

## НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

© 2020

- Д. Г. Федорченко** кандидат технических наук, доцент, главный конструктор;  
АО «Металлист-Самара», г. Самара; [dgfedorchenko@yandex.ru](mailto:dgfedorchenko@yandex.ru)
- Ю. И. Цыбизов** доктор технических наук, профессор, ведущий конструктор;  
АО «Металлист-Самара», г. Самара; [2422490@mail.ru](mailto:2422490@mail.ru)
- Д. Д. Тюлькин** инженер-конструктор;  
АО «Металлист-Самара», г. Самара; [tyulkin.dmitriy@gmail.com](mailto:tyulkin.dmitriy@gmail.com)
- И. Е. Воротынцев** инженер-конструктор;  
АО «Металлист-Самара», г. Самара; [vorotintsev15@yandex.ru](mailto:vorotintsev15@yandex.ru)
- Д. А. Жерелов** ведущий инженер-конструктор;  
АО «Металлист-Самара», г. Самара; [denis\\_samara\\_163@mail.ru](mailto:denis_samara_163@mail.ru)
- А. С. Дулов** инженер-конструктор;  
АО «Металлист-Самара», г. Самара; [dulov.alexander@mail.ru](mailto:dulov.alexander@mail.ru)
- В. Г. Смелов** кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей;  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [pdla\\_smelov@mail.ru](mailto:pdla_smelov@mail.ru)
- А. В. Сотов** кандидат технических наук, ассистент кафедры технологий производства двигателей;  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [sotovanton@yandex.ru](mailto:sotovanton@yandex.ru)
- А. В. Агаповичев** старший преподаватель кафедры технологий производства двигателей;  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [agapovichev5@mail.ru](mailto:agapovichev5@mail.ru)

Разработана принципиально новая конструкция унифицированной двухконтурной горелки малоэмиссионной камеры сгорания наземной газотурбинной установки, адаптированная для изготовления с помощью передовой технологии производства посредством селективного лазерного сплавления металлических порошков по САD-моделям. Изготовлены несколько партий горелок и выполнены контрольные исследования, характеризующие качество изготовления по принятой технологии. Обнаружены основные недостатки: повышенная шероховатость, в частности топливных каналов основной и дежурной зоны; микропористость, микронесплавления, микротрещины; нестабильность расходных характеристик; локальные зоны неспекания выращиваемых слоёв на корпусе горелки. В результате анализа состояния изготовленных горелок, исследований и доработок установлено, что большинство выявленных недостатков являются устранимыми в процессе дальнейшей отработки режимов и параметров технологического процесса. В настоящее время преодолены технические трудности, сопутствующие реализации аддитивных технологий изготовления.

*Малоэмиссионная камера сгорания; унифицированная двухконтурная горелка; аддитивные технологии; селективное лазерное сплавление.*

**Цитирование:** Федорченко Д.Г., Цыбизов Ю.И., Тюлькин Д.Д., Воротынцев И.Е., Жерелов Д.А., Дулов А.С., Смелов В.Г., Сотов А.В., Агаповичев А.В. Новые технологии изготовления малоэмиссионной камеры сгорания газотурбинной установки // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2020. Т. 19, № 1. С. 118-126. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-1-118-126

На сегодняшний день к авиационным газотурбинным двигателям и газотурбинным установкам наземного применения предъявляются высокие требования по эмиссии вредных веществ продуктов сгорания. В связи с этим создание и внедрение малоэмис-

сионной системы горения становится одной из актуальных задач для производителей. Для обеспечения экологической безопасности на предприятии АО «Металлист-Самара» внедрена апробированная в эксплуатации малоэмиссионная система горения. Основным элементом малоэмиссионной системы горения является камера сгорания, оснащённая универсальными двухконтурными горелками [1;2], обеспечивающая устойчивое горение предварительно подготовленной «бедной» хорошо перемешанной смеси. Традиционно унифицированная двухконтурная горелка производится с помощью литья и состоит из шести отдельных деталей, а именно: завихрителя 1, корпуса горелки 2, центрального тела 3, шайбы 4, заглушки 5 и штока 6 (рис. 1, а). Горелки, изготовленные методом литья, являются дорогостоящими и имеют высокий процент брака из-за сложной конструкции завихрителей и системы каналов для подачи топлива. В конструкции горелки присутствуют два сварных и шесть паяных швов, что усложняет процесс производства и увеличивает себестоимость двухконтурной горелки.

