

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ В КОНСТРУКЦИИ МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

© 2019

- Ю. С. Елисеев** доктор технических наук, профессор, исполнительный директор;
ОАО «Металлист-Самара»;
metallist@metallist-s.ru
- Д. Г. Федорченко** кандидат технических наук, доцент, главный конструктор;
ОАО «Металлист-Самара»;
dgfedorchenko@yandex.ru
- С. П. Голанов** главный металлург;
ОАО «Металлист-Самара»;
sergey@golanov.ru
- Ю. И. Цыбизов** доктор технических наук, профессор, ведущий конструктор;
ОАО «Металлист-Самара»;
2422490@mail.ru
- Д. Д. Тюлькин** инженер-конструктор;
ОАО «Металлист-Самара»;
tyulkin.dmitriy@gmail.com
- И. Е. Воротынцев** инженер-конструктор;
ОАО «Металлист-Самара»;
vorotintsev15@yandex.ru
- А. В. Ивченко** кандидат технических наук, доцент;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
fgrt@yandex.ru

Рассмотрены вопросы внедрения аддитивной технологии селективного лазерного сплавления в производство основных элементов конструкции камеры сгорания для наземных газоперекачивающих, энергетических и транспортных газотурбинных установок. Разработана принципиально новая конструкция малоэмиссионной двухконтурной горелки, адаптированная для изготовления с помощью технологии производства изделий со сложной геометрией посредством селективного лазерного сплавления металлических порошков по математическим САД-моделям. Преодолены технические трудности, сопутствующие реализации аддитивной технологии изготовления. В условиях серийного производства отработана технологическая цепочка от проектирования до изготовления и контроля качества готовых элементов конструкции. Выявлены и устранены недостатки изготовленных деталей по аддитивной технологии. Успешное освоение горелок малоэмиссионной камеры сгорания по новой технологии позволило существенно сократить трудоёмкость и сроки при обеспечении высокого качества.

Газотурбинная установка; малоэмиссионная камера сгорания; малоэмиссионная двухконтурная горелка; аддитивная технология; селективное лазерное сплавление (SLM); малоэмиссионная система горения.

Цитирование: Елисеев Ю.С., Федорченко Д.Г., Голанов С.П., Цыбизов Ю.И., Тюлькин Д.Д., Воротынцев И.Е., Ивченко А.В. Применение аддитивной технологии селективного лазерного сплавления в конструкции малоэмиссионной камеры сгорания газотурбинной установки // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 1. С. 174-183. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-174-183

В настоящее время устанавливаются всё более «жесткие» требования по эмиссии вредных веществ продуктов сгорания эксплуатируемых и вновь разрабатываемых газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ). На основании поручения Президента РФ по итогам заседания Президиума Госсовета от 27.05.2010 в ПАО «ГАЗПРОМ» утверждена научно-техническая политика, согласно которой должны быть обеспечены перспективные экологические характеристики на 2020 год: NO_x не более $25 \dots 30 \text{ мг/м}^3$ и CO не более 100 мг/м^3 . Поэтому создание малоэмиссионной системы горения является одной из актуальных задач в газотурбостроении.

На предприятии АО «Металлист-Самара» в порядке реализации программы импортозамещения и импортонезависимости с целью обеспечения экологической безопасности внедряется апробированная в эксплуатации малоэмиссионная система горения. Основным определяющим элементом является универсальная двухконтурная горелка [1], обеспечивающая устойчивое горение предварительно подготовленной «бедной» хорошо перемешанной смеси. Данная горелка представлена на рис. 1.

