

Методика изготовления пластинчатого теплообменника для малоразмерного газотурбинного двигателя с регенерацией тепла

Ремчуков С.С., Лебединский Р.Н.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

e-mail: ssremchukov@ciam.ru

Разработана методика изготовления пластинчатых теплообменников для малоразмерных газотурбинных двигателей и установок с регенерацией тепла. Изготовление высокотемпературного теплообменника осуществляется с применением лазерных технологий на маломощном станке с числовым программным управлением. Сформирован перечень технологической оснастки, необходимой для изготовления теплообменника по предлагаемой методике. Проведена апробация методики при создании экспериментального теплообменника для наземной малоразмерной газотурбинной установки с регенерацией тепла. Методика запатентована.

Ключевые слова: малоразмерный газотурбинный двигатель, пластинчатый теплообменник, лазерная сварка

Method of manufacturing a plate heat exchanger for a small-size gas turbine engine with heat recovery

Remchukov S.S., Lebedinskii R.N.

CIAM, Moscow

A method of manufacturing plate heat exchangers for small-size gas turbine engines and gas turbine plants with heat recovery has been developed. Manufacturing of a high-temperature heat exchanger is carried out using laser technologies on a low-power machine with numerical control. A list of technological equipment necessary for the manufacture of a heat exchanger according to the proposed methodology has been compiled. The methodology was tested during creation of an experimental heat exchanger for a ground-based small-size gas turbine powerplant with heat recovery. The methodology is patented.

Keywords: small-size gas turbine engine, plate heat exchanger, laser welding

Введение

Теплообменные аппараты, в которых один или оба теплоносителя являются газами, находят широкое применение в различных областях техники. Так, для большинства тепловых машин, и в частности малоразмерных газотурбинных двигателей (МГТД) и установок (МГТУ), при регенерации тепла отработавших газов может быть достигнуто существенное повышение экономичности [1; 2]. Этот эффект практически достижим только при наличии малогабаритных и легких теплообменников. При создании таких теплообменников необходимо обеспечить небольшие гидравлические сопротивления и высокую тепловую эффективность в сочетании с простотой конст-

рукции, ее прочностью, надежностью, достаточным ресурсом, дешевизной и технологичностью. Высокий уровень теплового и гидравлического совершенства теплообменника достигается путем применения методов проектирования и расчета, позволяющих определить оптимальную геометрию теплообменной поверхности [3; 4]. Однако применение теплообменников в газотурбинной технике существенно ограничено по причинам экономического и технологического характера.

Изготовление пластинчатых теплообменников для МГТД и МГТУ с регенерацией тепла – сложный процесс, предполагающий работу с тонкостенными и разнотолщинными элементами. Поэтому при создании теплообменника важнейшее значение приобретает техноло-

гическая проработка конструкции. Для обеспечения сохранения жаропрочности сплава и исключения возможности появления трещин необходимо тщательно подбирать режимы сварки, назначать последующую термообработку, а также в случае необходимости правильно подбирать присадочный материал. Таким образом, благодаря выбору рациональной технологии изготовления достигается прочность и герметичность конструкции в условиях работы высокотемпературных теплообменников.

Анализ условий работы теплообменников МГТД и МГТУ с регенерацией тепла

В МГТД и МГТУ сложного цикла теплообменник системы регенерации тепла работает в условиях высоких температур, давлений и их перепадов. Особенно усложняет условия работы термоцикличность. Перед разработкой способа изготовления был выполнен анализ условий работы таких высокотемпературных теплообменников и сформированы требования к ним:

- работа в условиях высоких температур (до 1000°C и выше), что достигается применением жаропрочных сплавов для изготовления пластин и корпусных деталей теплообменника. В качестве таких материалов можно рассматривать хромоникелевые сплавы 20Х23Н18 или ХН45Ю, позволяющие теплообменнику длительно функционировать в диапазоне рабочих температур до 1250°C [5];

