

УДК 621.91

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК МОНОКОЛЕС ГТД ТЕХНОЛОГИЕЙ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

А. В. АГАПОВИЧЕВ¹, В. Г. СМЕЛОВ²

¹agapovichev5@mail.ru, ²pdla_smelov@mail.ru

ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева»
(Самарский университет)

Поступила в редакцию 07.02.2020

Аннотация. В статье представлены результаты разработки методики проектирования технологических процессов изготовления заготовок моноколес газотурбинных двигателей технологией селективного лазерного сплавления. Рассмотрены основные этапы проектирования технологических процессов изготовления заготовок деталей технологией селективного лазерного сплавления. Проведено технико-экономическое обоснование применения технологии селективного лазерного сплавления при изготовлении моноколес малоразмерных газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: аддитивные технологии; селективное лазерное сплавление; технологический процесс; крыльчатка компрессора; малоразмерный газотурбинный двигатель; технико-экономическое обоснование.

ВВЕДЕНИЕ

Каждое новое поколение авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) характеризуется комплексом вновь созданных, реализованных в производстве и внедренных в эксплуатацию технологий [1].

Для новых поколений ГТД характерной особенностью является замена традиционно используемых дисков с лопатками на моноколеса. Моноколеса и крыльчатки давно используются при производстве малых ГТД (для вертолетов, бизнес-авиации, приводов для газокompрессорных установок и т. п.). В последние годы их начали применять для двигателей военной и гражданской авиации [1]. Стремление к повышению удельных параметров и одновременно создание компактных конструкций ГТД привело к тому, что несколько осевых ступеней компрессора стали заменять одним широкохордным моноколесом, или крыльчаткой. Это позволяет увеличить угловую скорость вращения ро-

тора (до 50...80 тыс. об/мин) и напорность ступеней [2].

Для изготовления новой, высокотехнологичной продукции с использованием новых конструкторских решений и из материалов, обладающих новыми свойствами, необходимо использовать новые технологии производства, в частности аддитивные технологии.

Одним из важнейших и динамично развивающихся направлений аддитивного производства является технология селективного лазерного сплавления. Селективное лазерное сплавление (selective laser melting, SLM, СЛС) – технология аддитивного производства, использующая лазеры высокой мощности для создания трехмерных физических объектов за счет сплавления металлических порошков [3].

На качество деталей, изготавливаемых технологией СЛС, влияет большое количество технологических параметров. Путем правильного понимания и управления этими

параметрами возможно получать детали, по качеству не уступающие деталям, полученным традиционными технологиями.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК МОНОКОЛЕС ГТД ТЕХНОЛОГИЕЙ СЛС

С учетом обобщения опыта использования технологии СЛС при изготовлении заготовок деталей и литературного обзора ниже предложена структурная схема методики проектирования типового перспективного технологического процесса изготовления заготовок моноколес ГТД технологией СЛС, которая позволяет обеспечить достижение требуемых параметров качества (рис. 1).

В качестве исходной информации (поз. 1) для разработки типового перспективного технологического процесса должны быть использованы:

- в качестве базовой информации должна быть использована информация, содержащаяся в конструкторской документации

(чертеж детали), а также трехмерная геометрическая модель детали;

- в качестве руководящей информации должны быть использованы стандарты, регламентирующие использование метода СЛС при изготовлении заготовок деталей;

- в качестве справочной информации должны быть использованы технологические инструкции по назначению режимов технологического процесса СЛС; инструкция по эксплуатации аддитивной установки SLM280HL.

Оценка возможности использования метода СЛС для изготовления заготовок деталей осуществляется на этапе анализа технологичности детали (поз. 2). На этом этапе осуществляется ее предварительное расположение относительно виртуальной платформы построения и рабочих частей аддитивной установки (поз. 3). Данные, полученные на этапах 1–3, служат исходной информацией для выполнения технико-экономического обоснования (ТЭО) использования технологии СЛС (поз. 4).

