

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ПАЙКА ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Пьянкова Юлия Александровна

Студент 6 курса,

кафедра «Технологии сварки и диагностики»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Неровный В.М.,

доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии сварки и диагностики»

Для эффективного охлаждения рабочих жидкостей авиационного газотурбинного двигателя широко применяют трубчатые теплообменники. Основным элементом такого теплообменника – трубка из хромоникелевой нержавеющей стали диаметром 2-5 мм и толщиной стенки 0,2-0,5 мм соединяется с трубной доской толщиной 3,0 мм при помощи высокотемпературной пайки припоем на медной основе. Припой, вырубленный из листа толщиной 0,2 мм, закрепляется на поверхности трубной доски точечной сваркой (рис. 1, б).

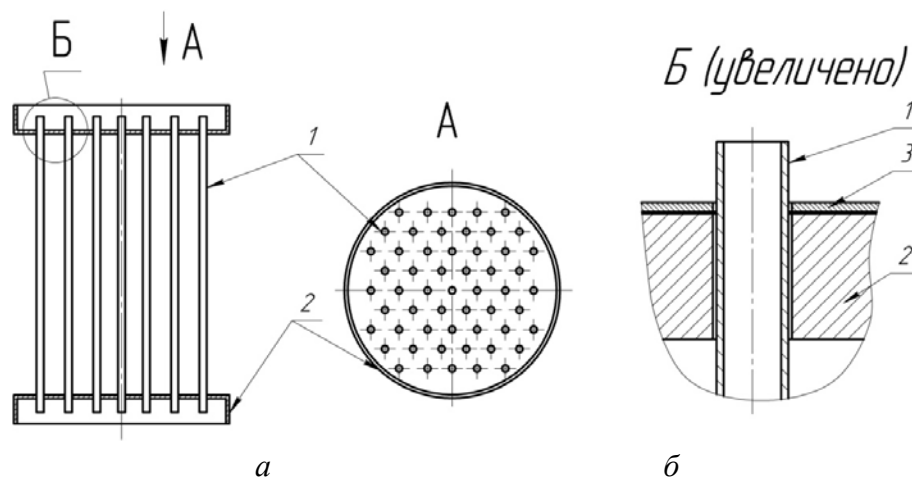


Рис. 1. Трубчатый теплообменник.

1 — трубки, 2 — трубная доска, 3 — припой

Технологический процесс пайки может проводиться с общим нагревом в вакуумной печи, в печи с контролируемой атмосферой, а также с локальным нагревом при двухкоординатном сканировании электронного луча.

Выбор в пользу локального источника нагрева связан с трудностями, возникающими при пайке с общим нагревом: неравномерность теплового поля за счет сложной геометрической формы теплообменника, и как следствие необходимость длительного нагрева, что приводит к деформации тонкостенных трубок.

Достоинства локального нагрева заключается в том, что вся тепловая энергия электронного луча идет на нагрев трубной доски, при этом она не тратится на ненужный нагрев всего теплообменника и пространства вокруг него как при пайке с общим нагревом. За счет локального нагрева снижается время проведения технологического процесса пайки, что приводит к повышению производительности в несколько раз.

Известно, что 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].

В литературе практически отсутствуют данные по выбору параметров сканируемого локального источника нагрева применительно к процессам пайки. Только в работе [3] показаны возможности высокотемпературной пайки локальными источниками энергии. Очевидно, это связано с разнообразием возможных схем паяных соединений, а также с широким кругом паяемых материалов и припоев. Имеющиеся публикации по сканируемым источникам нагрева не дают ответа на вопросы, связанные с проблемой пайки, т.к. в этих работах не вскрываются закономерности создания в зоне нагрева температурного поля близкого к стационарному с требуемой неравномерностью.

Так, например, локальный нагрев до стационарного температурного состояния, удовлетворяющего условиям высокотемпературной пайки в вакууме, тела в виде тонкой пластины в зоне обработки источника тепла с равномерным распределением плотности теплового потока может быть получен при значениях $q_2 = 2q_r = 14..40 \text{ Вт/см}^2$.

