

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ С УЧЕТОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

*Батрак В.В., Веремейчик А.И., Сазонов М.И.,
Хвисевич В.М., Черноиван Н.В.*

Брестский государственный технический университет,
Брест, Республика Беларусь

В любом процессе термообработки конструктивных элементов машин и механизмов (закалке, поверхностном плазменном напылении и т.д.) важным фактором является исследование формирования полей температур и термонапряжений [0-4]. Температурное поле является одной из основных физических характеристик поверхностного упрочнения высококонцентрированными источниками нагрева. Зная изменение температуры тела в зависимости от времени, ее установившиеся значения 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.

Не смотря на то, что решения задач механики термонапряжений для тел, находящихся в условиях нестационарного температурного воздействия от движущегося источника нагрева, получены в целом ряде работ [1, 3, 4], все они далеки до окончательной завершенности вследствие трудностей, как при постановке самих экспериментальных исследований по изучению распространения полей температур и термонапряжений, так и трудностей решения интегральных уравнений задач нестационарной теплопроводности. Особенно это актуально при исследовании деформированного состояния тел с учетом анизотропии и задач терморазрушения в условиях быстрого нагрева тел.

В качестве высококонцентрированного источника нагрева использовался плазмотрона постоянного тока. Для перемещения плазмотрона с заданной скоростью создано устройство, реализующее плоскопараллельное движение по копиру упрочняемой детали относительно плазмотрона. Силовой электроисточник обеспечивает горение дуги при напряжении 14-35 В и токах от 6 А до 32 А. Плазмотрон позволяет реализовать плотность теплового потока на поверхности детали $2,5 \cdot 10^7 - 6,0 \cdot 10^7$ Вт/м².

Для определения температурных полей использовалась разработанная приборная система. 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 персональным компьютером. Система позволяет выполнять регистрацию температуры со скоростью 1000 измерений в секунду.

Датчик устанавливается в отверстие, выполненное в теле образца на расстоянии 0,5 мм ниже обрабатываемой поверхности. Температура регистрировалась системой, компьютер обрабатывал в данный момент времени тепловой поток, а затем коэффициент теплообмена для каждого момента времени.

Если датчик (точка измерения температуры) расположен очень близко от нагреваемой поверхности (расстояние меньше чем 0,1 мм), можно с определенной долей погрешности считать, что измеренная температура соответствует температуре поверхности образца. В случае, когда расстояние между точкой измерений и поверхностью больше, температура в зависимости от времени определялась обратным методом. Определенная этим способом температура поверхности используется в качестве граничных краевых условий Дирихле для численной реализации уравнений теплопроводности Фурье методом конечных элементов.

При проведении экспериментов полагали, что процесс распространения тепла является одномерным. В такой постановке уравнение имеет вид

$$\rho c \frac{dT(z,t)}{dt} = \frac{\partial T}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T(z,r)}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где c – коэффициент теплоемкости; ρ – плотность материала; λ – коэффициент теплопроводности; T – температура; t – время; z – координата в направлении распространения тепла.

Результаты измерений регистрировались компьютером и использовались для дальнейшего анализа с помощью программы ANSYS, которая позволяет вычислять температуру в трехмерном измерении во время плазменной обработки.

При плазменной обработке поверхности тепловая нагрузка на обрабатываемую деталь передается ограниченной площадке. Струя ориентирована перпендикулярно поверхности и 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 можно считать отсутствующими и для определения температурного поля обрабатываемой детали можно применить классические уравнения теплопроводности твердого тела с граничными условиями первого рода

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

где a – коэффициент температуропроводности материала, x, y, z – координаты расчетной точки тела.

Из экспериментов известно, что для рассматриваемой задачи зона интенсивного прогрева 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 полу-

пространства. Такое решение, пригодное для вычисления температуры в любой точке в любой момент времени при стационарном поверхностном источнике ограниченных размеров, известно и имеет вид

$$T(t,r) = \frac{kRq}{2\lambda} \int_0^{\infty} J_0(\varphi r) \cdot J_1(\varphi R) \left\{ \exp(-\varphi z) \Phi^* \left[\frac{z}{2\sqrt{at}} - \lambda\sqrt{at} \right] - \exp(\varphi z) \Phi^* \left[\frac{z}{2\sqrt{at}} + \lambda\sqrt{at} \right] \right\} \frac{d\varphi}{\varphi}, \quad (3)$$

где q - интенсивность теплового потока поверхностного источника, λ - коэффициент теплопроводности материала, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ - расстояние от центра пятна нагружения до рассматриваемой точки пространства, J_0 и J_1 - функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка соответственно, $\Phi^* = 1 - \Phi$, где Φ - функция ошибок.

Для расчетов использовались значения коэффициентов теплопроводности λ и теплоемкости C в зависимости от температуры, которые приведены в [5]. По результатам вычислений построены графики распределения температуры для стали 45 (рисунок 1).

