

ФОРМИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАЗЕРНОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

*Н.Л. Казанский, В.И. Мордасов, С.П. Мурзин
Институт систем обработки изображений РАН,
Самарский государственный аэрокосмический университет*

Аннотация

При проведении лазерной и комбинированной обработки деталей актуальной является задача создания динамических систем формирования энергетических потоков с управляемым пространственным распределением плотности мощности. Проведены исследования перераспределения мощности лазерного излучения, формируемого динамическими фокусаторами. Для проведения лазерной термической и комбинированной обработки материалов с использованием непрерывного излучения CO₂-лазеров создано оптическое устройство на основе двух отражающих динамических фокусаторов. Разработан единый вычислительный алгоритм определения параметров воздействующих потоков энергии для создания температурного поля в изделии, обеспечивающего заданное изменение состояния технологического объекта при проведении лазерной и комбинированной обработки. Расчет распределения мощности лазерного излучения проводится для однородного изменения состояния материала на заданной глубине по ширине зоны термического влияния. Получены экспериментальные данные, свидетельствующие о целесообразности применения технологических оптических систем на основе фокусаторов излучения при плазменно-лазерном нанесении покрытий и термоупрочнении для повышения износостойкости деталей, работающих в условиях трения.

Введение

Методы высокоэнергетической обработки на основе лазерного излучения обладают значительными потенциальными возможностями для улучшения эксплуатационных свойств деталей путем придания их поверхностным слоям требуемых физико-механических свойств. К настоящему времени выполнен ряд работ, в которых показана возможность управления процессом упрочняющей обработки за счет изменения пространственного распределения мощности излучения в плоскости фокусировки [1, 2 и др.]. Применение элементов компьютерной оптики (фокусаторов излучения) позволяет сформировать заранее заданный профиль интенсивности излучения в фокальной плоскости [3, 4]. Для повышения качества лазерной и комбинированной обработки деталей актуальной является задача создания динамических систем формирования энергетических потоков с управляемым пространственным распределением плотности мощности. Предложен метод изменения интенсивности излучения и параметров энергетического воздействия на основе применения динамических фокусаторов [5, 6]. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования формирования лазерных пучков позволили создать оптические системы, обеспечивающие регулирование распределения плотности мощности по пятну нагрева. Для проведения лазерной термической и комбинированной обработки материалов с использованием непрерывного излучения CO₂-лазеров разработано оптическое устройство корректировки параметров лазерного излучения на базе одиночного динамического фокусатора излучения в отрезок и деформируемого зеркала с электромагнитным приводом [7].

Целью данной работы является совершенствование оптических систем формирования энергетических потоков с управляемым пространственным распределением плотности мощности, применяемых при лазерной термической и комбинированной обработке материалов.

Исследования перераспределения мощности лазерного излучения, формируемого динамическими фокусаторами

При лазерной термообработке целесообразно принять схему нагрева непрерывным излучением, сфокусированным в неподвижный, установленный перпендикулярно траектории движения отрезок прямой. Определены (см. рис.1) изменения фокусного расстояния и длины фокального отрезка, а также пространственное перераспределение интенсивности лазерного излучения при различных углах поворота такого динамического отражающего оптического элемента. При повороте на угол φ оптического элемента, происходит поворот светового пятна в фокальной плоскости на угол φ_1 , уменьшается средняя величина плотности мощности, распределенной в фокальный отрезок, и увеличивается его длина. При вращении фокусатора изменяется и положение фокальной плоскости.

На рис. 1 представлены графики изменения фокусного расстояния $\Delta f/f$ и угла φ_1 поворота светового пятна в фокальной плоскости в зависимости от угла поворота φ фокусатора. Распределения интенсивности излучения q вдоль продольной оси светового пятна в фокальной плоскости фокусатора при различных углах его поворота φ представлены на рис. 2, 3. На рис. 2, 3 обозначено: O ξ – ось, проходящая через проекцию начала координат плоскости UOV на фокальную плоскость и фокальный отрезок.

