

УДК 621.45.038.3

ПРИМЕНЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ ТРУБЧАТОГО ВОЗДУХО-ВОЗДУШНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

А. В. Агапов¹, А. В. Ионов², А. В. Стародумов³

¹agapov_andrey@icloud.com, ²woln@mail.ru, ³andrey-star.work@yandex.ru

¹⁻³ ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский институт)» (МАИ)

Поступила в редакцию 08.02.2023

Аннотация. В работе проводится исследование возможности перехода от традиционного производства авиационного трубчатого теплообменника к производству с использованием аддитивных технологий. Представлены результаты расчета сопряженного теплообмена при течении газа в трубках теплообменного аппарата в программном комплексе *Ansys CFX*, разработана конструкция образцов для испытаний с учетом использования аддитивных технологий. На произведенных образцах была измерена шероховатость внутренней поверхности и проведена опрессовка для обнаружения утечек. По результатам проведенной работы можно сделать вывод о целесообразности перехода от традиционного производства к производству с использованием аддитивных технологий.

Ключевые слова: Теплообменный аппарат, воздухо-воздушный теплообменник, трубчатый теплообменник, аддитивные технологии, селективное лазерное сплавление, математическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность и надежность теплообменных аппаратов (ТА) имеют большое значение для экономичной работы авиационного двигателя в целом, поэтому вопросам расчета, проектирования и эксплуатации ТА, а также перспективным разработкам по их совершенствованию необходимо уделять большое внимание. Совершенствование теплообменного оборудования может позволить либо снизить расход дорогостоящих материалов, уменьшить габариты ТА и облегчить компоновку энергоустановки в целом, либо повысить эффективность при сохранении массогабаритных характеристик.

Целью конструирования ТА является создание такой структуры, которая будет обеспечивать максимум теплоотдачи, минимум гидравлических потерь для обоих участвующих в теплообмене теплоносителей при обеспечении герметичности, легкости, компактности и прочности.

Проектирование и использование теплообменников в авиационных двигателях имеет свои особенности. При проектировании ТА стоит задача компоновки теплообменных поверхностей в объеме сложной геометрической формы, а также обеспечения достаточной эффективности. При размещении ТА во втором контуре газотурбинного двигателя (ГТД), помимо формы контура, должны учитываться расположенные в нем элементы других двигательных систем. Сложность компоновки обуславливает повышение доли сборных и раздаточных коллекторов в составе ТА, что ведет к значительным потерям из-за гидравлического сопротивления коллекторов. Технологические ограничения также влияют на форму элементов ТА: коллекторы обычно изготавливаются сваркой листовых металлов, вальцовкой труб, а теплообменные

поверхности – штамповкой листа или из труб. Использование аддитивных технологий (АТ) снимает большинство технологических и формообразующих ограничений, накладываемых на конструкцию ТА.

Совершенствование ТА осуществляется как в рамках традиционных конструкций, путем модернизации отдельных элементов, так и в направлении создания принципиально новых конструкций и компоновок.

Улучшение конструкций ТА должно обеспечивать при высокой надежности интенсификацию в них теплообмена, что может быть достигнуто применением интенсифицированных поверхностей теплообмена, таких, например, как оребренные и различно профилированные трубки [1]. Повышению тепловой эффективности аппаратов способствует и совершенствование аэродинамики трубных пучков, когда создаются условия для равномерного омывания теплоносителем поверхности теплообмена аппарата без застойных зон или труднодоступных участков, а также устранение или учет влияния протечек теплоносителя в зазорах промежуточных перегородок.

Проблемы повышения надежности работы аппаратов решаются, как правило, путем устранения недостатков существующих конструкций, выявленных в процессе эксплуатации аппаратов. Так, например, рациональная организация подвода межтрубного теплоносителя и его распределения по трубному пучку позволяет повысить виброненадежность трубных систем.

Применение различно профилированных трубок рассматривается в настоящее время как одно из наиболее перспективных направлений повышения эффективности теплообменных аппаратов. Искусственная шероховатость, образованная профилем накатки, турбулизирует пограничный слой, за счет чего происходит повышение интенсивности теплообмена при обтекании профилированных поверхностей воздухом. Наиболее исследованными из профилированных трубок являются профильные витые трубки. Также способствует повышению интенсивности теплообмена применение трубок с кольцевой накаткой и использование турбулизирующих вставок спирального и конфузorno-диффузорного профиля [2].

Среди российских исследований и разработок авиационных ТА можно выделить работы, проведенные в Центральном институте авиационного моторостроения (ЦИАМ), Московском авиационном институте (МАИ), Уфимском государственном авиационном техническом университете (УГАТУ).

Работа, проведенная в ЦИАМ [3], заключалась в исследовании трех типов теплообменных аппаратов авиационного назначения: трубчатого, размещенного в канале наружного контура ГТД; пластинчатого с гофрированными, зигзагообразными и микрохолмистыми теплообменными поверхностями; перспективного с ветвящимися каналами. В результате были получены результаты, которые могут быть использованы для проектирования и оптимизации ТА различного назначения.

Также в ЦИАМ ведутся работы по проектированию и изготовлению методами АТ перспективных ветвистых ТА-демонстраторов с взаимно-пористой теплообменной структурой [4].

В МАИ была разработана методика трехмерного расчета пластинчатых ТА [5, 6]. Данная методика позволяет получать достоверную качественную оценку расчетных зависимостей, а также позволяет увидеть структуру течения по тракту теплообменника (поля температур, давлений и скоростей). В ходе работы были проведены расчетные исследования ТА пластинчатого типа, проведена верификация разработанных методик на основании критериальных зависимостей.

Также в МАИ была проведена работа по расчету и модернизации ВВТ ТРДДФ [7]. На основе полученных результатов рекомендуется в системе охлаждения турбины двухконтурного турбореактивного двигателя с форсажной камерой применять ВВТ с овальными трубками, диагональные размеры которых составляют $6,3 \times 4,0$ мм, и микроинтенсификаторами теплообмена с выступами на внутренней поверхности трубок высотой 0,3 мм, установленными с шагом 5,0 мм. Эта конфигурация трубки соответствует наилучшему компромиссу между миним

альным значением их внешнего гидравлического сопротивления и максимумом интенсивности охлаждения внутреннего потока воздуха.

В УГАТУ проводится работа по созданию малоразмерного ГТД (мГТД), в ходе которой был разработан перспективный рекуператора для данного двигателя [8]. В рамках этой работы подробно рассмотрены виды различных рекуператоров, а также проработаны различные конструкции рекуператора для мГТД.

Проводятся и другие работы по повышению эффективности и оптимизации конструкции ТА [9–12].