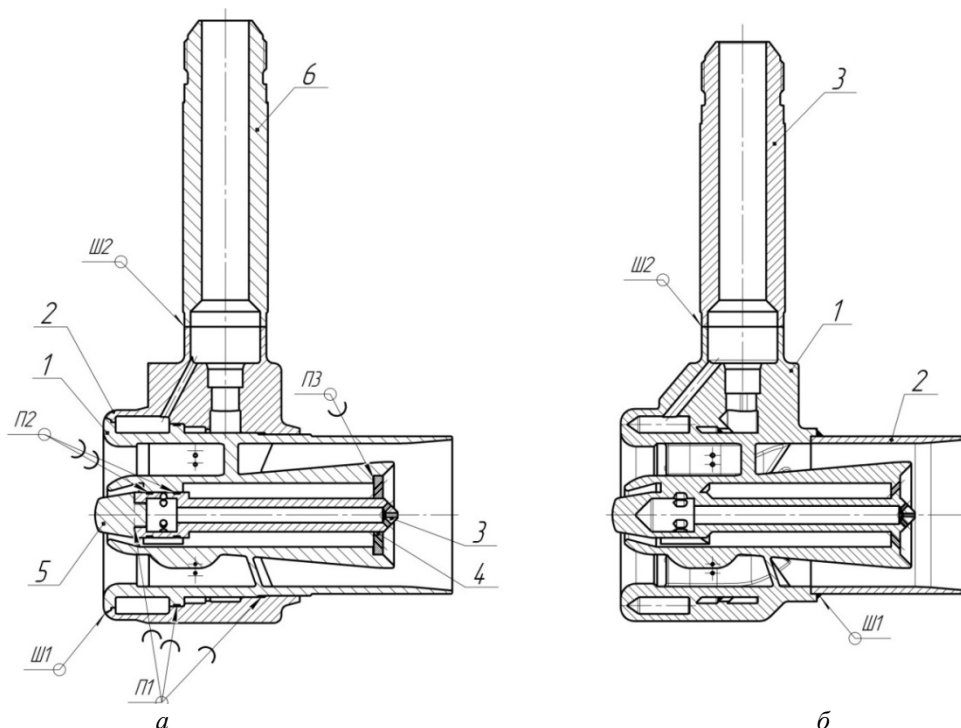


Рис. 1. Исходная (а) и модернизированная под метод СЛС (б) конструкции малоэмиссионной двухконтурной горелки

Для устранения этих недостатков разработана принципиально новая конструкция двухконтурной горелки, адаптированная под аддитивное производство по методу селективного лазерного сплавления (СЛС) металлических порошков. При проектировании новой конструкции учтён обширный опыт в аддитивных технологиях Самарского университета, а также фирмы Siemens, которая применила метод СЛС при ремонте горелок камеры сгорания SGT-700 и SGT-800 [3;4]. Горелка, адаптированная под метод СЛС, по сравнению с традиционной конструкцией имеет следующие преимущества: уменьшенная номенклатура деталей (горелка состоит из трёх деталей (рис.1, б): корпус горелки 1, стакан 2, шток 3), сокращённый срок изготовления, широкий спектр возможностей доработки горелок, что позволило свести количество бракованных изделий к минимуму.

В качестве материала для горелок выбран металлический порошок жаропрочного сплава ВВ751П (ХН56КВМТЮБ). Для данного порошка в Самарском университете

было проведено исследование влияния стратегии движения лазерного луча (штриховки) на прочность синтезируемого материала.

Исследование влияния штриховки (перемещение луча лазера при спекании порошка) было проведено для четырёх путей обхода сканируемого слоя лазерным излучением:

- вдоль оси  $X$ , угол сканирования  $0^\circ$ ;
- угловая, угол сканирования  $45^\circ$ ;
- вдоль оси  $Y$ , угол сканирования  $90^\circ$ ;
- с вращением, угол сканирования  $0^\circ - 45^\circ - 90^\circ$ .

