

**СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ СУДНА**

**SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ECOLOGICAL SAFETY
OF THE SHIP**

УДК 629.12.011.1.002.22:621.791

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi67.183>

**Моделирование процессов распространения теплоты при
термической резке металла с учётом основных положений
теории сварочных деформаций и напряжений**

А.Н. Винцев¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2614-8575>

Е.Г. Бурмистров²

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0385-0847>

¹АО «Судостроительный завод «Вымпел», г. Рыбинск, Россия

²Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В статье описываются особенности применения основных положений теории сварочных деформаций и напряжений к термической резке металла. Приведённые расчётные формулы позволяют предварительно оценить температурные деформации кромок листа при разделительной тепловой резке, а также размеры и конфигурацию температурного поля для учёта теплового воздействия на металл и определения размеров зоны термического влияния. Данные уравнения рассматриваются авторами в качестве основы для разработки методики расчёта тепловых деформаций и напряжений при тепловой резке металла с учётом поперечного и продольного распределения температуры по срезу листа, температуры окружающей среды и взаимодействия с ней, параметров геометрии разрезаемого листа и его жёсткости, теплоёмкости, теплопроводности и прочих температурных характеристик.

Ключевые слова: теплообмен, тепловой поток, температурная зависимость, граничные условия, источник теплоты, теплофизические свойства металла, градиент температур.

**Modeling of heat propagation processes during thermal metal
cutting, taking into account the main provisions of the theory of
welding deformations and stresses**

Anna N. Vintsiv¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2614-8575>

Evgeny G. Burmistrov²

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0385-0847>

¹AO «Vympel Shipbuilding Plant», Rybinsk, Russia

²Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article describes the features of applying the main provisions of the theory of welding deformations and stresses to the thermal cutting of metal. The above calculation formulas allow us to pre-evaluate the temperature deformations of the sheet edges during separation heat cutting, as well as the size and configuration of the temperature field, to take into account the thermal effect on the metal and determine the size of the zone of thermal influence. These equations are considered by the authors as a basis for the development of a method for calculating thermal deformations and stresses during thermal cutting of metal, taking into account the transverse and longitudinal distribution of temperature over the sheet section, the ambient temperature and interaction with it, the parameters of the geometry of the cut sheet and its stiffness, heat capacity, thermal conductivity and other temperature characteristics.

Keywords: heat transfer, heat flow, temperature dependence, boundary conditions, heat source, thermophysical properties of metal, temperature gradient.

Введение

Процессы и явления, сопровождающие термическую резку, к настоящему времени достаточно хорошо и полно изучены [1, 2]. Это сделало, например, автоматическую плазменную резку одним из ведущих технологических процессов при разделительной резке металла на судостроительных предприятиях. Однако остался ряд нерешённых проблем, связанных, в частности, с выполнением протяжённых прямых резов. Это особенно актуально при переходе многих верфей на использование крупногабаритного листового проката. Так, погрешность кромок (стрелка на середине длины) у листов длиной более 10 м может достигать 20...30 мм и более. Кроме этого имеет место волнистость кромок [3]. Всё это существенно затрудняет последующие сборочные и сварочные операции с такими деталями. Проблему приходится решать, по сути, в «ручном режиме», интуитивно корректируя управляющие программы машин термической резки. Для её кардинального решения, по-видимому, необходимо точно понимать тепловые процессы, происходящие в металле вблизи реза и в зоне термического влияния (ЗТВ). Как представляется, за основу можно принять основные положения известной теории сварочных процессов Н.Н. Рыкалина [4-7] и учесть процессы и явления, характерные для разделительной тепловой резки.

В отличие от сварки металлов температура в зоне реза при использовании высококонцентрированных источников теплоты может существенно превышать 3000°C [8]. Это ведёт к значительному усилению структурных превращений в металле и процессов, характерных для перехода металла из одного анизотропного состояния в другое, активизируются различные металлургические процессы. При этом, вследствие чрезвычайно высоких температур в зоне реза, инструментальное изучение этих процессов и явлений весьма трудоёмко, а часто и невозможно.