- обеспечение устойчивой работы при высоких давлениях, что может быть достигнуто рациональным выбором силовой схемы теплообменника. Ввиду движения по каналам горячего теплоносителя с низким давлением и холодного с высоким образуется существенный перепад, и конструктивная схема теплообменника должна быть выбрана такой, чтобы обеспечить жесткость и прочность в всех узлах и деталей, от пластин матрицы до корпусных элементов;

- абсолютная герметичность, т.е. отсутствие протекания теплоносителей между холодным и горячим контурами, а также в окружающую среду;

- минимально возможная масса теплообменника, что достигается минимизацией в пределах допустимых значений толщины листа для изготовления пластин,

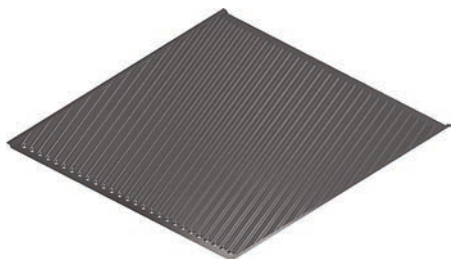


Рис. 1. Трехмерная модель пластины теплообменника

а также оптимизацией геометрии теплообменной поверхности;

- конструкция теплообменника на стадии разработки должна быть ориентирована на технологичность изготовления, применение известных, наиболее рациональных для каждого этапа производства технологий, что позволит сократить материальные и временные затраты на создание конечного изделия.

Методика изготовления высокотемпературного теплообменника

Методика изготовления разработана для пластинчатых теплообменников МГТД и МГТУ с регенерацией тепла с геометрией теплообменной поверхности типа «набивки Френкеля» [6; 7]. Геометрия рассматриваемой теплообменной поверхности пластины, представленной на рис. 1, получена с использованием комплексной методики автоматизированного проектирования и расчета и оптимизирована для параметров наземной МГТУ мощностью до 4 кВт [8].

Предлагаемая методика изготовления запатентована и представляет собой совокупность этапов, на каждом из которых производится определенная технологическая операция [9].

Этап № 1. Изготовление пластин теплообменника. На этом этапе необходимо получить базовые элементы теплообменника – пластины. Способ получения пластин должен обеспечивать максимально возможную повторяемость, не допускать появления дефектов и значительных остаточных напряжений [10]. В качестве технологии изготовления пластин теплообменника выбрана холодная листовая штамповка [11].

После выполнения холодной листовой штамповки сложная геометрия теплообменной поверхности в дальнейшем не подвергается изменению. Поэтому для получения качественных пластин высокие требования предъявляются к заготовкам и контактным поверхностям матрицы и пуансона штампа [12]. При выполнении операций по штамповке также важна чистота производства. Попадание твердых посторонних частиц в область штамповки не допускается. Заготовки для штампового производства пластин выполняются из листовой жаропрочной стали толщиной 0,2 мм методом лазерной резки на маломощной установке с числовым программным управлением. Предлагаемая технология позволяет добиться высокого качества реза благодаря малому тепловыделению и высокоточному позиционированию. Толщина пластины выбирается минимально допустимой, исходя из технологических сложностей работы с тонкими листовыми деталями.

Важной особенностью предлагаемой методики является то, что заготовки для пластин вырезаются

