

РАСХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛОВ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

ФГБОУ ВО "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" (МАИ),
Институт двигателей летательных аппаратов, кафедра "Технология производства двигателей летательных аппаратов":

Евгений Ювенальевич Марчуков, д.т.н., профессор,

Сергей Дмитриевич Селиверстов, аспирант ОКБ им. А. Люльки:

Андрей Владимирович Стародумов, начальник расчётно-исследовательского управления,

Дмитрий Дмитриевич Чирков, начальник бригады экспериментальных исследований.

Работа посвящена исследованию влияния методов обработки внутренних каналов лопаток газотурбинного двигателя (ГТД), изготовленных методом селективного лазерного сплавления (СЛС), на расходные характеристики. Изготовлены модели каналов, имитирующих каналы входной кромки рабочей лопатки турбины высокого давления. Проведено сравнение расходных характеристик каналов без обработки (после СЛС) с каналами после электрохимической обработки (ЭХО), электроимпульсной полировки (ЭИП) и после электрохимической полировки (ЭХП), а также с каналами, изготовленными по традиционной технологии (литье в формы со стержнями).

The work is devoted to the study of the influence of the methods of processing the internal channels of the gas turbine engine blades made by the method of selective laser melting on the flow characteristics. Models of channels simulating the channels of the input edge of the working blade of a high-pressure turbine are made. The flow characteristics of channels without processing (after SLM) are compared with channels after electrochemical processing, electric pulse polishing and after electrochemical polishing, as well as with channels made using traditional technology (casting into molds with ceramic rods).

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, газотурбинный двигатель, охлаждаемая лопатка, расходные характеристики.

Keywords: selective laser melting, gas turbine engine, cooled blade, flow characteristics.

Одним из основных направлений повышения топливной эффективности ГТД является повышение температуры газа перед турбиной. При достигнутом уровне температуры газа перед турбиной дальнейшее увеличение температуры возможно только при разработке более эффективных систем охлаждения лопаток турбины или новых конструктивных материалов и покрытий. В связи с усложнением систем охлаждения лопаток применение традиционных технологий их изготовления становится затруднительным или невозможным, поэтому применение для создания лопаток турбин аддитивных технологий (АТ) может решить часть задач.

Преимущества применения технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) для изготовления лопаток с внутренними каналами заключается в возможности реализации невыполнимых ранее или сложно выполнимых с технологической точки зрения схем охлаждения лопатки, в частности, создание лопатки с системой проникающего охлаждения или со структурой пористого материала. Особенностью СЛС является высокая шероховатость поверхности изготовленной детали, причем шероховатость поверхности различна на разных участках детали. Шероховатость поверхности зависит от размера частиц порошка, режимов спекания и от ориентации детали в 3D принтере. При проектировании лопатки, планируемой к изготовлению по технологии СЛС, необходимо обеспечить требуемые гидравлические характеристики каналов воздушного охлаждения, а также исключить появление поддерживающих структур во внутренних полостях системы охлаждения лопатки.

В настоящее время из-за высокой шероховатости наружную поверхность лопатки необходимо дополнительно обрабатывать, а предназначенные для пленочного охлаждения различные отверстия в профильной части лопатки осложняют эту обработку.

В настоящее время существует несколько жаропрочных сплавов, порошки которых возможно использовать в технологии СЛС: Inconel 718, Inconel 939 зарубежного производства и ЭП648ПС, ЭП741НП отечественного производства. Представленные мате-

риалы не обладают требуемыми прочностными свойствами для изготовления рабочих лопаток турбин высокого давления с температурой металла, достигающей 1150 °С. Современные лопатки высокотемпературных турбин изготавливают из монокристаллических сплавов. Работы по послойному синтезу монокристаллических образцов начаты, но пока не достигли стадии промышленного применения.

