

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФОКУСАТОРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

С.П. Мурзин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Аннотация

Разработана модель управления тепловым воздействием на конструкционные материалы энергетических источников с пространственно-временным модулированием распределения плотности мощности, проведены теоретические и экспериментальные исследования температурных полей, имеющих место в материалах при проведении лазерной термической обработки с применением фокусаторов излучения [1]. Проведены теоретические и экспериментальные исследования формирования требуемого температурного поля в материалах, разработана методика определения требуемого теплового потока. Это позволяет реализовать ситуацию, когда инструмент – лазерный луч (форма светового пятна и распределение интенсивности излучения) рассчитывается под потребности технологии, а не наоборот. Контроль температурных полей осуществлялся оптико-электронной системой анализа потоков теплового излучения от объекта. Экспериментальная проверка распределения поля температур по глубине зоны термического влияния проводилась с использованием методов металлографического анализа. Проведенные экспериментальные исследования показали, что расчетные значения температур для выбранного класса материалов в широких диапазонах скорости движения ($V=(2...30)10^{-3}$ м/с) и мощности ($Q_n=(0,2...1)10^3$ Вт) удовлетворительно (погрешность $\delta \leq 15..25\%$) совпадают с экспериментальными.

Введение

Технологические процессы лазерной термообработки металлических материалов основываются на тепловом воздействии излучения на непрозрачные среды. Теплофизические основы процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом достаточно хорошо изучены в работах отечественных и зарубежных ученых. Установлено [2-4], что лазерное воздействие на непрозрачные материалы в широком диапазоне плотностей потоков, вплоть до $q=10^{13}$ Вт/м², удовлетворительно описывается тепловой моделью.

Требуемые свойства материалов при воздействии лазерного излучения создаются соответствующим изменением теплового состояния точек объема тела. Характер тепловых процессов определяется теплофизическими характеристиками обрабатываемого материала и энергетическими характеристиками излучения: плотностью мощности, временем воздействия, пространственным распределением интенсивности по сечению пучка и его геометрическими параметрами. Сформулировать основные требования к параметрам лазерного воздействия для осуществления оптимальных высокоэффективных режимов позволяет прогнозирование тепловых процессов. При нагреве заготовок концентрированными потоками энергии характерны большие градиенты температур, высокие скорости нагрева и охлаждения, смещение точек структурных и фазовых переходов, изменение в процессе обработки оптических и теплофизических свойств металлов и сплавов. Учет вариаций всех характеристик при расчете тепловых процессов возможен при расчете температурных полей в материалах численным интегрированием основного уравнения теплопроводности с учетом зависимостей от температуры их теплофизических коэффициентов и оптических характеристик наносимых поглощающих покрытий.

Оптимизация поля температур

При лазерном воздействии непрерывным излучением на металлические материалы эквивалентный тепловой источник является поверхностным и распределенным. Для различных расчетных схем формулируются соответствующие граничные условия:

- а) условие ограниченности температуры на бесконечности;
- б) условие равенства температур и тепловых потоков на границе контактирования многослойных материалов;
- в) условие теплоотвода на ненагреваемой поверхности листового материала.

Шаги по координатам x , y , z приняты равными $\Delta x=\Delta y=\Delta z$, согласуются с шагом по времени и находятся в диапазоне значений, определяемом из условия устойчивости решения. Величина скорости обработки V находится в диапазоне значений $V=(2...30)10^{-3}$ м/с. Равномерное движение светового пятна осуществляется вдоль оси u .

При формировании теплового воздействия на материалы целесообразно задать распределение интенсивности источника, соответствующее требуемому тепловому потоку. Принимается схема нагрева непрерывным излучением, сфокусированным в неподвижный (установленный перпендикулярно, под углом и параллельно траектории движения) или вращающийся отрезок, а также выполняется условие неоднородного распределения интенсивности излучения по длине отрезка с ее максимумом по краям для выравнивания поля температур по ширине зоны термического влияния [5].