Допустим, что сканирование электронным лучом создает идеальный равномерно распределенный неподвижный источник тепла. При этом поверхность трубной доски теплообменника считаем сплошной и плоской, пренебрегая тем, что над поверхностью трубной доски выступают трубки. Определив плотность мощности источника по закону Стефана-Больцмана, получаем эффективную мощность источника, необходимую для нагрева до температуры пайки площади $S = 100 \text{ см}^2$ с учетом КПД $\eta = 0.85$:

$$q_2 = 2\varepsilon\sigma_r T^4 = 2 \cdot 0.8 \cdot 5.67 \cdot 10^{-12} \cdot (1313..1353)^4 = 29.9..30.4 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} \quad (1)$$

где $\varepsilon = 0.8$, $T = 1313 - 1353 \text{ К}$ – температура пайки.

$$P = \frac{q_2 \cdot S}{\eta} = \frac{(26.96..30.40) \cdot 100}{0.85} = 3525..3576 \text{ Вт} \quad (2)$$

Сущность процесса электронно-лучевого воздействия состоит в том, что кинетическая энергия сформированного в вакууме электронного пучка превращается в тепловую в зоне обработки. При электронно-лучевой пайке на поверхности площадью 80 см^2 и более используют ХУ-развертку электронного луча, 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 паяемых соединений.

Вместе с тем, знание требуемой эффективной мощности источника энергии для пайки развитых поверхностей явно недостаточно. Для того, чтобы получить близкое к стационарному и равномерное температурное поле как по толщине трубной доски, так и по ее поверхности нам необходимо знать локальные тепловые параметры источника – диаметр пятна нагрева, характер распределения плотности мощности по пятну нагрева и плотность мощности в центре пятна нагрева. Кроме этого, для создания квазиравномерного распределения плотности мощности по всей поверхности необходимо знать по какому закону перемещать электронный луч по поверхности трубной доски и с какой скоростью, чтобы предотвратить перегрев паяных соединений, а тем более их подплавления.

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. Из вышеизложенного следует, что с помощью сканируемого электронного луча возможно получение даже на довольно развитых поверхностях изделия относительно равномерное и близкое к стационарному температурное поле довольно в узком интервале заданных температур. В первую очередь важно определить локальные параметры электронного луча (диаметр пятна нагрева, частоту сканирования электронного луча, соотношение частот по осям X и Y), которые обеспечили бы нагрев паяемого изделия в диапазоне температур пайки и при этом, не произошло не только расплавление основного материала, но и его перегрев.

Цель работы заключается в определении оптимальных параметров режима электронно-лучевой пайки для получения на паяемой поверхности необходимого диапазона температур. Это достигается путем построения математической модели тепловых полей при пайке.

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

$$T(t) = 2q_2 \frac{\sqrt{at}}{\lambda\sqrt{\pi}} \quad (3)$$

и зная, что $q_L = \frac{P}{F_L}$, а $F_L = \frac{\pi d^2}{4}$, можно графически определить размер пятна нагрева, при котором наступает момент плавления основного материала одновременно с плавлением припоя (рисунок 3):

$$t = \frac{\pi^3 \lambda^2}{64a} \cdot \frac{T^2 d^4}{P^2} \quad (4)$$

где t – время, за которое поверхность нагревается до температуры T .

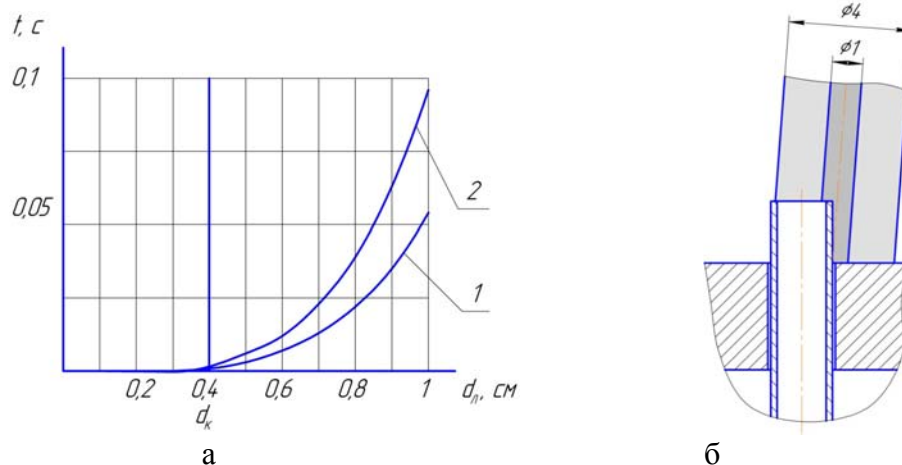


Рис. 2. а) Зависимость времени нагрева до температуры пайки (1) и до температуры плавления основного материала (2) от диаметра пятна нагрева;
б) влияние диаметра луча на зону нагрева.

