

УДК 539.3

А. И. ВЕРЕМЕЙЧИК, М. И. САЗОНОВ, В. М. ХВИСЕВИЧ

Брестский государственный технический университет

С. ЯКУШЕВИЧ

Белостокский технический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННОГО В ТЕЛАХ ИСТОЧНИКА НАГРЕВА

При помощи приборной системы с высокочувствительным датчиком разработана методика экспериментального определения температурных полей при поверхностном плазменном упрочнении. С использованием метода конечных элементов разработан алгоритм численного решения задач теплопроводности при воздействии движущихся локальных источников нагрева. Проведенные расчеты представляют возможность варьирования различными параметрами процесса поверхностной термообработки (скоростью перемещения источника, током дуги и т.д.) для получения требуемых поверхностных свойств конструктивных элементов машин и механизмов.

Введение. При описании любого процесса термообработки конструктивных элементов машин и механизмов (закалка, поверхностное плазменное напыление и т. д.) важным фактором является исследование распространения полей температур и термонапряжений. Температурное поле является одной из основных физических зависимостей, определяющих эффективность поверхностного упрочнения высококонцентрированными источниками нагрева. Зная изменение температуры тела в зависимости от времени, ее установившееся значение в определенной точке, можно судить (в зависимости от условий обработки, физических свойств тел, окружающей среды) о том, какие процессы термообработки могут быть реализованы. Определение температурного поля в теле детали при нагреве и охлаждении позволяет прогнозировать состав вещества после термообработки, его фазовое и структурное состояние.

В статье рассматривается теоретическое и экспериментальное определение температурных полей при поверхностном плазменном упрочнении стальных изделий.

Экспериментальная часть. Для экспериментального определения температурных полей использовалась разработанная авторами приборная система. На рисунке 1 показан ее внешний вид.

В состав системы входят датчик, цифровой анализатор и компьютер. Цифровой анализатор позволяет усиливать малый аналоговый сигнал, отфильтровывать его, отцифровывать и масштабировать. Взаимодействие оператора с

системой обеспечивается через персональный компьютер. Система позволяет выполнять регистрацию температуры со скоростью 1000 измерений в секунду.

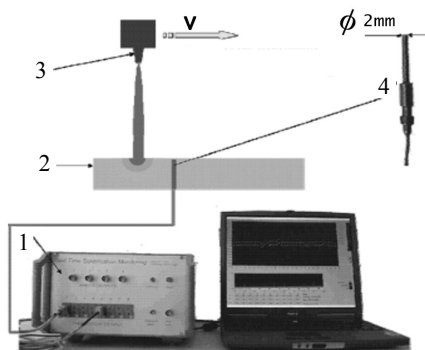


Рисунок 1 – Приборная система для определения температурных полей:
1 – измерительная система; 2 – образец; 3 – плазмотрон; 4 – измерительный датчик

Датчик устанавливается в отверстие, выполненное в теле образца на расстоянии 0,5 мм ниже обрабатываемой поверхности. Датчик может быть изготовлен из различных материалов: сталь, медные сплавы, легкие металлы, керамика. Охватываемый диапазон измеряемых температур от 200 до 2200 °С. Время выхода на рабочий режим ~ 400 мкс.

Если датчик (точка измерения температуры) расположен очень близко от нагреваемой поверхности (на расстоянии, меньшем 0,1 мм), то с определенной долей погрешности можно считать, что измеренная температура соответствует температуре поверхности образца. В случае, когда расстояние между точкой измерений и поверхностью больше указанного, температура в зависимости от времени определялась обратным методом, который построен на реализации вариационного уравнения распределения тепла Фурье. При этом полагалось, что процесс распространения тепла является одномерным. В такой постановке уравнение Фурье имеет вид:

$$\rho c \frac{dT(z, t)}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \right),$$

где ρ – плотность материала; c – коэффициент теплоемкости; λ – коэффициент теплопроводности; T – температура; z – координата в направлении распространения тепла; t – время. Определение температур поверхности путем решения данного уравнения осуществлялось в автоматическом режиме с использованием программного обеспечения, входящего в комплект приборной системы.

