

*Мирошник М. А., д-р техн. наук, доц.
Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова
Котух В. Г., канд. техн. наук, доц., с. н. с.,
Пахомов Ю. В., асс.
Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, г. Харьков*

ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ КОРПУСОВ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

Marinagmiro@gmail.com

Обеспечение требуемых температурных режимов функционирования датчиков для газового оборудования и трубопроводных систем (ГОиТС) является главным условием надежной работы любых измерительных устройств. Для этого необходимо обеспечить требуемый тепловой режим не только на этапе эксплуатации датчиков, но и на этапе их изготовления, т.к. их элементная база, подвергаясь перегреву на этапе изготовления может выйти из строя еще до начала эксплуатации.

Ключевые слова: датчики, герметизация, корпусные элементы, импульсная лазерная сварка, газовое оборудование, трубопроводные системы.

Введение. В настоящее время технология герметизации корпусов датчиков, включая средства технологического оснащения (СТО) в Украине, а также странах ближнего и дальнего зарубежья развивается опережающими темпами. Это связано прежде всего с использованием для этих целей импульсной лазерной сварки, обеспечивающей получение вакуумно-плотных соединений (натекание до 1×10^{-5} л \times мкм рт ст/с) и минимальное деформационное воздействие. Кроме того, импульсная лазерная сварка обладает еще рядом бесспорных преимуществ, особенно учитывая тот факт, что герметизация корпусов датчиков для ГОиТС является финишной и, соответственно, наиболее ответственной технологической операцией. Среди этих преимуществ следует отметить следующие:

практически мгновенное изменение параметров лазерного луча (мощности, диаметра, длительности импульса и др. в соответствии с вводимой программой;

высокая плотность мощности в луче ($10^6 \dots 10^9$ Вт/см²);

бесконтактность обработки, возможность производить обработку в труднодоступных местах изделия при сложных и точных формах швов, а также узкая зона температурного влияния, что дает возможность герметизировать сваркой функционально готовые изделия, очень чувствительные к повышенной температуре;

универсальность, заключающаяся в возможности обработки лазерным лучом из одного источника, в т.ч. не поддающихся обработке традиционными способами;

общее улучшение показателей механической прочности в связи с очисткой и дегазацией металла сварного шва, образованием мелкозер-

нистой структуры в шве и околошовной зоне, сопровождаемой некоторым повышением микротвердости в сочетании с меньшей неоднородностью свойств.

Основные положения и методы исследования. Одной из важных технологических задач, которые возникают при герметизации корпусов датчиков для ГОиТС, является задача обеспечения требуемых тепловых режимов свариваемых элементов их конструкции, т.к. перегрев может привести к выходу из строя непосредственно элементной базы датчиков. Составляющей расчета температурных полей является задача распределения тепловых потоков [1,3]. Существуют два различных подхода к решению поставленной задачи: традиционная теория температурного поля и подход с точки зрения теории тепловых цепей.

Традиционная теория температурного поля рассматривает распределение температур по всему объему исследуемого тела, что делает задачу заведомо многомерной, трудно разрешимой аналитически, особенно в нестационарной постановке, громоздкой и требующей длительных вычислений при решении численными методами. Кроме того, традиционная теория температурного поля рассматривает лишь классические тела: бесконечную пластину, шар и т.п.

В классической постановке задача решается как задача о распределении температур в неограниченной пластине с источниками тепла при температуре $T_0=0$ (отсчет температуры производим от температуры тела). В начальный момент времени ($\tau=0$) действуют мгновенные симметрично расположенные источники тепла при $x \pm x_1$ ($-R < x < +R$) силой Q_3 на единицу площади (источники тепла действуют вдоль

плоскостей $+x_1$ и $-x_1$. Между противоположными поверхностями пластины ($+R$ и $-R$) и окружающей средой происходит теплообмен по закону Ньютона (граничное условие третьего рода). Требуется найти распределение температуры по толщине пластины в любой момент времени (рис.1). Имеем:

$$T(x, 0) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dT(R,\tau)}{dx} = 0, \quad (2)$$

начало координат находится в середине пластины (задача симметричная)

$$\frac{dT(R,\tau)}{dx} + HT(R, \tau) = 0 \quad (3)$$

Для упрощения расчетов температуру окружающей среды принимаем равной начальной температуре тела ($T_c=T_0=0$).