Определение для проектируемого технологического процесса оптимальных значений угла поворота оптического элемента φ , диаметра фокусируемого пятна пучка D_p , скорости обработки V и коэффици-

ента уменьшения размеров светового пятна K включает следующие этапы:

1. Определение диапазона критических температур T_{\max} и $T_{\text{кр}}$ для данного технологического процесса.

Для термоупрочнения без ухудшения исходной геометрии детали выполняется условие нагрева до температур, не превышающих температуру плавления, но достаточных для структурно-фазовых превращений. Принимается, что смещения температуры плавления при значениях скорости нагрева $V_n \leq 10^5$ °C/с не происходит.

Для обработки деталей с плазменными покрытиями выполняется условие нагрева термореагирующего материала до максимальной температуры при отсутствии оплавления покрытия и основы.

Для отжига листовых полуфабрикатов выполняется условие снятия наклепа в диапазоне температур от температуры начала рекристаллизации до температуры полиморфного превращения.

Проводится оценка времени релаксации и смещения критических точек структурно-фазовых переходов в область более высоких температур из-за высоких скоростей нагрева материалов при лазерном воздействии. Совместное решение тепловой и диффузионной задач при скоростном нагреве приводит к значительному усложнению расчетов.

2. Определение значений коэффициента формы пятна K' соответствующих значениям скорости термообработки V , при которых температура поверхности обрабатываемого материала $T(x, y, z)|_{z=0}$ не превышает максимальную критическую температуру T_{\max} (рис. 1, (а):

$$\max(T(x, y, z)|_{z=0}) = T_{\max} \quad (1)$$

3. Выбор значения коэффициента формы пятна K' и максимальной величины скорости V , позволяющей на заданном значении глубины обработки $z=\delta$ обеспечить минимальную критическую температуру $T_{\text{кр}}$ (рис. 1 (б), рис. 2).

4. Определение матрицы значений температур $T(x, y, z)|_{z=\delta}$ на заданной глубине обработки $z=\delta$ и вектора максимальных значений температуры $\max(T(x, y, z)|_{z=\delta})$ по ширине зоны обработки. При создании заданного равномерного температурного воздействия выполняется условие:

$$\max(T(x, y, z)|_{z=\delta}) \approx T_{\text{кр.min}} \quad (2)$$

5. Для выравнивания поля температур на заданной глубине целесообразно регулировать интенсивность излучения вдоль светового отрезка следующим образом:

- перераспределять энергию к периферии увеличением апертуры падающего на оптический элемент излучения;

- перераспределять энергию к центру, осуществляя поворот оптического элемента на угол ϕ .

Коэффициент уменьшения размеров светового пятна K определяется с учетом значения коэффициента K' .

6. Определение градиента температур, скорости нагрева и охлаждения. Для закалки железоуглеродистых сплавов скорость охлаждения должна быть равной или больше критической.

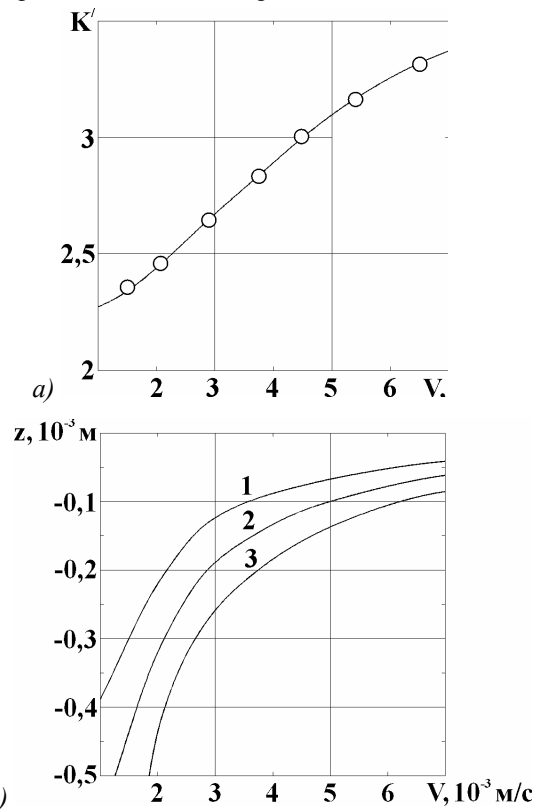


Рис. 1. Определение значений коэффициента формы пятна K' соответствующих значениям скорости термообработки V при термообработке без оплавления поверхности стали 40XНМА (а), выбор величины скорости V (б): 1 - $T_{\text{кр.}}=1200$ °C; 2 - $T_{\text{кр.}}=1000$ °C; 3 - $T_{\text{кр.}}=800$ °C. Полная мощность излучения $Q_n=10^3$ Вт