Определенная температура поверхности используется в качестве граничных краевых условий Дирихле для численной реализации уравнений теплопроводности Фурье методом конечных элементов. Результаты измерений ре-

гистрировались компьютером и использовались для дальнейшего анализа с помощью программы ANSYS [1], которая позволяет вычислять температуру в объеме изделия во время плазменной обработки. Вычисленные значения коэффициента теплообмена для различных параметров нагрева (число Рейнольдса, температура дуги плазмы, расстояние от сопла плазмотрона до обрабатываемой поверхности) позволяют оптимизировать процесс закалки.

Численное моделирование. Чтобы аналитически определить температурные поля, необходимо решить уравнение теплопроводности. Для этого задаются параметры процесса упрочнения: скорость перемещения источника v , плотность теплового потока q и размеры анодного пятна. В работах [2–5] постановка задачи теплопроводности осуществлялась в зависимости от скорости перемещения источника нагрева (одномерная постановка при $v > 0,6$ м/мин, а при $v < 0,6$ м/мин использовалась формула, которая получена путем решения задачи нагрева тела через круг на поверхности; значения температуры определялись для точек, расположенных в центре зоны нагрева).

Уравнения теплопроводности решаются методом конечных элементов для всех измеряемых температур. Температура определяется в зависимости от времени и координаты z . Поток тепла в зависимости от времени находится по следующей формуле:

$$q(t) = \lambda \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (z = 0).$$

Коэффициент теплообмена определяется из соотношения

$$\alpha(t) = q(T_p - T_q),$$

где T_p – температура поверхности; T_q – температура дуги плазмы.

Начальные и граничные условия имеют вид:

$$T(z, 0) = T_0; \quad \lambda \frac{\partial T(0, t)}{\partial z} = q - \frac{\partial T(h, t)}{\partial z} = 0.$$

Для реализации задачи теплопроводности в случае движущегося источника нагрева был предложен следующий подход. При плазменной обработке поверхности тепловая нагрузка на обрабатываемую деталь передается ограниченной площадке. Если струя ориентирована перпендикулярно поверхности, то на ней образуется участок оплавленного материала, размеры которого легко могут быть измерены. Поскольку при этом получение оплавленной зоны не является целью данного процесса, а инструмент непрерывно перемещается вдоль детали с заданной скоростью, то можно в первом приближении считать, что в пятне нагружения на поверхности достигается температура, равная температуре плавления материала, и дальнейшего разогрева этого уже жидкого металла не происходит. В этом случае фазовые превращения практически отсутствуют и для определения температурного поля обрабатываемой

детали можно применить классические уравнения теплопроводности твердого тела с граничными условиями первого рода:

$$\frac{dT}{dt} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где $T = T(t, x, y, z)$ – температура; t – время; a – коэффициент температуропроводности материала; x, y, z – координаты расчетной точки тела.

Из экспериментов известно, что для рассматриваемой задачи зона интенсивного прогрева и закалки составляет по глубине величину порядка радиуса R пятна нагружения, поэтому при определении температурного поля можно даже для пластины небольшой толщины $h > 10R$ использовать решения, полученные для полупространства. Такое решение, пригодное для вычисления температуры в любой точке для любого момента времени при стационарном поверхностном источнике ограниченных размеров, известно [3] и имеет вид:

$$T(t, r) = \frac{kRq}{2\lambda} \int_0^\infty J_0(\varphi r) J_1(\varphi R) \left\{ e^{-\varphi z} \Phi^* \left[\frac{z}{2\sqrt{at}} - \lambda\sqrt{at} \right] - e^{\varphi z} \Phi^* \left[\frac{z}{2\sqrt{at}} + \lambda\sqrt{at} \right] \right\} \frac{d\varphi}{\varphi}, \quad (2)$$

где q – интенсивность теплового потока поверхностного источника; $J_0()$ и $J_1()$ – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка соответственно; $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ – расстояние от центра пятна нагружения до рассматриваемой точки пространства, $\Phi^*(\cdot) = 1 - \Phi(\cdot)$, где $\Phi(\cdot)$ – функция ошибок:

$$J_0(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \cos(x \sin \vartheta) d\vartheta; \quad J_1(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \cos(\vartheta - x \sin \vartheta) d\vartheta; \quad (3)$$

$$\Phi^*(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-\vartheta^2} d\vartheta.$$