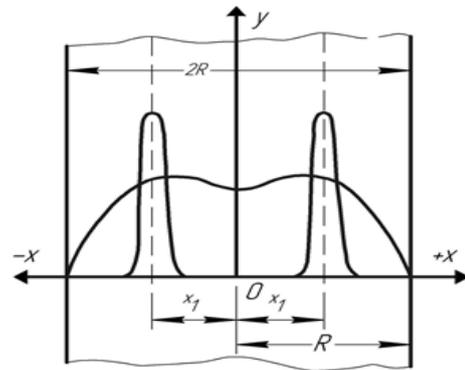


Рис. 1. Распределение температуры в неограниченной пластине в случае мгновенного источника тепла

Для решения задачи используем интегральные преобразования Лапласа.

Положим:

$$T(x, \tau) = u(x, \tau) + v(x, \tau),$$

где $u(x, \tau)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению теплопроводности.

$u(x, \tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi a \tau}} \left\{ \exp\left[-\frac{(x-x_1)^2}{4a\tau}\right] + \exp\left[-\frac{(x+x_1)^2}{4a\tau}\right] \right\}$ является решением задачи охлаждения неограниченного тела при действии мгновенных источников тепла вдоль плоскостей $\pm x_1$ (рис. 1).

Выражение для изображения можно написать так:

Переменная $v(x, \tau)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению теплопроводности.

$$T_L(x, s) = U_L(x, s) + V_L(x, s) = \left(\frac{b}{2\sqrt{as}}\right) \left[e^{-\sqrt{\frac{s}{a}}|x-x_1|} + \frac{b}{2\sqrt{as}} e^{-\sqrt{\frac{s}{a}}(x+x_1)} \right] + Ash \sqrt{\frac{s}{a}} x + Bsh \sqrt{\frac{s}{a}} x, \quad (5)$$

так как изображение $U_L(x, s) = L[u(x, \tau)]$ определяется соотношением [2].

откуда $B=0$.

Согласно соотношению (4) функция $u(x, \tau)$ является четной функцией относительно x_1 , как и ее изображение. Поэтому из условия (2) следует

Постоянную A находим из граничного условия (3), которое для изображения $T_L(x, s)$ напишем так:

$$T_L(R, s) + HT_L(R, s) = 0.$$

Следовательно, имеем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v(0,\tau)}{\partial x} = 0, V'_L(0, s) = 0, \quad (6) \\ -\frac{b}{2\sqrt{as}} \sqrt{\frac{s}{a}} \left[e^{-\sqrt{\frac{s}{a}}|R-x_1|} + e^{-\sqrt{\frac{s}{a}}|R+x_1|} \right] + \sqrt{\frac{s}{a}} Ash \sqrt{\frac{s}{a}} R + \\ + \frac{Hb}{2\sqrt{as}} \left[e^{-\sqrt{\frac{s}{a}}|R-x_1|} + e^{-\sqrt{\frac{s}{a}}|R+x_1|} \right] + H Ach \sqrt{\frac{s}{a}} R = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Определив из равенства (7) постоянную A и подставив ее значение в решение (5), будем