1. Основные упрощения и допущения

Для понимания закономерностей формирования и распределения температурных полей в металле при термической резке, как и при сварке, необходимо учитывать основные законы теплофизики и закономерности протекания процессов теплообмена [9].

Теплообмен в металлах можно представить известной формулой, как зависимость теплоты от изменения температуры [10]:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (1)$$

где Q – количества теплоты; m – масса металла, г, (кг); ΔT – разница температур, °С; c – удельная массовая теплоёмкость металла, кал/г·°С (Дж/кг·°С).

При различных условиях массовая теплоёмкость разных металлов различна. То есть, её можно представить функцией $c=f(T)$. Однако для инженерных расчётов можно принять среднее значение c . В противном случае уравнение теплоёмкости может оказаться труднорешаемым. Кроме средней теплоёмкости, в инженерных расчётах удобно пользоваться так называемой объёмной теплоёмкостью (C , кал/см³·°C).

Однако в металлах при фазовых переходах (перестройка кристаллической решётки, плавление, конденсация, испарение и т.п.) температура при изменении количества теплоты изменяется не всегда. В результате понятие «теплоёмкость» как физическая величина теряет смысл. Поэтому далее будем использовать величину теплосодержания (s , кал/г, кал/см³, или Дж/кг).

Зависимость температуры от пространственных координат будем описывать уравнениями, определяющими положение точки ввода теплоты в изделие в пространстве, то есть для наиболее привычной прямоугольной системы координат $T=T(x, y, z)$.

В изменяемом температурном поле при движении источника теплоты в определённом направлении температура изменяется непрерывно. Изменение температуры в этом направлении определяет градиент температур по заданному направлению $\partial T/\partial n$. При этом учтём, что при теплопередаче в неравномерном температурном поле температура будет выравниваться из-за перемещения частиц и передачи некоторого количества теплоты от одних частиц другим. В металлах вся передача, в основном, происходит за счёт теплопроводности. Для рассмотрения температурных полей при сварке этого положения оказывается достаточным. Однако при термической резке вследствие выделения большого количества теплоты, однозначно необходимо учитывать ещё и теплообмен между металлом и окружающей воздушной средой и теплообмен в воздушной среде. То есть, необходимо принимать в расчёт теплопередачу за счёт конвекции и лучистой энергии.

Для описания процессов теплопередачи в металле можно использовать известные уравнения теплопроводности [10, 11]. Изменение количества теплоты dQ на изотермической поверхности за время, равное dt , в элементе площадью ∂F пропорционально изменению температуры (dT/dn) в направлении нормали к заданной поверхности:

$$dT = \lambda \left(-\frac{dT}{dn}\right) \partial F dt, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, кал/см·с·°C (Вт/м·°C).

При бесконечном уменьшении температуры, площади и времени можно перейти к пределу ΔQ по отношению к $\Delta F/\Delta t$, то есть

$$q = \lim \left(\frac{\Delta Q}{\Delta F \Delta t} \right) \rightarrow 0 \quad (3)$$

что соответствует закону Фурье, поскольку из отмеченного очевидно пропорциональность максимального удельного теплового потока q и градиента температур по нормали к поверхности.

Учтённый в формуле (2) коэффициент теплопроводности λ в диапазоне температур от 0°С до 800°С сильно зависит от химического состава, структуры и температуры металла. При более высоких температурах λ изменяется незначительно и определяется, главным образом, только от свойств металла.

2. Учёт конвективного и лучистого теплообмена

В воздухе, над разрезаемым листом (за счёт конвекции) происходит активное перемешивание частиц воздуха между собой. Имеет место и перемешивание частиц воздуха с частицами паров металла. Вследствие этого теплота от более нагретых

частиц передаётся к менее нагретым. Чем ближе к поверхности металла, тем эти процессы протекают более интенсивно [8].

При конвекции удельный тепловой поток (q_k , кал/см³ или Вт/м³) в металле можно выразить законом Ньютона

$$q_k = \alpha_k(T - T_0) \quad (4)$$

где α_k – коэффициент конвективной теплоотдачи, кал/см²·с·°C (Вт/м²·°C).