Определение прочностных свойств материала, изготавливаемого при разных перемещениях луча лазера, было осуществлено на пластинчатых образцах с размерами  $70 \times 10 \times 2$  мм.

Влияние направления выращивания детали на механические свойства синтезируемого материала ВВ751П было исследовано также для аналогичных пластинчатых образцов, изготовленных при разных углах наклона в соответствии с рис. 2.

В качестве основных параметров лазерного излучения при изготовлении образцов были использованы мощность лазера 140 Вт и скорость сканирования 328 мм/с.

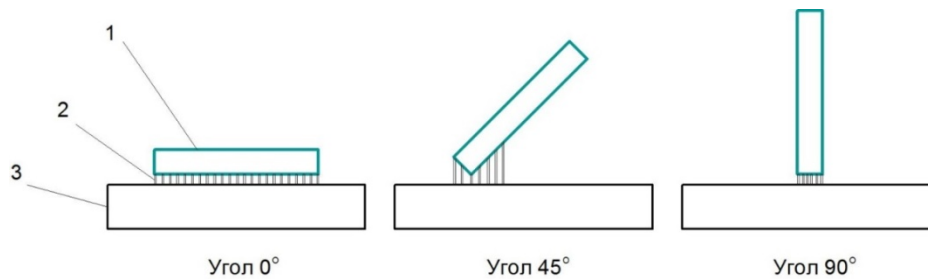


Рис. 2. Задание направления выращивания образцов:

1 – пластинчатый образец; 2 – материал поддержки; 3 – платформа построения

По результатам исследования влияния стратегии движения лазерного луча на механические свойства синтезируемого материала ВВ751П (табл. 1) было установлено, что наилучшие значения предела прочности и суммарной деформации из четырёх исследуемых режимов достигаются при штриховке лазерным лучом с вращением  $0^\circ - 45^\circ - 90^\circ$  и составляют 1120 МПа и 13,9% соответственно.

Таблица 1. Механические свойства синтезируемого материала ВВ751П в зависимости от стратегии движения лазерного луча

№ образца	Угол штриховки, градус	Предел прочности, МПа		Относительное удлинение, %	
		1	2	3	4
1-1	вдоль оси $X$ , 0	883	882	5,5	5,5
1-2		878		5,3	
1-3		886		5,6	
2-1	угловая, 45	887	884	5,9	5,9
2-2		890		6,2	
2-3		874		5,5	
3-1	вдоль оси $Y$ , 90	852	847	5,6	5,4
3-2		843		5,2	
3-3		846		5,4	
4-1	с вращением, $0 - 45 - 90$	1118	1120	13,7	13,9
4-2		1132		14,7	
4-3		1110		13,3	

Результаты исследования влияния направления изготовления образцов на механические свойства синтезируемого материала ВВ751П показали, что наилучшие значения предела прочности материала (табл. 2) достигаются при угле наклона образца  $90^\circ$ , где предел прочности выше на 15 и 19% относительно угла наклона  $0$  и  $45^\circ$  соответственно. Наилучшие значения относительного удлинения достигаются при угле наклона образца  $0^\circ$ , где данный параметр выше на 28 и 65% относительно угла наклона  $90$  и  $45^\circ$  соответственно [5].

Таблица 2. Механические свойства синтезируемого материала ВВ751П в зависимости от направления выращивания пластинчатых образцов

№ образца	Угол наклона образца, градус	Предел прочности, МПа		Относительное удлинение, %	
1-1	0	1121	1100	12,9	13,7
1-2		1101		13,4	
1-3		1080		14,9	
2-1	45	993	1048	5,3	4,8
2-2		1070		4,2	
2-3		1081		4,9	
3-1	90	1275	1294	9,7	9,8
3-2		1311		10,3	
3-3		1296		9,5	

Из табл. 1, 2 следует, что малоэмиссионные горелки, изготовленные из металлического порошка жаропрочного сплава ВВ751П (ХН56КВМТЮБ), полностью удовлетворяют требованиям по прочности.