иметь:

$$\begin{aligned} T_L(x, s) = \frac{b}{2\sqrt{as}} \left[ch \sqrt{\frac{s}{a}} R + \frac{1}{H} \sqrt{\frac{s}{a}} sh \sqrt{\frac{s}{a}} R \right] \times \\ \times \left\{ \left(ch \sqrt{\frac{s}{a}} R + \frac{1}{H} \sqrt{\frac{s}{a}} sh \sqrt{\frac{s}{a}} R \right) \left[e^{-\sqrt{\frac{s}{a}}|x-x_1|} + e^{-\sqrt{\frac{s}{a}}|x+x_1|} \right] \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{H} \sqrt{\frac{s}{a}} - 1 \right) ch \sqrt{\frac{s}{a}} x \left[e^{-\sqrt{\frac{s}{a}}|R-x_1|} + \frac{b}{2\sqrt{as}} e^{-\sqrt{\frac{s}{a}}|R+x_1|} \right] \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

Заменяя экспоненциальные функции через гиперболические по соотношению $e^{-z} = chz - shz$, можно показать, что решение (8) удовлетворяет

теореме разложения. Корни характеристического уравнения хорошо известны; они определяются из соответствующего уравнения.

После необходимых преобразований реше-

ние для оригинала получим в виде.

$$T(x, \tau) = \frac{2b}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \cos \mu_n \frac{x_1}{R} \times \cos \mu_n \frac{x}{R} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{a\tau}{R^2}\right), \tag{9}$$

где μ_n - корни характеристического уравнения. Если мгновенный источник тепла находится в середине пластины ($x_1 = 0$), то $\cos \mu_n \frac{x_1}{R} = 1$

Из решения (9) можно получить решение задачи на охлаждение неограниченной пластины в среде с нулевой температурой при заданном начальном распределении температуры в виде

$$T(x, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \cos \mu_n \frac{x}{R} \times \frac{2}{R} \int f(x) \cos \mu_n \frac{x}{R} \exp(-\mu_n^2 F_0), \tag{10}$$

Решение (9) можно написать в форме, более удобной для расчета, поскольку постоянные коэффициенты A_n табулированы:

$$T(x, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{bA_n \mu_n}{R \sin \mu_n} \cos \mu_n \frac{x_1}{R} \times \cos \mu_n \frac{x}{R} \exp(-\mu_n^2 F_0), \tag{11}$$

Средняя температура $\bar{T}(\tau)$, необходимая для определения количества тепла, теряемого пластиной в процессе охлаждения, будет равна:

$$\bar{T}(\tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b \mu_n \cos \mu_n \frac{x_1}{R}}{R \sin \mu_n} B_n \exp(-\mu_n^2 F_0) \tag{12}$$

$$T(x, \tau) = \frac{2b}{R} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cos \frac{(2n-1)\pi x_1}{R} \cos \frac{(2n-1)\pi x}{R} \times \exp\left[-(2n-1)^2 \pi^2 \frac{F_0}{4}\right]. \tag{13}$$

Если задача несимметрична ($0 < x < l$, где $l = 2R$ - толщина пластины) и имеется один плоский источник при $x = x_1$, то решение ана-

$$T_L(x, s) = \frac{b \left[ch \sqrt{\frac{s}{a}} (l + x - x_1) - ch \sqrt{\frac{s}{a}} (l - x - x_1) \right]}{2 \sqrt{as} ch \sqrt{\frac{s}{a}} l} \tag{14}$$

Отсюда находим решение для оригинала:

$$T(x, \tau) = \frac{2b}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi x_1}{l} \sin \frac{n\pi x}{l} \times \exp[-n^2 \pi^2 F_0]. \tag{15}$$

Как видно из описанного решения, задача решается при целом ряде допущений, не всегда выполняемых на практике (симметричное расположение источников тепла, граничное условие третьего рода с обеих сторон пластины). Учет несимметричности источников тепла и наличия тепловых контактов платы с другими элементами конструкции существенно усложняют задачу и делают ее практически неразрешимой классическими методами.

В рассматриваемом случае необходимо исследовать распределение и прохождение тепловых потоков через целую систему тел, поэтому эффективнее использовать теорию тепловых цепей. Теория цепей исходит из приближенной замены реального объекта, в котором происхо-

некоторой функции $f(x)$.