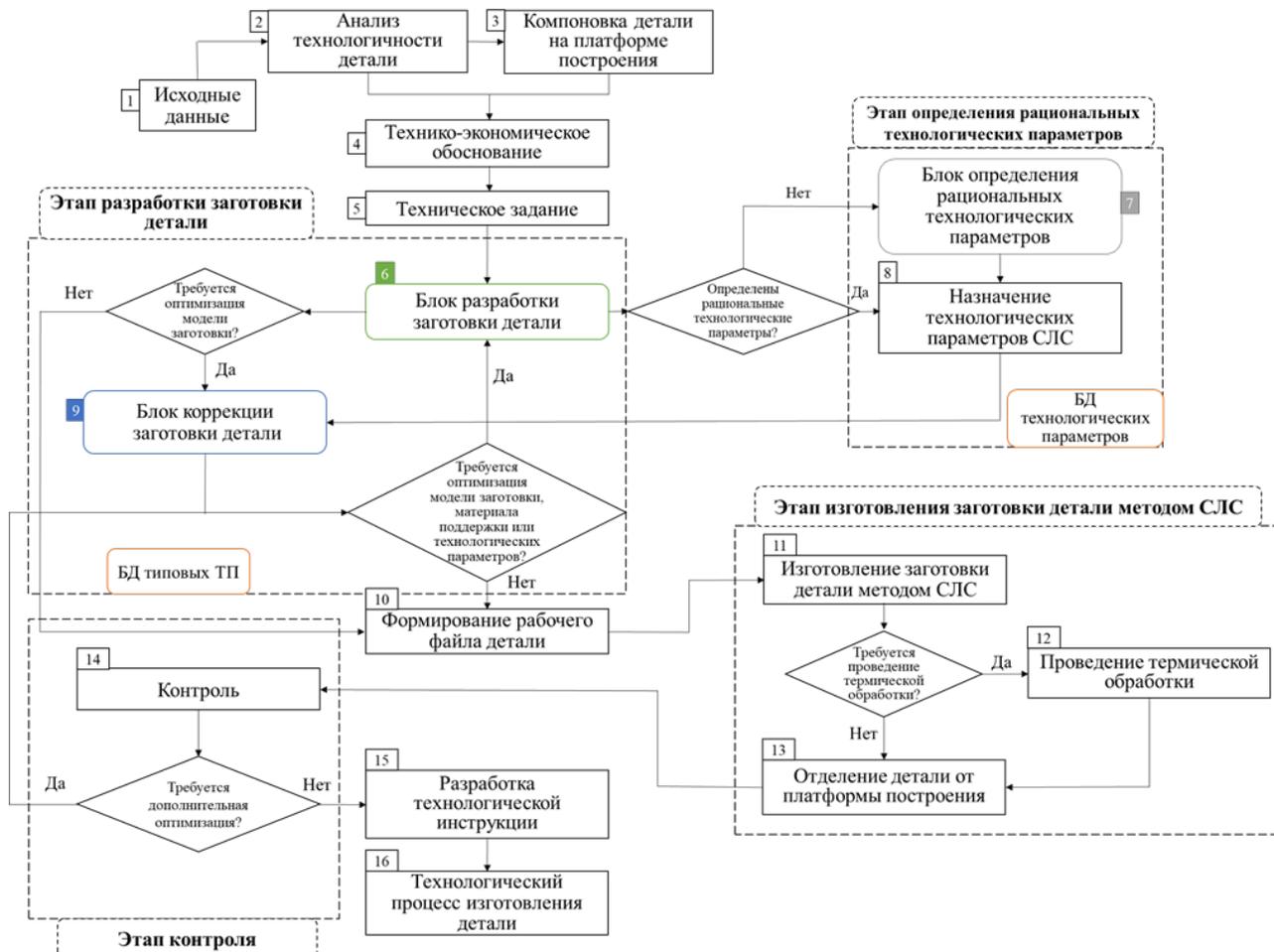


Рис. 1. Структурная схема методики проектирования ТП изготовления заготовок моноколес ГТД технологией СЛС

Стоимость изготовления заготовок деталей технологией СЛС складывается из непосредственно самой стоимости их изготовления, а также стоимости выполнения дополнительных операций, таких как подготовка аддитивной установки к работе, создание генерирующего файла, обслуживание аддитивной установки в процессе работы. Для определения стоимости изготовления заготовок деталей технологией СЛС необходимо иметь следующие исходные данные: количество металлического порошка для заполнения объема построения; количество порошка для построения основного материала детали; количество порошка для построения структур поддержек; время изготовления детали.

