

УДК 621.791.36

## ОЦЕНКА ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА ПРИ ПАЙКЕ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Пьянкова Юлия Александровна

*Студент 5 курса*

*Кафедра «Технологии сварки и диагностики»*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Неровный В.М.*

*Доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии сварки и диагностики»*

Теплообменник как конструкция, обеспечивающая эффективное охлаждение рабочих тел ГТД, находит все более широкое применение в двигателестроении.

По конструктивным решениям теплообменники можно разделить на две группы.

К первой группе относятся пластинчато-ребристые теплообменники. Они изготавливаются из штампованных пластин с определенным шагом и высотой зигов, которые собираются в пакеты. Штампованные пластины соединяются за счет припоя, нанесенного методом плакирования. Для обеспечения жесткости пластинчато-ребристых теплообменников пакеты собираются в жестком каркасе, который одновременно является корпусом теплообменника. Пайка данной конструкции осуществляется в вакуумных печах с общим нагревом.

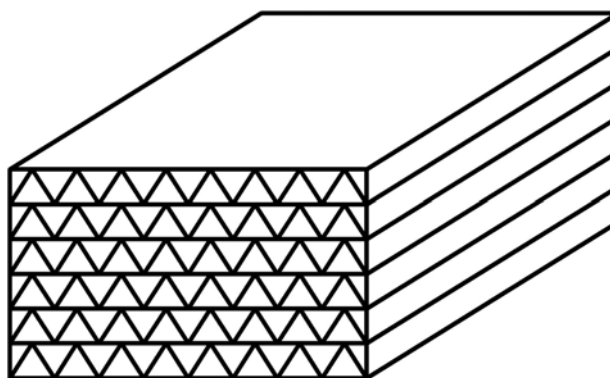


Рис.1. Пластинчато-ребристый теплообменник.

Данная конструкция теплообменников не позволяет производить визуальный контроль качества пайки по всей длине паяных пластин. Поэтому при изготовлении пластинчато-ребристых теплообменников получение даже одного дефекта по паяному шву приводит к браку всего узла.

Ко второй группе относятся трубчатые теплообменники, основным элементом которых изготавливают из трубок диаметром 2 - 5 мм и толщиной стенок 0,2 – 0,5 мм.

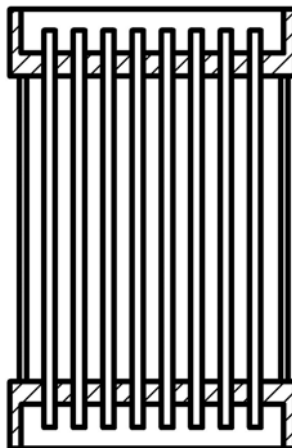


Рис.2. Трубчатый теплообменник

Пайка трубчатых теплообменников осуществляется в печах с общим нагревом в вакууме или в контролируемых газовых средах с применением флюса, а так же сканирующим электронным лучом с ускоряющим напряжением 30 – 60 кВ в качестве локального источника нагрева.

В связи с тем, что в конструкции теплообменника имеется, как правило, от 400 до 600 паяных швов, в первую очередь встает вопрос о качестве паяных соединений.

На качество пайки влияют следующие факторы:

- величина технологического зазора под пайку, между диаметром трубки и диаметром отверстия в трубной доске;
- чистота обработки паяемых поверхностей;
- вес припоя и схема его нанесения;
- физико-химические и механико-технологические свойства применяемого припоя;
- технологические и температурно-временные параметры процесса пайки.

Теплообменник топливо-масляный предназначен для охлаждения топливом масла, циркулирующего в масляной системе изделия АЛ-31Ф, эксплуатируемой во всех макроклиматических районах. Теплообменник по конструктивному оформлению поверхности теплообмена относится к трубчатым.

Основным рабочим элементом теплообменника является сот ТТМ – 419 трубок из стали 12Х18Н10Т диаметром 2 мм и толщиной стенок – 0.2 мм, закрепленные между двумя трубными досками.