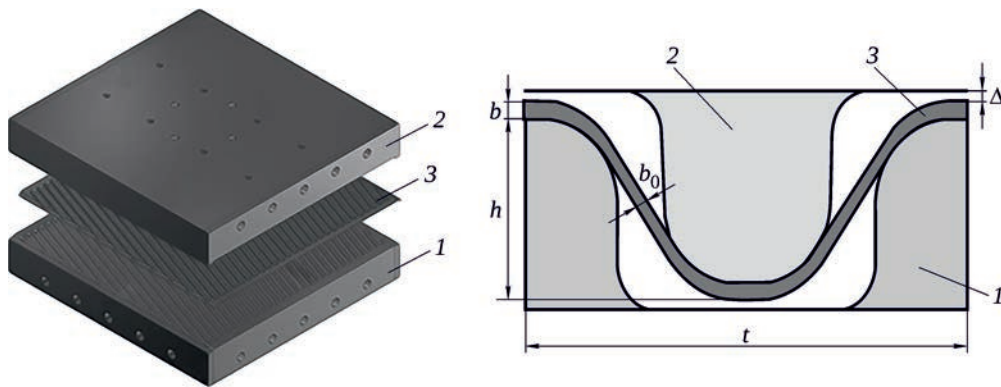


Рис. 2. Формообразующие элементы штампа для изготовления пластин теплообменника и их геометрия:
 1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – пластина; t – шаг выступов формообразующих; h – глубина штамповки;
 b – толщина листа; b_0 – минимальная толщина листа; Δ – технологический зазор

увеличенного размера. Добавление к размеру заготовок по 2,5...5 мм с каждой стороны позволяет сконцентрировать геометрические дефекты, вызванные физическими особенностями технологии листовой штамповки, на периферии пластины, а затем обрезать края вместе с дефектами.

Метод листовой штамповки подразумевает формирование требуемой геометрии теплообменной поверхности пластины путем необратимого пластического деформирования заготовки. Изготовление отдельных пластин производится специальным штампом со сложной геометрией рабочей поверхности (рис. 2).

Изготовление пластин методом холодной листовой штамповки имеет ограничения по глубине штамповки (h). Вследствие ограничений по прочности жаропрочных сталей получение качественной поверхности без локальных дефектов возможно при формообразовании пластин высотой ($h + b$) до 2 мм.

При проектировании формообразующих элементов также закладываются технологические ограничения. Для того, чтобы исключить деформацию листа при полном смыкании штампа, предлагается предусмотреть при проектировании технологический зазор (Δ). Величина технологического зазора в случае тонкостенной заготовки может быть рекомендована в половину тол-

щины листа ($0,5b$), что соответствует примерно 0,1 мм. Следует отметить, что увеличение технологического зазора до больших значений не окажет негативного влияния на конструкцию, но может быть использовано при доработке штампа в случае необходимости увеличения глубины штамповки.

Ввиду того, что процесс холодной листовой штамповки предусматривает не только формообразование, но и вытяжку листа, следует учитывать, что его толщина будет локально уменьшаться. Результатом такого процесса станет увеличение площади поверхности листовой заготовки.

Важной особенностью технологического процесса листовой штамповки является частичное сохранение упругой деформации материала пластин наряду с пластической деформацией. Это обстоятельство приводит к тому, что фактическая глубина штамповки пластин получается несколько меньше закладываемой при проектировании штампа.

Этап № 2. Выравнивание входных каналов. В процессе холодной листовой штамповки, в связи с особенностями геометрии теплообменной поверхности, возникают деформации в виде волнообразных дефектов кромок пластин, приводящие к отклонению пластины от перпендикулярности сторон по периметру и к изме-

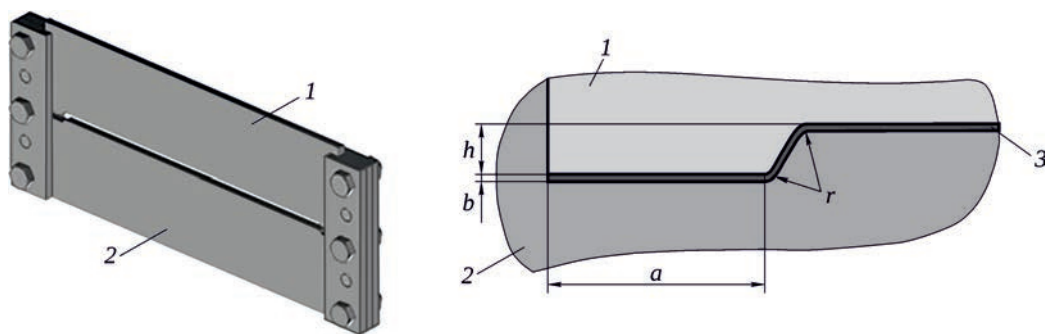


Рис. 3. Приспособление для выравнивания входных каналов пластин и его геометрия:
 1 – верхняя формообразующая; 2 – нижняя формообразующая; 3 – пластина;
 h – глубина штамповки; b – толщина листа; a – ширина сварочной полки; r – радиусы гибки