Результатом выполнения этапов с 1 по 4 является разработка технического задания (поз. 5) на изготовление заготовки детали методом СЛС. Техническое задание согласовывается с заказчиком.

В соответствии с разработанным и утвержденным техническим заданием приступают к разработке заготовки детали (поз. 6). На этом этапе осуществляется анализ поверхностей деталей, включающий анализ расположения поверхностей детали относительно платформы построения, требований к точности их изготовления и шероховатости.

Одним из важнейших этапов разработки технологического процесса изготовления заготовок технологией СЛС является определение и оптимизация технологических параметров (поз. 7). Информация о технологических параметрах должна содержаться в базе данных технологических параметров. Затем производят назначение технологических параметров СЛС (поз. 8).

Процесс изготовления заготовок деталей технологией СЛС включает в себя нагрев, плавление и затвердевание материала движущимся источником тепла. В результате этого различные участки заготовки испытывают различное количество циклов повторного нагревания и охлаждения, что приводит к возникновению остаточных напряжений и, как следствие, к деформации заготовок. Компенсировать воздействие остаточных напряжений возможно путем прове-

дения коррекции их трехмерных моделей и/или оптимизации структур поддержек и назначаемых технологических параметров (поз. 9). Если в результате действия остаточных напряжений размеры заготовки выходят за границы поля допуска, возможным решением может быть оптимизация теплоотвода в технологическую платформу через платформу построения. Для этого необходимо вернуться на этап разработки заготовки детали (поз. 6) и в соответствии с результатами моделирования процесса СЛС оптимизировать структуры поддержек и теплоотводов. Другим возможным решением может быть оптимизация и коррекция применяемых технологических параметров (поз. 7), в том числе оптимизация мощности лазерного излучения, скорости сканирования, а также направления и стратегии сканирования.

Еще одним способом компенсации деформаций от воздействия остаточных напряжений является предварительная коррекция геометрии заготовки детали. Так, разработанная трехмерная геометрическая модель заготовки может быть скорректирована в соответствии с результатами моделирования. Моделирование позволяет спрогнозировать уровень остаточных напряжений, возникающих в процессе 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 трехмерная модель заготовки детали с такой геометрией, которая после изготовления технологией СЛС, термической обработки, отделения от платформы построения и удаления поддержек обеспечит минимальное отклонение формы, размеров и расположения поверхностей от заданных значений. И уже эта скорректированная трехмерная геометрическая модель используется при формировании рабочего файла детали (поз. 10).

После формирования рабочего файла следует этап изготовления заготовки детали технологией СЛС (поз. 11). Данный этап

характеризуется подготовкой аддитивной установки к процессу СЛС, включающий позиционирование платформы построения, установку дозатора, заполнение рабочей камеры инертным газом, просев металлического порошка.

После завершения процесса СЛС производится удаление технологического объема металлического порошка, и заготовка детали совместно с платформой построения извлекается из рабочей камеры. В зависимости от применяемого технологического процесса и функционального назначения детали заготовка может подвергаться термической обработке (поз. 12). Термическая обработка проводится для снятия остаточных напряжений перед отделением заготовки от платформы построения, а также для получения требуемых механических свойств.

Затем происходит отделение заготовки от платформы построения (поз. 13). Отделение заготовки от платформы построения может осуществляться различными способами, в том числе с использованием ленточной пилы, слесарных инструментов и электроэрозионной обработкой.

Полученная деталь подвергается контролю (поз. 14) в соответствии с разработанным технологическим процессом. На этом этапе осуществляют контроль отклонений формы, размеров и расположения поверхностей от заданных значений. Также в зависимости от требований, заложенных в техническом задании, проводят контроль структуры материала на наличие дефектов.

Завершающими этапами разработанной методики является этап оформления технологической инструкции (поз. 15) и этап оформления технологического процесса изготовления детали (поз. 16).

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВКИ КРЫЛЬЧАТКИ КОМПРЕССОРА МАЛОРАЗМЕРНОГО ГТД

Апробация разработанной методики была осуществлена на заготовке крыльчатки компрессора малоразмерного ГТД.