Степень локализации ввода тепла в область изделия (пятно нагрева) влияет на скорость охлаждения поверхностного слоя металла, структуру и свойства упрочненной зоны. В общем случае порядок величины скорости охлаждения практически соответствует порядку величины тепловой мощности плазмотрона.

На основании экспериментальных исследований построены зависимости скорости нагрева и охлаждения поверхностного слоя, образцов при воздействии плазменной струи.

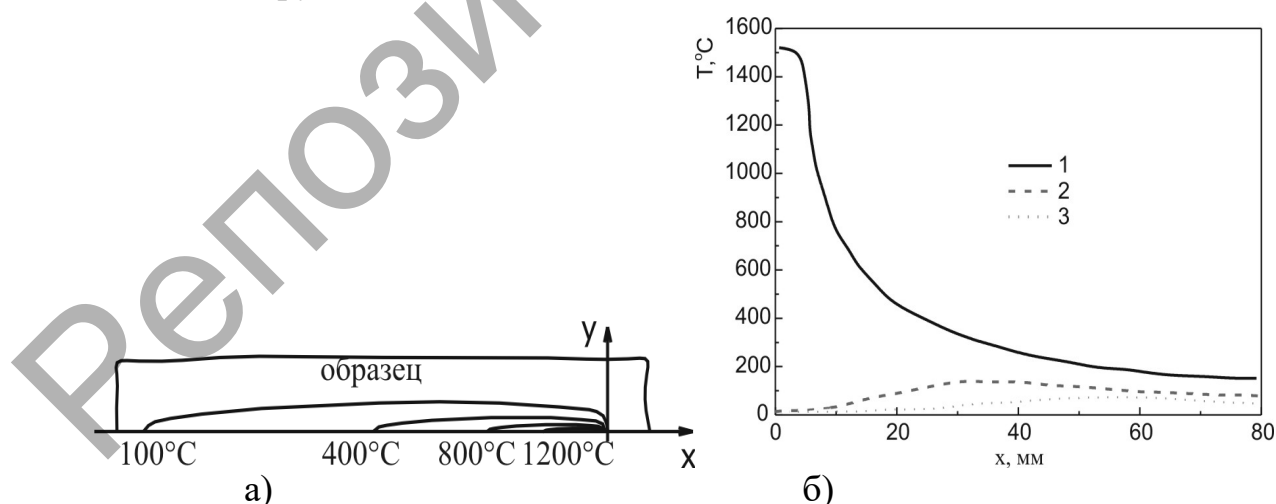


Рисунок 1 - Распределение температуры в поверхностном слое металла; а) изотермы на поверхности образца, б) расчетные значения температуры по глубине образца. 1 - глубина 0 мм; 2 - глубина 1 мм; 3 - глубина 1,5 мм.

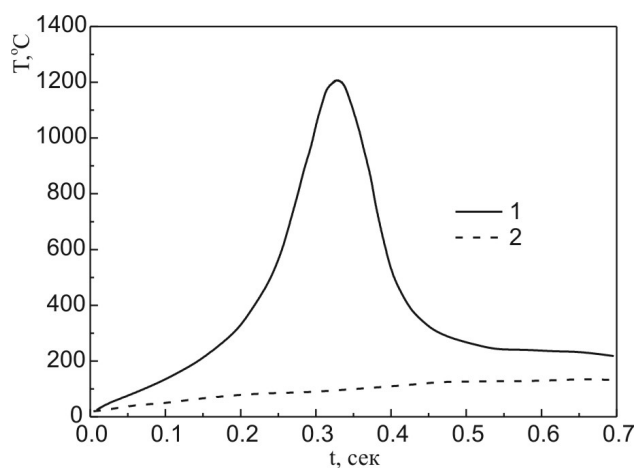


Рисунок 2 - Графики экспериментальных значений температуры;
 1) исходные (экспериментальные) значения на глубине;
 2) расчетные значения на поверхности

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Спиридонов, Н.В., и др. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н.В. Спиридонов, О.С. Кобяков, И.Л. Куприянов, В.Н. Чачин - Мн.: Высшая школа, 1988. - 155 с.
2. Веремейчик, А.И., и др. Теоретическое и экспериментальное определение температурных полей при воздействии плазменной струи / А.И. Веремейчик, В.М. Хвисевич, Д.Л. Цыганов // Межвуз. сб. научн. трудов. Под ред. Н.Б. Демкин. - Тверь: ТГТУ, 2006. - С. 139-146.
3. Кундас, С.П. Компьютерное моделирование процессов термической обработки сталей: монография. - Мн.: Бестпринт. 2005. - 313 с.
4. Карслоу, Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. - М.: Наука. 1964. - 497 с.
5. Варгафтик, Н.Б. Теплофизические свойства веществ. Справочник / Н.Б. Варгафтик. М.: Госэнергоиздат, 1956. - 340 с.