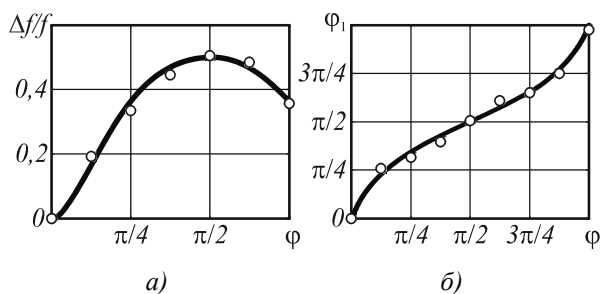


Рис. 1. Изменение положения фокуса $\Delta f/f$ (а) и угла ϕ , поворота светового пятна в фокальной плоскости (б) в зависимости от угла поворота ϕ фокусатора:

— результаты расчета; \circ — эксперимент

Из рисунка видно: выполняется условие неоднородного распределения интенсивности излучения по длине отрезка с ее максимумом по краям для выравнивания поля температур по ширине зоны термического влияния. Перераспределение энергии к периферии светового отрезка достигается увеличением диаметра фокусируемого луча (рис. 2) или использованием лазерного излучения с кольцевым распределением плотности потока (рис. 3).

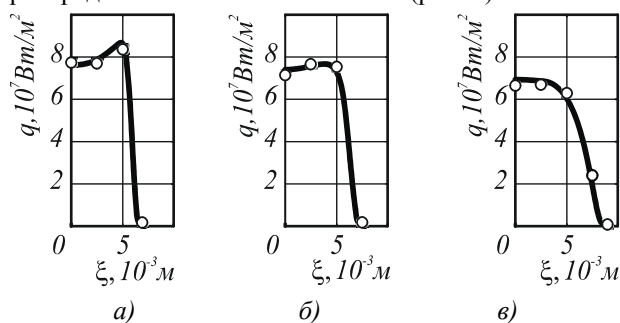


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения q вдоль продольной оси светового пятна в фокусе оптического элемента при различных углах его поворота: $\phi = 0^\circ$ (а); $\phi = 5^\circ$ (б); $\phi = 10^\circ$ (в):

линия – результаты расчета; \circ – эксперимент (мощность излучения CO_2 -лазерной установки «Хебр-1А» равна $Q_n = 10^3 \text{ Вт}$)

При использовании одиночного динамического фокусатора имеют место значительные изменения фокусного расстояния оптической системы ($\Delta f = (0 \dots 0,5) f$) и увеличение размеров светового отрезка при углах поворота фокусатора $\phi \sim (10 \dots 20)^\circ$, приводящее к снижению максимальной и средней интенсивности излучения в фокальной плоскости.

Устранить эти недостатки возможно применением оптической системы из двух отражающих динамических фокусаторов, преобразующих излучение соответственно в отрезок прямой (I) и точку (II), установленных под углом 45° к падающему излучению и вращающихся относительно центральных нормалей к их поверхностям с одинаковой скоростью. Причем целесообразно выбрать равным $\phi_{II} = (\phi_I + \pi)$, где ϕ_I, ϕ_{II} – углы поворота отражающих

динамических фокусаторов, преобразующих излучение соответственно в отрезок прямой и точку.

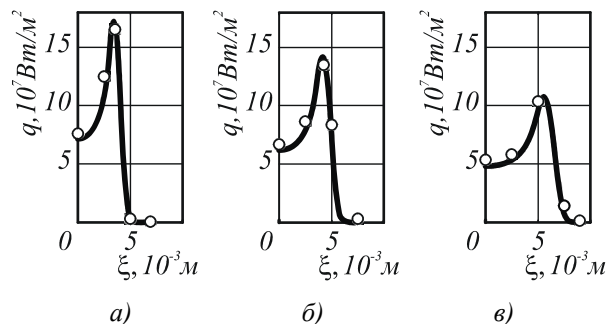


Рис. 3. Распределение интенсивности излучения q вдоль продольной оси светового пятна в фокусе оптического элемента при использовании лазерного излучения с кольцевым распределением плотности потока: $\phi = 0^\circ$ (а); $\phi = 10^\circ$ (б); $\phi = 20^\circ$ (в):

линия – результаты расчета; \circ – эксперимент (мощность излучения CO_2 -лазерной установки «Хебр-1А» равна $Q_n = 10^3 \text{ Вт}$)

На рис. 4, 5 представлены графики изменения фокусного расстояния $\Delta f/f$ и распределения интенсивности излучения q вдоль продольной оси светового пятна в фокальной плоскости оптической системы в зависимости от угла поворота ϕ фокусаторов при использовании лазерного излучения с кольцевым распределением плотности потока.