На коэффициент α_k оказывают влияние следующие факторы: поверхность, от которой распространяется тепло; ориентация этой поверхности в пространстве; физические свойства теплопроводящей поверхности; свойства среды, в которой происходит теплопередача; перепад температур. Для каждого конкретного случая для расчёта α_k можно применять одну из известных [9] эмпирических зависимостей.

Лучистый теплообмен можно учесть законом Стефана-Больцмана. Для удельного потока излучения от предмета, нагретого до некоторой температуры, он запишется как:

$$q_r = \varepsilon \left(T + \frac{273}{100}\right)^4 \quad (5)$$

где ε – коэффициент излучения, определяющий поглощающее тело и состояние его поверхности ($\varepsilon = 0,9 \dots 0,95$).

Для расчёта лучистого теплообмена q_r при разности температур ($T - T_0$) над поверхностью листа можно использовать формулу

$$q_r = \alpha_r(T - T_0) \quad (6)$$

где α_r – коэффициент, характеризующий лучистый теплообмен, кал/см²·с·°C (Вт/м²·°C).

Конвективный и лучистый теплообмен взаимно дополняют друг друга – при низких температурах большую роль играет конвекция, при более высоких – основной теплообмен происходит за счёт лучистого теплообмена. То есть, так как в теплообмене от поверхности нагретого листа металла к воздуху принимают обе разновидности теплообмена, удельные потоки теплопередачи должны суммироваться. Формула для удельного теплового потока (поверхностной теплоотдачи) может быть записана как:

$$q = q_k + q_r(\alpha_k + \alpha_r)(T - T_0) = \alpha(T - T_0), \quad (7)$$

где α – коэффициент суммарной теплоотдачи, кал/см²·с·°C или Вт/м²·°C.

3. Уравнение теплового баланса при тепловой резке

Из уравнения теплопроводности выводятся все основные зависимости, включая уравнение теплового баланса для некоторого элементарного объёма, находящегося в условиях изменяющегося температурного поля.

Распространяющаяся в металле теплота в общем виде может быть описана известным уравнением теплопроводности [9]

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

Для случая термической резки рассмотрим однородное по толщине листа изотермическое поле (не зависящее от z). Распространение теплоты по плоскости листа выразится формулой

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (9)$$

где $a = \lambda / c\gamma$ – коэффициент температуропроводности, см²/с (м²/с).

Этот случай достаточно близок к условиям резки листов за один проход резака, как для тонких, так и для толстых листов.

Примем допущение, что в резе после прохода резака температура распространяется с одинаковой скоростью по всей площади реза. Тогда зависимость температуры от y и от z будет равна нулю. То есть, $\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$.

Тогда уравнение (9) для распространения теплоты примет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (10)$$

Отметим, что условие (10) выполняется при однопроходной резке.

При удовлетворении требования дифференциального уравнения теплопроводности в каждой точке рассматриваемого пространства в некоторый момент времени необходимо связать частные производные от температуры по координатам. Для обозначения граничных условий в расчётах по распределению теплоты на разных участках реза необходимо задать распределение поля температур на его границах. В начальный момент времени (начало отсчёта) вдоль всех направлений в листе задаётся температура

$$T(x, y, z, t) = T_0(x, y, z)$$

Из первоначального теплового состояния тела можно сделать дальнейшие выводы о распространении теплоты в теле с течением времени. Далее, с учётом граничных условий определяется взаимодействие нагретой зоны с окружающей средой и её составляющими.

4. Граничные условия

Граничные условия в зависимости от рассматриваемого случая могут отличаться. Рассмотрим граничные условия первого, второго и третьего рода.

Под условием первого рода будем понимать, что температура листа металла, через который проходит теплота, зависит от поверхностных координат и от времени. То есть:

$$T_s = T_s(x, y, z, t)$$

Критерием одного из условий первого рода является граничная температура, идущая по изотерме. В случае интенсивного охлаждения поверхности при помощи жидкости с определённой температурой можно принять, что температура T_s является постоянной. В расчётах эту температуру следует принимать как фиксированную величину, а $T_0 = 0$.