нению габаритных размеров пластины на расстоянии до 2...2,5 мм от ее края, причем с увеличением глубины штамповки степень деформации может увеличиваться. В то же время для выполнения надежного соединения пластин в конверты, а затем и конвертов в матрицу необходимо обеспечить максимальную повторяемость подводящих и отводящих каналов. Это достигается посредством дополнительной технологической операции – выравнивания подводящих и отводящих каналов с применением специального приспособления (рис. 3).

Приспособление проектируется таким образом, чтобы формообразующие 1 и 2 максимально приближенно облегли подводящие и отводящие каналы пластины 3. Предлагаемый этап направлен только на доводку уже сформированных на предыдущем этапе каналов, что позволяет устранить волнообразные деформации краевых зон пластин, избегая существенных пластических деформаций и исключая закусывание пластины приспособлением.

Этап № 3. Подрезка пластин в единый габаритный размер. При резке заготовок для пластин закладывается размер несколько больше размера пластины, что позволяет сконцентрировать геометрические дефекты штамповки, связанные со стягиванием материала по направлению к зоне наибольшей пластической деформации, на краях пластины, а затем обрезать дефектные места (рис. 4).

Ввиду требований высокой точности и чистоты кромок обрезку целесообразно проводить на малоомощной лазерной установке с числовым программным управлением. Для позиционирования пластин при выполнении рассматриваемого этапа в качестве стапеля может применяться формообразующий элемент штампа – матрица. Точное позиционирование пластин по геометрии матрицы существенно упрощает наладочные работы и сокращает временные затраты на установку обрабатываемых пластин.

Таким образом, после выполнения этапа достигается максимальная повторяемость геометрических разме-

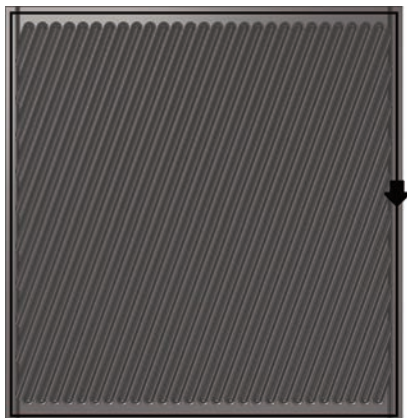


Рис. 4. Схема обрезки пластин в единый габаритный размер

ров отдельных пластин, что существенно упрощает работу на следующих этапах.

Этап № 4. Соединение пластин в конверт. Сформированные на этапах № 1–3 пластины, идентичные по геометрическим размерам, должны быть соединены попарно в конверты. Неразъемное соединение пластин в конвертах традиционно получают сваркой (микроплазменной, роликовой, лазерной) или пайкой.

В производстве низкотемпературных пластинчатых теплообменников чаще всего используют пайку. К ее достоинствам следует отнести слабое влияние технологического процесса на структуру и состав конструкционного материала, из которого изготовлены соединяемые детали. Также пайка не ухудшает механических свойств материала, а после обработки образуются меньшие остаточные напряжения, чем при сварке [13]. Применение пайки при изготовлении высокотемпературных теплообменников, к числу которых относятся теплообменные аппараты системы регенерации тепла МГТД и МГТУ сложного цикла, нецелесообразно ввиду низких термических и механических прочностных характеристик получаемого соединения.