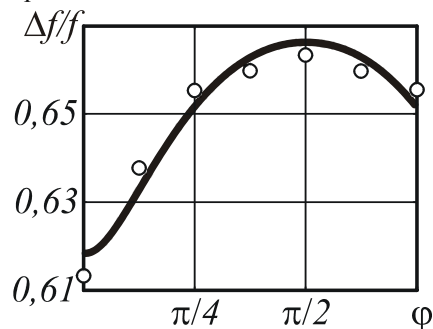


Рис. 4. Изменение положения фокуса $\Delta f/f$ и в зависимости от угла поворота ϕ при использовании оптической системы из двух отражающих динамических фокусаторов: линия – результаты расчета; \circ – эксперимент

Для проведения лазерной термической и комбинированной обработки материалов с использованием непрерывного излучения CO_2 -лазеров разработано оптическое устройство, состоящее из узлов фиксации, охлаждения, юстировки и вращения элементов компьютерной оптики (см. рис. 6). Оптические элементы устанавливаются и фиксируются в устройстве на втулках, передающих крутящий момент от электродвигателя. Регулируется угол падения излучения на оптический элемент, имеется возможность точной установки фокусаторов излучения относительно центра лазерного пучка по двум взаимноперпендикулярным координатам.

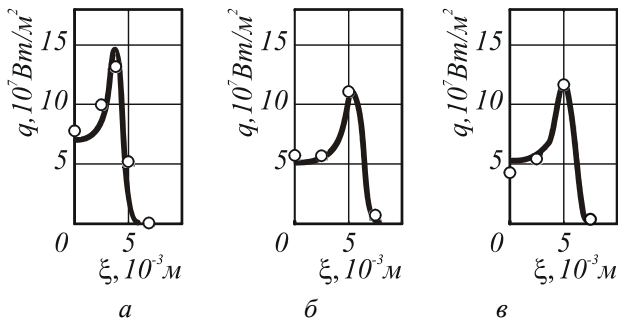


Рис. 5. Распределение интенсивности излучения q вдоль продольной оси светового пятна в фокусе оптической системы из двух отражающих динамических фокусаторов при использовании лазерного излучения с кольцевым распределением плотности потока: $\varphi=0$ (а); $\varphi=45^\circ$ (б); $\varphi=90^\circ$ (в): линия – результаты расчета; \circ – эксперимент (мощность излучения CO_2 -лазерной установки «Хебр-1А» равна $Q_n=10^3$ Вт)

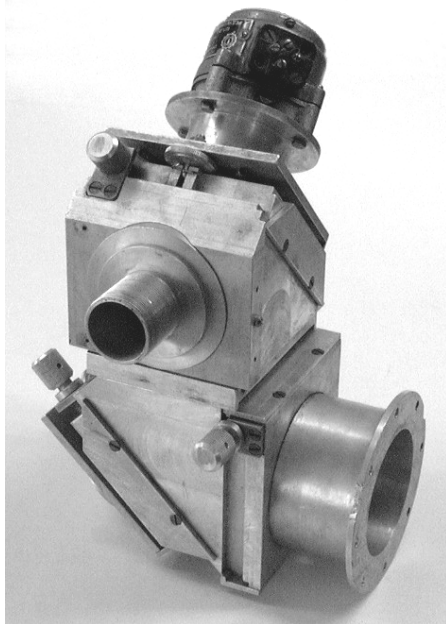


Рис. 6. Общий вид устройства для проведения лазерной термической и комбинированной лазерной обработки материалов на основе двух отражающих динамических фокусаторов