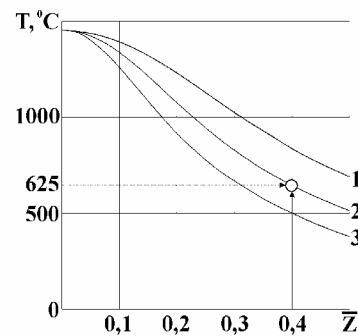


Рис. 2. Выбор величины скорости V при обработке многослойной системы КТП35Н-85Н+НА-67+АЛ4Т6:

1 - $V=2,04 \cdot 10^{-3}$ м/с, $K=2,45$;

2 - $V=2,68 \cdot 10^{-3}$ м/с, $K=2,59$;

3 - $V=3,33 \cdot 10^{-3}$ м/с, $K=2,74$;

Толщина покрытия КТП35Н-85Н $\delta_n=0,35 \cdot 10^{-3}$ м; толщина подслоя – термореагирующего материала НА-67 $\delta_{nc}=0,05 \cdot 10^{-3}$ м. $T_{\text{кр.min}}=625$ °C. Полная мощность излучения $Q_n=10^3$ Вт.

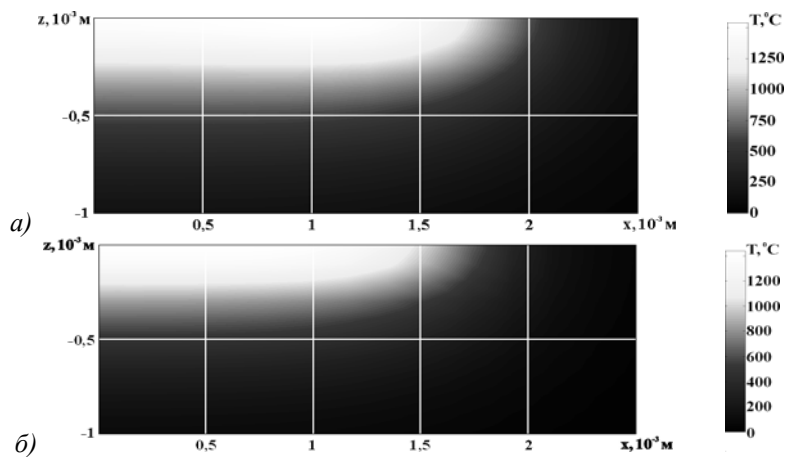


Рис. 3. Результаты оптимизации поля температур по ширине зоны термического влияния при обработке без оплавления поверхности стали 40XНМА на глубину $z=0,3 \cdot 10^{-3}$ м: $\varphi=12^\circ$, $Dn=2,3 \cdot 10^{-2}$ м, $V=2,04 \cdot 10^{-3}$ м/с, $K=2,81$; при обработке многослойной системы КТП35Н-85Н+НА-67+АЛ4Т6 на глубину $z=0,4 \cdot 10^{-3}$ м: $\varphi=0$, $Dn=1,8 \cdot 10^{-2}$ м, $V=2,68 \cdot 10^{-3}$ м/с, $K=2,59$. Полная мощность излучения $Q_n=10^3$ Вт

Составлена программа определения на персональном компьютере оптимальных значений φ , Dn , V , K для проектируемых технологических процессов. На рис. 3 представлены результаты оптимизации поля температур по ширине зоны термического влияния.

