, 2016, p. 37.
6. *Bonham E., McMaster K., Thomson E., et al.* Designing and Integrating a Digital Thread System for Customized Additive Manufacturing in Multi-Partner Kayak Production. *Systems*, 2020, vol. 8, no. 4: 43. DOI: 10.3390/systems8040043
7. *Виноградов К.А., Пятунин К.Р., Федосеев Д.В. и др.* *Materialy III Mezhdunarodnoi konferentsii "Additivnye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee"* (23 March 2017; Moscow), Moscow, VIAM, 2017, p. 3.
8. *Additivnye tekhnologicheskie protsessy. Bazovye printsipy. Chast' 1. Terminy i opredeleniya. GOST R 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015* (Additive manufacturing processes. General principles. Part 1. Terminology. State Standard R 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015), Moscow, Standartinform, 2020, 12 p.

9. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E. et al. *Elektrometal-lurgiya*, 2016, no. 9, pp. 30–41.
10. Fedotov A.V. *Materialy v mashinostroenii*, 2012, no. 1(76), pp. 53–56.
11. Kablov E.N. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1(34), pp. 3–33.
12. Parshukov L.I., Efremov N.A. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3(75), pp. 27–34. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-27-34
13. Mahamood R.M., Akinlabi E.T. Effect of laser power on surface finish during laser metal deposition process. *World Congress on Engineering and Computer Science* (22–24 October 2014; San Francisco, USA).
14. Shukla M., Mahamood R.M., Akinlabi E.T., Pityana S.L. Effect of Laser Power and Powder Flow Rate on Properties of Laser Metal Deposited Ti6Al4V. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 2012, vol. 6, no. 11, pp. 2475–2479.
15. Mahamood R.M., Akinlabi E.T., Shukla M., Pityana S.L. Effect of Laser Power on Material Efficiency, Layer Height and Width of Laser Metal Deposited Ti6Al4V. *World Congress on Engineering and Computer Science* (24–26 October 2012; San Francisco, USA). Vol II WCECS 2012.
16. Dye D., Hunziker O., Reed R.C. Numerical analysis of the weldability of superalloys. *Acta Materialia*, 2001, vol. 49, no. 4, pp. 683–697. DOI: 10.1016/S1359-6454(00)00361-X
17. Sames W.J. Additive manufacturing of Inconel 718 using electron beam melting: *Processing, post-processing, & mechanical properties*. Doctor's thesis, Texas A&M University, 2015, 313 p.
18. Alekseev V.V., Bobrov A.N., Kalugin K.S. Study of complex strength characteristics of gas turbine odels fabricated by additive methods. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 43–50.
19. 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
20. 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

Статья поступила в редакцию 24.12.2022; одобрена после рецензирования 30.01.2023; принята к публикации 31.01.2023.

The article was submitted on 24.12.2022; approved after reviewing on 30.01.2023; accepted for publication on 31.01.2023.