Задаваясь всеми необходимыми величинами (λ , a , P), а также двумя температурами:

- 1) температура пайки $T=1350$ К

2) температура плавления основного материала $T=1500$ К
и, варьируя диаметр электронного луча от 0,1 до 1 см, построим 2 кривые по зависимости (4).

В месте сближения кривых 1 и 2 определяем величину диаметра электронного луча, равную 0,4 см. При всех диаметрах меньших или равных этому критическому (минимальный) диаметру пятна нагрева возникает опасность подплавления основного материала, т.к. плотность мощности с уменьшением диаметра луча увеличивается (рисунок 2б).

Для значения критического диаметра луча получаем частоту сканирования:

$$f = \frac{d_{\text{к}}}{tA} = \frac{0,4}{0,001 \cdot 20} = 20 \text{ Гц} \quad (5)$$

где $A = 20$ см – путь перемещения луча по паяемой поверхности.

Путём периодических колебаний электронного пучка по различным законам и амплитуде удаётся изменять в зоне воздействия луча за определенный период времени «усреднённое» распределение мощности источника нагрева на поверхности паяемого изделия [1]. Для использования электронного луча в процессе пайки необходимо, чтобы сканирование электронным лучом создавало идеальный равномерно распределенный неподвижный источник тепла. Для этих целей задается рассогласование значений частот сканирования по взаимно перпендикулярным координатам. При определенном соотношении частот f_x и f_y вполне можно распределить энергию луча практически равномерно по всей поверхности. Это соотношение определяется по внешнему виду траектории электронного луча, получаемой при задании различных частот (см. рисунок 3).

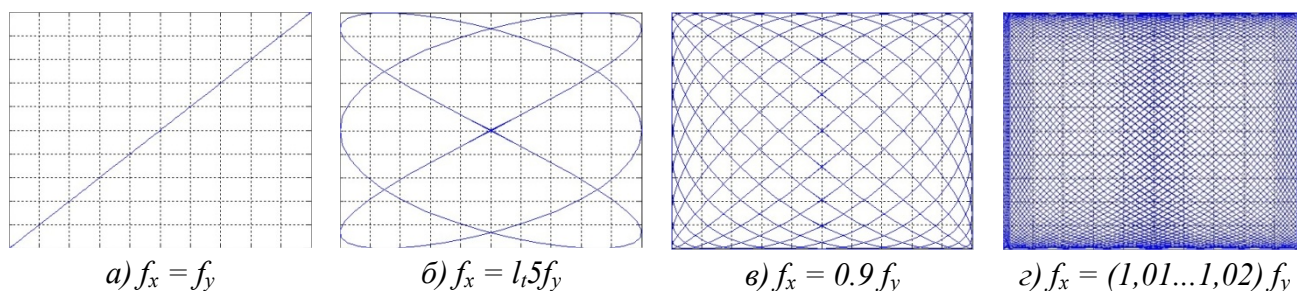


Рис. 3. Траектории электронного луча
при различных соотношениях частот развертки.

Равенство частот f_x и f_y приводит к линейной развёртке луча. В случае, когда $f_x = n f_y$, где $n = 1,5; 2; 2,5; 3; \dots$, получают семейство разнообразных фигур. С возрастанием n и при достижении соотношения частот $f_x \ll f_y$, развёртка приобретает вид линии, перемещающейся вдоль одной из осей координат.

В случае двухкоординатного сканирования большое значение для равномерности распределения температур по зоне нагрева имеет выявление оптимального закона сканирования нормально-кругового источника нагрева.

Расчеты температурных полей проводились согласно теории тепловых процессов при сварке с учетом распределенности источника тепла [4].