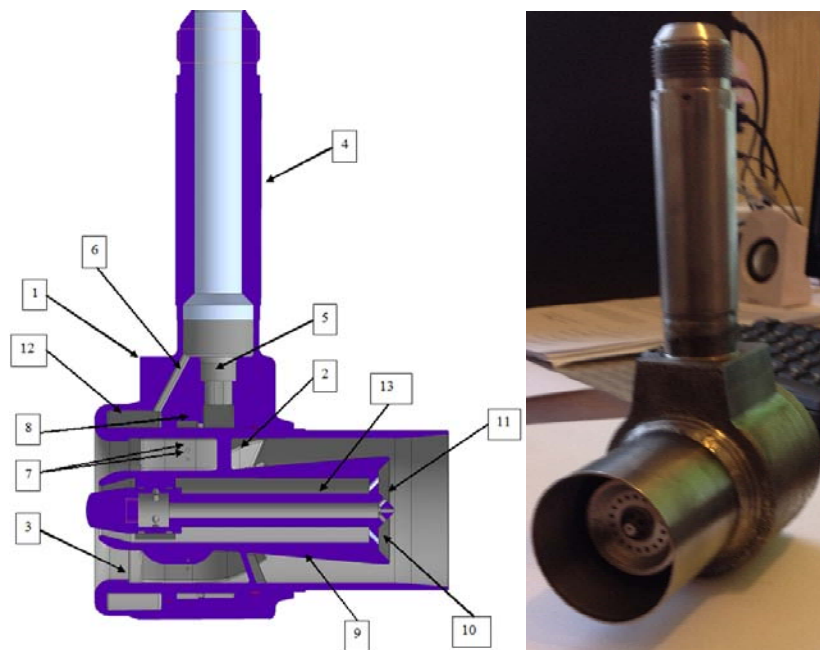


Рис. 1. Компоновка и общий вид двухконтурной горелки малоэмиссионной камеры сгорания

Малоэмиссионная горелка содержит корпус с соплом 1; завихритель с полыми лопатками 2; попутный уступ-турбулизатор 3, расположенный на наружном диаметре воздушного канала на входе перед лопатками завихрителя; шток 4 с каналами 5 и 6 подвода топлива в основную и дежурную зоны соответственно с отверстиями 7 подачи топлива из кольцевого коллектора 8 в основную зону горения; плохообтекаемое центральное тело 9, являющееся продолжением завихрителя, с отверстиями 10 подачи воздуха в дежурную зону горения и отверстиями 11 подачи топлива в дежурную зону из кольцевого коллектора 12 через центральный канал 13. Сложность конструкции горелки обусловлена конфигурацией топливных каналов и выходных отверстий подачи топлива дежурной и основной зоны горения.

На основании имеющегося опыта Самарского университета [2], опыта изготовления рабочих лопаток турбины SGT-400 и ремонта горелок камеры сгорания ГТУ SGT-700 и SGT-800 методом селективного лазерного сплавления фирмой Siemens [3] на предприятии АО «Металлист-Самара» разработана новая конструкция малоэмиссионной двухконтурной горелки, адаптированная под особенности изготовления деталей

и сборочных единиц посредством селективного лазерного сплавления (SLM) металлических порошков по математическим CAD-моделям. При этом 3D-печать предполагает создание трёхмерного объекта путём добавления ультратонких слоёв материала, следующих один за другим. Данная технология является методом аддитивного производства и использует мощные лазеры для создания трёхмерных физических объектов. Данный процесс успешно заменяет традиционные методы производства, так как физико-механические свойства изделий, построенных по технологии SLM, согласно опубликованным данным фирмы Siemens по результатам испытаний турбины с лопатками, изготовленными с применением аддитивных технологий, зачастую превосходят свойства изделий, изготовленных по традиционным технологиям.

На рис. 2 представлено сравнение конструкции малоэмиссионной двухконтурной горелки, изготавливаемой традиционным способом или по высокотехнологичной аддитивной технологии.

Традиционно основные детали двухконтурной горелки изготавливают с помощью литья (рис. 2, а). Здесь 1 – завихритель; 2 – корпус горелки с каналами подвода топлива в дежурную и основную зону горения и кольцевой полостью успокоителя; 3 и 4 – центральное тело с каналом подачи дежурного (пилотного) топлива и воздуха в камеру смешения горелки; 5 – входная часть центрального тела; 6 – шток с каналом подвода дежурного и основного топлива.