В МГТД и МГТУ рабочие температуры могут достигать 1000°C и выше, поэтому наиболее подходящим способом соединения является сварка. Для рационального выбора способа сварки были проведены экспериментальные исследования, посвященные изготовлению высокотемпературных теплообменников методами микроплазменной и роликовой шовной сварки, что позволило выявить основные трудности, характерные для технологического процесса сварки жаропрочных сплавов. Анализ результатов проведенных исследований показал, что работы по соединению тонкостенных деталей с высокими требованиями по герметичности необходимо проводить на установке малой мощности, чтобы, во-первых, исключить возможность прожигания, а во-вторых, снизить потребность в теплоотводе из зоны сварки [14]. Благодаря малому тепловыделению также уменьшаются остаточные термические напряжения в зоне сварного соединения. По результатам проведенных экспериментальных исследований установлено, что наиболее подходящим способом соединения тонких пластин и разнотолщинных деталей при изготовлении высокотемпературных теплообменников является лазерная сварка [15].

Лазерная сварка пластин теплообменника в конверты осуществляется по подготовленным выровненным полкам. Во время проведения лазерной сварки соединяемые кромки должны максимально плотно прилегать друг к другу, в противном случае возникает необходимость применения присадочного материала, что усложняет технологический процесс. Достигается это с помощью специально спроектированного прижим-

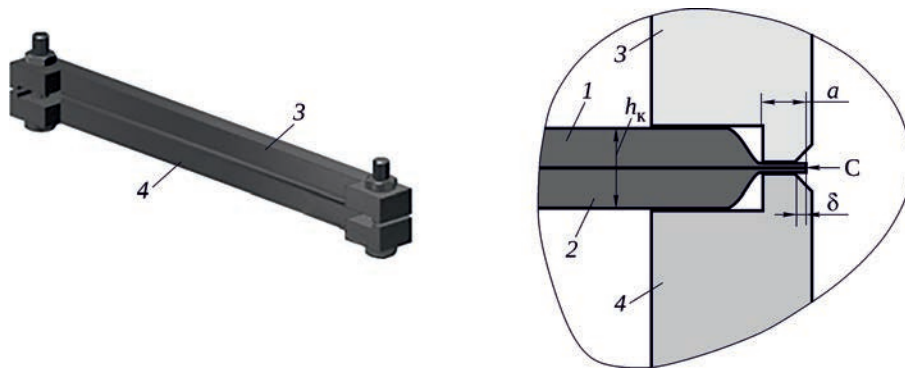


Рис. 5. Приспособление для обжима свариваемых пластин и его геометрия:
1, 2 – свариваемые в конверт пластины; 3 – верхний элемент приспособления; 4 – нижний элемент приспособления;
С – сварной шов; h_k – высота конверта; a – ширина сварочной полки; δ – выступ полки

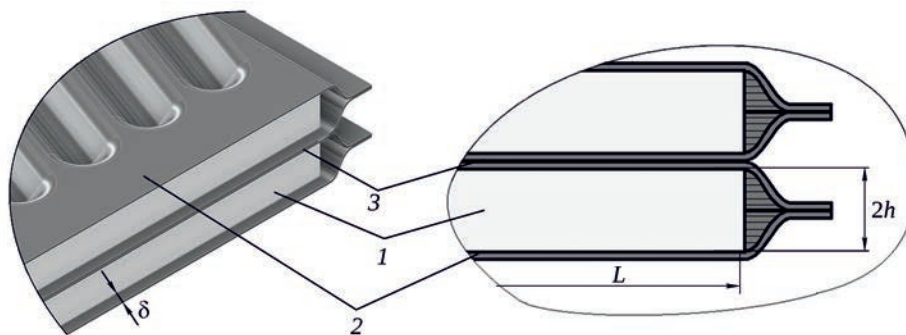


Рис. 6. Технологические вставки для сварки конвертов и их геометрия:
1 – вставка; 2 – конверт теплообменника; 3 – сварной шов; L – длина прямолинейного участка входного канала пластины; $2h$ – высота вставки; δ – технологический выступ

ного приспособления (рис. 5). Оно фиксирует пластины 1 и 2 по высоте конверта (h_k). При выполнении лазерной сварки встык формируется сварной шов. Технологический выступ (δ), значение которого принимается не менее 1 мм, входит в общую длину полки (a) и позволяет избежать прихватывания конверта к приспособлению. Защита от приваривания приспособления к конверту также обеспечивается отводом теплоты из зоны сварки: в качестве материала при изготовлении приспособления применяется алюминий, имеющий большую степень рассеивания тепла. Приспособление состоит из верхнего 3 и нижнего 4 элементов, которые стягиваются при помощи резьбового соединения. Такая конструкция позволяет достичь требуемого усилия сжатия пластин.