В связи с перечисленными выше особенностями технологии СЛС пока не могут быть применены для изготовления лопаток перспективных высокотемпературных турбин, однако 3D печать активно используется для изготовления лопаток с целью отработки новых систем охлаждения на экспериментальных образцах. Данная технология позволяет уже на стадии проектирования изготавливать лопатки и проводить экспериментальные исследования эффективности системы охлаждения, дорабатывать и оптимизировать конструкции без значительных затрат на изготовление образцов по традиционным технологиям.

Традиционная технология производства охлаждаемых лопаток методом прецизионного литья включает множество операций, в том числе изготовление металлических пресс-форм для оболочки и стержня методами механической обработки, изготовление керамических стержней, выплавляемых моделей, керамических оснасток.

Изготовление пресс-формы методом механической обработки - длительный и сложный технологический процесс, включающий получение заготовок деталей пресс-формы из поковок, проката или литьем из инструментальных сталей, предварительную обработку заготовок на станках с ЧПУ, слесарную обработку, термическую обработку, чистовую обработку заготовок деталей на металлорежущих станках, доводку наиболее ответственных поверхностей заготовок деталей пресс-форм, контрольную сборку и испытание пресс-формы. Все эти трудоемкие и длительные операции производства пресс-форм можно заменить выращиванием их из стали методом СЛС.

Одной из важных задач при изготовлении лопаток с перспек-

тивными высокоэффективными схемами охлаждения по технологии литья является получение керамического стержня, формирующего внутренние каналы лопатки. 3D-модель стержня представляет собой сложную внутреннюю полость охлаждаемой лопатки. Стержень будет служить вкладышем в пресс-форму для изготовления литейной формы и в последующем должен удаляться с помощью щелочи. Ввиду сложной конфигурации каналов применение пресс-форм для изготовления таких стержней не всегда возможно.

Целью работы является сравнение расходных характеристик каналов охлаждаемой лопатки турбины ГТД при различных технологиях изготовления и обработки:

1. По традиционной технологии (литье в формы со стержнями);
2. После СЛС;
3. После СЛС и ЭХО, ЭИП и ЭХП.

Задачи работы:

1. Провести продувку и проливку каналов моделей пера лопатки, изготовленных методом аддитивных технологий, до и после обработки внутренней поверхности каналов.
2. Определить различие расходных характеристик каналов охлаждения лопатки, полученных литьем и методом аддитивных технологий с последующей обработкой каналов различными видами.
3. После всех испытаний измерить шероховатость внутренних поверхностей каналов и диаметры внутренних отверстий.

Экспериментальное исследование моделей каналов, изготовленных методом СЛС

В рамках отработки технологии изготовления опытных деталей аддитивным методом были изготовлены три модели каналов, имитирующих каналы входной кромки рабочей лопатки турбины высокого давления (рис. 1). Данные модели были изготовлены из порошкового сплава Inconel 718 (размер частиц 40...60 мкм).

После изготовления детали была проведена продувка и проливка образцов.