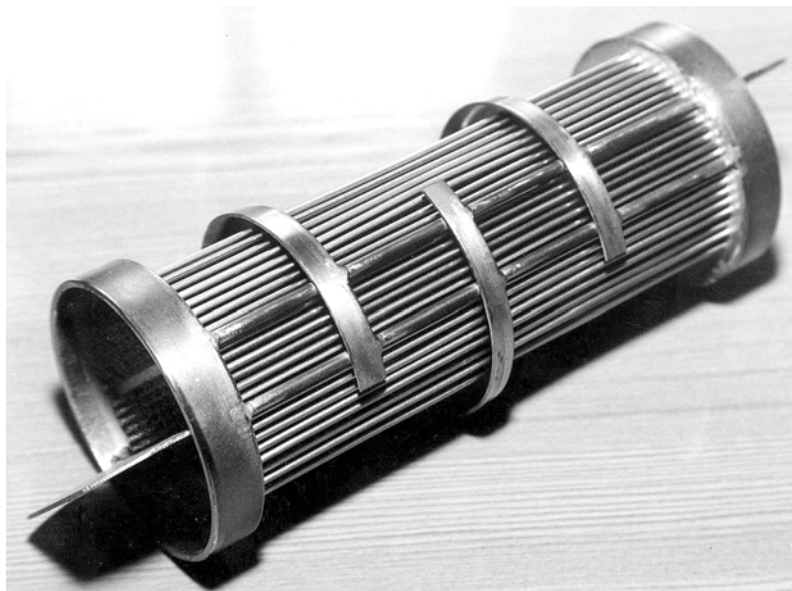


Рис.3. Внешний вид сота.

Для пайки теплообменника из хромоникелевой стали используется порошкообразный припой ВПр2 (припой на медной основе). После нанесения припой закрепляется связующим веществом и, затем, после сушки отправляется в камеру на пайку.

Пайка производится с помощью ступенчатого нагрева, со степенью разряжения  $10^{-3}$  Па.

Для одновременного получения большого количества паяных швов используют ХУ-развертку электронного луча по поверхности, в пределах которой расположены паяные швы. При этом электронный луч с большой скоростью сканирует поверхность детали, являясь по существу квазиравномерным источником теплоты, и обеспечивает требуемый нагрев паемых соединений.

Сущность процесса электронно-лучевого воздействия состоит в том, что кинетическая энергия сформированного в вакууме электронного пучка превращается в тепловую в зоне обработки. Так как диапазон мощности и концентрации энергии в луче велики, то практически возможно получение всех видов термического воздействия на материалы: нагрев до заданных температур, плавление и испарение с очень высокими скоростями. Поэтому важно определить локальные параметры электронного луча: диаметр пятна нагрева, частоту сканирования электронного луча, такие, чтобы при пайке не произошло расплавление основного материала.[1]

Поверхностного источника энергии должны выбираться из условия создания в нагреваемом теле состояния, близкого к температурному равновесию, т.е. такого состояния, когда приток количества тепла в тело становится почти равным количеству отведенного тепла. После достижения равновесного состояния температурное поле сохраняет свой характер. Такое тепловое поле в литературе принято называть «предельным» или «стационарным».

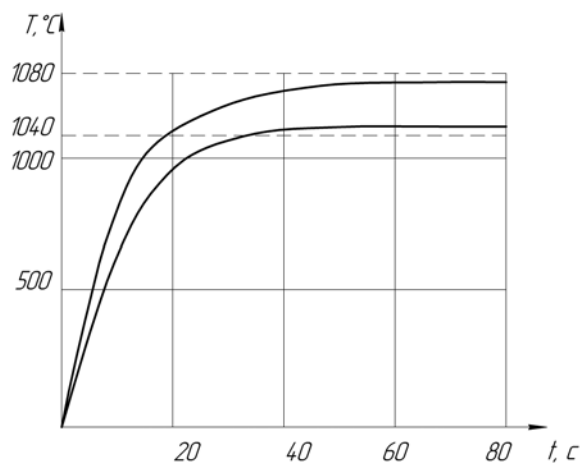


Рис.4. Переход на стационарный режим.

Допустим, что сканирование электронным лучом создает идеальный равномерно распределенный неподвижный источник тепла. При этом пренебрегаем тем, что поверхность теплообменника развита: над поверхностью трубной доски выступают трубки.