Рассматривая мировой опыт, можно выделить США, где Агентство перспективных исследовательских проектов Министерства энергетики – *Energy Agency (ARPA-E)* в рамках программы *HITEMP* выделило премии за 18 проектов в этой сфере. Эти проектные группы разрабатывают новые подходы и технологии для проектирования и производства высокотемпературных, высоконапорных и очень компактных теплообменников и их компонентов [13].

Также проводятся работы по исследованию компоновок трубчатых пучков и формы трубок [14–16]. Много исследований проводится в других сферах (энергетика, электроника и т.д.), некоторые результаты этих работ применимы и в авиации [17–20].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является воздушно-воздушный теплообменник, размещаемый во втором контуре ГТД, необходимый для охлаждения вторичного воздуха камеры сгорания, который поступает в охлаждаемые лопатки соплового аппарата. ВВТ состоит из 42 модулей, которые выполнены из трех рядов трубок, которые соединены с двумя фланцами, ряд представляет из себя пучок из 4 цилиндрических трубок. ВВТ устанавливается на корпусе камеры сгорания. На данный момент изготовление модулей производится подетально, с последующей сборкой и пайкой. Для производства необходимы заготовки трубок, которые имеют различную геометрию, а следовательно, несколько линий гибки, фланцев, которые изготавливаются фрезерованием, различные опорные элементы, дистанционные вставки и гофрированные пластины, изготавливаемые штамповкой. 3D-модель модуля ВВТ представлена на рисунке 1.

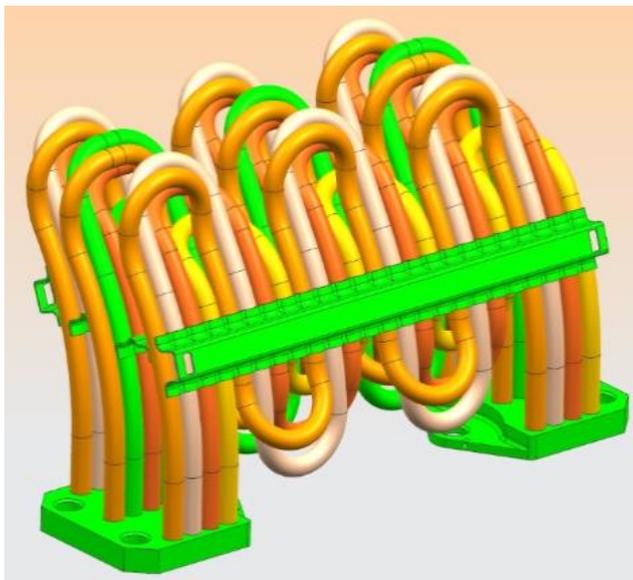


Рис. 1. Модуль ВВТ.

Целью исследования является оценка возможности перехода от традиционного изготовления ВВТ к изготовлению с применением аддитивных технологий с целью сокращения числа технологических операций, следовательно, времени и трудозатрат на изготовление одного модуля. В связи с переходом к изготовлению с помощью аддитивных технологий необходимо

спроектировать конструкцию ТА с учетом ограничений, накладываемых данным способом производства, при этом сохранить или улучшить массогабаритные характеристики и увеличить его эффективность.

В ходе работы были произведены гидрогазодинамические расчеты модуля теплообменника, одного пучка трубок и трубки отдельно неизменённой конструкции (расчеты проводились на одной трубке из пучка как на более простой модели для отработки методики). Это необходимо для верификации методики расчета. Расчеты проводились в программном комплексе *Ansys-CFX*. Для упрощения расчета из геометрии были исключены дистанционные вставки, опорные детали и гофрированные пластины. Геометрия расчетной области представлена на рисунке 2. Она состоит из 4 тел: «жидкий объем» вокруг ТА; ТА с частью корпуса камеры сгорания в месте крепления; «жидкий объем» горячего воздуха внутри ТА.

Основными уравнениями, решаемыми в процессе численного исследования, являются нестационарные осреднённые уравнения Навье-Стокса (*FANS – Favre Averages Navier-Stokes*). В декартовой системе координат уравнения могут быть представлены в общей форме как:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} = \mathbf{S}, \quad (1)$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p - \tau_{xx} \\ \rho v u - \tau_{zx} \\ \rho w u - \tau_{zx} \\ \rho u H - u \tau_{xx} - v \tau_{yx} \\ -w \tau_{zx} + q_x \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho u v - \tau_{xy} \\ \rho v^2 + p - \tau_{yy} \\ \rho w v - \tau_{zy} \\ \rho v H - u \tau_{xy} - v \tau_{yy} \\ -w \tau_{zx} + q_y \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho u w - \tau_{xz} \\ \rho v w - \tau_{yz} \\ \rho w^2 + p - \tau_{zz} \\ \rho w H - u \tau_{xz} - v \tau_{yz} \\ -w \tau_{zz} + q_z \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где ρ – плотность; u, v, w – компоненты вектора скорости в проекции на оси x, y, z соответственно; τ_{ij} – компоненты тензора вязких напряжений; H – энтальпия; E – полная внутренняя энергия; p – давление; q – тепловые потоки; $\dot{\omega}_k$ – источниковый член.

Для моделирования турбулентности использовалась модель *k-omega SST (Shear Stress transport)*.

Основные уравнения модели:

Уравнение переноса кинетической энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{k}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \tilde{U}_j \tilde{k}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_{k1}} \right) \frac{\partial \tilde{k}}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta_0^* \rho \tilde{k} \tilde{\omega}. \quad (6)$$

Уравнение переноса скорости диссипации:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{\omega}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tilde{\rho}\tilde{U}_j\tilde{\omega}) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_{\omega 1}}\right)\frac{\partial\tilde{\omega}}{\partial x_j}\right] + \alpha\frac{\tilde{\omega}}{k}P_k - \beta_0\tilde{\rho}\tilde{\omega}^2, \quad (7)$$

где $\mu_T = \tilde{\rho}\frac{\tilde{k}}{\max(\tilde{\omega}, \frac{SF_2}{\alpha_1})}$ – коэффициент турбулентной вязкости;

$\alpha_1 = 0.31$; $\beta_0^* = 0.09$; $\alpha = 5/9$; $\beta_0 = 0.075$; $\sigma_{k1} = 2$; $\sigma_{\omega 1} = 2$ – эмпирические константы модели.