Если положить $db = f(x_1) dx_1$, то можно написать

$$2b = \int_{-R}^{+R} f(x_1) dx_1.$$

Если подставим это выражение в (9), то получим решение

$$A_n \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} = (-1)^{n+1} \frac{2Bi(Bi^2 + \mu_n^2)^{\frac{1}{2}}}{\mu_n(Bi^2 + Bi + \mu_n^2)},$$

а именно:

Если $Bi \rightarrow \infty$, то $A_n = (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n}$, а $\mu_n = (2n-1) \frac{\pi}{2}$, и решение (11) упрощается:

логичной задачи для случая $Bi = \infty$ (граничное условие первого рода) имеет вид:

дят процессы теплообмена, идеализированной схемой замещения – тепловой цепью. Она позволяет определять разность температур между концами рассматриваемого участка цепи, а также тепловые потоки, не прибегая к вычислению в промежуточных точках. Этим отличаются конечные результаты, полученные с помощью тепловых цепей, от результатов, даваемых теорией поля, где изучается изменение температур и потоков от точки к точке.

Тепловые цепи делятся на цепи с сосредоточенными и распределенными параметрами. Цепям с сосредоточенными параметрами соответствуют объекты, отдельные области которых имеют равномерные температурные поля. В таких цепях термические сопротивления, емкости

и источники теплоты условно сосредотачиваются в отдельных точках тел. Цепи, в которых процессы выделения, поглощения и передачи теплоты не могут быть разделены, являются цепями с распределенными параметрами. К ним относятся тела с одно-, двух- и трехмерными температурными полями. Элементы тепловой цепи делятся на активные и пассивные.

Активные элементы отображают процессы выделения или поглощения теплоты, остальные элементы (термические сопротивления, емкости) относятся к пассивным. Активными элементами являются источники теплового потока (ИТП) и температурного напора (ИТН).

ИТП называются различные по природе источники (стоки) тепловой энергии (теплота Пельтье, Джоуля, теплоты фазовых переходов, эндо- и экзотермические химические реакции и т. д.), в результате действия которых вырабатываются (поглощаются) определенные потоки тепловой энергии. К ИТП относится также заданный тепловой поток, протекающий между двумя изотермическими областями. Если тепловая мощность ИТП не зависит от температуры, то имеем дело с идеальным ИТП, внутреннее термическое сопротивление которого считается бесконечно большим. В рассматриваемом случае ИТП является импульсный лазерный луч.

В системах тел часто бывают известны средние температуры некоторых областей (внешняя среда, кристаллизующиеся объемы, области с заданными за счет источников температурами и т. д.). Области с заданными температурами называются источниками температурных напоров; величины их определяют по отношению к температуре t_0 , выбранной за начало отсчета. В этом случае температурный напор $\Delta t_{i0} = t_i - t_0$, где t_i - заданная температура i -й области. К ИТН относится любая разность температур $\Delta t_{ij} = t_i - t_j$, двух изотермических поверхностей или областей модели. Если температурный напор ИТН не зависит от теплового потока, то такой ИТН называют идеальным, его внутреннее термическое сопротивление равно нулю.

Тепловая схема представляет собой графическое изображение тепловой цепи и показывает, как осуществляется соединение ее активных и пассивных элементов. Рассмотрим решение

поставленной задачи с помощью теории тепловых цепей.

Эскиз свариваемых корпусных элементов датчиков в сборке с условным указанием импульсного луча сварки приведен на рис. 2. Луч сварки попадает на стык свариваемых поверхностей крышки и рамки датчиков, где происходит их плавление и образование сварного шва. Поток энергии излучения поглощается свариваемыми поверхностями и передается в виде тепла на остальные элементы конструкции датчика: крышку, рамку и плату. Основная задача теплофизического конструирования датчика - не допустить нагрева его платы с элементной базой до $t > 70^\circ\text{C}$ на расстоянии 5 мм и больше от торцевой поверхности, то есть перегрев платы может привести к перегреву находящейся на ней элементной базы и выходу её из строя.