Этап № 5. Изготовление теплообменной матрицы.

На данном этапе производится соединение конвертов в матрицу теплообменника. Здесь также целесообразно применять технологию лазерной сварки с использованием специальной оснастки, обеспечивающей прилегание кромок конвертов, подвергающихся воздействию излучения. Для реализации рассматриваемого этапа применяются специальные вставки (рис. 6). Вставка 1 представляет собой металлическую пластину, длина которой (L) соответствует прямолинейному участку

подводящего канала пластины, а высота равна удвоенной глубине штамповки ($2h$). Вставка 1 обеспечивает жесткую фиксацию подводящего канала по ширине и высоте, а также служит формообразующей для кромки конверта 2, благодаря чему два свариваемых конверта максимально плотно прилегают друг к другу. По полученной ровной кромке и выполняется лазерная сварка встык 3. Важно, что технологическая вставка должна размещаться внутри конверта на расстоянии $\delta = 1 \dots 2$ мм от свариваемой кромки, что исключает приваривание вставки к конверту.

Полученная матрица теплообменника далее соединяется с корпусными деталями, позволяющими подключить теплообменник к двигателю или экспериментальной установке. На данном этапе специальная оснастка не требуется.

Изготовление экспериментального теплообменника

По разработанной методике в ЦИАМ был изготовлен комплект технологической оснастки и экспериментальный теплообменник с геометрией теплообменной поверхности типа «набивки Френкеля», представленный на рис. 7.



Рис. 7. Экспериментальный теплообменник, изготовленный по предлагаемой методике с применением лазерных технологий

Экспериментальный теплообменник разработан для наземной МГТУ с регенерацией тепла мощностью до 4 кВт. Теплообменник прошел комплексные испытания на стенде, по результатам которых были получены теплогидравлические характеристики теплообменной поверхности, а также подтверждена прочность и герметичность сварных соединений. Оценка остаточных термических напряжений в зоне сварных соединений в рамках исследования не проводилась. В процессе испытаний осуществлялась продувка теплообменника холодным и горячим потоками воздуха по соответствующим контурам. Испытания показали близкую схожимость расчетных и экспериментальных теплогидравлических характеристик.

Литература

1. Тихонов А.М. Регенерация тепла в авиационных ГТД. М. : Машиностроение, 1977. 108 с.
2. Формирование облика рекуператора для малоразмерного ГТД с регенерацией тепла / Р.Г. Дадоян, А.Е. Михайлов, Д.А. Ахмедзянов, А.Б. Михайлова // Вестник УГАТУ. 2021. Т. 25, № 1 (91). С. 22–32.
3. Развитие методик расчета и проектирования теплообменных аппаратов авиационного назначения / Светлаков А.Л., Вербанов И.С., Маслова Д.В., Гулимовский И.А., Шлякотин В.Е. // Авиационные двигатели. 2019. № 4 (5). С. 37–44.
4. Омар Х.Х.О., Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю. Повышение эффективности авиационных турбовальных газотурбинных двигателей за счет утилизации тепла // Вестник УГАТУ. 2020. Т. 24, № 3 (89). С. 83–89.
5. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы : справочник / А.П. Шлямнев и др. ; Центр. науч.-исслед. ин-т чер. металлургии им. И.П. Бардина, Некоммер. партнерство «Спецметаллы». М. : Интернет Инжиниринг, 2000. 232 с.
6. Савостин А.Ф., Тихонов А.М. Исследование характеристик пластинчатых поверхностей теплообмена // Теплоэнергетика. 1970. № 9. С. 75–78.
7. Пластинчатый рекуператор с поверхностями теплообмена типа Френкеля : патент на полезную модель RU 125321 U1 / Ардатов К.В., Нестеренко В.Г., Равикович Ю.А. ; патентообладатель Моск. авиац. ин-т (нац. исслед. ун-т). Заявка № 2012138051/06, 05.09.2012 ; опубл. 27.02.2013, Бюл. № 6.
8. Remchukov S.S., Lepeshkin A.R., Yaroslavtsev N.L. Automated design, calculation and production of plate heat exchangers for complex cycle gas turbine plants // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). Vol. 1683, iss. 4. Art. 042064. 4 p. DOI 10.1088/1742-6596/1683/4/042064.
9. Способ изготовления пластинчатого теплообменника : патент на изобретение RU 2762237 C1 / Ремчуков С.С., Ломазов В.С., Осипов И.В., Лебединский Р.Н ; патентообладатель Центр. ин-т авиац. моторостроения им. П.И. Баранова. Заявка № 2021103779, 16.02.2021 ; опубл. 16.12.2021, Бюл. № 35.
10. Бутузов Е.А. Специальные виды штамповки. М. : Высшая школа, 1963. 206 с.