Стыковочные функции:

$$F_1 = \tanh(\text{arg}_1^4); \quad (8)$$

$$\text{arg}_1 = \min\left[\max\left(\frac{\sqrt{\tilde{k}}}{\beta_0^*\tilde{\omega}y}, \frac{500\mu}{y^2\tilde{\omega}}\right), \frac{4\tilde{\rho}\tilde{k}}{CD_{k\omega}\sigma_{\omega 2}y^2}\right]; \quad (9)$$

$$CD_{k\omega} = \max\left(\frac{2\tilde{\rho}}{\sigma_{\omega 2}\tilde{\omega}}\frac{\partial\tilde{k}}{\partial x_j}\frac{\partial\tilde{\omega}}{\partial x_j}, 1 \times 10^{-10}\right); \quad (10)$$

$$F_2 = \tanh(\text{arg}_2^2); \quad (11)$$

$$\text{arg}_2 = \max\left(\frac{2\sqrt{\tilde{k}}}{\beta_0^*\tilde{\omega}y}, \frac{500\mu}{y^2\tilde{\omega}}\right), \quad (12)$$

где y – расстояние до ближайшей стенки; μ – кинематическая вязкость; $\sigma_{\omega 2} = 0.856$ – эмпирическая константа

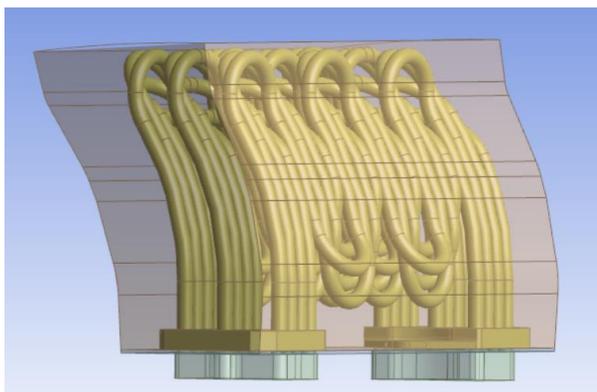


Рис. 2. Геометрия расчетной области

На рисунке 3 представлена расчетная сетка и ее параметры. Сетка состоит из 4128771 узлов и 13411871 элементов. На необходимые поверхности добавлены слои *Inflation* (на «жидкий объем» – 8 слоев с толщиной первого слоя 0,1 мм с увеличением каждого последующего слоя на 20%, а на твердых телах – 5 равномерных слоев размером 0,1 мм). Это необходимо для получения правильного распределения параметров в поверхностном слое. Такую сетку можно считать достаточно точной (сеточная сходимость составляет порядка 3%)

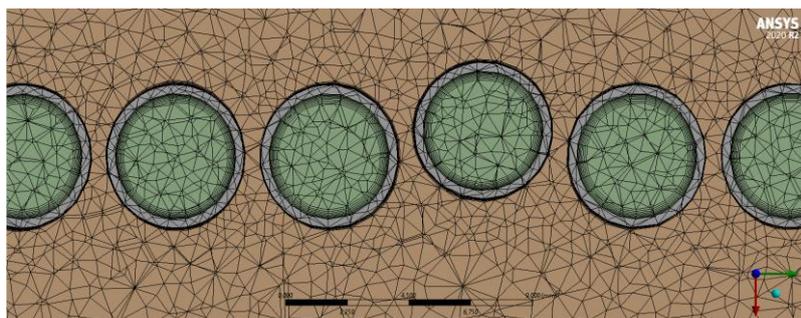


Рис. 3. Расчетная сетка.

На рисунке 4 представлена расчетная область с расставленными граничными условиями (граничные условия получены измерениями на стендовых испытаниях, схема измерения представлена на рисунке 5) для холодного и горячего воздуха. Расчетная область состоит из 4 доменов, связанных между собой интерфейсами, с включенной функцией теплопередачи между телами. Для «жидкого объема» задан режим турбулентности *Shear Stress Transport* и режим теплопередачи *Total Energy*, в качестве материала задан идеальный газ. Для твердых тел задан материал *Inkonel 718*. Данный материал выбран для оценки возможности производства с помощью аддитивных технологий (материал является порошковым и производится для 3D-печати) [27–29], к тому же он является аналогом и имеет схожие свойства с материалом, используемым в традиционном производстве ХН62ВМЮТ. На боковых поверхностях «жидкого объема» холодного воздуха поставлено условие *Periodic*

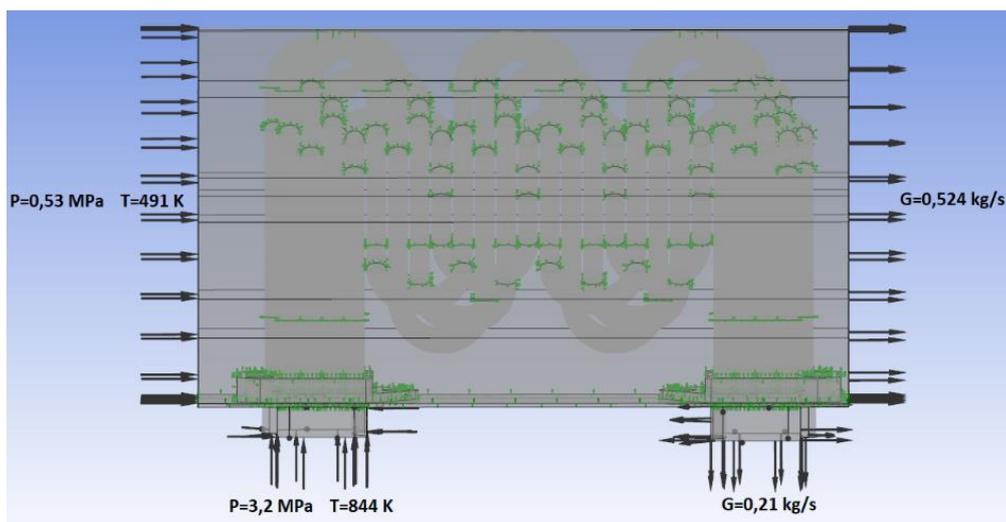


Рис. 4. Расчетная область с граничными условиями.