Распределение удельного теплового потока через поверхность разрезаемого листа примем как граничные условия 2 рода. Тепловой поток $q_s = q_s(x, y, z, t)$ на исследуемой поверхности примем в зависимости от координат и времени. Обязательным условием является заданный градиент, который описывается кривой, проходящей по границе температурного поля (как частный случай, кривая может иметь постоянный характер). Эту границу примем как адиабатическую – тепловой поток через неё будет равен 0°С. Она будет являться частным случаем второго рода (границу, кроме данного случая, можно считать адиабатической, если тепловые потоки внутри тела и в окружающей среду сопоставимы между собой).

Из условия наличия среды с заданной температурой формируется условие 3 рода.

Запишем уравнение для удельного потока теплоотдачи по закону Ньютона

$$q_s = \alpha_s(T_s - T_0), \quad (11)$$

где α_s – коэффициент полной поверхностной теплоотдачи, Дж/см²·с·°С.

Запишем выражение для удельного теплового потока, протекающего через граничную поверхность:

$$q_s = -\lambda \left(\frac{dT}{dn} \right)_s \quad (12)$$

Тогда для записи условия третьего рода будем иметь:

$$\alpha_s(T_s - T_0) = -\lambda \left(\frac{dT}{dn} \right) \quad (13)$$

Можно рассмотреть частный случай, когда температура окружающей среды постоянна ($T_0 = \text{const}$). Для расчётов удобно принять $T_0 = 0$. Тогда будем иметь

$$\alpha_s T_s = -\lambda \left(\frac{dT}{dn} \right) \quad (14)$$

Это условие можно рассматривать как общее, пригодное для решения большинства практических задач.

Изменение температуры по изотерме соответствует предельному теплообмену на рассматриваемой границе при котором $\alpha/\lambda = \infty$, где $\alpha \rightarrow \infty$, а $\lambda \rightarrow 0$.

В связи с этим на поверхности листа по мере удаления от линии реза температура стремится к температуре окружающей среды. Однако, существует и другой предельный случай, когда поток теплоты через рассматриваемую границу стремится к нулю (условие адиабатичности) – при непродолжительном контакте поверхности металла с воздухом.

5. Аналитические и численные методы расчёта теплопроводности при тепловой резке металла

Известно, что расчёт теплопроводности можно вести либо аналитическими, либо численными методами [5]. В расчётах для сварки металлов применялись методы линейных дифференциальных исчислений с линейными же граничными условиями. При этом все теплофизические свойства металла усреднялись и принимались независимыми от температуры: значения коэффициентов теплоёмкости и теплопроводности принимались постоянными, а теплота фазовых превращений в учёт не принималась вовсе [12].

Применительно к термической резке наиболее подходит метод источников. Однако принятые для случая сварки допущения неизбежно приведут к существенному искажению формы и размеров температурного поля. Дело в том, что источник теплоты при резке (кислородное пламя, плазменная струя, лазерный луч) является поверхностно-распределённым источником теплоты. Учесть все возможные процессы и явления в нём, между ним и поверхностью, в разрезаемом металле и т.п., крайне затруднительно. С точки зрения авторов, целесообразно подобные сложные расчёты сводить к нескольким идеальным случаям, а процессы, сопровождающие термическую резку описывать простыми математическими зависимостями. Например, плазменную дугу можно рассматривать как источник теплоты: точечный, плоский или линейный. Однако, хорошую сходимости решений при таком подходе можно получить только за пределами зоны термического влияния источника теплоты. Вблизи него, а также по оси реза эти идеализированные схемы могут также давать значительные расхождения.

При введении точечного источника теплоты в некоторый объём $dx dy dz$ теплоту, которую получает металл, будем считать введённой относительно некоторой точки,

располагающейся в центре пятна нагрева. Для случая, когда толщина листа ограничена и равна s , при вводе теплоты линейным источником можно рассматривать объём, равный объёму призмы бесконечно малого сечения и толщиной $z=s$. В случае с плоским источником за основу расчёта можно принять площадь некоторой плоскости, а сам источник термической режки определять в координатах объёма [13].

Так же, как и при сварке, типы источников теплоты при термической резке по времени действия можно рассматривать как мгновенные и непрерывно действующие, а по типу ориентации относительно рассматриваемого предмета – неподвижные и подвижные. Последние – постоянной мощности, перемещающиеся прямолинейно и с постоянной скоростью.

