

3. Коротков, В. А. Исследование влияния скорости охлаждения на качество поверхностного слоя при плазменной закалке / В. А. Коротков, С. П. Ананьев, А. В. Шакуров // Сварочное производство. – 2012. – № 3. – С. 23–27.

УДК 536.2

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ВЫХОДНОГО СЕЧЕНИЯ СОПЛА ИСТОЧНИКА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТРУИ НА УРОВНИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Веремейчик А. И., Холодарь Б. Г.

*Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь*

Воздействие на элементы машин и механизмов подвижным тепловым потоком высокой интенсивности используется для модификации свойств материалов в приповерхностной зоне. Задачей воздействия является целенаправленное изменение фазового состава материала и его микроструктуры, что в свою очередь ведет к требуемому улучшению механических свойств материала. При этом основным вопросом является подбор оптимального режима теплового нагружения, который зависит прежде всего от уровня и скорости нагрева и следующего за ним охлаждения тела. В связи с этим расчеты температурных полей в соответствующих зонах материала имеют первостепенное значение.

Известно, что значительная трансформация материала в зоне термического воздействия происходит на небольших глубинах, составляющих в большинстве случаев доли миллиметра. Поэтому в качестве объекта теплового нагружения рассматривается обычно полупространство, что сводит к минимуму число граничных условий задачи и позволяет использовать для решения метод приложения мгновенных точечных источников тепла (метод Грина). Для такого источника энергии, расположенного в точке с координатами x_0, y_0, z_0 , температура в любой точке тела и в любой момент времени описывается выражением:

$$T(r,t) = \frac{Q}{8(\pi at)^{3/2}} \exp\left[-\frac{r^2}{4at}\right], \quad (1)$$

где Q – выделение тепла в точке в единицу времени, $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коэффициент

температуропроводности, λ – коэффициент теплопроводности, c – удельная теплоемкость, ρ – плотность материала, t – время, $r^2 = (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2$ – расстояние до рассматриваемой точки. Здесь T – приращение температуры над исходным уровнем температуры тела в данной точке (для удобства далее принимаем одинаковым во всех точках).

Поскольку для реальных источников тепловое воздействие распределено по некоторой поверхности (объему) тела, необходимо рассматривать действие совокупности точечных источников, что приводит к необходимости интегрирования выражения (1) в пределах этой поверхности (объема):

$$T_s(r, t) = \int \left(\int T(r, t) ds \right) d\xi, \quad (2)$$

где ξ – переменная интегрирования по времени от начального значения $\xi=0$.

Естественно, что этот способ удобен для случая, когда возможен подход теории линейной теплопроводности, что далее принимается.

Для движущихся источников энергии при вычислениях должна быть задана конкретная траектория движения зоны прямого теплового воздействия. В простейшем случае движения источника вдоль оси Ox с постоянной скоростью V выражение (2) примет вид:

– для источника с нормально-круговым распределением интенсивности исходящего потока [1]:

$$T(x, y, z, t) = \left[2P_0 \exp\left(-\frac{Vx}{a}\right) (c\gamma(4\pi a)^{3/2}) \right] \times \\ \times \int_0^t \frac{1}{\sqrt{\xi}(t_0 + \xi)} \exp\left[-\frac{z^2}{4a\xi} - \frac{r^2}{4a(t_0 + \xi)} - \frac{V^2(t_0 + \xi)}{4a}\right] d\xi, \quad (3)$$

– для источника с равномерно-распределенным по прямоугольной площадке потоком:

$$T(x, y, z, t) = \frac{q}{8\rho c\sqrt{\pi a}} \int_0^w \exp\left(-\frac{z}{w}\right)^2 F_x F_y dw, \quad (4)$$

где q – интенсивность теплового потока, $w = \sqrt{4at}$,

$$F_x = \Phi\left[\frac{x+b}{w} - \frac{V}{4a}w\right] - \Phi\left[\frac{x-b}{w} - \frac{V}{4a}w\right], \quad F_y = \Phi\left[\frac{y+l}{w}\right] - \Phi\left[\frac{y-l}{w}\right],$$

b, l – размер площадки вдоль осей x и y соответственно,

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du \text{ – интеграл вероятности.}$$

Естественно, что фактическая форма поверхности приложения тепловой нагрузки должна в той или иной степени сказаться на результатах вычислений, поскольку тепловая задача, как это имеет место и во всей механике сплошной среды, подчиняется известному принципу Сен-Венана.