При расчетах были приняты следующие допущения:

- трубная доска принималась за бесконечный плоский слой;
- теплофизические коэффициенты λ , σ , α , а паяемых материалов были приняты независимыми от температуры. Их значения в расчетах для стали 12Х18Н10Т соответствовали средней температуре нагрева 600 °С:

$\lambda=0.218$ Дж/(см·с·град), $C\rho=4.348$ Дж/(см³·град), $a=0.0395$ см²/с, $\alpha=0.001$ Дж/(см²·с·град);

- мощность и коэффициент сосредоточенности источника энергии в процессе сканирования остаются постоянными.

Краевые условия:

- начальное распределение температуры в изделии равномерное, т.е. при $t=0$, $T=T_0$;
- приняты граничные условия 3 рода, т.е с учетом теплоотдачи излучением с поверхности плоского слоя.

Промежуток времени t действия неподвижного источника разобьем на элементы dt' . Тепло, введенное мгновенным нормально-круговым источником $dQ=q dt'$ с центром в точке C' , приложенным в момент t' на расстоянии $L \sin \omega t'$ от начального положения центра источника точки O_0 , распространяясь по плоскому слою в течение $t'' = t - t'$ повысит к моменту t температуру в точке $A(x,y,z)$ на

$$dT(x,y,z,t'') = \sum_{n=-3}^{n=3} \frac{2q dt'}{c\rho \sqrt{4\pi a t''} 4\pi a(t_0 + t'')} \cdot \exp \left[-\frac{(z-2n\delta)^2}{4at''} - \frac{(x-L_x \sin \omega_x t')^2 + (y-L_y \sin \omega_y t')^2}{4a(t_0 + t'')} \right] \quad (6)$$

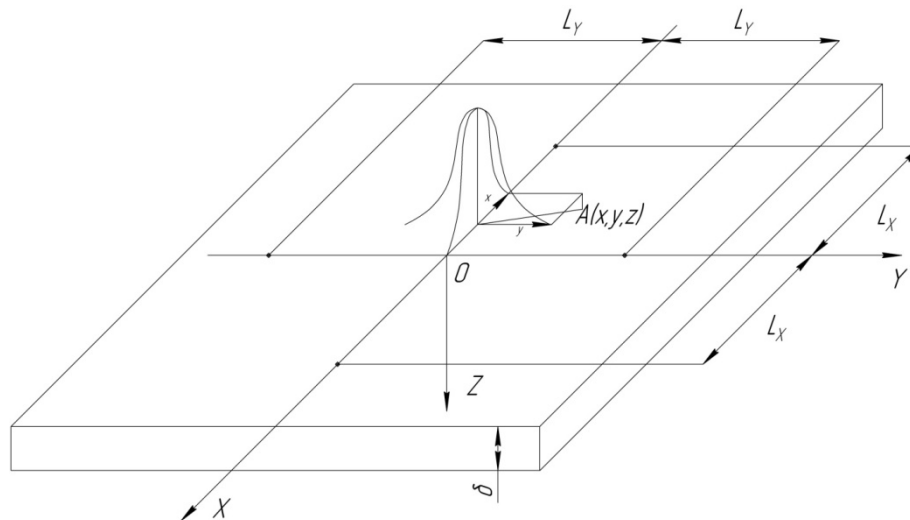


Рис. 4. Расчетная схема нагрева плоского слоя нормально-круговым источником, сканирующим по двум координатам.

По принципу наложения температура в момент t_n , продолжающегося действия нормально-кругового сканируемого источника равна сумме температур dT от всех элементарных источников, действующих за время от $t'=0$ до $t'=t_n$ на всем участке C_1C_2 , равном двум амплитудам колебания по осям X и Y

$$T(x_0, y_0, z_0, t) = \frac{2q}{c\rho(4\pi a)^{3/2}} \sum_{n=-3}^{n=3} \int_0^{t_n} \frac{dt'}{\sqrt{t_n - t'}(t_0 + t_n - t')} \exp \left[-\frac{(z-2n\delta)^2}{4a(t - t')} - \frac{(x_0 - L_x \sin \omega_x t')^2 + (y_0 - L_y \sin \omega_y t')^2}{4a(t_0 + t_n - t')} \right] \quad (7)$$