Для упрощения расчётов можно принять следующие приближения к идеальным случаям:

- выбранная схема расчёта может влиять на выбор типа источника теплоты (точечный, плоский, линейный);
- независимость от температуры таких свойств металла как поверхностная теплоотдача α , коэффициент теплопроводности λ , объёмная теплоёмкость $a=c\gamma$; условие адиабатической границы;
- теплота, выделяемая при резке, и структурные превращения в металле не учитываются;
- за начало отсчёта принимается температура окружающей среды равная 0°C .

В случае, когда рассматривается резка посредством точечного источника

$$T(R, t) = \frac{Q}{c\gamma(4\pi\alpha t)^{3/2}} \exp\left[-\frac{R^2}{4at}\right] \quad (15)$$

где R – радиус-вектор для определения положения некоторой точки тела $A(x, y, z)$ в пространстве до источника теплоты. Задаётся как $R^2=x^2+y^2+z^2$.

Уравнение описывает трёхмерный процесс распространения теплоты в разрезаемом листе металла, который Берхоу и Фортунье положен в основу метода конечно-элементного моделирования (КЭМ) процессов теплопередачи в металлах [14, 15]. Получаемые изотермы можно аппроксимировать сферами с центром в некоторой точке O , близкой к оси симметрии источника теплоты (рис. 1).

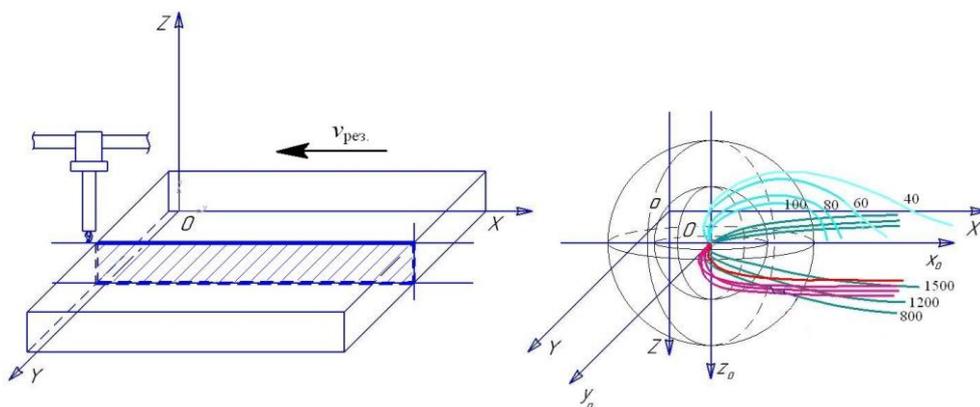


Рис. 1 – К описанию трёхмерного процесса распространения теплоты в разрезаемом листе
 Fig. 1 - To the description of the three-dimensional process of heat propagation in the cut sheet

Если рассмотреть частный случай, не предусматривающий теплообмен с окружающей средой и применить метод КЭМ, уравнение (15) примет вид [16]:

$$T(R, t) = \frac{2Q}{c\gamma(4\pi\alpha t)^{3/2}} \exp\left[-\frac{R^2}{4at}\right] \quad (16)$$

Коэффициент «2» перед Q принят из условия адиабатичности, т.к. в расчёт принимается только половина листа металла, длина которой стремится к бесконечности.

При рассмотрении линейного источника для «бесконечного» листа металла:

$$T(R, t) = \frac{Q}{4\pi\lambda t} \exp\left[-\frac{R^2}{4at}\right] \quad (17)$$

где $r^2=x^2+y^2$; $\lambda=ac\gamma$.

Если плоский источник действует в металле мгновенно, получим

$$T(R, t) = \frac{2}{c\gamma(4\pi\alpha t)^{1/2}} \exp\left[-\frac{x^2}{4at}\right]. \quad (18)$$

Уравнения (15-18) описывают процессы, вызванные воздействием концентрированного источника нагрева при кратковременном его воздействии (например, для случая неподвижного источника). То есть, они могут использоваться для рассмотрения процессов и явлений в начальный период термической резки (при «пробивке» листа металла).