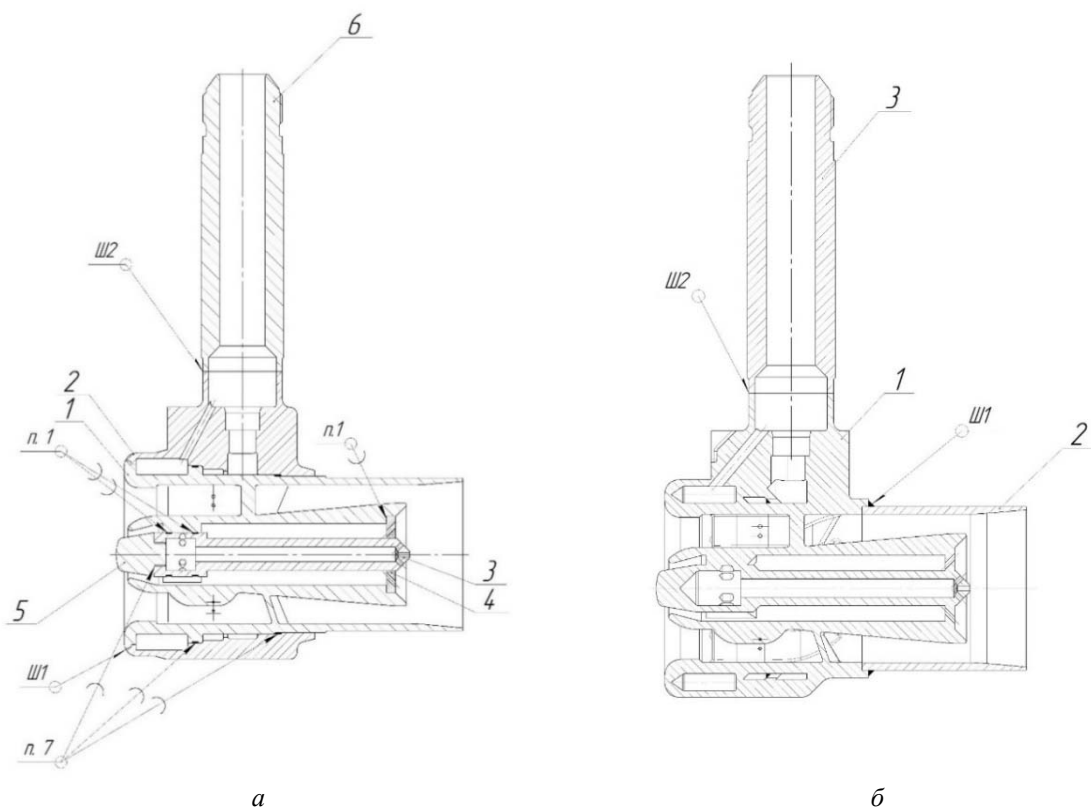


Рис. 2. Сравнение методов производства двухконтурных малоэмиссионных горелок: а – традиционный метод изготовления; б – изготовление по аддитивной технологии SLM

Процесс литья дорогостоящий и трудоёмкий, требующий предельной точности и соблюдения технологических требований. Сборка предполагает наличие двух сварных и шести паяных соединений (рис. 2, а). Себестоимость изделий, полученных таким образом, достаточно высока и не исключает наличия брака. Аддитивное производство полностью изменило ситуацию.

На рис. 2, б показан изменённый состав деталей, определяющих конструкцию двухконтурной горелки, изготовленной по аддитивной технологии. Здесь 1 – корпус горелки с завихрителем и центральным телом, изготавливаемый как единая деталь; элемент камеры смешения 2 и шток 3 изготавливаются механическим способом.

Данное изменение элементов конструкции позволило сократить номенклатуру деталей и стоимость одной горелки более чем в два раза, а также существенно сократить время производства и свести к минимуму брак.

На примере изготовления малоэмиссионной горелки по SLM процессу показана возможность резкого снижения времени отработки конструкции и её геометрических параметров с целью получения необходимых расходных характеристик изделия без дополнительной подготовки производства путём изменения математической CAD-модели и получения необходимых параметров на следующей партии изготавливаемых деталей.

На АО «Металлист-Самара» разработана технологическая цепочка (рис. 3), начиная от проектирования отдельных компонентов и заканчивая методами контроля готовых изделий.