Заключение

В рамках проведенной работы сформированы требования к современным пластинчатым теплообменникам применительно к условиям работы в составе МГТД и МГТУ с регенерацией тепла. Проведен поэтапный анализ технологии изготовления пластинчатых теплообменников МГТД. Выбраны наиболее рациональные технологии выполнения этапов создания теплообменника. Проведены экспериментальные исследования способов соединения тонкостенных и разнотолщинных деталей, позволившие выявить основные трудности, возникающие при сварке жаропрочных сплавов. Сформированы требования к способу сварки.

Разработана и запатентована методика изготовления теплообменников для МГТД и МГТУ с регенерацией тепла с применением лазерных технологий.

По разработанной методике изготовлен экспериментальный пластинчатый теплообменник для наземной МГТУ с регенерацией тепла. Теплообменник прошел комплексные испытания, по результатам которых подтверждена прочность и герметичность сварных швов его конструкции.

Разработанная методика может использоваться при создании опытных и серийных высокотемпературных теплообменников на предприятиях аэрокосмической и энергетической отрасли.

-
11. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. Изд. 3-е, перераб. и доп. Л. : Машиностроение, Ленингр. отделение, 1980. 432 с.
 12. Проектирование штампов для холодной листовой штамповки на основе компьютерных прототипов / Рыбаков А.В., Пичугин В.И., Краснов А.А., Евдокимов С.А. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2008. № 6. С. 16–21.
 13. Краснопевцев А.Ю. Отличия, преимущества и недостатки пайки по сравнению со сваркой // Сварочное производство. 2020. № 8. С. 39–45.
 14. Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. Теория свариваемости сталей и сплавов / под ред. Э.Л. Макарова. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 487 с.
 15. Ремчуков С.С., Лебединский Р.Н. Особенности применения лазерных технологий в процессе создания пластинчатых теплообменников для малоразмерных газотурбинных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27, № 2. С. 90–98.