Поскольку специфика взаимодействия высококонцентрированных потоков энергии с деталью делает невозможным использование контактных способов измерения температуры, то контроль температурных полей целесообразно осуществлять оптико-электронными системами анализа потоков теплового излучения от объекта. Экспериментальная проверка полученных теоретических результатов и исследования быстроменяющихся температурных полей проводилась с применением многоэлементных приемников и цифровой обработки сигналов. Периодичность поступления видеoinформации при использовании телевизионного

стандарта достаточно, поэтому элементная база из ИК-радиометра - блока оптической визуализации температурного поля в рабочей зоне тепловизора «Радуга», блока ввода-вывода изображений и персонального компьютера в состоянии обеспечить создание пирометрических систем с использованием программных средств обработки изображений. Пирометрическая система дает достаточно информации о температуре, времени пребывания материала в нагретом состоянии и характерном размере зоны влияния. Разработаны автоматизированные системы сопряжения визуализационных приемников с персональным компьютером.

На рис. 4, 5 представлены изображения температурных полей объектов и экспериментально определенные поля температур, имеющие место на поверхности образцов.

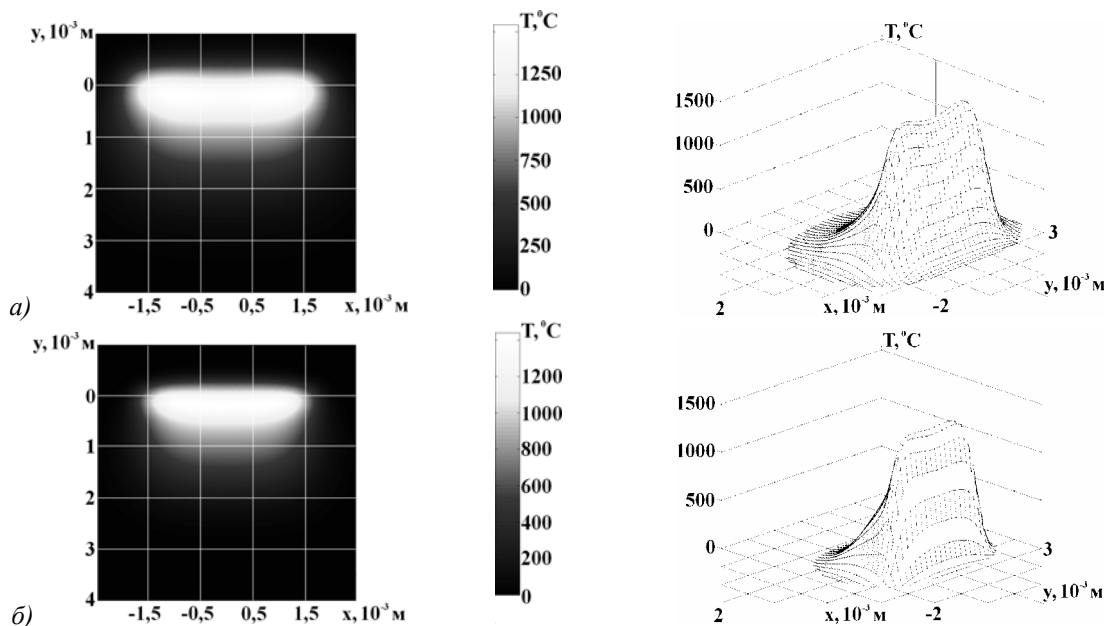


Рис. 4. Изображение температурного поля объекта и экспериментально определенные поля температур, имеющие место на поверхности деталей из стали 40XНМА (а) и многослойной системы КТП35Н-85Н+НА-67+АЛ4Т6 (б).

