

УДК 517.977

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ВОЗДЕЙСТВИЯ  
КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ  
НА МАТЕРИАЛЫ МЕТОДОМ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ**© 2013 г. Д.А. Репкин,<sup>1</sup> В.В. Мелюков,<sup>1</sup> А.К. Гукасов,<sup>1</sup> А.М. Чирков,<sup>2</sup> И.А. Князева<sup>1</sup><sup>1</sup> Вятский госуниверситет, Киров<sup>2</sup>ООО «Вятское машиностроительное предприятие «Лазерная техника и технологии», Киров

repka@repka.kirov.ru

Поступила в редакцию 04.04.2013

Рассматривается один из способов решения обратной задачи теплопроводности, применяемой для определения оптимальных параметров источника энергии, обеспечивающего заданные физико-химические и эксплуатационные свойства, а также наноструктурирование поверхностных слоев сталей и сплавов.

*Ключевые слова:* наноструктурирование, физико-химические свойства, математическое моделирование, управление, тепловой процесс, обратная задача теплопроводности, уравнение Вольтерра, микроструктурная структура, зона термического влияния.

**Введение**

Прикладной интерес к наноструктурированию поверхностных слоев сталей и сплавов связан с прогнозируемым улучшением механических свойств поверхности и повышением стойкости по отношению к различным видам износа, жаропрочности, жаростойкости, а также формированием поверхностных слоев со специальными физико-химическими свойствами – оптическими, электрическими, магнитными, коррозионными [1].

Один из методов формирования микро- и субмикроструктурной структуры в поверхностных слоях сталей достаточно хорошо известен и заключается в высокоскоростном нагреве и охлаждении концентрированным источником энергии, например электронным лучом или лучом лазера, поверхностных слоев материала.

При воздействии концентрированных потоков энергии на материалы (наплавке, поверхностной обработке, локальной термической и термоциклической обработке, поверхностном наноструктурировании и т.д.) существует общая задача определения режима обработки. К основным параметрам режима воздействия концентрированного источника энергии относятся его мощность и плотность мощности, пространственно-временное распределение плотности мощности в пятне нагрева, скорость перемещения источника в процессе обработки.

Теория тепловых процессов обработки материалов концентрированными потоками энергии, разработанная Н.Н. Рыкалиным [2] применительно к процессам сварки, позволяет выпол-

нить расчеты температурных полей и режима воздействия концентрированного источника энергии на основе метода решения прямой задачи теплопроводности. Формализованное выражение решения прямой задачи теплопроводности имеет вид [3]:

$$T = A \cdot q, \quad (1)$$

где  $A$  – интегральный оператор, устанавливающий связь между температурой процесса  $T$  и функцией источника энергии  $q$ .

Модель источника энергии и режим его воздействия, определяемые функцией  $q$ , являются исходными величинами в решении прямой задачи (1). Модель источника строится в соответствии с выбранной схемой источника (точечный, линейный, равномерно или нормально распределенный по пятну нагрева, быстро движущийся и др.), а режим воздействия задается выбранными значениями энергии источника или его мощности, плотности мощности, скорости перемещения подвижного источника и рядом других параметров в зависимости от способа воздействия источника.

Температура  $T$  и зависящие от неё свойства материала в зоне обработки определяются и оцениваются по результатам решения прямой задачи (1): по распределению температур, по изменению параметров термических циклов в каждой точке материала, по изотермам.

Процедура выбора необходимого, наиболее эффективного режима воздействия источника энергии на основе моделирования прямой задачи теплопроводности требует повторения её решения для каждого заданного режима. Такая процедура определения режима, основанная на

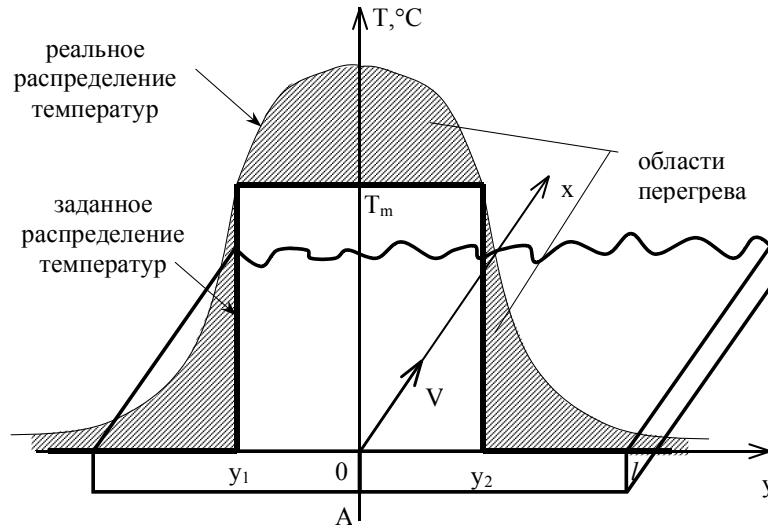


Рис.1. Свариваемые пластины и распределения температуры

эмпирических подходах, становится малоэффективной при разработке новых технологических процессов и при определении оптимальных режимов воздействия источника.