Если же рассматривать подвижный источник теплоты (то есть, собственно процесс разделительной резки), а нагреваемую поверхность рассматривать как «полубесконечное» тело, решение примет вид

$$dT(x_0, y_0, t) = \frac{2qdt'}{c\gamma[4\pi\alpha(t-t')]^{3/2}} \exp\left[-\frac{R'^2}{4a(t-t')}\right], \quad (19)$$

где $R'^2=(x_0-vt')^2+y^2+z_0^2$ – квадрат радиус-вектора в пространственном измерении по которому можно определить расстояние от некоторой заданной точки A до действующего источника в координатах по X, Y, Z ; v – скорость движения источника теплоты.

Если данное уравнение проинтегрировать по двум переменным t и t' , получим изменение температуры при тепловой резке в некоторой точке A (т.е., в любой точке зоны термического влияния):

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T(x_0, y_0, t)}{\partial t \partial t'} &= \left[\frac{2qdt'}{c\gamma[4\pi\alpha(t-t')]^{\frac{3}{2}}} \exp\left[-\frac{R'^2}{4a(t-t')}\right] \right]' \\ &= \frac{2q}{c\gamma} \left[-10 \frac{t'}{[9 \cdot 4\pi\alpha(t-t')]^{\frac{8}{3}}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{2}{[3 \cdot 4\pi\alpha(t-t')]^{\frac{5}{3}}} \left[-\frac{R'^2 e^{-\frac{R'^2}{4a(t-t')}}}{2a(t-t')^3} - \frac{R'^4 e^{-\frac{R'^2}{4a(t-t')}}}{16a(t-t')^4} \right] \right] \quad (20) \end{aligned}$$

Для системы координат x, y, z , перемещающейся вместе с действующим в ней источником теплоты при рассмотрении точки A (x_0, y_0, z_0), конечно-элементное моделирование даёт $x=x_0=vt$, где $y=y_0, z=z_0$, а v – задаётся как скорость источника (см. рис. 2); R – радиус-вектор, обозначающий расстояние от нулевой координаты до некоторой точки A в пространстве, который находится в движущейся системе координат x, y, z ($R^2=x^2+y^2+z^2$).

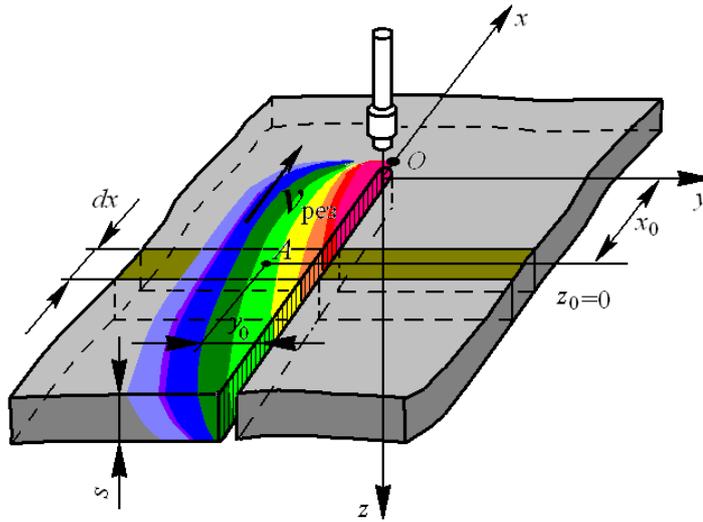


Рис. 2 – К описанию трёхмерного процесса распространения теплоты в разрезаемом листе по методу КЭМ

Fig. 2 - To the description of the three-dimensional process of heat propagation in the cut sheet by the FEM method