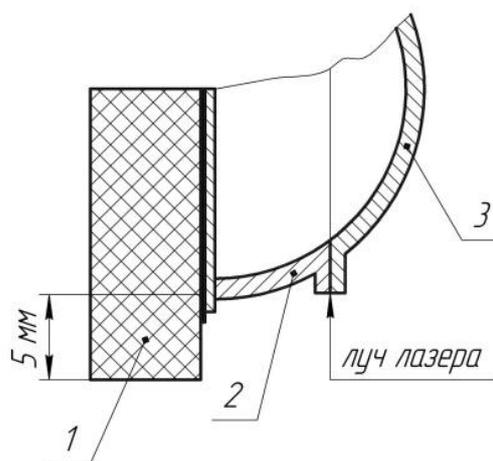


Рис. 2. Эскиз свариваемых корпусных элементов датчиков в сборке:

1 – плата; 2 – рамка; 3 - крышка

Данное требование также должно выполняться во время финишных технологических операций сборки и монтажа датчиков, в том числе и таких энергонапряженных, как импульсная лазерная сварка, поэтому, рассмотрим насколько требуемый температурный режим обеспечивается их конструкцией и параметрами технологического процесса сборки и монтажа датчиков.

Составим схему термосопротивлений и распределения тепловых потоков при процессе лазерной сварки (рис. 3) [2,4].

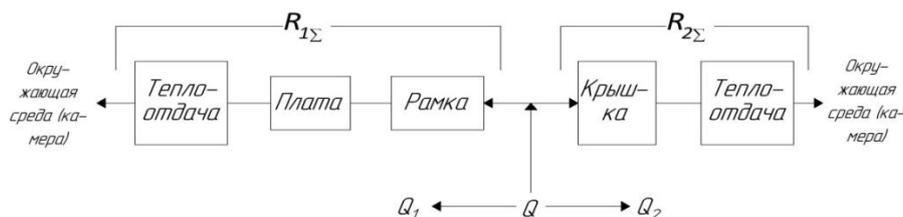


Рис. 3. Схема термосопротивлений и распределения тепловых потоков

Энергия лазерного луча Q , попадающего на стык между рамкой и крышкой, поглощается ими. Соответственно входящий тепловой поток Q распадается на две составные части:

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (16)$$

где: Q_1 - тепловой поток, поглощаемый рамкой, Вт; Q_2 - тепловой поток, поглощаемый крышкой, Вт.

В соответствии с положениями теории тепловых цепей тепловые потоки распределяются обратно пропорционально величинам суммарных термосопротивлений каждого из направлений

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_{2\Sigma}}{R_{1\Sigma}} \quad (17)$$

где $R_{1\Sigma}$ - суммарное термосопротивление процессу теплопередачи со стороны рамки; $R_{2\Sigma}$ - суммарное термосопротивление процессу теплопередачи со стороны крышки.

Рассмотрим подробнее составляющие каждого из суммарных термосопротивлений.

Термосопротивление $R_{1\Sigma}$, исходя из состава элементов конструкции, участвующих в процессе теплопередачи в окружающую среду, имеет в своем составе лишь термосопротивление процесса теплопроводности в материале крышки и термосопротивления процесса теплопередачи от крышки в окружающую среду.

Термосопротивление $R_{2\Sigma}$ включает в себя следующие составляющие: термосопротивление процесса теплопроводности в рамке;

- термосопротивление процесса теплопроводности в прокладке;
- термосопротивление процесса теплопроводности в плате;
- термосопротивление процесса теплоотдачи от всех перечисленных элементов конструкции датчика в окружающую среду.