Для успешного изготовления двухконтурных горелок методом СЛС на АО «Металлист-Самара» разработана оправдавшая себя в серийном производстве технологическая цепочка, которая включает в себя полный поэтапный процесс изготовления горелок (рис. 3).



Рис. 3. Технологическая цепочка процесса изготовления двухконтурных горелок с помощью метода СЛС

В ходе отработки процесса изготовления горелок обнаружен ряд недостатков, присущий деталям, изготовленным по аддитивным технологиям, к которым следует отнести:

- повышенную шероховатость топливных каналов и выходных отверстий основной и дежурной зоны, вызывающую нестабильность расходных характеристик;
- микропористость, микронесплавления, микротрещины;
- локальные зоны неспекания выращиваемых слоёв на корпусе горелки.

Из-за отмеченных недостатков горелок, изготовленных с помощью метода СЛС, количество кондиционных горелок составляло 59% от общего числа горелок. Однако, как показано в технологической цепочке (рис. 3), горелки можно дорабатывать после проведения испытания.

На основании анализа результатов испытаний партии горелок разработаны методы доработки наиболее распространённых дефектов (рис. 4).

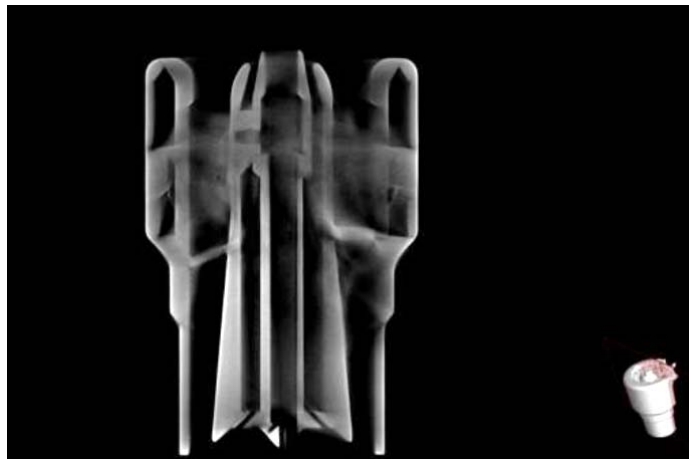


Рис. 4. Типичные недостатки малоэмиссионных горелок, изготовленных с помощью метода СЛС

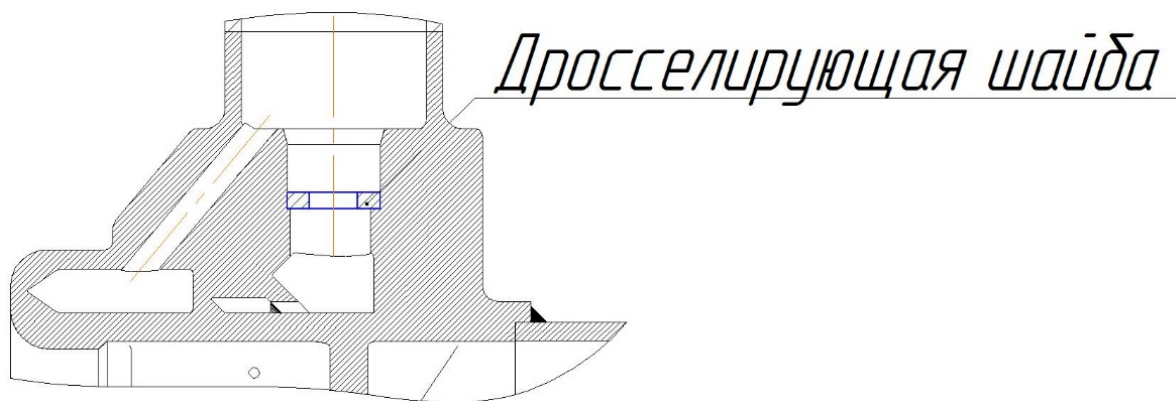
Указанные методы доработки включают в себя следующее. Горелки перед механической обработкой необходимо отправить на томографию для выявления неустранимых дефектов, которые невозможно обнаружить при визуальном осмотре на ранней стадии производства. С помощью данного предложения доработки горелок можно исключить затраты времени и ресурсов на горелки с неустранимыми дефектами (рис. 5).