Введя новую переменную $t''=t-t'$, продифференцировав уравнение (19) ещё раз и выполнив необходимые преобразования получим:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^3 T(x_0, y_0, z_0, t)}{\partial t \partial t' \partial t''} = \\ & = \frac{2q}{c\gamma} \left[\left[-10 \frac{t'}{[36\pi\alpha]^{\frac{8}{3}}} (t-t')^{\frac{8}{3}} - \frac{2}{[12\pi\alpha]^{\frac{5}{3}}} (t-t')^{\frac{5}{3}} \right] \times \right. \\ & \times \left. \left[-\frac{R'^2 e^{\frac{-R'^2}{4a(t-t')}}}{2a} (t-t')^3 - \frac{R'^4 e^{\frac{-R'^2}{4a(t-t')}}}{16a} (t-t')^4 \right] \right] = \\ & = \frac{2q}{c\gamma} \left[\left[-10 \frac{t'}{[36\pi\alpha]^{\frac{8}{3}}} (t'')^{\frac{8}{3}} - \frac{2}{[12\pi\alpha]^{\frac{5}{3}}} (t'')^{\frac{5}{3}} \right] \times \right. \\ & \times \left. \left[-\frac{R'^2 e^{\frac{-R'^2}{4a(t-t')}}}{2a} (t'')^3 - \frac{R'^4 e^{\frac{-R'^2}{4a(t-t')}}}{16a} (t'')^4 \right] \right]. \end{aligned} \quad (21)$$

Заключение

Представленные выше уравнения, описывающие размеры и конфигурацию температурных полей, получены для упрощенных моделей. Однако они могут применяться в расчётах, в частности, для плазменной резки металла, в том числе - на форсированных режимах. С их помощью можно предварительно оценить:

- а) температурные деформации кромок листа при разделительной тепловой резке;
- б) поля температур, возникающих при плазменной резке, для учёта теплового воздействия на металл и определения размеров зоны термического влияния.

Кроме того, полученные уравнения являются базой для разработки методики расчёта тепловых деформаций и напряжений при тепловой резке металла. Предполагается, что такая методика должна также учитывать и такие факторы как: поперечное и продольное распределение температуры по срезу листа, температуру окружающей среды и взаимодействие с ней, параметры геометрии разрезаемого листа и его жёсткость, теплоёмкость, температуропроводность и прочие температурные характеристики.

Список литературы

1. Физико-химические процессы при воздействии плазменной струи (дуги) [Электронный ресурс]. – URL: <https://lektsii.org/1-18616.html>.
2. Зеленский С.Л., Белинский В.А., Василенко С.Л., Коровченко А.И., Олейник В.А., Золотопупова Т.Б. Сравнение автоматизированной плазменной и кислородной резки на машинах с ЧПУ низкоуглеродистых и низколегированных сталей малой толщины. Журнал «Сварщик», №2'14, с.22.
3. Винчив А.Н. Тепловые деформации и потеря устойчивости при плазменной резке металла / А.Н. Винчив, Е.Г. Бурмистров // Научные проблемы водного транспорта. – 2020. – № 64. – С. 27-35. DOI: 10.37890/jwt.vi64.94.
4. Рыкалин, Н.Н. Тепловые основы сварки. Ч. 1. Процессы распространения тепла при сварке / Н.Н. Рыкалин. – М. : Издательство АН СССР, 1974.
5. Рыкалин Н.Н. Расчёт тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. – М. : Машгиз, 1957.
6. Рыкалин Н.Н. Температурное поле разнородных материалов при сварке встык поверхностным источником тепла / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов // Физика и химия обработки материалов, 1964. №6.
7. Рыкалин Н.Н. Распределение температуры в элементах конструкции при сварке / Н.Н. Рыкалин // Автогенное дело, 1938. №5, 7.
8. Садриев Р.Ш. Экспериментальное определение температуры плазменного столба в установках плазменной резки и сварки металлов / Р.Ш. Садриев // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2007. № 3. – С. 10-11.
9. Петров Г.Л. Теория сварочных процессов / Г.Л. Петров, А.С. Тумарев. – М. : Высшая школа. Т.1, 1967.
10. Хотин А.С., Боровикова Р.П., Нечаева Т.В., Пушкарский А.С. Теплопроводность твёрдых тел. – М. : Энергоатомиздат, 1984.
11. Krein F. Fundamentals of heat transfer / F. Krein, W. Black. - М.: Mir, 1983.
12. Lindgren L. E. Computational mechanics of welding. Thermomechanical and microstructural modeling. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2007.
13. Панов В.И., Кандалов С.В. Газокислородная резка сталей больших толщин. Тепловые особенности газоплазменной резки металла большой толщины. Ч.2, Журнал «Сварщик», №4'20, с.22.
14. Berhou J., Fortunier R. Finite element modeling of heat transfer. USA: JW Publishing, 2004.
15. Devyatov S. Modeling of welding processes using the software of the company ESI Group №2/2011/CADmaster. p 48-52.
16. Мишичев А.И., Мартъянова А.Е. Решение задач теплопроводности методом конечных элементов в САЕ – системе ELCUT /А.И. Мишичев, А.Е. Мартъянова. – URL: <https://elcut.ru/publications/mishichev.pdf>.