Вводя обозначение распределения температуры по длине платы в точке с координатой X в момент времени τ

$$t_3 = (x, \tau)$$

можем записать требование обеспечения необходимого теплового режима:

$$t_3 = (x, \tau) < 70^\circ\text{C}$$

для всех $X > 5 \times 10^{-3}\text{м}$,
 $\tau \in [0; \infty]$.

Преимущество использования теории тепловых цепей состоит в том, что она позволяет определить температуру в требуемой точке цепи без вычисления всего температурного поля конструкции, что существенно снижает трудоемкость расчетов.

Проведем качественную оценку термосопротивлений рассматриваемой цепи с целью определения возможности введения упрощаю-

щих допущений.

Ввиду импульсного характера тепловой нагрузки процесс является существенно нестационарным, а его полное математическое описание - нелинейным вследствие наличия фазовых переходов (при плавлении и застывании свариваемых элементов конструкции). Однако ввиду высокой частоты импульсов, а также вследствие того, что нас интересует не все температурное поле, а лишь выполнения условия (2), можно воспользоваться осредненными характеристиками тепловых потоков.

Из нестационарности процесса вытекает следующее упрощающее допущение, касающееся теплоотдачи в окружающую среду. Входящий поток лучистой энергии импульсного лазерного луча изначально преобразуется во внутреннюю энергию свариваемых элементов конструкции датчика, часть которой идет на изменение их внутренней структуры вследствие фазовых переходов, часть передается посредством теплопроводности к остальным элементам конструкции, а от них - посредством теплообмена (процесса теплоотдачи) - в окружающую среду. Ввиду того, что тепловой поток подводится точно, термосопротивление процесса теплопроводности в элементах конструкции значительно ниже термосопротивления процессу теплоотдачи в окружающую среду, можно принять допущение о малости потоков теплоотдачи в окружающую среду во время прогрева элементов конструкции. Максимум теплоотдачи в окружающую среду будет иметь при максимуме среднеповерхностной температуры элементов, который может наступить лишь после существенного выравнивания температурного поля по каждому из элементов соответственно (рис. 4).

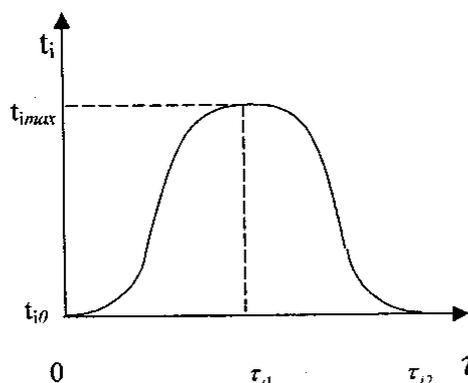


Рис. 4. Качественное поведение избыточной температуры

Поэтому в интересующий нас период при расчете начального температурного поля пренебречь внешними тепловыми потоками.

Оценим поэлементно термосопротивления элементов конструкции в соответствии со схе-

мой, приведенной на рис. 3.

Термосопротивление рамки R_1 :

$$R_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1 F_1},$$

где δ_1 - толщина материала рамки по направлению распространения теплового потока (в соответствии с [5])

$$F_{11} = 0,9 \cdot 10^{-3} \cdot (25 + 46,7) \cdot 10^{-3} \cdot 2 = 129,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 0,129 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Величина термосопротивления R_{11} :

$$R_{11} = \frac{1,8 \cdot 10^{-3}}{58 \cdot 0,129 \cdot 10^{-3}} = 0,241 \frac{\text{К}}{\text{Вт}}.$$

Величина термосопротивления прокладки R_2 определяется аналогично.