Рассматриваемая крыльчатка конструктивно относится к типу полуоткрытых колес и представляет собой ступицу и диск, к ко-

торым примыкают лопатки (рис. 2). Центральное отверстие крыльчатки выполнено гладким. Лопатки крыльчатки выполнены криволинейными трапецеидального сечения с постепенным утолщением от периферии к ступице. Изготовление заготовки крыльчатки компрессора производилось на аддитивной установке SLM 280HL компании SLM Solutions. Установка оснащена лазером мощностью 400 Вт. Установка позволяет изготавливать детали размерами до $280 \times 280 \times 350$ мм. Диаметр крыльчатки составляет 82 мм, высота – 34,3 мм. При использовании стандартной платформы построения (280×280 мм) одновременно можно изготавливать до 9 заготовок крыльчатки компрессора.

Компоновка заготовки крыльчатки компрессора относительно платформы построения осуществлялась в соответствии с рис. 3, а.

Для формирования технического задания на проектирование технологического процесса изготовления заготовки крыльчатки компрессора малоразмерного ГТД было проведено ТЭО использования технологии СЛС.



Рис. 2. Трехмерная модель крыльчатки компрессора малоразмерного ГТД

Заготовки открытых и полуоткрытых крыльчаток для серийного производства обычно штампуют в закрытых штампах. Для единичного производства заготовки получают свободной ковкой [4]. Профиль лопаток крыльчатки компрессора в традиционном ТП формируется путем фрезерования на 5-осевых фрезерных центрах с ЧПУ [5]. Внедрение технологии СЛС для изготовления заготовки крыльчатки компрессора позволило исключить заготовительную и фрезерную операцию из технологического процесса, тем самым снизить себестоимость и трудоемкость изготовления крыльчатки компрессора. Нормирование операций механической обработки было проведено с использованием симуляции управляющей

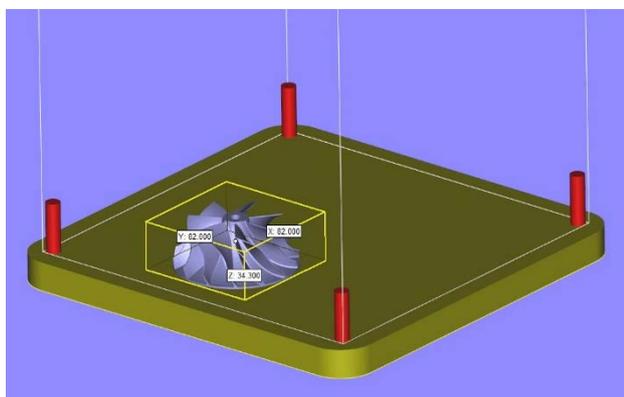
программы в программном продукте Siemens NX, а также с использованием справочных данных [6]. Расчет технологической себестоимости проводился исходя из данных затрат, полученных в условиях опытного производства в Самарском университете. В расчете не учитывалась стоимость проведения заготовительной операции в традиционном технологическом процессе.

При изготовлении крыльчатки компрессора в количестве 1 шт. наименьшая трудоемкость обработки профиля межлопаточных каналов наблюдается при использовании операции механической обработки на 5-осевом обрабатывающем центре с ЧПУ, экономия времени при этом составит 14,7 мин, а при одновременном изготовлении крыльчаток компрессора в количестве 9 шт. наименее трудоемким является использование технологии СЛС, так как экономия времени составит 1547,7 мин. Применение технологии СЛС для изготовления заготовки крыльчатки компрессора позволяет снизить себестоимость операции по формированию профиля лопаток с 21 894 руб. до 18 150 руб. (при изготовлении одной заготовки) и до 12 079 руб. – при одновременном изготовлении 9 заготовок.

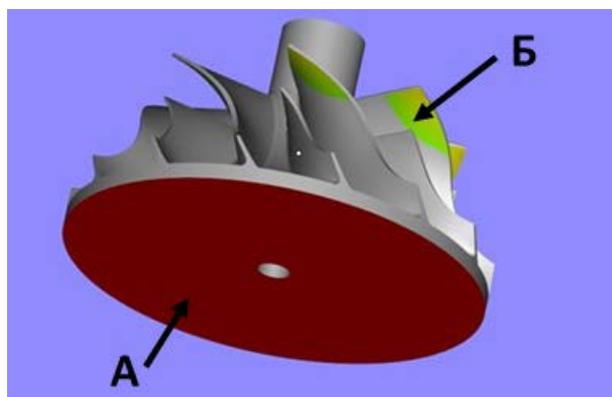
В соответствии с проведенным анализом технологичности детали и ее компоновкой на платформе построения была осуществлена разработка заготовки детали (рис. 3, б). На поверхности, точность размеров которых невозможно обеспечить технологией СЛС,