References

1. Physical and chemical processes under the influence of a plasma jet (arc) [Electronic resource]. – Access mode: <https://lektsii.org/1-18616.html>.
2. Zelensky S.L., Belinsky V.A., Vasilenko S.L., Korovchenko A.I., Oleinik V.A., Zolotopupova T.B. Comparison of automated plasma and oxygen cutting on CNC machines of low-carbon and low-alloy steels of small thickness. Journal «Welder», №2' 14, p. 22.
3. Vintsiv A.N. Thermal deformations and loss of stability in the plasma cutting of metal / A.N. Vintsiv, E.G. Burmistrov // Scientific problems of water transport. – 2020. – No. 64. – P. 27-35. DOI: 10.37890/jwt.vi64.94.
4. Rykalin N. N. Heat the basics of welding. Part 1. The process of heat distribution during welding / N.N. Rykalin. – M. : publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1974.
5. Rykalin N. N. Calculation of thermal processes in welding / N. N. Rykalin. – M. : Mashgiz, 1957.
6. Rykalin N.N. The temperature field of heterogeneous materials at the weld surface with heat source / N.N. Rykalin, A.A. Uglov // Physics and chemistry of materials treatment, 1964. № 6.
7. Rykalin N.N. The temperature distribution in the elements of construction when welding / N. N. Regalen // autogenous business, 1938. Number 5, 7.
8. Sadriev R.S. Experimental determination of the temperature of the plasma column in installations of plasma cutting and welding metals / R. sh Sadriev // Bulletin of Kazan state technical University. A.N. Tupolev. – 2007. No. 3. – p. 10-11.
9. Petrov G.L. Theory of welding processes / G.L. Petrov, A.S. Tomarev. – M.: Higher school. Vol. 1, 1967.
10. Khotyn, A.S., Borovikova, R.P., Nechaev, T.V., Sokol, A.S. thermal Conductivity of solids. – M. : Energoatomizdat, 1984.
11. Krein, F. Fundamentals of heat transfer / F. Krein, W. Black. - M.: Mir, 1983.
12. Lindgren L.E. Computational mechanics of welding. Thermomechanical and microstructural modeling. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2007.
13. Panov V.I., Kandalov S.V. Gas-oxygen cutting of large-thickness steels. Thermal features of gas-flame cutting of metal of large thickness. Part 2, Journal «Welder», No.4' 20, p. 22.
14. Berhou J., Fortunier R. Finite element modeling of heat transfer. USA: JW Publishing, 2004.
15. Devyatov S. Modeling of welding processes using the software of the company ESI Group №2/2011/CADmaster. P. 48-52.
16. Mishichev A.I., Martyanova A.E. Solution of heat conduction problems by the finite element method in the CAE-system ELCUT /A. I. Mishichev, A. E. Martyanova. – Access mode : <https://elcut.ru/publications/mishichev.pdf>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Винцив Анна Николаевна, инженер-технолог, АО «Судостроительный завод «Вымпел», 152912, Россия, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Новая, 4, e-mail: a.n.vintsiv@vypmel-rybinsk.ru

Anna N. Vintsiv, Process Engineer, JSC "Vypmel Shipbuilding Plant", 152912, Russia, Yaroslavl region, Rybinsk, Novaya str., 4, e-mail: a.n.vintsiv@vypmel-rybinsk.ru.

Бурмистров Евгений Геннадьевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры проектирования и технологии постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru

Evgeny G. Burmistrov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Design and Technology of Ship Construction, Volga State University of Water Transport (VSUVT), 5 Nesterova str., Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.03.2020; опубликована онлайн 15.06.2021
Received 26.03.2020; published online 15.06.2021