Один из основных критериев качества горелок – это соответствие расходных характеристик горелок расходной характеристике эталонной горелки. Расход эталонной горелки при перепаде 0,6 атм. равен  $6,8 \pm 0,68$  г/с через основной топливный канал и  $2,8 \pm 0,28$  г/с через дежурный топливный канал. Только 59% испытанных горелок соответствуют этому условию. Для соответствия расходным требованиям горелок с завышенным расходом было принято решение об установке в топливном канале штока дросселирующих шайб, диаметры которых подбирались селективным методом (рис. 6). Данная доработка позволила добиться кондиционного расхода на всех горелках с завышенными расходными характеристиками.





*Рис. 5. Томография напечатанной горелки, вид сбоку*



*Рис. 6. Место установки дросселирующих шайб*



*Рис. 7. Малоэмиссионная горелка после применения электроэрозионной обработки*

Заниженный расход горелок связан с высокой шероховатостью топливных каналов и отверстий на завихрителях. Поэтому было принято решение о доработке горелок с помощью метода электроэрозионной обработки для уменьшения шероховатости завихрителей и топливных отверстий на них. На АО «Металлист-Самара» был спроектирован и изготовлен специальный электрод, который устанавливался в межлопаточные каналы горелок.

Применение метода электроэрозионной обработки позволило значительно уменьшить шероховатость каналов подвода топлива (с Ra 12,5 до Ra 3,2), благодаря чему были получены кондиционные расходы большинства горелок с заниженным расходом при продувке на стенде. Недостаток электроэрозионной обработки заключается в том, что с уменьшением шероховатости происходит утонение лопаток завихрителя. В связи с этим электроэрозионная обработка применялась на каждой горелке не более двух раз продолжительностью 30 с. При одном установе снимается слой материала 0,1 мм, поэтому удалось доработать не все горелки с заниженным расходом. Внешний вид горелок после электроэрозионной обработки представлен на рис. 7.

Для устранения локальных зон микротрещин и микронесплавлений на АО «Металлист-Самара» успешно применяется лазерная сварка, с помощью которой можно точно устранить микротрещины на горелках. После лазерной подварки локальных микротрещин малоэмиссионные горелки отправляются на повторные гидравлические испытания для подтверждения герметичности доработанных горелок. Все подваренные горелки удовлетворяют требованиям герметичности и расходным характеристикам.

Выполненные на АО «Металлист-Самара» совместно с Самарским университетом работы по внедрению новой апробированной в серийном производстве технологии изготовления унифицированной двухконтурной горелки с применением аддитивной технологии по СЛС процессу позволили существенно уменьшить стоимость, повысить качество и снизить время производства малоэмиссионной камеры сгорания.

Применение разработанной технологии доработки горелок, изготовленных с помощью метода СЛС, позволило существенно увеличить количество кондиционных горелок с 59 до 90%.

### Библиографический список

1. 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
2. Бантиков Д.Ю., Васильев В.И., Лавров В.Н., Кустов Д.И., Цыбизов Ю.И., Шариков Б.Ю. Малоэмиссионная горелка: патент РФ № 2442932; опубл. 20.02.2012; бюл. № 5.
3. 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» (22-24 июня 2016 г., Самара). Ч. 2. Самара: Самарский университет, 2016. С. 113-114.
4. Андрессон О., Бродин Х., Грайчен А., Навроцкий В. Аддитивное наращивание при ремонте горелок камер сгорания ГТУ // Турбины и Дизели. 2017. № 3. С. 4-11.
5. Сотов А.В., Проничев Н.Д., Смелов В.Г., Богданович В.И., Гиорбелидзе М.Г., Агаповичев А.В. 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.