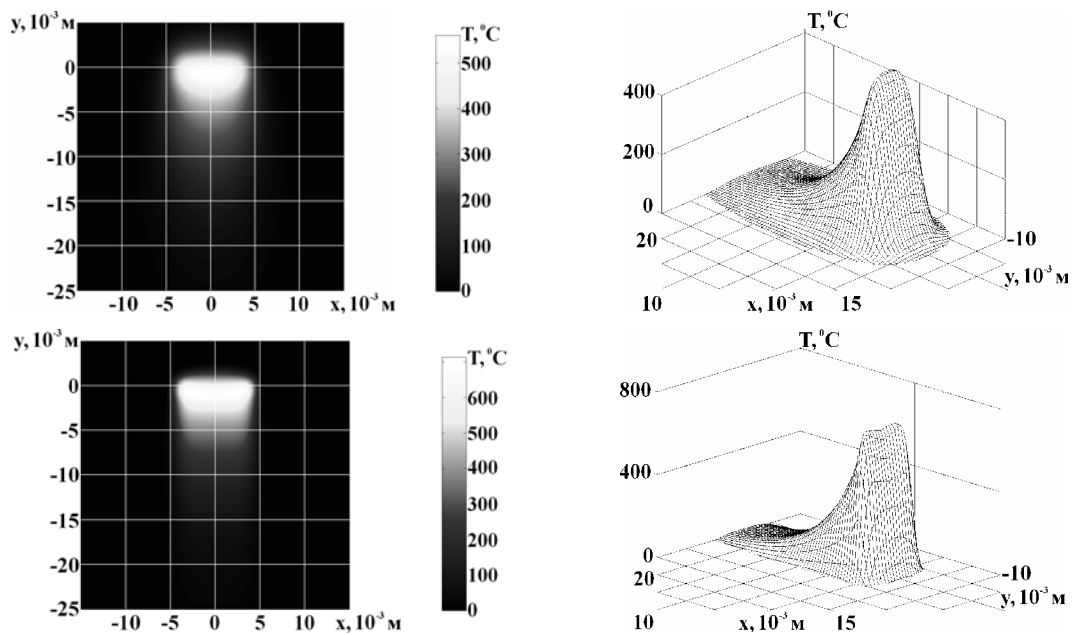


Рис. 5. Изображение температурного поля объекта и экспериментально определенные поля температур, имеющее место на поверхности листовых полуфабрикатов из алюминиевого сплава АМ2Н (а) и титанового сплава ОТ4-1 (б)

Экспериментальная оценка распределения поля температур по глубине зоны термического влияния проводилась с использованием методов металлографического анализа. Проведенные экспериментальные исследования показали, что расчетные значения температур для выбранного класса материалов в широких диапазонах скорости движения ($V=(2...30)10^{-3}$ м/с) и мощности ($Q_n=(0,2...1)10^3$ Вт) удовлетворительно (погрешность $\delta \leq 15..25\%$) совпадают с экспериментальными.

Заключение

Для эффективной фокусировки излучения при лазерной обработке материалов не могут применяться общеизвестные оптические системы (линзовые или зеркальные объективы, растровые элементы и т.п.). Это вносит технологические ограничения при проведении различных операций упрочнения металлических материалов, модификации поверхности лазерным спеканием, отжиге листовых материалов.

При формировании теплового воздействия на материалы целесообразно задать распределение интенсивности источника, соответствующее требуемому тепловому потоку.

Составлена программа определения на персональном компьютере оптимальных значений φ , $Dп$, V , K для проектируемых технологических процессов.

Пирометрическая система дает достаточно информации о температуре, времени пребывания материала в нагретом состоянии и характерном размере зоны влияния. Разработаны автоматизированные системы сопряжения визуализационных приемников с персональным компьютером.

Литература

1. Методы компьютерной оптики / Под ред. В.А. Соифера. –М.: Физматлит, 2000. – 688 с.
2. Рэди Дж. Промышленные применения лазеров: Пер. с англ. –М.: Мир, 1981. – 638 с.
3. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник // Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. –М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
4. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов // М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
5. Device for laser treatment of an object: Pat. USA 5, 103, 073. 7.04.1992. Int. cl.⁵ B 23 K, 26/00. V.A. Danilov, V.V. Popov, A.M. Prokhorov, I.N. Sisakian, D.M. Sagatelian, V.A. Soifer, E.V. Sisakian, L.P. Naumidi, J.K. Danileiko, J.D. Terekhin, V.S. Akopian, V.P. Shorin, V.I. Mordasov, S.P. Murzin.