В таблице 1 приведены результаты расчетов максимальной температуры в нескольких точках тела (по глубине z и ширине y), расположенных в плоскости, перпендикулярной оси движения Ox . Поверхность воздействия задавалась в виде прямоугольника и круга, площади которых одинаковы ($A = 9 \text{ мм}^2$). Прямоугольная площадка имела стороны 4.25 и 2.0 мм, которые могут быть ориентированы широкой стороной либо перпендикулярно оси движения источника, либо параллельно ей, для квадрата сторона составляет 3 мм, радиус сечения для круга $R \approx 1.69$ мм.

Числовые значения термодинамических параметров параметры задачи соответствуют стали 40X13 и составляют: плотность материала $\rho = 7860 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, тепло-

емкость $c = 745 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 38 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$, температура плавления $T_{пл} = 1550 ^\circ\text{C}$. Эффективная мощность источника $P_0 = 1000 \text{ Вт}$, скорость движения $V = 700 \text{ мм/мин} = 1.17 \text{ см/с}$, положение расчетных точек на траектории соответствует координате $x \approx 8.1 \text{ см}$.

Еще раз подчеркнем, что формулы (3), (4) непосредственно подходят только для случая постоянных термодинамических характеристик, поэтому указанные константы материала приняты по рекомендации [1, 2] соответствующими температуре $T = 900 ^\circ\text{C}$.

Таблица 1 – Максимальная температура в точках тела

Форма пятна нагрева	Максимальная температура в точках с координатами, мм						
	$y = 0;$ $z = 0$	$y = 0;$ $z = 0.25$	$y = 0;$ $z = 0.5$	$y = 0;$ $z = 0.75$	$y = 0;$ $z = 1.0$	$y = 2.0;$ $z = 0$	$y = 4.0;$ $z = 0$
Прямоугольник ↑X 	1650.0 0.38	1309.3 0.33	1041.8 0.24	830.4 0.09	665.5	791.3	111.7
Прямоугольник ↑X 	1481.2 0.25	1181.6 0.21	927.9 0.14	735.3	589.4	368.7	102.1
Квадрат ↑X 	1595.0 0.31	1290.0 0.26	1022.7 0.20	812.8 0.04	649.2	449.0	105.2
Круг ↑X 	1286.6 0.49	1105.1 0.42	942.1 0.31	807.0	694.6	894.2 0.24	325.6

В случаях, когда максимальная температура в точке превышает $850 ^\circ\text{C}$, в таблице 1 под ней указан интервал этого превышения (с).

Для большей наглядности на рисунках 1, 2 представлены зависимости максимальной температуры от координат для различных форм пятна нагрева.