References

1. Tikhonov A.M. Regeneratsiia tepla v aviatsionnykh GTD [Heat recovery in aviation gas turbine engines]. Moscow: Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 1977. 108 p.
2. Dadoian R.G., Mikhailov A.E., Akhmedzianov D.A., Mikhailova A.B. Formirovanie oblika rekuperatora dlia malorazmernogo GTD s regeneratsiei tepla [Small gas turbine engine with heat regeneration]. Vestnik UGATU [Vestnik of Ufa State Aviation Technical University]. 2021. Vol. 24, no. 1 (91). P. 22–32.
3. Svetlakov A.L., Verbanov I.S., Maslova D.V., Gulimovskii I.A., Shliakotin V.E. Razvitie metodik rascheta i proektirovaniia teploobmennyykh apparatov aviatsionnogo naznacheniia [Development of calculation and design methods for aviation heat exchangers]. Aviation Engines. 2019. No. 4 (5). P. 37–44.
4. Omar Kh.Kh.O., Kuz'michev V.S., Tkachenko A.Iu. Povyshenie effektivnosti aviatsionnykh turboval'nykh gazoturbinykh dvigatelei za schet utilizatsii tepla [Improving the efficiency of aviation turboshaft gas turbine engine by using heat recovery]. Vestnik UGATU [Vestnik of Ufa State Aviation Technical University]. 2020. Vol. 24, no. 3 (89). P. 83–89.
5. Shliamnev A.P. et al. Korrozionnostoikie, zharostoikie i vysokoprochnye stali i splavy: spravochnik [Corrosion-resistant, heat-resistant and high-strength steels and alloys: handbook]. I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy. Non-profit Partnership "Special Metals". Moscow: Internet Engineering, 2000. 232 p.
6. Savostin A.F., Tikhonov A.M. Issledovanie kharakteristik plastinchatykh poverkhnostei teploobmena [Investigation of the characteristics of plate heat transfer surfaces]. Teploenergetika [Thermal power engineering]. 1970. No. 9. P. 75–78.
7. Ardatov K.V., Nesterenko V.G., Ravikovich Iu.A. Plastinchatyi rekuperator s poverkhnostiami teploobmena tipa Frenkelia: patent na poleznuiu model' RU 125321 U1 [Plate heat exchanger with Frenkel-type heat exchange surfaces: utility model patent RU 125321 U1]. Patent holder – Moscow Aviation Institute (National Research University). Application No. 2012138051/06, 09/05/2012; published on 02/27/2013, Bulletin no. 6.
8. Remchukov S.S., Lepeshkin A.R., Yaroslavtsev N.L. Automated design, calculation and production of plate heat exchangers for complex cycle gas turbine plants // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). Vol. 1683, iss. 4. Art. 042064. 4 p. DOI 10.1088/1742-6596/1683/4/042064.
9. Remchukov S.S., Lomazov V.S., Osipov I.V., Lebedinskii R.N. Sposob izgotovleniia plastinchatogo teploobmennika: patent na izobrenenie RU 2762237 S1 [Method of manufacturing a plate heat exchanger: patent for invention RU 2762237 C1]. Patent holder – Central Institute of Aviation Motors. Application no. 2021103779, 16.02.2021; published on 16.12.2021. Bulletin no. 35.
10. Butuzov E.A. Spetsial'nye vidy shtampovki [Special types of stamping]. Moscow: Vysshiaia shkola [Higher School], 1963. 206 p.
11. Zubtsov M.E. Listovaia shtampovka [Sheet stamping]. 3rd edition, revised and supplemented. Leningrad: Mashinostroenie [Mechanical Engineering], Leningrad Branch, 1980. 432 p.
12. Rybakov A.V., Pichugin V.I., Krasnov A.A., Evdokimov S.A. Proektirovanie shtampov dlia kholodnoi listovoi shtampovki na osnove komp'iuternykh prototipov [Designing stamps for cold sheet stamping based on computer prototypes]. Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem [Forging and stamping manufacture. Processing of materials by pressure]. 2008. No 6. P. 16–21.
13. Krasnopedtsev A.Iu. Otlichiia, preimushchestva i nedostatki paiki po sravneniiu so svarkoi [Differences, advantages and disadvantages of soldering compared to welding]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Manufacture]. 2020. No. 8. P. 39–45.

-
14. Makarov E.L., Iakushin B.F. Teoriia svarivaemosti stalei i splavov [Theory of weldability of steels and alloys]. Edited by E.L. Makarov. Moscow: The Bauman University Publishing House, 2014. 487 p.
 15. Remchukov S.S., Lebedinskii R.N. Osobennosti primeneniia lazernykh tekhnologii v protsesse sozdaniia plastinchatykh teploobmennikov dlia malorazmernykh gazoturbinykh dvigatelei [Laser technologies application specifics while plate heat exchangers developing for small-size gas turbine engines]. Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta [Aerospace MAI Journal]. 2020. Vol. 27, no. 2. P. 90–98.

Материалы получены редакцией 09.02.2022