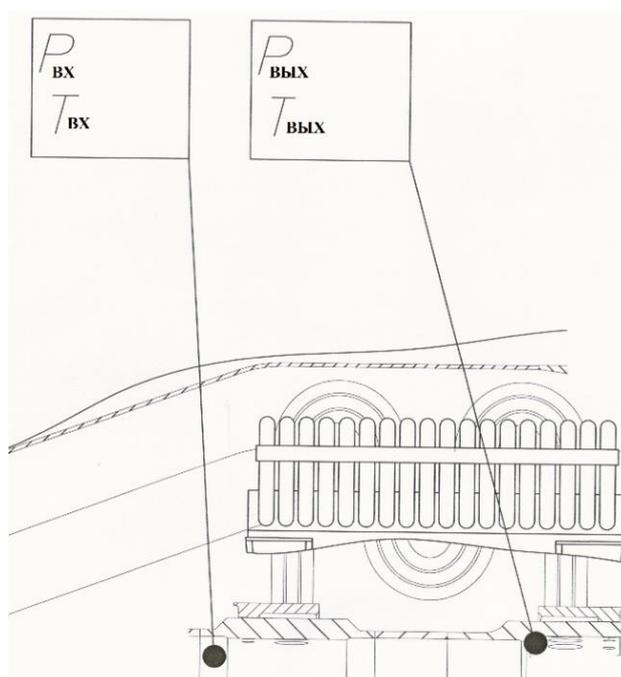


Рис. 5. Схема измерения параметров при стендовых испытаниях.

Для исследования шероховатости внутренней поверхности трубок, проверки на герметичность и отработки технологии печати (подбор режимов печати и геометрических параметров конечного изделия) была спроектирована и произведена конструкция образцов. В качестве образца был выбран участок трубки, который представляет из себя колено (место перегиба). Данный участок был выбран, потому что является самым сложным по геометрии в плане производства аддитивными технологиями: имеется наклонный (нависающий) участок и переход от вертикального к горизонтальному расположению трубки. Конструкция проектировалась с учетом имеющегося опыта печати и ограничений, накладываемых данной технологией. Так, толщина стенки на прямых вертикальных участках трубки была увеличена до 0,5 мм, на горизонтальном участке толщина стенки увеличена до 1 мм, на участке перехода от вертикального до горизонтального участка толщина лежит в пределах от 0,5 мм до 1 мм. В конструкцию также была заложена перегородка для уменьшения числа поддержек и для увеличения жесткости конструкции. Помимо этого, были предусмотрены посадочные места для приваривания штуцеров, необходимых для испытаний на герметичность. На рисунке 6 показана 3D-модель спроектированного образца, а на рисунке 7 – выращенный образец.

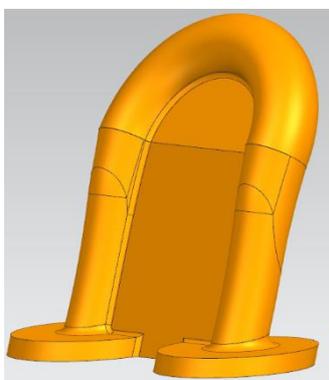


Рис. 6. 3D-модель образца.



Рис. 7. Выращенный образец.

Печать образцов производилась в АО «Центр Аддитивных Технологий», созданном на базе холдинговых корпораций авиационного комплекса ГК «Ростех» в 2018 году как единый интегратор в области аддитивного производства. Для производства использовался принтер *EOS M 290* компании «*Electro Optical Systems*». Данный принтер можно назвать практически универсальным, т.к. он работает с широким ассортиментом металлических порошков, включая:

- алюминий;
- титан;
- инструментальную и нержавеющую сталь;
- никелевые сплавы;

- кобальт-хромовые сплавы.

Для уменьшения гидравлических потерь в условиях работы ТА желательно добиться высокого качества внутренней поверхности трубки, при этом необходимо учитывать влияние шероховатости поверхности на эффективность теплоотдачи.

Для измерения шероховатости использовался трехмерный измерительный лазерный микроскоп *OSL5000* компании «*Olympus*». Он имеет оптические системы двух типов: оптическая система цветного изображения и лазерная конфокальная оптическая система.

Оптическая система цветного изображения позволяет получить цифровое изображение образца с использованием светодиодного источника белого света и датчика изображения *CMOS*. Одновременно возможно получение цветовой информации об образце. Так как глубина фокуса оптической системы цветного изображения больше, чем у лазерной конфокальной оптической системы, оптическая система цветного изображения используется для поиска позиции измерения образца.

Лазерная конфокальная оптическая система позволяет получать конфокальные изображения с помощью полупроводникового лазерного источника света (длина волны – 405 нм) и высокочувствительного спектрального детектора (фотоумножителя). Лазерная конфокальная оптическая система отличается чрезвычайно малой глубиной фокуса, что используется для измерения неровной поверхности образца.

Воздухо-воздушный теплообменный аппарат работает в условиях повышенных температур и давлений. Одной из особенностей изделий, полученных методом селективного лазерного плавления, является вероятность возникновения сквозных пор в тонких участках изделий. В связи с этим необходимым условием оценки применимости новой технологии и конструкции является проверка давлением. Испытания образцов на герметичность проводились на стенде кафедры 202 МАИ. Конструкция стенда включает в себя следующие элементы:

- баллон со сжатым воздухом под давлением 100 атм;
- понижающий редуктор с рабочим диапазоном 0–100 атм;
- пневматическая обвязка стенда;
- манометр с рабочим диапазоном 0–100 атм.

К посадочным местам образца были приварены штуцеры для подключения к системе стенда.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунках 8–13 представлены полученные результаты температуры и скорости потока воздуха внутри трубок для модуля и для одной трубки. По имеющимся экспериментальным данным проведено сравнение данных, полученных при расчете.

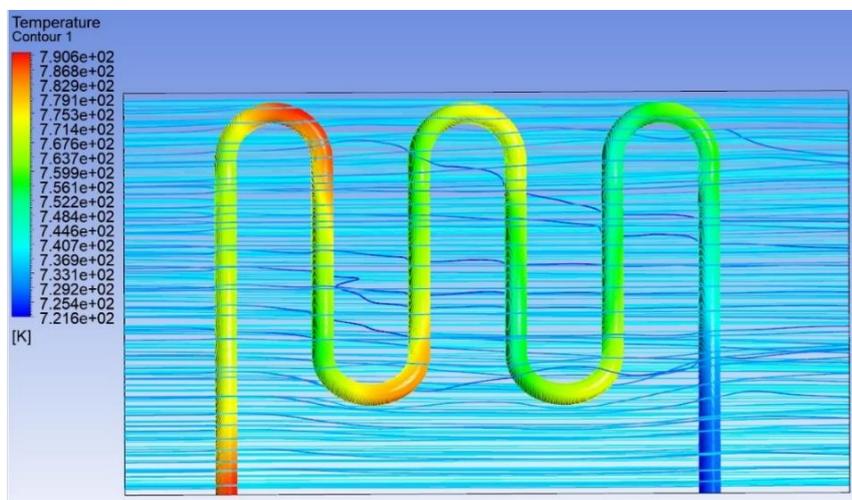


Рис. 8. Температура стенки отдельной трубки (без влияния остальных трубок).