Для прокладки под рамку ЖЭ 8.637.132 [5]:

$$R_{21} = \left(\frac{\delta}{\lambda F} \right)_{21},$$

где $\delta = 0,15 \cdot 10^{-3}$ м - толщина прокладки в направлении теплового потока; $\lambda = 37$ Вт/м·К - коэффициент теплопроводности материала прокладки; $F_{21} = F_{11} = 0,129 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ - площадь теплового контакта прокладки. Подставляя

$$R_{1\Sigma} = R_{11} + R_{21} + R_{31},$$

$$R_{1\Sigma} = 0,241 + 0,031 + 25,840 = 26,112 \frac{\text{К}}{\text{Вт}}.$$

Подставив термосопротивление, найдем величину перегрева в искомой точке

$$\Delta t = \frac{Q}{R_{1\Sigma}}.$$

Для искомой модификации:

$$\Delta t = \frac{300}{26,112} = 11,49 \approx 11,5 \text{ К}.$$

Наиболее термонапряженные места находятся в зоне пересечения тепловых потоков от импульсной лазерной сварки - продольной и поперечной. В этом случае в рассматриваемой точке тепловые потоки складываются, соответственно, складываются величины перегревов, поскольку величина $Q_{\Sigma} = 300$ Вт по всем направлениям, соответственно

$$\Delta t = 2 \times 11,5 \text{ К} = 23 \text{ К}$$

При $t_{\text{окр.среды}} = 20^\circ \text{ С}$ получаем минимальное расчетное значение температуры в исследуемой точке

$$T_{\text{max}} = 20 + 23 = 43^\circ \text{ С} < 70^\circ \text{ С}$$

т.е. требуемый температурный режим выполняется.

Выводы. В ходе проведенных исследований получено распределение тепловых потоков при импульсной лазерной сварке корпусов датчиков для ГОиТС, которое определяется термосопротивлениями различных элементов их конструкции.

При этом в начальный период разогрева элементов конструкции датчиков до достижения ими максимальной температуры (период $\tau \in [0, \tau_{11}, \tau_{12}]$ на рис. 4) преобладают внутренние тепловые потоки, направленные на выравнивание температурного поля, а в последующий период времени преобладают исходящие (внеш-

$$\delta_1 = 1,8 \text{ мм} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$\lambda_1 = 58$ Вт/м·К - коэффициент теплопроводности материала рамки;

F_1 - площадь поверхности теплового контакта рамки.

Для рамки ЖЭ 8.637.132 [5]:

приведенные величины, получим:

$$R_{21} = \frac{0,15 \cdot 10^{-3}}{37 \cdot 0,129 \cdot 10^{-3}} = 0,031 \frac{\text{К}}{\text{Вт}}.$$

Термосопротивление платы с учетом удаленности размещения элементной базы на 5 мм от места контакта и коэффициента теплопроводности платы $\lambda = 1,5$ Вт/м·К:

$$R_{31} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 0,129 \cdot 10^{-3}} = 25,840 \frac{\text{К}}{\text{Вт}}.$$

Величина суммарного термосопротивления потоку Q_1 :

ние) тепловые потоки, направленные на теплоотдачу в окружающую среду, что позволяет при расчете начального температурного поля пренебречь внешними тепловыми потоками.

Расчеты показали, что требуемый температурный режим обеспечивается при помощи применяемых конструкторско-технологических решений для датчиков ГОиТС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Котух В. Г., Нестерцова С. А. Экспериментальные исследования технологических режимов герметизации корпусов датчиков из алюминиевых сплавов микроплазменной и лазерной сваркой // Вестник Национального технического университета «ХПИ». 2002. №7. т. 2. С. 27-31
2. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М: Высш. шк., 1984. -247 с
3. Замирец Н. В., Котух В. Г., Шур В. А., Алтухова Т. Л. Технологическая концепция лазерной герметизации радиоэлектронных модулей в корпусах из алюминиевых сплавов // Технология приборостроения, 1996. №1. С. 54-57
4. Филиппов И. Ф. Теплообмен в электрических машинах. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. 256 с., ил.
5. Замирец Н. В., Котух В. Г., Шур В. А., Нестерцова С. А. Опыт создания унифицированной микросборки для изделий радиоэлектронной аппаратуры // Технология приборостроения. 2000. №2. С. 32-38.