При достаточно длительном непрерывном воздействии неподвижным источником энергии на полуограниченные и ограниченные в процессе удаётся получить в них тепловое равновесие, т.е. стационарное температурное поле. Если в полубесконечном теле стационарное состояние достигается благодаря значительному теплоотводу в трёх направлениях, то в тонкостенных телах стационарное поле возможно лишь при наличии теплоотдачи в окружающее пространство. При высокотемпературной пайке в вакууме поверхностная теплоотдача определяется в основном лучистым теплообменом, достигающая значений  $q_r = \varepsilon \cdot \sigma_r (\Delta T)^4 = 7..20 \text{ Вт/см}^2$ , где  $\varepsilon = 0,5..0,8$ ;  $\sigma_r = 5,67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/(см}^2\text{K}^4)$  – постоянная Стефана-Больцмана.[2]

Определяющее влияние на характер и эффективность нагрева паяного соединения оказывают тепловые параметры источника энергии (плотность теплового потока  $q_2$ , её распределение по пятну нагрева  $q_2(r)$  и размеры этого пятна). В свою очередь при пайке уровень плотности теплового потока источника зависит от степени равномерности её распределения по пятну нагрева, размеров и формы нагреваемого тела, а также теплофизических свойств металла и глубины прогрева до требуемых температур пайки. Так, например, локальный нагрев до стационарного температурного состояния, удовлетворяющего условиям высокотемпературной пайки в вакууме, тела в виде тонкой пластины в зоне обработки источником тепла с равномерным распределением плотности теплового потока может быть получен при значениях  $q_2 = 2q_r = 14..40 \text{ Вт/см}^2$ .

Для проведения процесса пайки сканируемым локальным источником энергии необходимо, чтобы сканируемый источник обладал требуемой мощностью в сочетании с оптимальной распределенностью тепловых характеристик в зоне нагрева, позволяющих производить нагрев этой зоны до требуемого интервала температур пайки без подплавления основного металла.

Определяем плотность мощности источника тепла с равномерным распределением плотности теплового потока:

$$q_2 = 2 \cdot \varepsilon \cdot \sigma_r T^4 = 2 \cdot 0.8 \cdot 5.67 \cdot 10^{-12} (1.3 \cdot 10^3)^4 = 25.9 \text{ Вт/см}^2, \quad (1)$$

где  $\varepsilon = 0.8$ ,  $T = 1300 \text{ К}$  – температура пайки.

Тогда эффективная мощность источника, необходимая для нагрева до температуры пайки площади  $S = 100 \text{ см}^2$  с учетом КПД  $\eta = 0.85$ :

$$P = \frac{q_2 \cdot S}{\eta} = \frac{25.9 \cdot 100}{0.85} \cong 3000 \text{ Вт} \quad (2)$$

Следующей задачей является определение локальных параметров источника нагрева: диаметр пятна нагрева и распределение в нем плотности мощности. Для простоты берем равномерное распределение энергии в пятне нагрева. Тогда плотность мощности в электронном луче,  $\text{Вт/см}^2$ :

$$q_L = \frac{P}{F_L}, \quad (3)$$

где  $F_L$  - площадь пятна нагрева,  $\text{см}^2$ .

Используя уравнение, описывающее изменение температуры  $T$  в центре пятна нагрева на поверхности тела со временем [1]:

$$T(t) = 2q_2 \frac{\sqrt{at}}{\lambda\sqrt{\pi}} \quad (4)$$

можно оценить значение  $q_2$ , при которой за время  $t$  на поверхности тела достигается температура пайки  $T_n$ . Полагая, что  $T(t) = T_n$  получаем:

$$q_c = 0.885 \cdot T_n \frac{\lambda}{\sqrt{at}} \quad (5)$$

Отсюда, приравнявая к критической плотности мощности значения  $q_c$  плотности мощности  $q_L$  луча с различной площадью пятна нагрева, получаем значение максимального времени, в течение которого на поверхности тела достигается температура пайки:

$$t = 0.621 \left( \frac{T_n}{q_L} \right)^2 \quad (6)$$

Зная диаметр электронного луча, можно определить необходимую скорость его перемещения и частоту сканирования:

$$v = \frac{d_L}{t}, \quad (7)$$

где  $d_L$  - диаметр луча, см.

$$f = \frac{v}{A}, \quad (8)$$

где  $A = 20 \text{ см}$  – амплитуда перемещения луча по паяемой поверхности.

Далее принимая различные значения площади пятна нагрева  $F_L$  от  $0.1 \text{ см}^2$  до  $1 \text{ см}^2$ , в программе MathCAD были построены зависимости  $t(F_L)$  -

время пребывания в зоне пятна нагрева,  $f(F_L)$  - частота сканирования электронного луча (рис. 5,6).