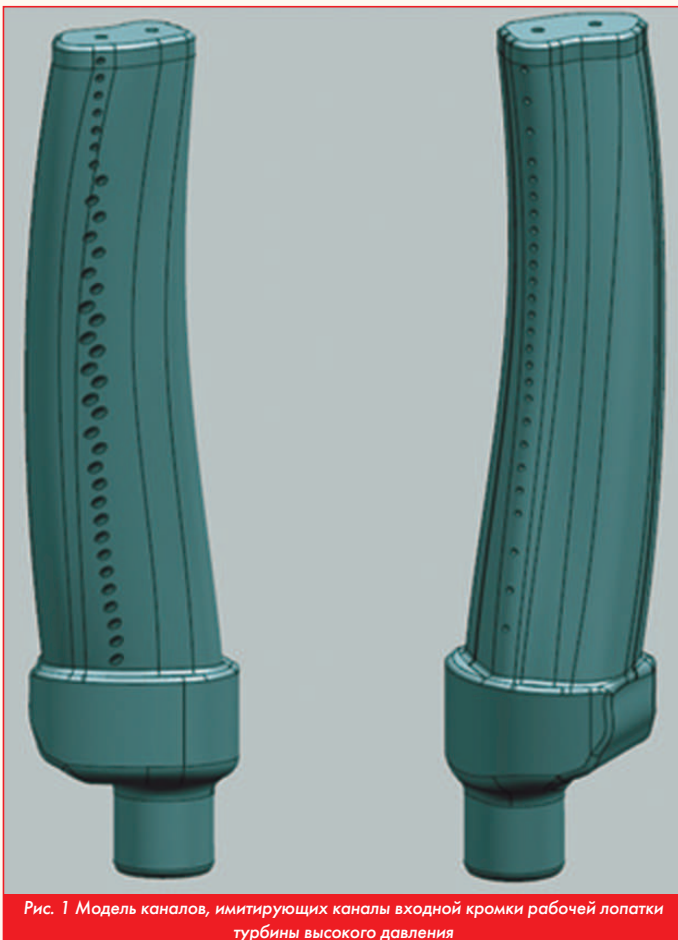


Рис. 1 Модель каналов, имитирующих каналы входной кромки рабочей лопатки турбины высокого давления

Перед проведением испытаний каждая деталь маркировалась индивидуальным номером ("N" = 1, 2, 3). Деталь подключалась к стенду (рис. 2) и проводилась проверка на герметичность установки.

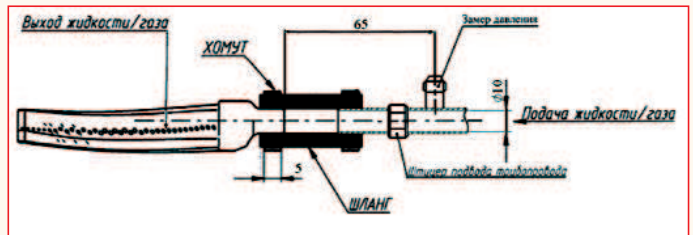


Рис. 2. Схема подключения модели канала к стенду

Продувка образцов выполнялась при перепадах давления: $\pi = 1,1; 1,3; 1,5; 1,7; 1,9; 2,1$. Проливка выполнялась под давлением на входе в деталь $P_{вх} = 0,3...6,0$ кгс/см², с шагом 0,3 кгс/см² и расходом воды 60...280 г/с.

В таблице 1 приведены используемые для измерения параметров приборы и погрешности измерения.

Таблица 1. Приборы, измеряемые параметры и погрешности измерений

Измеряемая величина	Измерительный прибор	Диапазон измерения	Погрешность измерения	Примечание
Перепад давлений	Датчик давления Метран-150	0...60 МПа	±0,5 % измеренной величины	-
Давление	Манометр МТИ ГОСТ 2405-72	0...2,1 кгс/см ²	±1 % измеренной величины	-
Температура воздуха	Приемник ТП-1040 (Термопара)	0...+600 °С	± 2,5 °С	-
Расход воздуха	Мерный участок	1...12 г/с	±1 % измеренной величины	Косвенное измерение

По данным испытаний были построены графики расходных характеристик.

На рисунках 3 и 4 представлены результаты продувок и проливок каналов трех образцов, изготовленных методом аддитивных технологий.

По полученным данным максимальный результат отклонения от общего среднего значения трех образцов по продувкам не превышает 6,15 %, а по проливкам - 3,9 %.