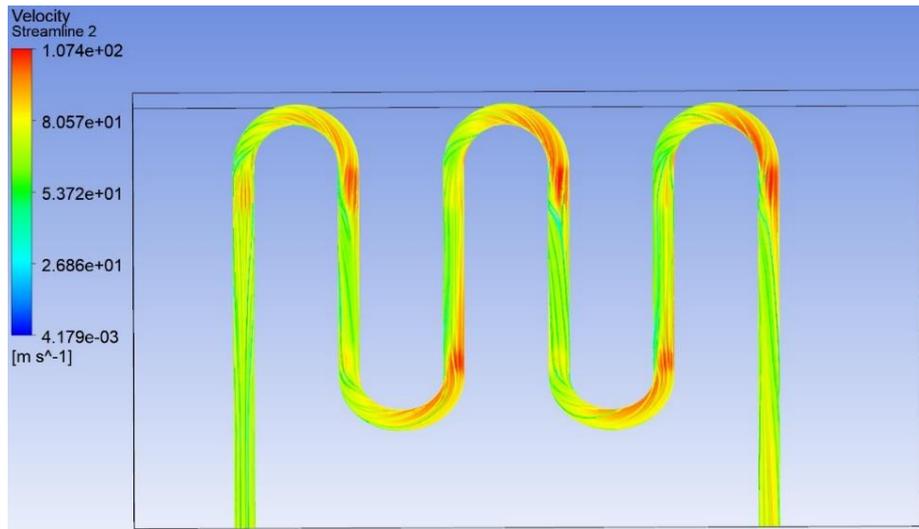


Рис. 9. Течение потока внутри трубки.

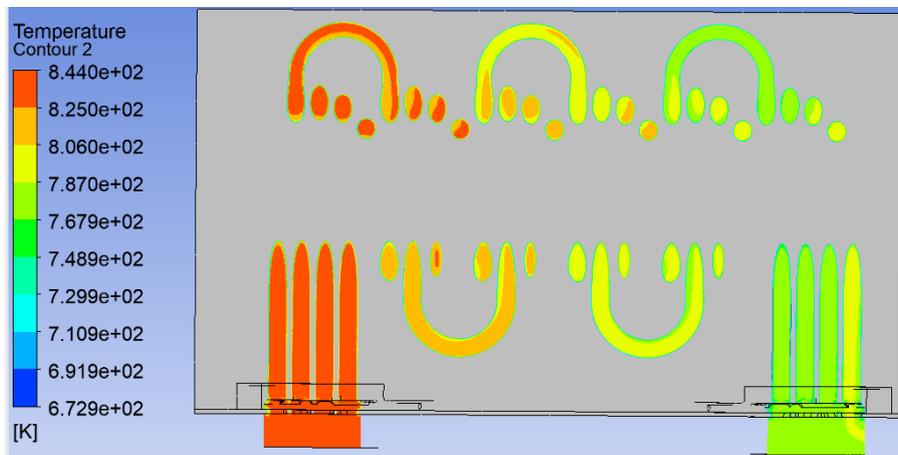


Рис. 10. Температура внутреннего теплоносителя (средний ряд трубок).

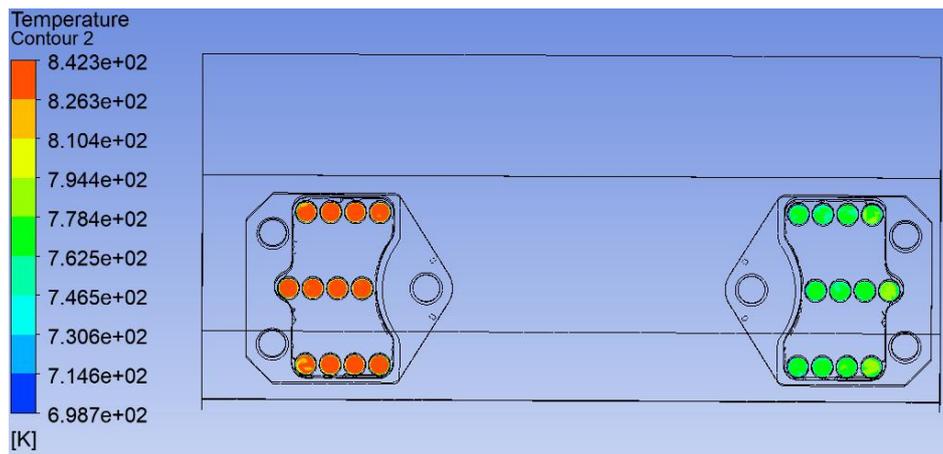


Рис. 11. Температура потока внутри трубок на входе и выходе.

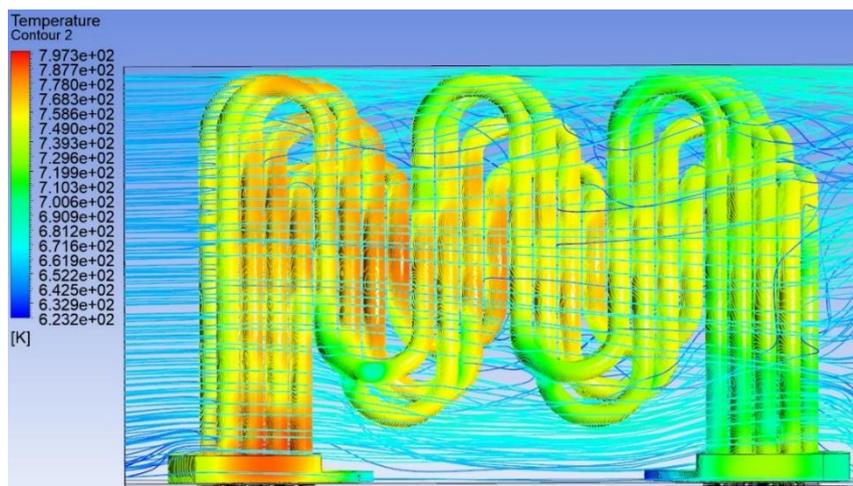


Рис. 12. Температура стенок и обтекающий поток модуля ТА.