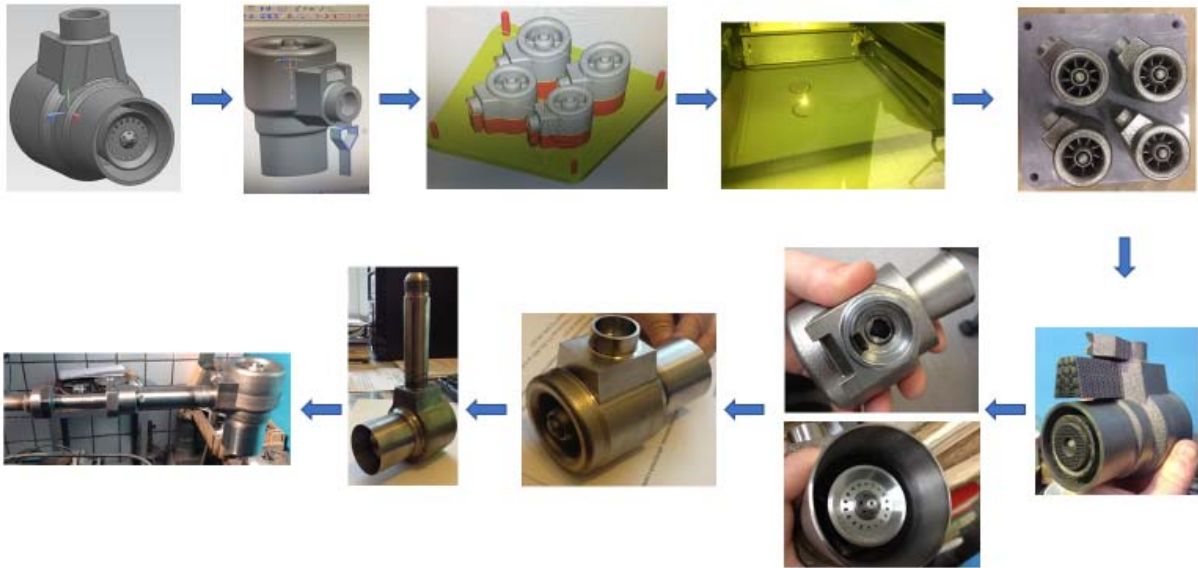


Рис. 3. Технологическая цепочка изготовления, испытания и контроля изделия

К основным особенностям принятой на предприятии АО «Металлист-Самара» технологии относятся:

- выпуск специальной конструкторской документации (3D-модели, учитывающие специфику наличия материала «поддержки», условия спекания и т.д.);
- подбор материала и зернистости металлического порошка;
- введение специальных операций по доводке требуемых параметров топливных и воздушных каналов с применением электроэрозионного оборудования;
- введение видов специального контроля (в том числе шероховатости) и гидравлические испытания.

Согласно действующей технологической цепочке перед проведением контроля заготовок горелки удаляется технологический материал «поддержки». Контроль поверхности заготовок на наличие трещин и расслоений производится люминесцентным методом. Контроль внутренних дефектов заготовок производится рентгенографическим методом или методом рентгеновской вычислительной томографии.

Изготовлена партия горелок (рис. 4) и выполнены контрольные исследования, характеризующие качество изготовления по принятой технологии.

Выявлены и изучены типичные микродефекты, свойственные SLM процессу, такие как микропористость, микронесплавления, микротрещины.

Преодолены технические трудности, сопутствующие реализации аддитивной технологии изготовления двухконтурных горелок малоэмиссионной камеры сгорания.

Обнаружены недостатки при изготовлении первых партий горелок, к основным из которых следует отнести:

- повышенную шероховатость, в частности, топливных каналов основной и дежурной зоны;
- нестабильность расходных характеристик;
- локальные зоны неспекания выращиваемых слоёв на корпусе горелки;
- сложность извлечения порошка из замкнутых труднодоступных полостей по ходу наращивания.

В большей части выявленные недостатки являются устранимыми в процессе дальнейшей отработки режимов и параметров технологического процесса.

В связи с этим проведены исследования геометрических параметров поверхностного слоя образцов-свидетелей из нескольких материалов, полученных методом селективного лазерного спекания.

В табл. 1 и на рис. 5, 6, 7 приведено сравнение геометрических параметров поверхностного слоя образцов-свидетелей кольцевого типа из порошка хромоникелевого сплава ПР-ВВ751П ТУ 1-809-56-2015 и порошка из нержавеющей стали ПР-07Х18Н12М2-0/40 ТТ 08-271-2015.



Рис. 4. Партия двухконтурных малоэмиссионных горелок, изготовленных по технологии селективного лазерного сплавления

Таблица 1. Геометрические параметры поверхностного слоя образцов-свидетелей кольцевого типа

Материал порошка	Участок поверхности	Параметры шероховатости в соответствии с ГОСТ 2789-73				Класс шероховатости
		Rz , мкм	Ra , мкм	S_m , мкм	t_m , %	
Хромоникелевый сплав	Внешняя сторона кольца	37,5±9,3	9,59±1,15	282,59±15,79	45,4±0,99	4-5
	Внутренняя сторона кольца	46,9±7,1	10,12±0,63	294,88±17,16	45,7±1,42	4-5
Нержавеющая сталь	Внешняя сторона кольца	31,3±4,3	8,77±0,49	167,05±5,87	46,6±0,87	4-5
	Внутренняя сторона кольца	35,2±6,5	9,12±0,69	170,73±8,21	46±0,93	4-5