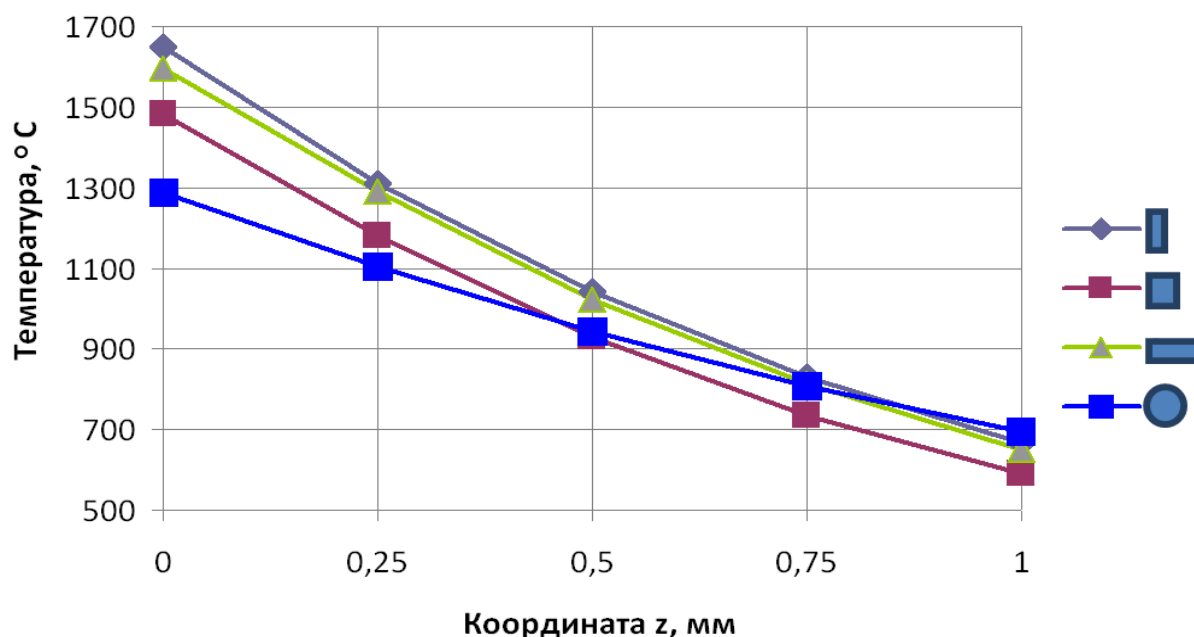


Рисунок 1 – Зависимость максимальной температуры от координаты z

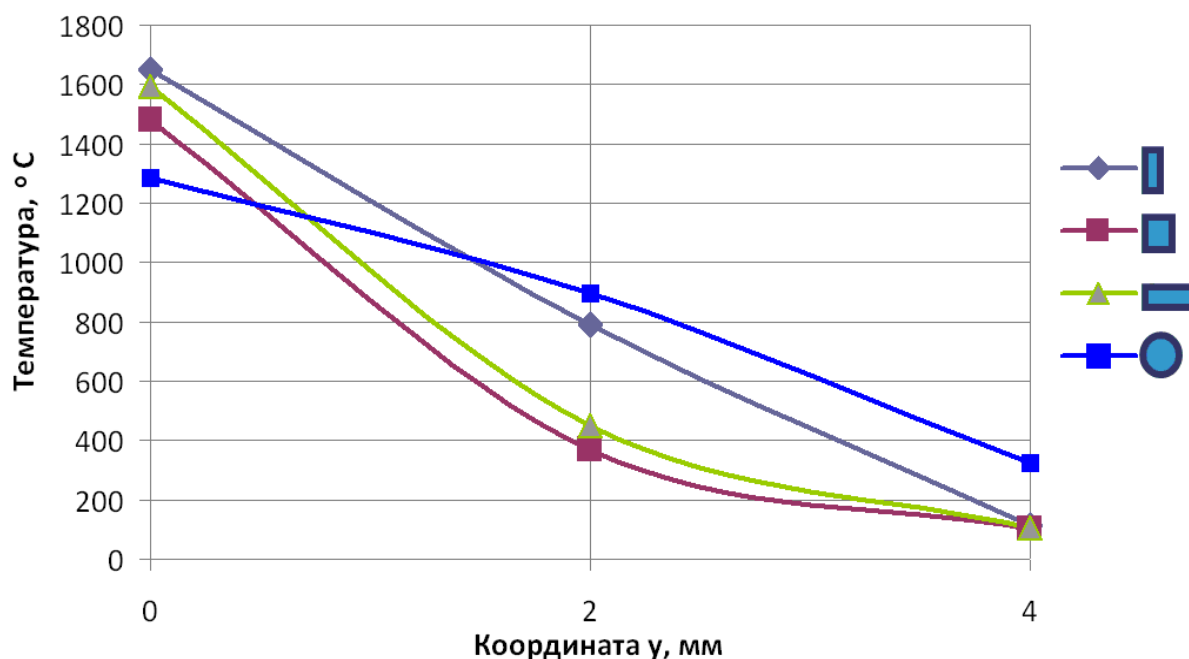


Рисунок 2 – Зависимость максимальной температуры от координаты y

Из результатов расчетов видно, что форма пятна нагрева оказывает существенное влияние на величину максимальной температуры, но ее роль падает при удалении от центра нагрева даже для таких небольших отклонений, как приняты в таблице 1, о чем можно судить по соотношению между температурами при $y = 2$ с и $y = 4$ с их значениями при $y = 0$ для разных форм пятна нагрева.

Распределение максимальной температуры по глубине z для рассмотренных случаев форм пятна нагрева имеет одинаковый вид для рассмотренных термодинамических параметров с тем отличием, что для прямоугольного и квадратного сечений изменение максимальной температуры на глубине 1 мм составляет 892...985 °C, а для круглого – 592 °C. Графики максимальной температуры по ширине y имеют нисходящий характер, причем для круглого отверстия кривая обращена выпуклостью вверх.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н. Н. Рыкалин [и др] – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М. : ГНТИ машиностроительной литературы, 1951. – 296 с.