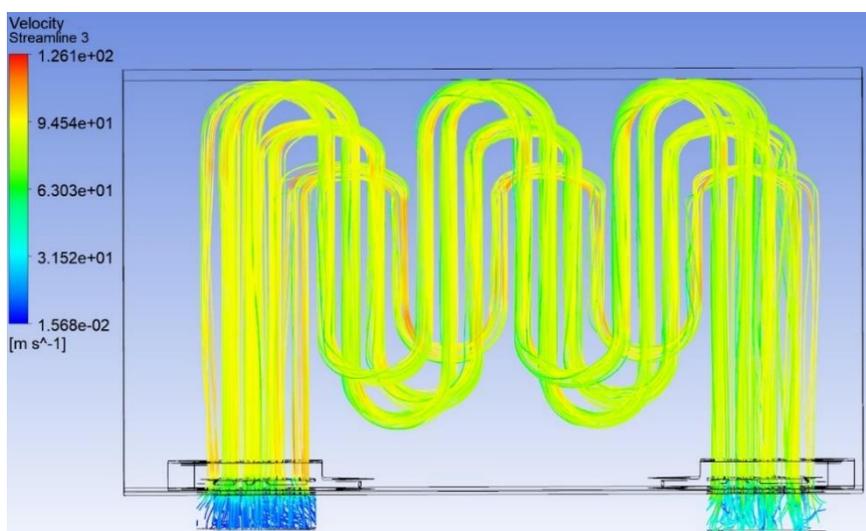


Рис. 13. Течение потока внутри трубок.

Анализируя полученные данные, можно сказать, что воздух внутри ВВТ охлаждается примерно на $75\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также видны места с наибольшими гидравлическими потерями (места поворота потока внутри трубок). Стоит сказать, что в расчет не были включены опорные элементы и проставки, которые участвуют в теплообмене, также не был включен теплообмен между трубками и фланцами, т.е. учитывался теплообмен, происходящий только в трубках.

Измерения на испытаниях показали, что на режиме работы при полном охлаждении (8,1% от расхода горячего воздуха) давление на входе в ТА равно 3,2 МПа, а температура 844 К (эти замеры были взяты как граничные условия для воздуха, проходящего через теплообменник), на выходе из ТА замеры показали температуру, равную 751 К, и давление 3,04 МПа.

Учитывая все вышесказанное, можно считать, что методика математического моделирования работы модуля теплообменника является корректной.

С целью определения внутренней шероховатости выращенный образец был разделен на две части с помощью электроэрозионного станка. Для исследования зависимости шероховатости от угла нависания детали относительно плоскости печати были выбраны три участка, располагающихся под углами 0, 45 и 90 градусов к плоскости печати. Измерения в участках проводились по шести отрезкам, а также было получено трехмерное представление каждого участка (рис. 14). Как видно на рисунке, самое высокое значение шероховатости – на участке 1, это связано с особенностями технологии селективного лазерного сплавления, но, несмотря

на это, среднее значение шероховатости на всех участках удовлетворяет требуемым техническим условиям эксплуатации изделия.

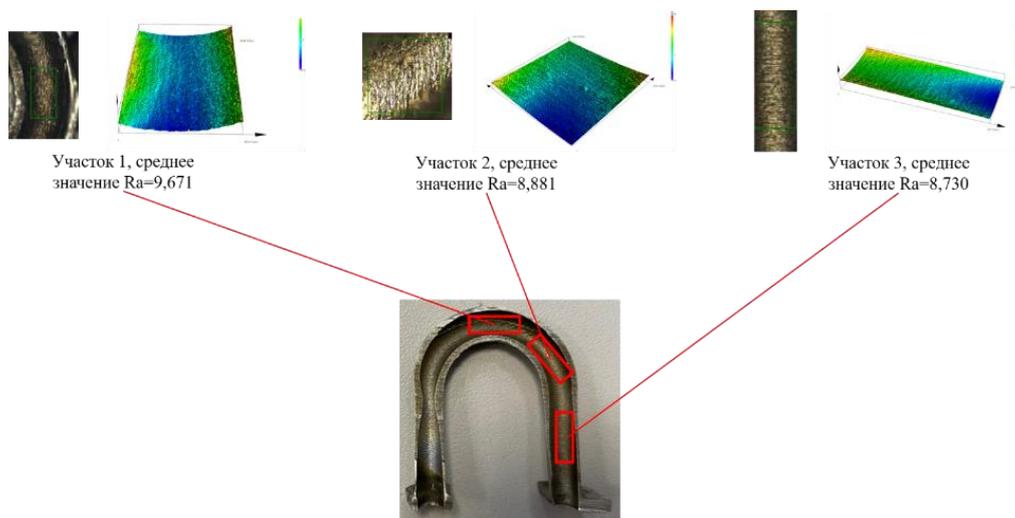


Рис. 14. Исследование шероховатости внутреннего канала образца/

Согласно техническому заданию, изделие должно оставаться герметичным при внутреннем давлении воздуха 40 атм в течение 30 минут. Для опрессовки к посадочным местам образца были приварены входной и выходной штуцеры. Входной штуцер соединен с системой подачи воздуха, состоящей из баллонов со сжатым атмосферным воздухом и редуктором. Выходной штуцер соединен с аналоговым манометром. Герметичность образца проверялась методом обмыливания: перед увеличением давления образец покрыли мыльным раствором, а в ходе эксперимента отслеживали появление мыльных пузырей на поверхности образца.

По результатам опрессовки было установлено, что напечатанный образец соответствует требованиям технического задания по критерию герметичности (рис. 15).



Рис. 15. Образец до и во время испытаний на герметичность

ДИСКУССИЯ

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что используемая методика расчета теплообменника, которую планируется применять в дальнейших работах по модернизации его

конструкции, является достоверной и хорошо коррелирует с методиками, используемыми в других работах [3, 7].

В данной работе не было учтено влияние проставок и опорных элементов на протекание теплообмена в модуле ТА, которое, в свою очередь, может внести изменения в конечные результаты. В дальнейшем планируется произвести расчет с учетом всех элементов конструкции для получения более точного результата. На данный момент подобных расчетов не было проведено, поэтому задача является актуальной.

Так как при модернизации конструкции ТА планируется переход от традиционного производства к производству с использованием аддитивных технологий, то также необходимо учитывать все особенности как самой технологии, так и свойств получаемого изделия. Исходя из этого, в дальнейших работах планируется провести исследование расположения заготовки в камере построения 3D-принтера и спроектировать зону построения, минимизировав использование поддерживающих структур и количество поводок после отделения заготовки от стола построения по методике, ранее используемой на другом объекте [21]. Также планируется провести математическое моделирование процесса печати для выявления напряжений и их компенсации при печати [22]. Говоря о свойствах получаемого изделия, важно учитывать анизотропию теплопроводности аддитивных металлов [23, 24], шероховатость получаемых изделий [25, 26], наличие пор и так далее. На эти параметры влияет режим печати (стратегия сканирования, мощность и скорость лазера, подогрев стола, остывание, термическая обработка и т.д.), и все это необходимо учитывать в методике проектирования ТА. На данный момент подобной методики, включающей все эти параметры, не существует.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты исследования применимости селективного лазерного сплавления в модернизации теплообменника.