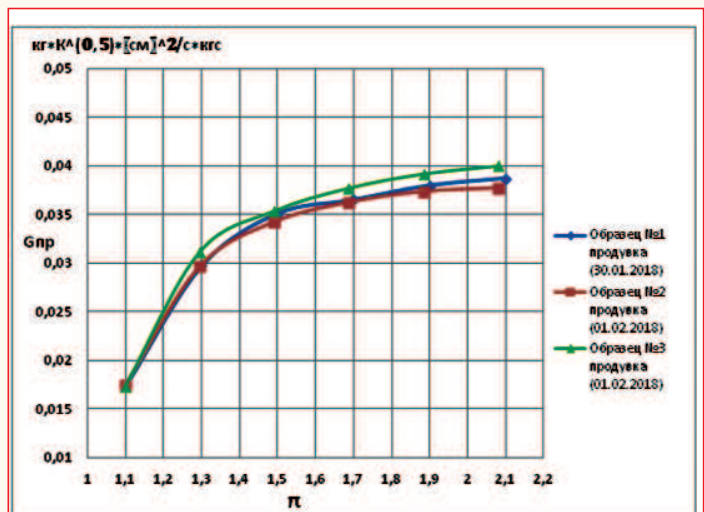


Рис. 3 Результаты продувок каналов, изготовленных методом СЛС

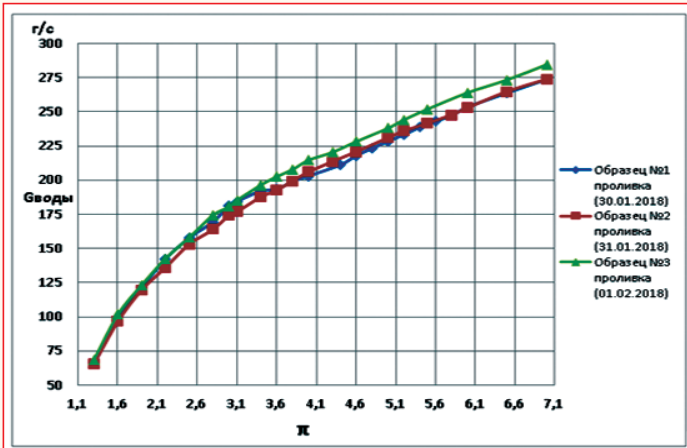


Рис. 4 Результаты проливок каналов, изготовленных методом СЛС

Экспериментальное исследование моделей каналов, изготовленных методом аддитивных технологий, после ЭХО и ЭИП+ЭХП

В связи с тем, что расходная характеристика каналов охлаждения, изготовленных методом СЛС, значительно ниже расходной характеристики каналов, полученных литьем (при продувке - на 45 %, рисунок б приложение А), в ходе дальнейших испытаний внутренние полости каналов моделей, изготовленных методом СЛС, подверглись дополнительной обработке. Образцы № 2 и № 3 прошли электрохимическую обработку (ЭХО), а образец №1 - сначала электроимпульсную полировку (ЭИП), а затем электрохимическую полировку (ЭХП).

Затем обработанные образцы прошли повторную продувку и проливку. Были построены графики сравнения расходных характеристик до и после обработки методами ЭХО и ЭИП+ЭХП каналов моделей, изготовленных методом СЛС (рисунки 5 и 6).