Расчет параметров воздействующих потоков энергии для создания температурного поля, обеспечивающего заданное изменение состояния технологического объекта при проведении лазерной и комбинированной обработок

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. Численное интегрирование дифференциального уравнения теплопроводности проводится с учетом зависимостей от температуры теплофизических коэффициентов и оптических характеристик наноси-

мых обрабатываемых материалов. Теплофизические функции зависимости от температуры теплопроводности, объемной теплоемкости, полной поверхностной теплоотдачи и эффективного коэффициента поверхностного поглощения лазерного излучения задаются табулированными значениями с шагом по температуре. Протяженность зоны обработки соизмерима с размерами тела, поэтому расчет проводится с учетом реальной геометрической формы обрабатываемой детали. Принятая для расчетов температурных полей схема нагрева деталей при плазменно-лазерном нанесении покрытий представлена на рис. 7. Полосовой лазерный энергетический источник расположен перед участком воздействия плазменной струи.

Деталь перемещается с постоянной угловой скоростью ω в положительном направлении оси Оф в системе координат (r, φ, z) , помещенной в центр пятна нагрева лазерного энергетического источника. Принимаются допущения: тепловые источники с заданной геометрией и распределением плотности мощности являются поверхностными; в условиях достаточно быстрой кристаллизации наносимых расплавленных частиц их конвективное перемешивание отсутствует; граница фазового перехода тонкого слоя расплава находится на поверхности детали.

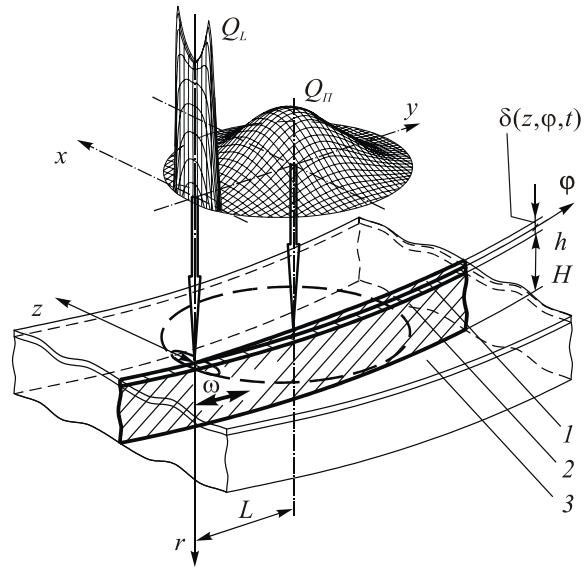


Рис. 7. Схема расчета температурных полей при плазменно-лазерном нанесении покрытий: $\delta(z, \varphi, t)$, h , H – толщины наносимого покрытия (1), подслоя (2) и основы (3) соответственно; L – расстояние между центром лазерного Q_L и осью симметрии плазменного Q_P энергетических источников; ω – угловая скорость перемещения обрабатываемой детали

Распределение плотности мощности лазерного излучения q_L в пятне нагрева определяется соответствующими оптическими расчетами в зависимости от исходных характеристик излучения. При определении температуры поверхности в пятне напыления, вследствие кратковременного действия теплового потока отдельных частиц, нагрев напыляемым матери-

лом определяется интегральной оценкой. Принято считать, что распределение тепловой мощности плазменной струи Q_p , т.е. введенной в изделие энергии с учетом ее выделения при кристаллизации напыляемых частиц, характеризуется законом нормального распределения. На остальной части поверхности задаются нелинейные условия теплообмена с окружающей средой.

При численном решении тепловых задач дискретизацию дифференциального уравнения теплопроводности целесообразно проводить методом контрольного объема. Одним из важных свойств метода контрольного объема является точное интегральное сохранение таких величин, как масса и энергия на всей расчетной области при любом числе узловых точек. Основными этапами численного решения задачи являются: разбивка расчетной области с помощью сеток – получение массива N узлов, получение дискретных аналогов дифференциального уравнения методом контрольного объема, составление и приближенное решение системы алгебраических уравнений с N неизвестными (температуры в каждом узле в рассматриваемый момент времени). Неравномерная разбивка расчетной области с переменным шагом по осям координат, возрастающим в геометрической прогрессии при удалении от зоны воздействия внешних энергетических источников, позволяет значительно сократить время расчетов при сохранении устойчивости решения и повышении точности определения температур.