Поскольку в процессе плазменной термообработки источник тепла перемещается вдоль свободной граничной поверхности $z = 0$, то решение (2) должно быть модифицировано при его использовании для определения $T(t, r)$. Имея в виду сложность выражения (2) и невозможность его интегрирования для получения решения о подвижном пятне в аналитическом виде, вычисления температурного поля проведены для скачкообразного перемещения инструмента на расстояние, равное диаметру пятна, причем время стационарного состояния принято равным времени смещения инструмента на диаметр пятна. Поскольку зона пятна нагружения мала ($\sim 1,5$ – $2,0$ мм), а скорость смещения инструмента v составляет в опытах $v = 4 \dots 20$ мм/с, то длительность такого нагружения оказывается весьма малой, и расчетные точки по шкале времени образуют плотную группу, достаточную для построения непрерывного графика зависимости температуры от времени в любой точке тела.

Для решения уравнений использована программа, написанная на языке программирования Fortran, в которой разработаны специальные подпрограммы для вычисления функций Бесселя J_0 , $J_1(\cdot)$ и функции ошибок $\Phi^*(\cdot)$. Вычислительная сложность получения результатов состоит в том, что для больших значений аргументов рассматриваемых функций (а из (3) следует, что они меняются в пределах от 0 до ∞) вычислительные ряды являются расходящимися, и для преодоления этого недостатка приходится использовать асимптотические представления функций.

Стыковка непрерывных и асимптотических участков выполнена на специальных тестовых примерах и дает достаточно гладкие переходы на границах между участками.

Результаты и их обсуждение. Для расчетов использовались значения коэффициентов теплопроводности λ и теплоемкости C в зависимости от температуры, которые приведены в [7]. В рассмотренных диапазонах их выражения имеют вид:

$$\begin{aligned} - \text{при } 20 \leq T \leq 150 \text{ }^\circ\text{C} & \quad \lambda = 12,6 - 0,443 T ; \\ 150 \leq T \leq 900 \text{ }^\circ\text{C} & \quad \lambda = 52,14 - 0,0296 T ; \\ 20 \leq T \leq 700 \text{ }^\circ\text{C} & \quad C = (3507384,7 + 3132,3 T) / \rho ; \\ 700 \leq T \leq 750 \text{ }^\circ\text{C} & \quad C = (110140 T - 71398000) / \rho ; \\ 750 \leq T \leq 900 \text{ }^\circ\text{C} & \quad C = (111812000 + 134140 T) / \rho . \end{aligned}$$

Значение плотности принималось постоянным. В частности для стали 45 $\rho = 7825 \text{ кг/м}^3$.

По результатам вычислений построены графики распределения температуры в поверхностном слое образца из стали 45 (рисунок 2).

Степень локализации ввода тепла в область изделия (пятно нагрева) влияет на скорость охлаждения поверхностного слоя металла, структуру и свойства упроченной зоны. В общем случае порядок величины скорости охлаждения ($^\circ\text{C/с}$) практически соответствует порядку величины тепловой мощности плазмотрона (Вт/см^2), в нашем случае модернизированный плазмотрон имеет тепловую мощность $(2,5 \dots 6,0) \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$.

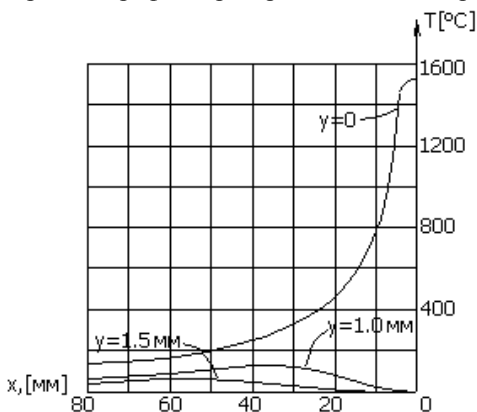


Рисунок 2 – Распределение температуры в поверхностном слое металла на глубинах y

На основании экспериментальных исследований построены зависимости скорости нагрева и охлаждения поверхностного слоя образцов при воздействии плазменной струи (рисунок 3).