Так как уравнение (7) содержит определенный интеграл, который в данном случае аналитически не решается, для численного решения определенного интеграла в уравнении (7) использован стандартный программный пакет MATLAB. Выбор этого программного пакета обусловлен тем, что он позволял довольно оперативно решать данное уравнение в широком диапазоне изменения параметров ($dt \geq 0,001$ с, $50 \leq t_n \leq 400$ с, $5 \leq f_x, f_y \leq 100$ Гц, закон изменения амплитуд f_x, f_y – синусоидальный,

соотношение частот $0,5 \leq f_x/f_y \leq 1,5$, коэффициент сосредоточенности источника тепла $4,0 \leq k \leq 100 \text{ см}^{-2}$). В программной среде MATLAB 6.5 было проведено моделирование процесса нагрева трубной доски путем сканирования электронного луча.

Было построено распределение температур вдоль оси сканирования Y в момент времени $t=200..400 \text{ с}$. При варьировании соотношения частот был получен оптимальный диапазон: $f=18..21 \text{ Гц}$ при соотношении $f_x/f_y=1,05$.

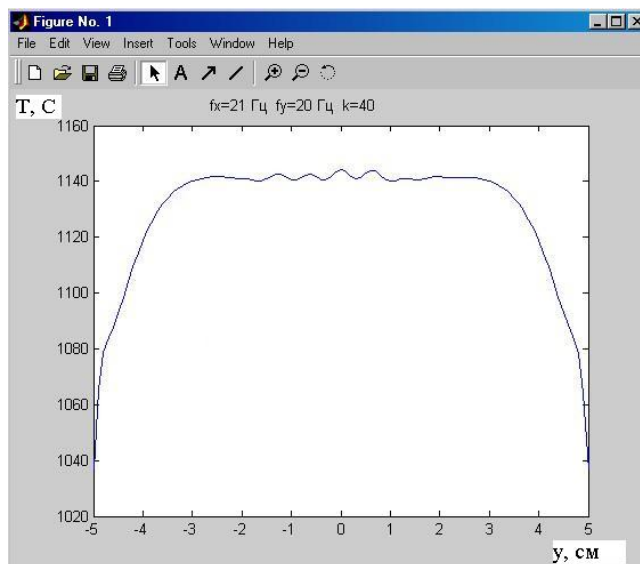


Рис. 5. Распределение температур вдоль оси Y при частотах сканирования $f_x = 21 \text{ Гц}$ и $f_y = 20 \text{ Гц}$, $k = 40$.

Таким образом, при двухкоординатном сканировании электронного луча по поверхности трубной доски можно получить квазистационарное температурное поле (рисунок 5), но в данном случае температура нагрева $T_{max} = 1140^\circ\text{C}$ превышает требуемую температуру пайки $T_{n.max} = 1080^\circ\text{C}$. Изменяя значения коэффициента сосредоточенности источника энергии в диапазоне $4 \leq k \leq 40$, удалось сгладить впадины на графике изменения температуры (рисунок 6).

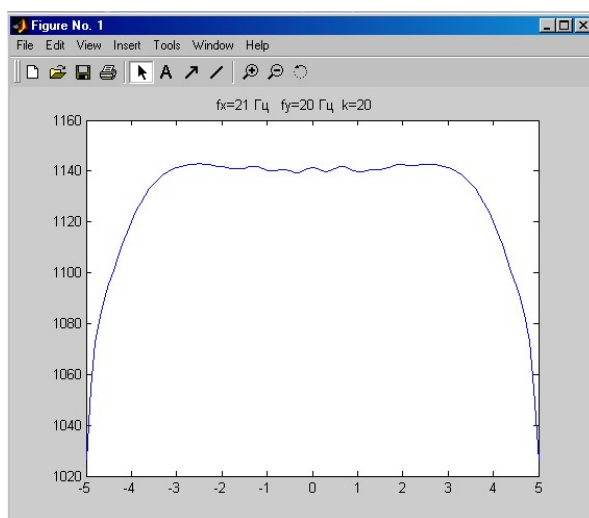


Рис. 6. Распределение температур вдоль оси Y при частотах сканирования $f_x = 21 \text{ Гц}$ и $f_y = 20 \text{ Гц}$, $k = 20$.