Прямая задача не нарушает причинно-следственной связи, характерной для реального теплового процесса, но не позволяет найти наиболее эффективный режим воздействия источника, обеспечивающий требуемые свойства материала в зоне обработки. Источник  $q$  как причина процесса является исходной величиной, а температура  $T$  как следствие процесса определяется из решения (1).

Анализ подходов и способов определения режима источника энергии показывает, что задача определения режима является обратной. В формулировке задачи поиска режима требуется определить причину теплового процесса – источник – по требуемым свойствам материала, зависящим от распределения температуры.

Характерным для обратной задачи является нарушение причинно-следственной связи реального теплового процесса. Математическая формализация задачи определения режима сварки как обратной задачи сводится к следующему уравнению

$$q = A^{-1} \cdot T' \quad (2)$$

где  $T'$  – заданное распределение температуры, построенное с учетом требуемых свойств сварного соединения.

Задача (2) относительно реального процесса сварки является некорректной. В тех случаях когда целью решения задачи (2) является определение оптимального режима источника, обратная задача может быть поставлена и решена как задача оптимального управления тепловым процессом сварки. Первые задачи оптимизации режима сварки были поставлены и решены еще

в 1970-х годах [4, 5] под руководством Н.Н. Рыкалина и А.А. Углова.

Обратная задача относится к числу трудно решаемых задач, и одним из начальных условий ее успешного решения является соответствие постановки задачи условиям Адамара: решение должно существовать, решение должно быть единственным, решение должно быть устойчивым.

Эффективными методами решения обратной задачи являются методы теории оптимального управления системами с распределенными параметрами [6]. Рассмотрим процесс нагрева пластины толщиной  $\delta$  нестационарным линейно перемещающимся со скоростью  $v$  вдоль оси  $Ox$  источником. Геометрическая интерпретация задачи представлена на рис. 1.

Задача определения режима сварки формулируется и решается как уравнение Вольтерра первого рода:

$$T(x, y, t) = \int_0^t \frac{q(\tau)}{c_v \delta 4\pi a(t-\tau)} \times \exp\left(-\frac{(x-v\tau)^2 + y^2}{4a(t-\tau)}\right) d\tau, \quad (3)$$

где  $x, y$  – координаты,  $c_v$  – объемная теплоемкость,  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $q$  – мощность подвижного источника,  $\delta$  – толщина пластины,  $v$  – скорость обработки.

Эта задача является некорректно поставленной. Она неустойчива по правой части, поэтому для решения необходимо применять регуляризирующие алгоритмы. В частности, можно воспользоваться вариационным методом регуляризации, минимизируя функционал невязки.

По уравнению (3) температура в точке 0 в момент времени  $t_1$  имеет вид:

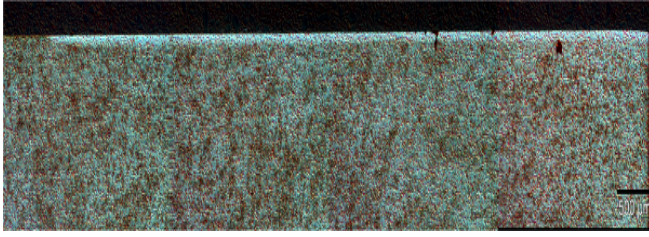


Рис. 2. Макроструктура шлифа стали А11Р3М3Ф2 после лазерно-плазменного упрочнения

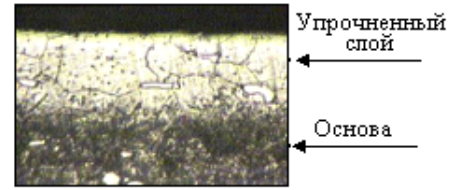


Рис. 3. Шлиф поверхностного слоя стали А11Р3М3Ф2, упрочненного лазерно-плазменным методом