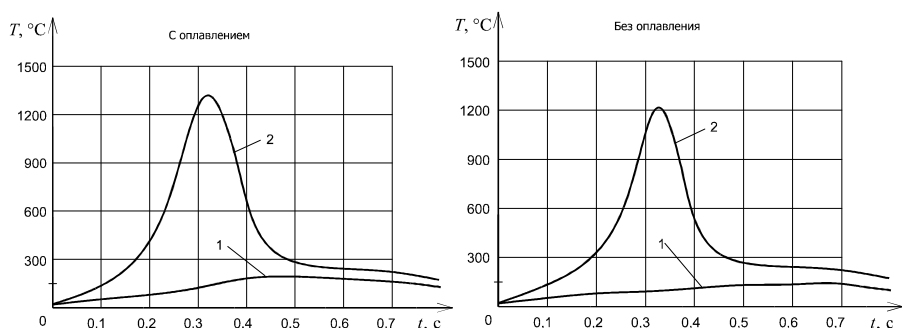


Рисунок 3 – Графики экспериментальных значений температуры:

- 1 – исходные (экспериментальные) значения;
- 2 – расчетные значения температуры на поверхности

Закключение. В результате проведенных исследований можно заключить:

- на основе применения приборной системы с высокочувствительным датчиком разработана методика экспериментального определения температуры при воздействии высококонцентрированных источников нагрева;
- разработан алгоритм численного решения задач теплопроводности, возникающих при воздействии движущихся локальных источников нагрева;
- сравнение значений температуры, определенных экспериментально и теоретически, показало удовлетворительное совпадение результатов.

Проведенные расчеты представляют возможность варьирования различными параметрами процесса поверхностной термообработки (скоростью перемещения источника, током дуги и т. д.) для получения требуемых поверхностных свойств конструктивных элементов. Зная значение температуры и напряжения в любой точке тела, можно определить начало и окончание структурных превращений в поверхностном слое металла при воздействии плазменной дуги. Проведенные исследования позволяют прогнозировать параметры технологических процессов упрочнения с помощью высококонцентрированных движущихся источников тепла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 <http://www.ansys.com/>

2 **Спиридонов, Н. В.** Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н. В. Спиридонов, О. С. Кобяков, Н. Л. Куприянов. – Минск : Вышэйшая школа, 1988. – 155 с.

3 **Кобяков, О. С.** Поверхностное упрочнение сталей при микродуговом нагреве металла / О. С. Кобяков, Е. Г. Гинзбург // *Машиностроение*. – Минск, 1985. – Вып.10. – С. 127–130.

4 **Карслоу, Г.** Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1964. – 487 с.

5 **Chadwick, P.** Thermoelasticity. The dynamical theory / P. Chadwick // *Progress in solid mechanics*. – 1960. – Vol. 1. – № 6. – P. 263–328.

6 **Кундас, С. П.** Компьютерное моделирование процессов термической обработки сталей : монография / С. П. Кундас. – Минск : Бестпринт, 2005. – 313 с.

7 **Теплофизические свойства веществ**: справочник / под ред. Н. Б. Варгафтика. – М. : Госэнергоиздат, 1956. – 367 с.

A. I. VEREMEJCHIK, M. I. SAZONOV, V. M. HVISEVICH, S. JAKUSHEVICH
**HIGH CONCENTRATED BODY HEATING SOURCE
TEMPERATURE FIELDS DEFINITION TEST**

The technique for experimental surface plasma hardening temperature fields determination with the help of highly sensitive sensor instrument system has been developed. The algorithm for numerical problem of local moving sources of heating thermal conductivity solutions with the help of finite elements method has been worked out. The computations give the possibility for different surface thermal process quality variations (by traverse speed of sources, arc current, etc.) for the purpose of obtaining necessary machine and mechanism construct surface characteristics.

Получено 27.05.2008

**ISBN 978-985-468-565-6. Механика. Научные исследования
и учебно-методические разработки. Вып. 3. Гомель, 2009**

УДК 656.212.6.073.22.002.5

И. А. ВОРОЖУН, А. В. ЗАВОРОТНЫЙ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

**АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ В ЭЛЕМЕНТАХ КРЕПЛЕНИЯ ТРУБ
К ПЛАТФОРМЕ**

В работе на основе принципа Даламбера составлена система 9 дифференциальных уравнений, описывающих движение железнодорожной платформы с пятью попарно закрепленными на ней трубами. В результате решения выведенной системы уравнений получены расчетные оценки сил в элементах крепления труб при соударении платформы с неподвижными вагонами.

Технические условия на крепления грузов [1] предусматривают размещение четырех металлических труб диаметром 1420 мм в полувагоне и трех труб