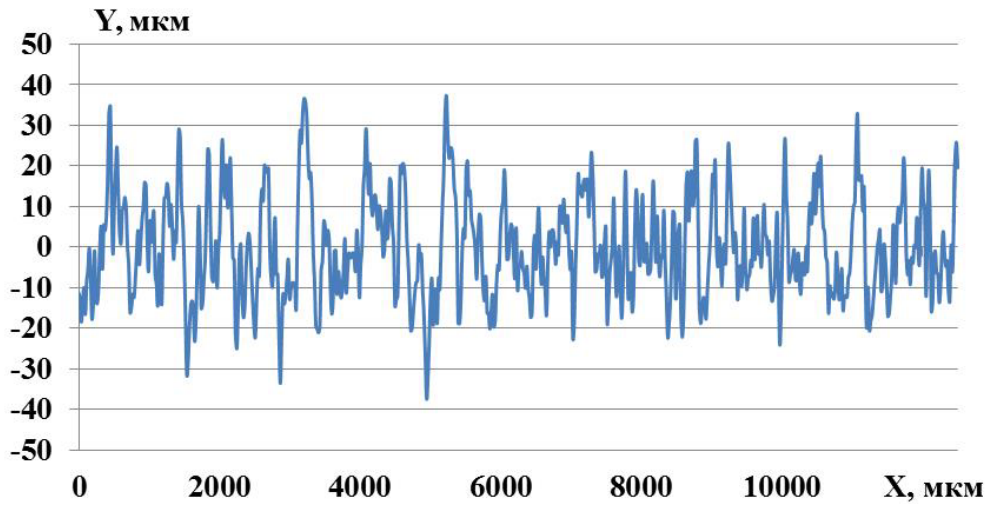
а



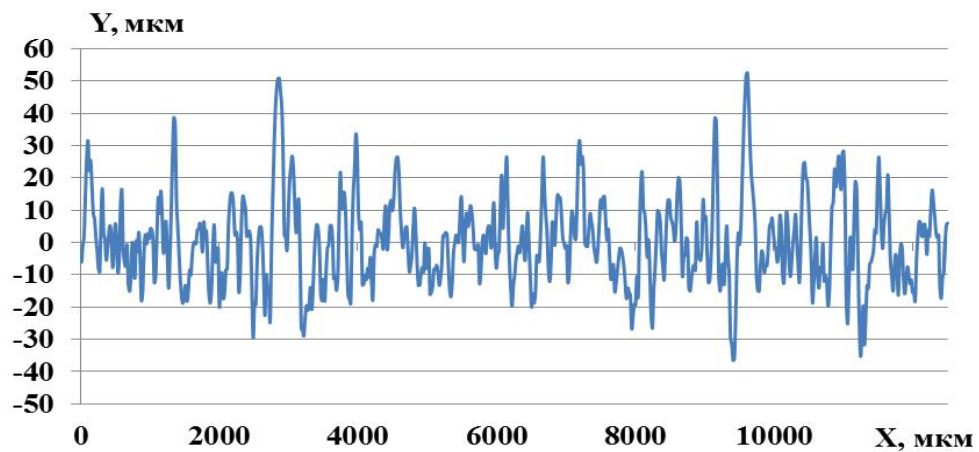
б

Рис. 5. Внешний вид изделия:

а – порошок из нержавеющей стали; б – порошок из хромоникелевого сплава



а



б

Рис. 6. Типичные профилограммы образца-свидетеля кольцевого типа, выполненного лазерным спеканием из нержавеющей стали:

а – внешняя образующая кольца; б – внутренняя образующая кольца

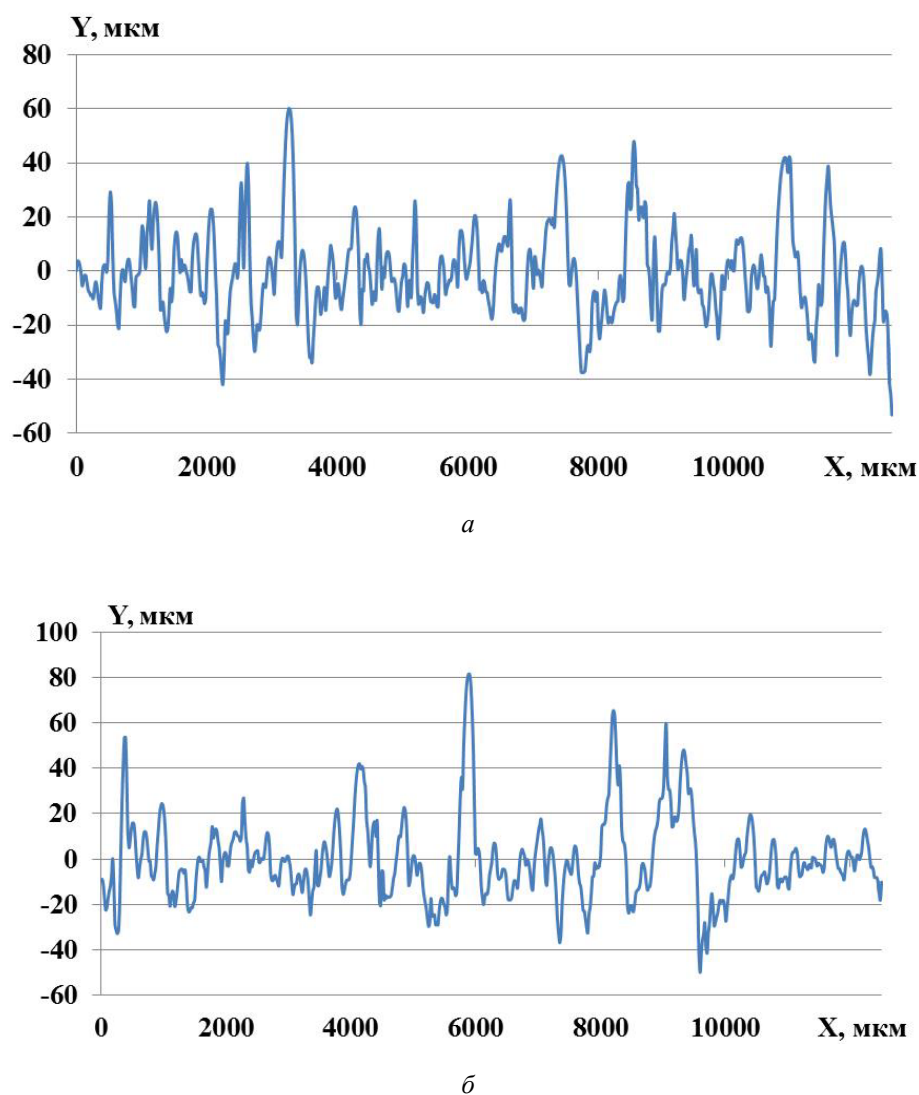


Рис. 7. Типичные профилограммы образца-свидетеля кольцевого типа, выполненного лазерным спеканием из хромоникелевого сплава: а – внешняя образующая кольца; б – внутренняя образующая кольца

По результатам исследования сделан вывод о том, что химический состав материала порошка практически не влияет на шероховатость изделия. Доработка выходных кромок отверстий топливных каналов и наружных поверхностей воздушных каналов проводилась механической обработкой. Стабильность расходных характеристик топливных каналов, недоступных для механической обработки, была достигнута выбором материала порошка (из жаропрочного хромоникелевого порошка ПР-ВВ751П ТУ 1-809-56-2015), отработкой режимов спекания и электрохимической полировкой с изготовлением специального электрода. Следует иметь в виду, что обдувка электрорундом и горячее изостатическое прессование способны снизить и/или полностью устранить указанные выше недостатки в виде повышенной шероховатости и микродефектов материала изделий, изготовленных по SLM процессу [3].

На первых партиях изготовления малоэмиссионных горелок локальные зоны несплавления (рис. 8) были устранены лазерной заваркой с последующим обязательным циклом контроля. Отметим, что поиск дальнейших технологических процессов, снижающих шероховатость наружных и внутренних поверхностей деталей, изготовленных по SLM процессу, является не менее значимой задачей.



Рис. 8. Несплавления на наружной поверхности корпуса горелки

Таким образом, на АО «Металлист-Самара» успешно освоено изготовление основного элемента камеры сгорания – малоэмиссионной горелки – с применением аддитивной технологии по SLM процессу, что позволило существенно уменьшить стоимость, повысить качество и снизить время производства всей малоэмиссионной камеры сгорания.