По результатам исследования можно сказать, что переход от традиционного производства ТА к производству с применением аддитивных технологий является возможным и целесообразным.

В ходе работы была отработана и верифицирована методика математического моделирования работы модуля теплообменного аппарата, которая в дальнейшем будет использоваться при проектировании конструкции ТА для производства с помощью аддитивных технологий, в том числе с применением СЛС.

Спроектированная и выращенная конструкция образцов показала возможность применения селективного лазерного сплавления для производства авиационного ТА, но требуется разработка новой конструкции теплообменника, которая должна учитывать все ограничения, накладываемые технологией аддитивного производства, при этом появляется возможность проектирования ТА сложной геометрии, которая будет увеличивать эффективность ТА, уменьшать гидравлические потери и, возможно, вес изделия, что особо важно в авиации.

На данный момент начаты работы по проектированию конструкций ТА для производства с применением аддитивных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Глухарев А. С.** Повышение эффективности теплообменных аппаратов за счет оребрения внутритрубного пространства // Молодежный научно-технический вестник. – 2017. – № 1. – С. 10-10. [A.S. Glucharev. "Increasing the efficiency of heat exchangers due to finning of the tube space", (in Russian), in Youth Scientific and Technical Bulletin, no. 1, pp. 10-10, 2017.]
2. **Аронсон К. Э.** и др. Теплообменники энергетических установок. 2015. [K.E. Aronson and others. "Heat exchangers of power plants", (in Russian), 2015.]
3. **Светлаков А. Л.** и др. Развитие методик расчета и проектирования теплообменных аппаратов авиационного назначения //Авиационные двигатели. – 2019. – № 4. – С. 37-44. [A.L. Svetlakov and others. "Развитие методик расчета и проектирования теплообменных аппаратов авиационного назначения", (in Russian), in Aircraft engines, no. 4, pp. 37-44, 2019.]
4. **Магеррамова Л. А.** и др. Перспективы применения аддитивных технологий для создания деталей и узлов авиационных газотурбинных двигателей и прямоточных воздушно-реактивных двигателей //Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – Т. 18. – № 3. – С. 81-98. [L.A. Magerramova and others.

"Prospects for the use of additive technologies for the creation of parts and assemblies for aircraft gas turbine engines and ramjet engines", (in Russian), in Bulletin of the Samara University. Aerospace engineering, technology and mechanical engineering, vol. 18, no. 3, pp. 81-89, 2019.]

5. **Силуянова М. В.**, Попова Т. В. Разработка методики проектирования и расчета теплообменного аппарата для газотурбинных двигателей сложного цикла //Труды МАИ. – 2016. – №. 85. – С. 8-8. [M. V. Siluyanova, T. V. Popova. "Development of a methodology for designing and calculating a heat exchanger for gas turbine engines of a complex cycle", (in Russian), in Trudi MAI, no.85, pp. 8-8, 2016.]

6. **Ремчуков С. С.**, Данилов М. А., Чистов К. А. Автоматизированное проектирование и расчет пластинчатого теплообменника для малоразмерного газотурбинного двигателя //Вестник Московского авиационного института. – 2018. – Т. 25. – №. 3. – С. 116-123. [S. S. Remchukov, M. A. Danilov, K. A. Chistov. "Automated design and calculation of a plate heat exchanger for a small-sized gas turbine engine", (in Russian), in Bulletin of the Moscow Aviation Institute, Vol.25, no.3, pp. 116-123, 2018.]

7. **Нестеренко В. Г.**, Редди А. Р. Воздухо-воздушные теплообменники системы охлаждения ротора турбины высокого давления в современных авиационных турбореактивных двухконтурных двигателях //Инженерный журнал: наука и инновации. – 2018. – №. 11 (83). – С. 7.[V. G. Nesterenko, A. R. Reddy. "Air-to-air heat exchangers of the high-pressure turbine rotor cooling system in modern aircraft turbojet bypass engines", (in Russian), in Engineering Journal: Science and Innovation, no. 11(83), pp. 7, 2018.]

8. **Дадоян Р. Г.** и др. Формирование облика рекуператора для малоразмерного ГТД с регенерацией тепла //Вестник УГАТУ. – 2021. – Т. 25. – №. 1 (91). – С. 22-32. [R.G. Dadoyan and others. "Shaping the appearance of a heat exchanger for a small-sized gas turbine engine with heat recovery", (in Russian), in Vestnik USATU, Vol. 25, no. 1(91), pp. 22-32, 2021.]

9. **Ардатов К. В.**, Нестеренко В. Г., Равикович Ю. А. Классификация высокоэффективных рекуператоров газотурбинных двигателей //Труды МАИ. – 2013. – Т. 71.[K. V. Ardatov, V. G. Nesterenko, Yu. A. Ravikovich. "Classification of high efficiency recuperators of gas turbine engines", (in Russian), in Trudi MAO, vol. 71, 2013.]

10. **Афанасьева И. В.** Классификация перспективных теплообменных элементов с развитой поверхностью // Аддитивные технологии: настоящее и будущее. – 2019. – С. 9-18.[I.V. Afanasieva. "Classification of promising heat exchange elements with a developed surface", (in Russian), in Additive technologies: present and future, pp. 9-18, 2019.]

11. **Виноградов К. А.** и др. Применение инновационных методов проектирования и изготовления деталей ГТД //Аддитивные технологии: настоящее и будущее. – 2017. – С. 3-3. [K.A. Vinogradov and others. "Application of innovative methods for designing and manufacturing GTE parts", (in Russian), in Additive technologies: present and future, pp. 3-3, 2017]

12. **Чумаков Д. М.** Перспективы использования аддитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники //Труды МАИ. – 2014. – №. 78. – С. 31. [D.M. Chumakov. "Prospects for the use of additive technologies in the creation of aviation and rocket and space technology", (in Russian), Trudi MAI, no. 78, pp. 31, 2014.]

13. **Список** проектов программы «High Intensity Thermal Exchange through Materials and Manufacturing Processes» Агентства передовых исследований в области энергетики (ARPA-E). URL: <https://arpa-e.energy.gov/technologies/programs/hitemmp> (дата обращения 15.01.2023)

14. **Cohen J. H.** Development of novel tapered pin fin geometries for additive manufacturing of compact heat exchangers: thesis. – 2016.

15. **Pedrotti V. A.** et al. Thermal analysis of tubular arrangements submitted to external flow using constructal theory //International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2020. – V. 111. – P. 104458.

16. **Moreira R. S. M.** et al. Numerical Study and Geometric Investigation of Corrugated Channels Subjected to Forced Convective Flows //Journal of Applied and Computational Mechanics. – 2021. – V. 7. – №. 2. – P. 727-738.