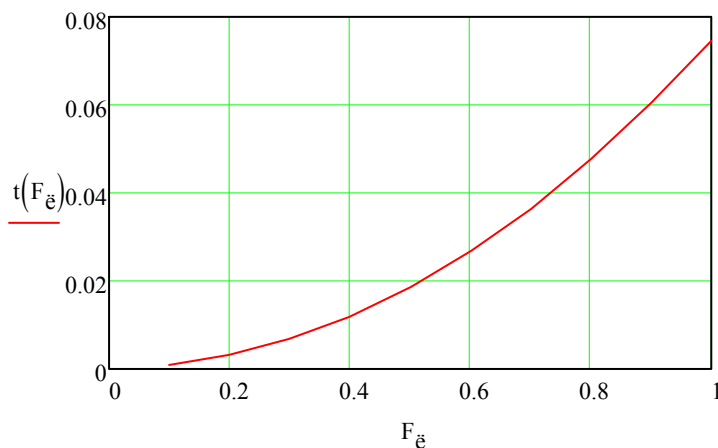


Рис. 5. Зависимость времени пребывания в зоне пятна нагрева от площади пятна нагрева.

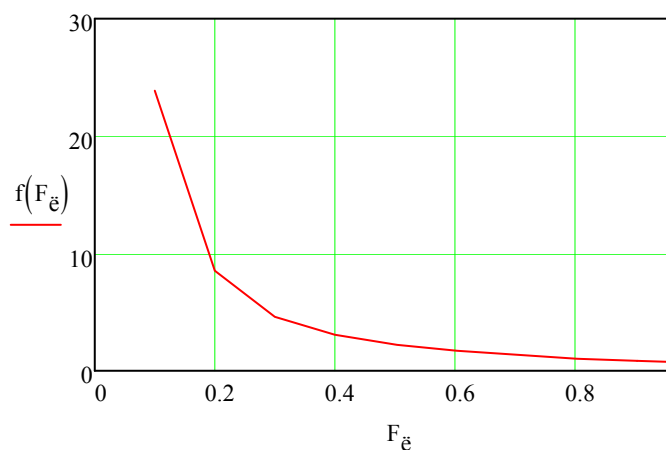


Рис.6. Зависимость частоты сканирования луча от площади пятна нагрева.

Таким образом были выбраны локальные параметры электронного луча:

- $F_L = 0.1 \text{ см}^2$  - площадь пятна нагрева;
- $d_L = 0.36 \text{ см}$  - диаметр луча;
- $t = 0.0007 \text{ с}$  – время пребывания в зоне пятна нагрева
- $f = 24 \text{ Гц}$  – частота сканирования луча.

С уменьшением диаметра электронного луча становится необходимым увеличение частоты сканирования, что избавляет от возможного подплавления трубок теплообменника. Это объясняется тем, что время пребывания в зоне нагрева луча с высокой плотностью мощности сокращается, и температура при этом увеличивается на величину:

$$\Delta T = \frac{t \cdot q_L}{c \cdot \rho} = \frac{0.0007 \cdot 30000}{0.57 \cdot 7.9} \cong 5^{\circ}\text{C}, \quad (9)$$

где  $q_{л} = 30000 \text{ Вт/см}^2$ ,  $c = 0.57 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot ^\circ\text{C}}$  - теплоемкость стали 12Х18Н10Т,

$\rho = 7.9 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$  - плотность стали.

Для критериальной оценки параметром электронного луча при пайке теплообменников выбрана схема нагрева пластины равномерно распределенным неподвижным источником тепла. Распределение энергий в электронном луче принято равномерным.

Определены зависимости времени пребывания в зоне пятна нагрева и частоты сканирования от площади пятна нагрева. Выбраны локальные параметры электронного луча.

### Литература

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев и др. - М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Теория сварочных процессов: Учебник для вузов / А.В. Коновалов, А.С. Куркин, Э.Л. Макаров, В.М. Неровный, Б.Ф. Якушин; Под ред. В.М. Неровного. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 752 с.: ил.
3. Электронно-лучевая сварка / Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н.; Под ред. Б.Е. Патона. – Киев: Наук. Думка, 1987. – 256 с.