Авторы статьи благодарят сотрудника кафедры технологий производства двигателей Самарского университета А.Н. Жидяева за помощь при проведении экспериментальных работ.

Библиографический список

1. Бантиков Д.Ю., Васильев В.И., Лавров В.Н., Цыбизов Ю.И., Кустов Д.И., Шариков Б.Ю. Малоэмиссионная горелка: патент РФ № 2442932; опубл. 20.02.2012; бюл. № 5.
2. Смелов В.Г., Сотов А.В., Агаповичев А.В., Носова Е.А. Изготовление деталей камеры сгорания малоразмерного газотурбинного двигателя из интерметаллидного сплава ВКНА с использованием селективного лазерного сплавления // Материалы докладов международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Ч. 2. Самара: Самарский университет, 2016. С. 113-114.
3. Андрессон О., Бродин Х., Грайчен А., Навроцкий В. Аддитивное наращивание при ремонте горелок камер сгорания ГТУ // Турбины и Дизели. 2017. № 3. С. 4-11.

APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGY OF SELECTIVE LASER MELTING (SLM) IN DESIGNING A LOW EMISSION COMBUSTION CHAMBER OF A GAS TURBINE PLANT

© 2019

- Yu. S. Yeliseev** Doctor of Science (Engineering), Professor, Executive Director;
Joint-Stock company «Metallist-Samara», Samara, Russian Federation;
metallist@metallist-s.ru
- D. G. Fedorchenko** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Chief Designer;
Joint-Stock company «Metallist-Samara», Samara, Russian Federation;
dgfedorchenko@yandex.ru
- S. P. Golanov** Chief Metallurgist;
Joint-Stock company «Metallist-Samara», Samara, Russian Federation;
sergey@golanov.ru
- Yu. I. Tsibisov** Doctor of Science (Engineering), Professor, Design Project Leader;
Joint-Stock company «Metallist-Samara», Samara, Russian Federation;
2422490@mail.ru
- D. D. Tyulkin** Design Engineer;
Joint-Stock company «Metallist-Samara», Samara, Russian Federation;
tyulkin.dmitriy@gmail.com
- I. E. Vorotyntsev** Design Engineer;
Joint-Stock company «Metallist-Samara», Samara, Russian Federation;
vorotintsev15@yandex.ru
- A. V. Ivchenko** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
fgrt@yandex.ru

The paper deals with the questions of introducing the additive technology of selective laser melting (SLM) into the production of the main structural elements of a combustion chamber for ground-based gas pumping, power and transport gas turbines. A fundamentally new design of a low-emission two-circuit burner was developed, adapted for the manufacture of products with a complex geometry through the use of selective laser melting (SLM) of metal powders according to mathematical CAD-models with the help of an advanced production technology. Technical difficulties associated with the implementation of additive manufacturing technology were overcome. The process chain was tried out from design to manufacturing and quality control of finished structural elements under conditions of mass production. The deficiencies of the parts manufactured by the additive technology were revealed and ultimately eliminated. Successful development of burners for a low-emission combustion chamber using a new technology significantly reduces labor intensity and time of production while maintaining high quality.

Gas turbine power plant; low-emission combustion chamber, low-emission two-circuit burner, additive technology, selective laser melting (SLM), low-emission combustion system.

Citation: Yeliseev Yu.S., Fedorchenko D.G., Golanov S.P., Tsibisov Yu.I., Tyulkin D.D., Vorotyntsev I.E., Ivchenko A.V. Application of additive technology of selective laser melting (SLM) in designing a low emission combustion chamber of a gas turbine plant. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. V. 18, no. 1. P. 174-183. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-174-183

References

1. Bantikov D.Yu., Vasil'ev V.I., Lavrov V.N., Tsybizov Yu.I., Kustov D.I., Sharikov B.Yu. *Maloemissionnaya gorelka* [Low emission burner]. Patent RF, no. 2442932, 2012. (Publ. 20.02.2012, bull. no. 5)
2. Smelov V.G., Sotov A.V., Agapovichev A.V., Nosova E.A. Manufacturing of small-sized gas turbine engine combustion chamber parts from intermetallic alloy VKNA using se-

lective laser melting. *Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya»*. Part 2. Samara: Samara University Publ., 2016. P. 113-114. (In Russ.)

3. Andresson O., Brodin H., Graichen A., Navrotskiy V. Additive build-up in repair of combustion chamber burners. *Turbines and Diesels*. 2017. No. 3. P. 4-11. (In Russ.)