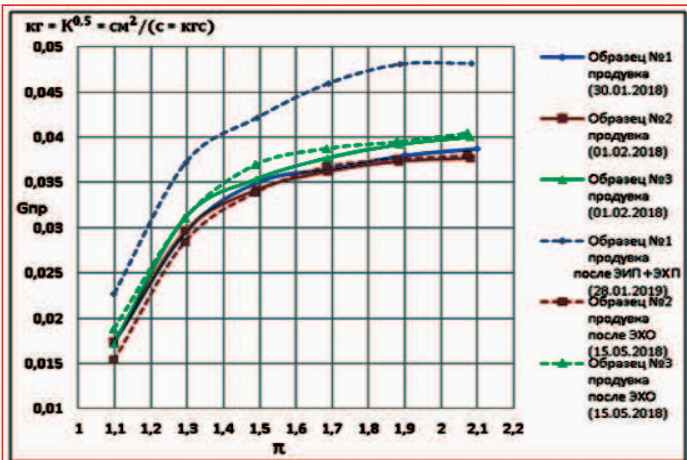


Рис. 5 Результаты продувок каналов, изготовленных методом СЛС

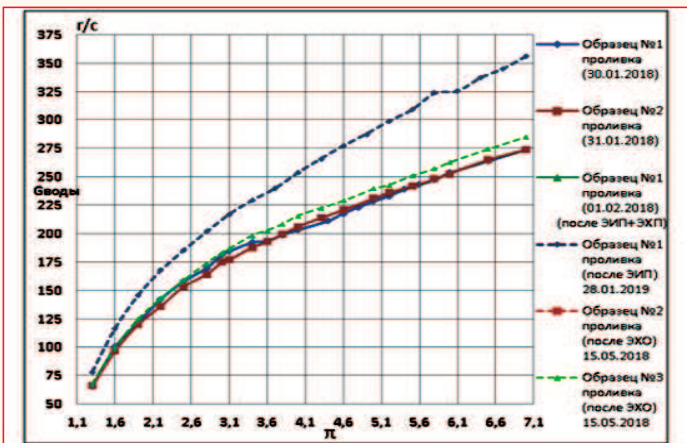


Рис. 6 Результаты проливок каналов, изготовленных методом СЛС (после ЭХО и ЭИП+ЭХП).

По результатам продувок и проливок каналов, изготовленных методом СЛС, на рабочем перепаде $\pi = 2,1$ выявлено:

- 1) для образца № 1 после ЭИП+ЭХП $G_{пр}$ увеличился на 30 %, а $G_{воды}$ увеличился на 16 %;
- 2) для образца № 2 после ЭХО $G_{пр}$ увеличился на 0,8 %, а $G_{воды}$ увеличился на 0,2 %;
- 3) для образца № 3 после ЭХО $G_{пр}$ увеличился на 1,1 %, а $G_{воды}$ увеличился на 0,3 %.

Также подсчитано, что значение приведенного расхода воздуха аддитивного канала после ЭИП+ЭХП на перепаде $\pi = 2,1$ сопоставимо со средним значением расхода воздуха по продувкам каналов литых лопаток. При этом приведенный расход через аддитивный канал после ЭИП+ЭХП меньше, чем через канал литой лопатки на 3 % (рис. 7).

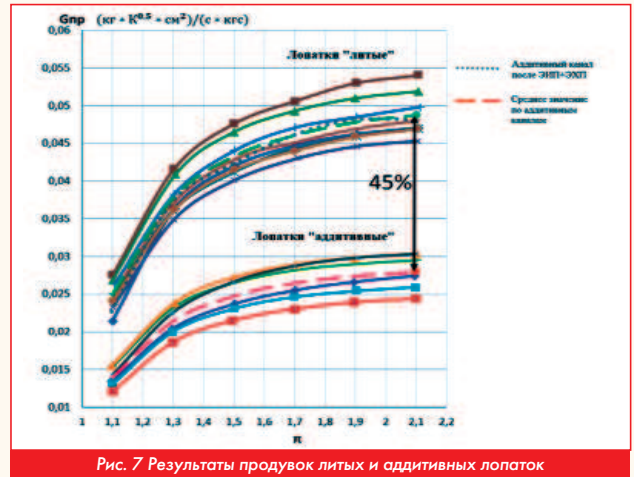


Рис. 7 Результаты продувок литых и аддитивных лопаток

Измерение параметров каналов моделей, изготовленных методом аддитивных технологий

После обработки и проведения экспериментальных исследований

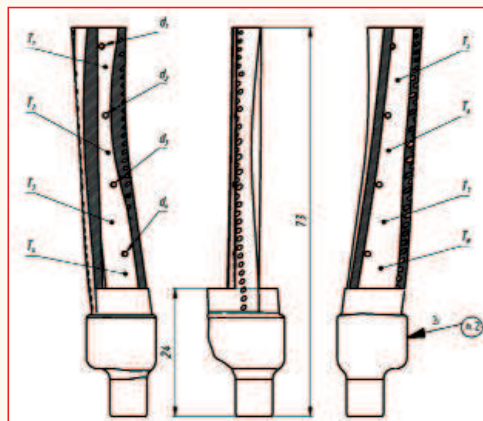


Рис. 8 Схема разрезки моделей каналов

по продувке и проливке, модели каналов были переданы для измерения их внутренних поверхностей. Была выполнена разрезка трех моделей согласно рисунку 8, измерены диаметры четырёх внутренних отверстий d_j с точностью $\pm 0,01$ мм и шероховатость в восьми зонах T_j .