Значению коэффициента сосредоточенности $k = 20$ соответствует диаметр пятная нагрева $d = 0.77 \text{ см}$. При этом значение $T_{max} = 1140^\circ\text{C}$ осталось

неизменным. Для понижения температуры до необходимой при расчете снижено значение эффективной мощности луча (рис. 7).

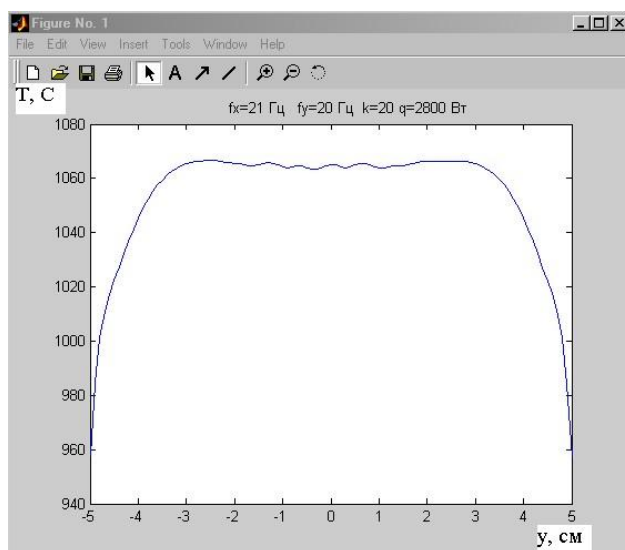


Рис. 7. Распределение температур вдоль оси У при частотах сканирования $f_x = 21$ Гц, $f_y = 20$ Гц, $k = 20$, $q = 2800$ Вт.

При данном режиме тепловое поле с обратной стороны трубной доски $\delta = 0.3$ см показано на рис. 8. Так как температуры соответствуют диапазону температур пайки $T = 1040^{+40} \text{ °C}$, обеспечиваются условия для образования качественного паяного соединения по всему зазору между трубкой и отверстием в трубной доске.

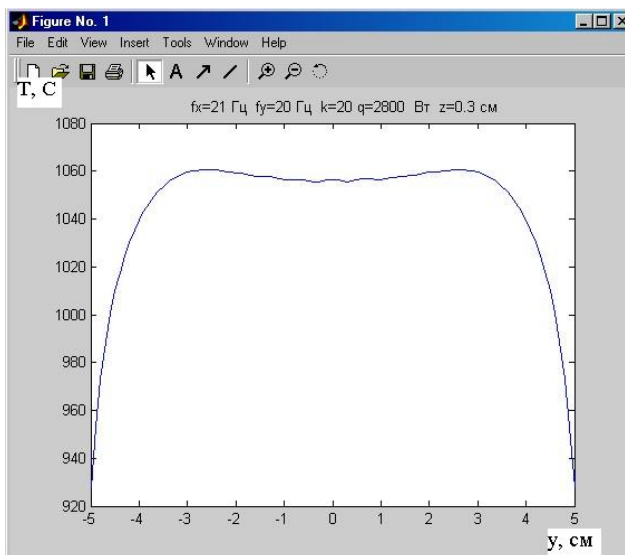


Рис. 8. Распределение температур вдоль оси У при частотах сканирования $f_x = 21$ Гц, $f_y = 20$ Гц, $k = 20$, $q = 2800$ Вт, $z = 0.3$ см.

В результате данных расчетов был определен оптимальный режим пайки:

- ускоряющее напряжение $U_{\text{ук}} = 60 \text{ кВ}$;
- ток луча $I_{\text{л}} = 35..40 \text{ мА}$;
- частота сканирования $f_x = 21 \text{ Гц}$, $f_y = 20 \text{ Гц}$;

- диаметр электронного луча $d_{\text{л}} = 0,7..0,8 \text{ см}$;
- площадь нагрева $Q_{\text{растр}} = 100 \times 100 \text{ мм}$;
- время нагрева $t_{\text{н}} = 300 \text{ с}$.

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. Основы электронно-лучевой обработки материалов / *Н.Н. Рыкалин, И.В. Зуев, А.А. Углов*. - М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.