17. **Zhang T.**, Lu G., Zhai X. Design and experimental investigation of a novel thermal energy storage unit with phase change material //Energy Reports. – 2021. – V. 7. – P. 1818-1827.

18. **Patel H. A.** et al. Comparative Thermal Analysis of Fins //Proceedings of International Conference on Intelligent Manufacturing and Automation: ICIMA 2018. – Springer Singapore, 2019. – P. 195-204.

19. **Dehaj M. S.**, Hajabdollahi H. Fin and tube heat exchanger: constructal thermo-economic optimization //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – V. 173. – P. 121257.

20. **Kumar K.**, Vinay P., Siddhardha R. Thermal and Structural Analysis of Tree Shaped Fin Array //Int. Journal of Engineering Research and Applications. – V. 3.

21. **Агапов А. В.**, Ионов А. В. Применение материалов и методов аддитивных технологий в проектировании и изготовлении элементов газотурбинных двигателей //НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ XXI ВЕКА: РАЗРАБОТКА, ДИАГНОСТИКА, ИСПОЛЬЗОВАНИЕ. – 2020. – С. 6-17. [A. V. Agapov, A. V. Ionov. "Application of materials and methods of additive technologies in the design and manufacture of elements of gas turbine engines", (in Russian), EW MATERIALS OF THE XXI CENTURY: DEVELOPMENT, DIAGNOSIS, USE, pp. 6-17, 2020.]

22. **Турас-УранQUI Н.**, Armani A. Additive manufacturing of functional Inconel 718 parts from recycled materials //Journal of Materials Engineering and Performance. – 2021. – V. 30. – P. 1177-1187.

23. **Киселёв В. П.** и др. Анизотропия теплопроводности аддитивных металлов, полученных методом селективного лазерного сплавления на примере нержавеющей стали CL 20ES //Тепловые процессы в технике. – 2021. – Т. 13. – №. 7. – С. 329-335. [V. P. Kiselev. And others. "Thermal Conductivity Anisotropy of Additive Metals Obtained by Selective Laser Fusion Using Stainless Steel as an Example CL 20ES", (in Russian), Thermal processes in technology. Vol. 13, no. 7, pp. 329-335, 2021.]

24. **Kim S. E.** et al. Extremely anisotropic van der Waals thermal conductors //Nature. – 2021. – V. 597. – №. 7878. – P. 660-

665.

25. **Guo L.**, Xu H., Gong L. Influence of wall roughness models on fluid flow and heat transfer in microchannels //Applied Thermal Engineering. – 2015. – V. 84. – P. 399-408.
26. **Chen Z.** et al. Effect of roughness on water flow through a synthetic single rough fracture //Environmental Earth Sciences. – 2017. – V. 76. – P. 1-17.
27. **Jia Q.**, Gu D. Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties //Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – V. 585. – P. 713-721.
28. **Caiazza F.** et al. Mechanical properties of Inconel 718 in additive manufacturing via selective laser melting: An investigation on possible anisotropy of tensile strength //2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI). – IEEE, 2017. – P. 1-4.
29. **Zhao X.** et al. Study on microstructure and mechanical properties of laser rapid forming Inconel 718 //Materials Science and Engineering: A. – 2008. – V. 478. – №. 1-2. – P. 119-124.

ОБ АВТОРАХ

АГАПОВ Андрей Владимирович, асп. каф. 205 МАИ «Технология производства двигателей летательных аппаратов». Дипл. инженер-технолог (МАИ, 2020 г.). Готовит дис. на тему «Влияние технологических параметров процесса лазерного селективного спекания на эффективность и конструктивное совершенство трубчатых теплообменных аппаратов».

ИОНОВ Алексей Владимирович, доцент каф. 205 МАИ «Технология производства двигателей летательных аппаратов». Дипл. инженер технолог (МАИ, 2009 г.). К.т.н. по управлению технологической подготовкой производства. Иссл. в обл. применения аддитивных технологий при производстве авиационных двигателей.

СТАРОДУМОВ Андрей Владимирович, Старший преподаватель каф. 203 МАИ «Конструкция и проектирование двигателей», дипл. инженер-механик ЖРД (МАИ, 2000 г.), начальник расчетно-исследовательского управления ОКБ им. А. Льюки. Иссл. в обл. тепломассобмена, газовой динамики, гидравлики, инженерного анализа, современных цифровых технологий.

METADATA

Title: The use of selective laser fusion in the modernization and production of a tubular air-to-air heat exchanger.

Authors: A. V. Agapov¹, A. V. Ionov¹, A. V. Starodumov¹

Affiliation:

¹ Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI), Moscow, Russia.

Email: ¹ agapov_andrey@icloud.com, ¹ woln@mail.ru, andrey-star.work@yandex.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 27, no. 1 (99), pp. 116-129, 2023. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print)

Abstract: The paper investigates the possibility of transition from the traditional production of an aviation tubular heat exchanger to production using additive technologies. The results of the calculation of conjugate heat exchange during gas flow in the heat exchanger tubes in the Ansys CFX software package are presented, the design of test samples is developed taking into account the use of additive technologies. The roughness of the inner surface was measured on the produced samples and crimping was carried out to detect leaks. Based on the results of the work carried out, it can be concluded that it is advisable to switch from traditional production to production using additive technologies.

Key words: Heat exchanger, air-to-air heat exchanger, tubular heat exchanger, additive technologies, selective laser melting, mathematical modeling.

About authors:

АГАПОВ, Андрей Владимирович, Postgrad. student, Department 205 of Moscow Aviation Institute “Technology of Aircraft Engine Production”. Dipl. engineer-technologist (Moscow Aviation Institute, 2020). Prepares a thesis entitled “Effect of the process parameters of selective laser fusion on the efficiency and design perfection of tubular heat exchangers”.

ИОНОВ, Алексей Владимирович, Associate Professor, Department 205 of Moscow Aviation Institute “Technology of Aircraft Engine Production”. Dipl. engineer-technologist (Moscow Aviation Institute, 2009). Candidate of Tech. Sci. (Moscow Aviation Institute, 2014). Studies in the area of the application of additive technologies in the manufacture of aircraft engines.

СТАРОДУМОВ, Андрей Владимирович, Senior Lecturer, Department 203 of Moscow Aviation Institute “Design and engineering of engines”. Dipl. Mechanical engineer of the LRE (Moscow Aviation Institute, 2000). Head of the Calculation and Research Office of the Experimental Design Bureau named after A. Lyulka. Studies in the area of heat and mass exchange, gas dynamics, hydraulics, engineering analysis, modern digital technologies.