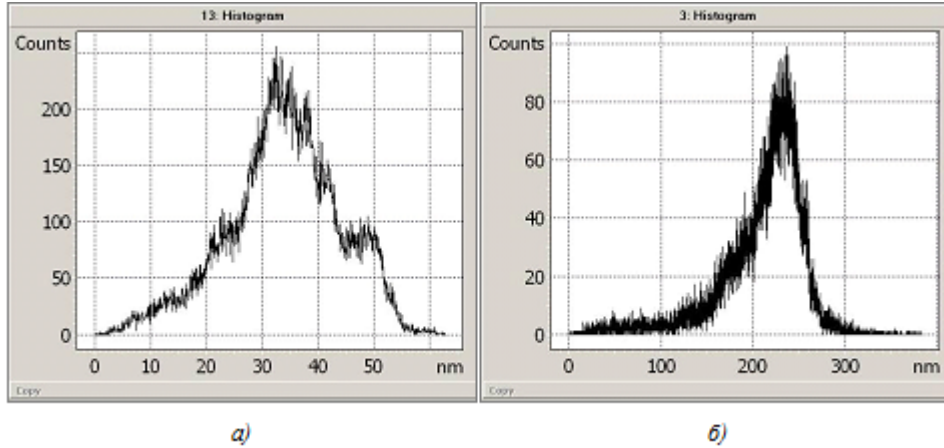


Рис. 4. Гистограммы наноструктур поверхностного слоя быстрорежущей стали А11Р3М3Ф2 после лазерно-плазменной обработки: а) гистограмма края зоны лазерной обработки; б) гистограмма центра зоны лазерной обработки

$$T_m = \int_0^{t_1} \frac{q(\tau)}{c_v \delta 4\pi a(t_1 - \tau)} \times \exp\left(-\frac{(x_0 - v\tau)^2 + y_0^2}{4a(t_1 - \tau)}\right) d\tau, \quad (4)$$

где  $T_m = t_1 \omega = T(x_0, y_0, t_1)$ ,  $\omega$  – скорость изменения температуры,  $t_1$  – время нагрева.

Рассмотрим частный случай – стационарный во времени и пространстве источник. В этом случае решение уравнения (3) имеет следующий вид:

$$q = \frac{T_m c_v \delta 4\pi a}{\int_0^{t_1} \frac{d\tau}{(t_1 - \tau)} \exp\left(-\frac{(x_0 - v\tau)^2 + y_0^2}{4a(t_1 - \tau)}\right)}. \quad (5)$$

Задавая  $T_m$ ,  $\omega$  и, соответственно,  $t_1$  можно определить тепловую мощность линейного источника.

Реальное и заданное распределения температур стационарного по мощности и координате источника нагрева показаны на рис. 1. Снизить площадь областей перегрева и оптимизировать результирующие свойства и структуру обрабатываемых изделий возможно только при переходе от стационарного источника к нестационарному, распределенному по ширине пластины.

Нами была решена задача (5) применительно к процессу лазерно-плазменного упрочнения поверхностного слоя, по результатам решения проведен эксперимент. Исследования обработанной с помощью лазерно-плазменной технологии поверхности режущего инструмента из быстрорежущей стали А11Р3М3Ф2 (рис. 2) с применением оптической микроскопии показали наличие упрочненного слоя, сформированного в режиме автозакалки, толщиной порядка 50 мкм (рис. 3). Проведенные металлографические исследования упрочненного поверхностного слоя показали твердость упрочненного слоя 12000 МПа при твердости основы 8000 МПа.

Аномально высокое повышение стойкости отрезных фрез после лазерно-плазменной обработки дало основание для предположения, что, кроме упрочнения в режиме автозакалки поверхностного слоя, произошло наноструктурирование поверхностного слоя, которое позволило получить столь высокое значение стойкости режущего инструмента.

Исследования 3D-топографии структуры поверхностного слоя, проведенные на атомно-силовом микроскопе Solver PRO-M, показали наличие в поверхностном слое наноструктур различной дисперсности (рис. 4).

Таким образом, применяя математические методы решения обратной задачи теплопроводности, возможно найти такие режимы обработки сталей и сплавов, которые обеспечат кардинальное улучшение механических свойств, в частности кратное повышение твёрдости, за счёт наноструктурирования заданных областей (слоев) обрабатываемых концентрированными потоками энергии материалов.

*Список литературы*

1. Носкова Н.И., Мулюков Р.Р. Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 279 с.

2. Рыкалин Н.Н. Расчет тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1951. 296 стр.

3. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. 5-е изд. М.: Наука, 1977.

4. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Добровольский Ю.Н., Мелюков В.В. Об оптимальном по быстродействию режиме регулирования термического цикла при нагреве стержня // Физика и химия обработки материалов. 1976. № 5 С. 19–24.

5. Углов А.А., Мелюков В.В. Об оптимальном регулировании ширины зоны термического влияния при нагреве стержня // Физика и химия обработки материалов. 1976. № 4. С. 3–7.

6. Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределёнными параметрами. М.: Наука, 1965. 474 с.

**DETERMINATION OF THE MODE OF MATERIAL EXPOSURE TO CONCENTRATED ENERGY FLUXES BY THE INVERSE PROBLEM METHOD**

*D.A. Repkin, V.V. Melyukov, A.K. Gukasov, A.M. Chirkov, I.A. Knyazeva*

The article presents a solution of an inverse heat conduction problem applied for the determination of energy source optimal parameters. The energy source provides required physico-chemical and performance properties as well as nanostructuring of steel and alloy surface layers.

*Keywords:* nanostructuring, physico-chemical properties, mathematical simulation, control, thermal process, inverse heat conduction problem, Volterra equation, microcrystalline structure, heat-affected zone (HAZ).