## NEW TECHNOLOGIES IMPLEMENTED IN THE DESIGN OF A LOW-EMISSION COMBUSTION CHAMBER OF A GAS-TURBINE UNIT

© 2020

- D. G. Fedorchenko** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Chief Designer; Joint-Stock company “Metallist-Samara”, Samara, Russian Federation; [dgfedorchenko@yandex.ru](mailto:dgfedorchenko@yandex.ru)
- Yu. I. Tsybizov** Doctor of Science (Engineering), Professor, Design Project Leader; Joint-Stock Company “Metallist-Samara”, Samara, Russian Federation; [2422490@mail.ru](mailto:2422490@mail.ru)
- D. D. Tyulkin** Design Engineer; Joint-Stock Company “Metallist-Samara”, Samara, Russian Federation; [tyulkin.dmitriy@gmail.com](mailto:tyulkin.dmitriy@gmail.com)
- I. E. Vorotyntsev** Design Engineer; Joint-Stock Company “Metallist-Samara”, Samara, Russian Federation; [vorotyntsev15@yandex.ru](mailto:vorotyntsev15@yandex.ru)
- D. A. Zherelov** Design Project Leader; Joint-Stock company “Metallist-Samara”, Samara, Russian Federation; [denis\\_samara\\_163@mail.ru](mailto:denis_samara_163@mail.ru)
- A. S. Dulov** Design Engineer; Joint-Stock company “Metallist-Samara”, Samara, Russian Federation; [dulov.alexander@mail.ru](mailto:dulov.alexander@mail.ru)
- V. G. Smelov** Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor; Department of Engine Production Technology; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [pdla\\_smelov@mail.ru](mailto:pdla_smelov@mail.ru)
- A. V. Sotov** Candidate of Science (Engineering), Assistant Lecturer; Department of Engine Production Technology; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [sotovanton@yandex.ru](mailto:sotovanton@yandex.ru)
- A. V. Agapovichev** Senior Lecturer; Department of Engine Production Technology, Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [agapovichev5@mail.ru](mailto:agapovichev5@mail.ru)

Metallist-Samara JSC has developed a fundamentally new design of a unified double-circuit burner of a low-emission combustion chamber (LECC) of a ground-based gas turbine unit (GTU), adapted for manufacturing with the help of an innovative technology by selective laser melting (SLM) of metal powders using CAD models. Several batches of burners were made and control studies were carried out characterizing the quality of manufacturing according to the established procedure. Deficiencies inherent in the SLM process were discovered, the main of which are: raised roughness, in particular, of the fuel channels of the main and duty zones; microporosity, microalloying; microcracks; instability of flow characteristics; local non-sintering zones of the layers grown on the burner body. As a result of the analysis of the state of the manufactured burners, research and refinements, it was found that most of the identified shortcomings can be eliminated during further development of the modes and parameters of the technological process. Currently, difficult engineering problems associated with the implementation of additive manufacturing technologies have been overcome.

*Low-emission combustion chamber; unified double-circuit burner; additive technologies; selective laser melting.*

---

*Citation:* Fedorchenko D.G., Tsybizov Yu.I., Tyulkin D.D., Vorotyntsev I.E., Zherelov D.A., Dulov A.S., Smelov V.G., Sotov A.V., Agapovichev A.V. New technologies implemented in the design of a low-emission combustion chamber of a gas-turbine unit. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2020. V. 19, no. 1. P. 118-126. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-1-118-126



## References

1. 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. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-174-183
2. Bantikov D.Yu., Vasil'ev V.I., Lavrov V.N., Tsibisov 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)
3. 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 selective laser melting. *Materialy dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya» (June, 22-24, 2016, Samara)*. Part. 2. Samara: Samara University Publ., 2016. P. 113-114. (In Russ.)
4. Andresson O., Brodin H., Graychen A., Navrotskiy V. Developing additive manufacturing technology for burner repair. *Turbines and Diesels*. 2017. No. 3. P. 4-11. (In Russ.)
5. Sotov A.V., Pronichev N.D., Smelov V.G., Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G., Agapovichev A.V. Development algorithm of the technological process of manufacturing gas turbine parts by selective laser melting. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2017. V. 19, no. 4. P. 96-104. (In Russ.)