к которым подводится материал поддержки или они располагаются непосредственно на платформе построения, добавляется припуск на последующую механическую обработку (в нашем случае 0,5 мм). Данная величина припуска получена экспериментальным путем и апробирована в разрабатываемом ТП. Также в геометрию заготовки была добавлена технологическая бобышка, предназначенная для крепления заготовки крыльчатки компрессора в процессе механической обработки.

Выбор вида, размера и расположения структур поддержек является важной подготовительной частью при изготовлении заготовок технологией СЛС, который напрямую влияет на качество получаемых деталей. На рис. 3, б показаны поверхности, угол наклона которых относительно платформы построения равен менее 43° . Угол наклона поверхности А относительно платформы построения 0° . Эта поверхность будет базироваться и изготавливаться непосредственно на платформе построения, поэтому подвод поддержек к ней не требуется. Часть поверхностей Б, образующих профиль лопаток, также рекомендуется изготавливать с подводом поддержек. Эти поверхности могут быть изготовлены без материала поддержки, однако они подвержены большим деформациям. Для предотвращения деформаций этих поверхностей была проведена коррекция заготовки крыльчатки компрессора.



а



б

Рис. 3. Разработка технологического процесса изготовления заготовки крыльчатки компрессора малоразмерного ГТД: а – компоновка крыльчатки компрессора на виртуальной платформе построения; б – анализ поверхностей заготовки крыльчатки компрессора

Для компенсации деформаций от воздействия остаточных напряжений была проведена предварительная коррекция геометрии заготовки детали. Уровень остаточных напряжений определялся путем численного моделирования в коммерческом программном продукте Simufact Additive компании MSC.

Для приближения результатов моделирования к реальным условиям была проведена предварительная калибровка. Исходными данными численной модели являются коэффициенты унаследованных деформаций (ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z). Эти значения единичны и определяются в локальных координатах в трех направлениях X, Y и Z. Для калибровки значений унаследованных деформаций были изготовлены три образца консольного типа, которые располагались под углом 0° , 45° и 90° относительно дозатора (рис. 4).



Рис. 4. Изготовленные калибровочные образцы

После изготовления образцы были отрезаны от платформы построения с применением электроэрозионной обработки. Затем было проведено измерение максимального отгиба по оси Z каждого образца. Полученные данные были использованы для калибровки. После проведения калибровочного расчета были получены значения коэффициентов унаследованных деформаций: $\epsilon_x = -0,005$; $\epsilon_y = -0,003$; $\epsilon_z = -0,03$.

Далее было проведено моделирование процесса СЛС заготовки крыльчатки компрессора малоразмерного ГТД. Помимо моделирования процесса СЛС были учтены операции термической обработки и отделения заготовки от платформы построения. Результаты моделирования процесса СЛС, термической обработки и отрезки от платформы построения заготовки крыльчатки компрессора представлены на рис. 5.

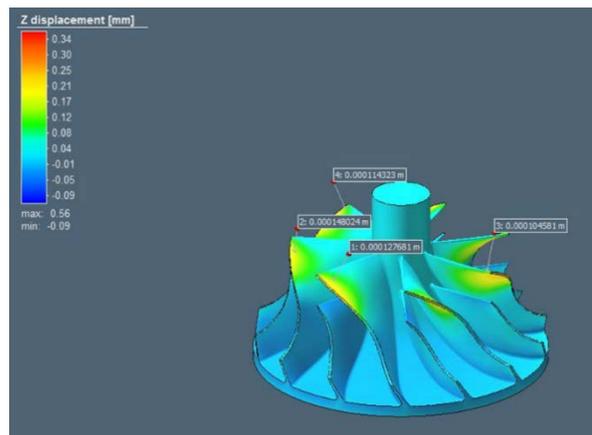


Рис. 5. Деформации заготовки крыльчатки компрессора по оси

Наибольшие деформации заготовки детали наблюдаются по оси Z, что объясняется направлением печати. Основные коробления возникают на краях лопаток, которые выполнены консольно относительно ступицы. Из-за такого расположения на краях лопаток возникает большой градиент температур и, как следствие, более медленное рассеивание тепла, что приводит к большим деформациям. Максимальные деформации поверхностей заготовки в процессе СЛС составляют 0,34 мм, что превышает значения отклонений, указанных в технических требованиях чертежа.