Рис. 9 Разрезанные образцы моделей каналов после проведенных испытаний



Таблица 2. Результаты контроля диаметров отверстий и шероховатостей поверхностей каналов модели

Образец № 2					
Контроль диаметров		Контроль шероховатости			
№ отверстия	Фактический диаметр отверстия d_i , мм	№ зоны	Фактическая шероховатость R_a , мкм	№ зоны	Фактическая шероховатость R_a , мкм
d_1	0,80	T_1	не измерялось по техническим возможностям	T_3	4,5
d_2	0,80	T_2		T_5	8,23
d_3	0,76	T_4		T_6	6,28 ÷ 6,59
d_4	0,70	T_8		T_7	6,56 ÷ 7,98
Образец № 3					
Контроль диаметров		Контроль шероховатости			
№ отверстия	Фактический диаметр отверстия d_i , мм	№ зоны	Фактическая шероховатость R_a , мкм	№ зоны	Фактическая шероховатость R_a , мкм
d_1	0,85	T_1	не измерялось по техническим возможностям	T_3	6,6
d_2	0,79	T_2		T_5	5,68
d_3	0,80	T_4		T_6	5,74
d_4	0,70	T_8		T_7	6,85 ÷ 7,20
Образец № 1					
Контроль диаметров		Контроль шероховатости			
№ отверстия	Фактический диаметр отверстия d_i , мм	№ зоны	Фактическая шероховатость R_a , мкм	№ зоны	Фактическая шероховатость R_a , мкм
d_1	0,93	T_1	0,82 ÷ 0,9	T_3	2,67 ÷ 3,61
d_2		T_2	1,36 ÷ 1,39	T_5	2,97 ÷ 3,82
d_3		T_4	0,36 ÷ 0,39	T_6	2,73 ÷ 3,93
d_4		T_8	0,93 ÷ 1,17	T_7	2,7 ÷ 3,14

Согласно данным таблицы 2 шероховатость внутренних каналов после обработки ЭХО и ЭИП+ЭХП полностью удовлетворяет значениям, допускаемым при изготовлении литых лопаток третьего класса точности $R_a = 10...20$ мкм. Сравнение способов обработки поверхностей показало, что обработка ЭИП+ЭХП на одной из внутренних сторон образца № 1 снизила шероховатость в среднем на 55 %, а на другой стороне изменений не выявлено. Также была проведена оценка влияния ЭИП+ЭХП на внешнюю поверхность, в результате которой шероховатость в среднем снизилась на 90 %. Метод ЭХО, применяемый для образцов № 2 и № 3, значительных изменений не показал.

Согласно чертежу отверстия внутренних каналов d_i необходимо было изготовить диаметром 1 мм с допуском $\pm 0,2$ мм. Из таблицы 2 видно, что 50 % диаметров отверстий образцов № 2 и № 3 не удовлетворяют допустимому значению, в отличие от диаметров отверстий образца № 1, которые полностью удовлетворяют допуску. Также подсчитано, что размеры диаметров отверстий образца № 1 в среднем на 14 % превышают размеры отверстий образцов № 2 и № 3, что приводит к увеличению их площади на 7...40 %.

Таким образом, обработка ЭИП+ЭХП каналов моделей лопаток, изготовленных методом СЛС, по расходным характеристикам приблизило их к каналам литых лопаток, о чем свидетельствуют меньшее значение шероховатости и увеличенное значение внутренних отверстий по сравнению с обработкой ЭХО.