Для минимизации действия остаточных напряжений был использован метод предварительной коррекции геометрии заготовки детали. Для этого был проведен экспорт модели заготовки крыльчатки компрессора, полученный в результате моделирования процесса СЛС, с масштабным множителем -1 . Результаты моделирования процесса СЛС, термической обработки и отрезки от платформы построения скорректированной модели заготовки представлены на рис. 6. Значения суммарных деформаций масштабированной заготовки относительно исходной геометрии не превышают 0,04 мм, что полностью соответствует техническим требованиям чертежа. Полученная геометрия заготовки использовалась при формировании рабочего файла детали.

Изготовленные заготовки крыльчатки компрессора представлены на рис. 7. Была проведена термическая обработка изготовленных заготовок. Термическая обработка заключалась в нагреве заготовок до темпе-

ратуры 650 °С в течение 6 ч, выдержке при температуре 650 °С в течение 3 ч и остывании совместно с печью. Отделение заготовок от платформы построения осуществлялось с использованием электроэрозионной обработки.

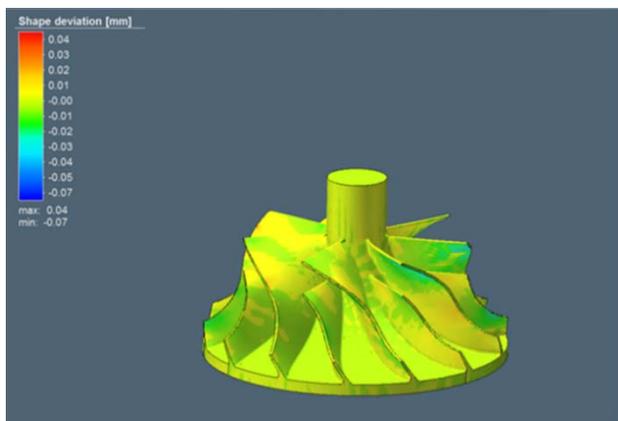


Рис. 6. Суммарные деформации масштабированной заготовки крыльчатки компрессора

После выполнения указанных операций было проведено сравнение геометрии изготовленных заготовок крыльчатки компрессора с исходной 3D-моделью. Результаты сравнения представлены в табл. 1. Контроль геометрии заготовок осуществлялся с использованием оптического сканера Range-Vision PRO2M.



Рис. 7. Заготовки крыльчатки компрессора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены результаты разработки методики проектирования технологических процессов СЛС заготовок моноколес ГТД, которая состоит из четырех основных этапов: разработки заготовки детали, определения рациональных техноло-

гических параметров, изготовления методом СЛС заготовки детали и контроля. Апробация разработанной методики была проведена на примере крыльчатки компрессора малоразмерного ГТД.

Таблица 1

Результаты контроля заготовок крыльчатки компрессора малоразмерного ГТД, изготовленных методом СЛС

Параметр	Крыльчатка без коррекции геометрии	Крыльчатка с коррекцией геометрии (масштабный множитель -1)
Минимальное отклонение, мм	-0,757	-0,128
Максимальное отклонение, мм	+0,769	+0,128
Среднее отклонение, мм	-0,182	-0,035