Выводы

В ходе исследования моделей, изготовленных методом СЛС выявлено, что после ЭХО у каналов моделей № 2 и № 3 (при $\pi = 2,1$) $G_{пр}$ в среднем увеличился на 0,95 %; $G_{воды}$ в среднем увеличился на 0,25 %. На образце № 1 (при $\pi = 2,1$) после ЭИП+ЭХП $G_{пр}$ увеличился на 30 %, $G_{воды}$ увеличился на 16 %. Также подсчитано, что значение $G_{пр}$ после ЭИП+ЭХП меньше среднего значения расхода по продувкам каналов литых лопаток на 3 %. Сравнения результатов значений приведены в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение результатов продувок и проликов образцов при $\pi = 2,1$

№ образца	Расход до обработки		Расход после обработки	
	Вода, Гв	Воздух, Гпр	Вода, Гв	Воздух, Гпр
1	136,17	4,80	160,10	6,10
2	130,66	4,71	133,20	4,77
3	136,33	5,01	136,84	5,07

Измерение шероховатости показало, что обработка внешней поверхности методом ЭИП+ЭХП снижает R_a в среднем на 90 %, а внутренней поверхности - на 55 %. Метод ЭХО не показал существенных изменений значений R_a после его применения.

После проведенных обработок методами ЭИП+ЭХП и ЭХО обнаружено что, 50 % диаметров отверстий образцов № 2 и № 3 не удовлетворяют допустимому значению, в отличие от диаметров отверстий образца № 1, которые полностью удовлетворяют допустимым значениям. Также подсчитано, что размеры диаметров отверстий образца № 1 в среднем на 14 % превышают размеры отверстий образцов № 2 и № 3, что приводит к увеличению их площади на 7...40 %.

Исследованное в работах [3, 4, 5] влияние шероховатости на течение потока в каналах показывает незначительную разницу как в расчетах, так и в сравнении с экспериментом. Учитывая это, можно предположить, что постобработка методом ЭИП+ЭХП необходима только для компенсации получаемых после СЛС диаметров отверстий. Таким образом, в дальнейшей работе планируется экспериментально проверить повторяемость получаемых после СЛС отверстий каналов в зависимости от диаметра и угла установки. **П**

Литература

1. Завалишин И.В., Финогеев А.Г. Особенности технологической подготовки производства деталей турбины газотурбинного двигателя // Электронный журнал "Труды МАИ", 2021, №56. -11 с.
2. Логунов А.В., Буров М.Н., Данилов Д.В. Развитие энергетического и морского газотурбинного двигателестроения в мире // Научно-технический журнал "Двигатель", 2016, № 3 - С. 2-4.
3. Иноземцев А.А., Плотноков А.И. Исследование влияния шероховатости поверхностей проточной части сверхзвуковой высоконапорной ступени осевого компрессора на её характеристики // Прикладная механика и техническая физика, 2015, Т. 56, №2 - С. 21-31.
4. Хайрулин В.Т., Самохвалов Н.Ю., Тихонов А.С., Сендюров С.И. Оценка влияния шероховатости поверхности лопаток на параметры турбины высокого давления // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника, 2014, № 37 - С. 99-111.
5. Шевченко М.И. Проектирование охлаждаемых деталей ГТД с опережающей верификацией теплогидравлических моделей на примере охлаждаемых лопаток газовой турбины: Дис. канд. техн. наук: 05.07.10 / Роголев Андрей Николаевич; "НИУ "МЭИ". - М., 2016. - 193 с.
6. К.В. Рахин, К.Д. Талахов, С.Д. Селиверстов. Применение цифровых и аддитивных технологий в исследованиях двигателей ЛА // Материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых "Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности", г. Могилев, 26-27 октября 2017 г. - С. 28.
7. ASTM F2792-12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (Withdrawn 2015), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org.
8. Инновации для двигателестроения [Электронный ресурс]. - http://viam.ru/news/2073.
9. Rolls-Royce breaks additive record with printed Trent-XWB bearing [Электронный ресурс]. - https://www.theengineer.co.uk/rolls-royce-breaks-additive-record-with-printed-trent-xwb-bearing/
10. Kumar J. Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry / J. Kumar, C.G. K. Nair // Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies, pp. 39-54, 2017. DOI: 10.1007/978-981-10-0812-2_4.

Связь с авторами:
seliverstovsd@mai.ru,
dmitriy.chirkov@okb.umpro.ru