Для минимизации влияния остаточных напряжений на точность заготовок был апробирован способ предварительной коррекции. Определены коэффициенты унаследованных деформаций при СЛС порошка титанового сплава ВТ6. Проанализированы значения деформаций заготовки крыльчатки компрессора малоразмерного ГТД в процессе СЛС. На основе полученных данных проведена оптимизация 3D-модели заготовки крыльчатки компрессора путем экспорта 3D-модели с масштабным множителем -1. Итоговые деформации оптимизированной модели заготовки крыльчатки компрессора не превышают 0,04 мм. Точность изготовления заготовки крыльчатки компрессора малоразмерного ГТД составила $\pm 0,128$ мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Развитие авиационных ГТД и создание уникальных технологий / В. И. Бабкин и др. // Двигатель. 2013. № 2 (86). С. 2–7. [V. I. Babkin, et. al., "The development of aviation gas turbine engines and the creation of unique technologies", (in Russian), in *Dvigatel'*, no. 2 (86), pp. 2-7, 2013.]
2. Гейкин В. А., Шаронова Н. И. Технология производства двигателей нового поколения // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. Т. 3, № 2 (45). С. 11–13. [V. A. Geykin, N. I. Sharonova, "Production technology of new generation engines", (in Russian), in *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovy'x texnologij*, vol. 3, no. 2 (45), pp. 11-13, 2010.]
3. Комбинированные лазерные аддитивные технологии производства лопаток турбин сложной геометрической формы / Б. Граф и др. // Известия высших учебных заведе-

ний. 2016. № 3 (20). С. 34–42. [V. Graf, et. al., “Combined Laser Additive Manufacturing for Complex Turbine Blades”, in *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy*, no. 3 (20), pp. 34–42, 2016.]

4. Сулима А. М., Носков А. А., Серебренников Г. З. Основы технологии производства газотурбинных двигателей: Учебник для студентов авиац. спец. вузов. М.: Машиностроение, 1996. 480 с. [A. M. Sulima, A. A. Noskov, G. Z. Serebrennikov, *Undamentals of gas turbine engine production technology: A textbook for students of aviation special schools*, (in Russian). Moscow: Mashinostroyeniye, 1996.]

5. Крымов В. В., Елисеев Ю. С., Зудин К. И. Производство лопаток газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 2002. 376 с. [V. V. Krymov, Yu. S. Eliseev, K. I. Zudin, *Production of gas turbine engine blades*, (in Russian). Moscow: Mashinostroyeniye, 2002.]

6. Гришин Р. Г., Лысенко Н. В., Носов Н. В. Нормирование станочных работ. Определение вспомогательного времени при механической обработке заготовок [Электронный ресурс]. Систем. требования: PDF. URL: <http://tm.samgtu.ru/sites/tm.samgtu.ru/files/normirovanie.pdf> (дата обращения 15.01.2020). [R. G. Grishin, N. V. Lysenko, N. V. Nosov (2020, Jan. 15). *Rationing of machine tools. Determination of auxiliary time during machining of workpieces* [Online], (in Russian). Available: <http://tm.samgtu.ru/sites/tm.samgtu.ru/files/normirovanie.pdf>]

ОБ АВТОРАХ

АГАПОВИЧЕВ Антон Васильевич, ст. преподаватель каф. ТПД Самарского университета. Готовит дис. о методике проектирования технологических процессов изготовления заготовок моноколес ГТД из титановых сплавов технологией селективного лазерного сплавления.

СМЕЛОВ Виталий Геннадиевич, доцент. каф. ТПД Самарского университета. Канд. техн. наук по двигателям летательных аппаратов (Самарский университет, 2007). Иссл. в области технологий аддитивного производства.

METADATA

Title: Methods of design process for producing blanks impellers GTE technology of selective laser melting.

Authors: A. V. Agapovichev¹, V. G. Smelov²

Affiliation:

Samara National Research University, Russia.

Email: ¹agapovichev5@mail.ru, ²pdla_smelov@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 24, no. 1 (87), pp. 85–92, 2020. ISSN 2225–2789 (Online), ISSN 1992–6502 (Print).

Abstract: The article presents the results of developing a methodology for designing technological processes for the manufacture of blanks for impellers of gas turbine engines using selective laser melting technology. The main stages of designing technological processes for the manufacture of workpieces of parts by selective laser melting technology are considered. A feasibility study was carried out on the application of selective laser melting technology in the manufacture of impellers of small-sized gas turbine engines.

Key words: additive technology; selective laser melting; technological process; compressor impeller; small gas turbine engine; feasibility study.

About authors:

АГАПОВИЧЕВ, Anton Vasilievich, assistant professor of the Department of Engine Production Technology, Samara University.

СМЕЛОВ, Vitaliy Genadievich, Ph.D. on aircraft engines (Samara University, 2007).