Дискретный аналог дифференциального уравнения теплопроводности в линейной форме имеет вид системы алгебраических уравнений, которые в нелинейной задаче решаются итерационным методом релаксаций. Разработанная математическая модель формирования температурных полей при плазменно-лазерном нанесении покрытий доведена до уровня программного продукта, что обеспечивает ее применение, как по отдельности, так и в комплексе к лазерным и комбинированным, а также к другим близким по физической природе технологиям обработки материалов концентрированными энергетическими потоками. Программа численного моделирования тепловых процессов при плазменно-лазерном нанесении покрытий позволяет по заданной совокупности исходных данных получить массивы значений температур во всех узлах расчетной области в моменты времени, следующие с интервалом Δt . Изменяемыми параметрами модели являются геометрические характеристики обрабатываемой детали и тепловых источников, режимы обработки, условия теплообмена и теплофизические свойства материалов. Положение изотермических поверхностей определяется интерполяцией значений температур между узлами сетки.

Для регистрации нестационарных тепловых процессов в зоне лазерного воздействия и применения в составе систем управления технологическими процессами создана система бесконтактной диагностики. Экспериментальная проверка распределения

поля температур по глубине зоны термического влияния проводилась с использованием методов металлографического анализа. Разработан единый вычислительный алгоритм определения параметров воздействующих потоков энергии для создания температурного поля в изделии, обеспечивающего заданное изменение состояния технологического объекта при проведении лазерной и комбинированной обработки.

Расчет распределения мощности лазерного излучения для однородного изменения состояния материала на заданной глубине по ширине зоны термического влияния включает следующие этапы:

- определение максимально допустимой температуры на поверхности изделия при реализации технологического процесса;
- ввод требуемых значений температуры на заданной глубине обработки;
- задание распределения потока энергии на поверхности обрабатываемого изделия;
- расчет вектора максимальных значений температуры на заданной глубине обработки при постоянной скорости перемещения v энергетического источника;
- определение среднеквадратичного отклонения расчетной температуры от требуемой и сравнение его с заданным допустимым значением;
- коррекция распределения потока энергии на поверхности обрабатываемого изделия.

Применение технологических оптических систем на основе фокусаторов излучения при плазменно-лазерном нанесении покрытий и термоупрочнении деталей

При плазменно-лазерном нанесении покрытий достигается более высокая производительность, чем при физическом и химическом осаждении из паровой фазы, а применение лазерного излучения для оплавления напыленного с помощью плазменной струи слоя улучшает структуру, механические и функциональные свойства получаемого покрытия. Повышение эффективности интегрированных технологий достигается путем снижения потерь мощности лазерного излучения в гетерофазном плазменном потоке и дуговом разряде [8]. Проведен выбор схем совмещения плазменного потока и дугового разряда с лазерным излучением при комбинированной обработке [7-8].

Экспериментальная установка для плазменно-лазерного нанесения покрытий содержит устройство плазменного напыления мощностью 4,0 кВт, а также сопряженные блоки: оптический блок транспортировки лазерного излучения с формированием светового пятна и сканированием его в рабочем пространстве; электронный блок управления сканирующим устройством траектории движения излучения и манипулятора детали, сопряженный с персональным компьютером; блок оптической визуализации температурного поля в рабочей зоне тепловизора «Радуга».

Сжатую плазменную струю формирует выходной канал цилиндрической дуговой камеры корпуса плазмотрона. Для возбуждения плазмогенерирующей дуги служит анод – сопло. Столб дуги ориентируется по оси формирующего канала и заполняет практически все его сечение. Вытекающий из сопла поток плазмы стабилизирует дуговой разряд. Обрабатываемый материал может являться одним из электродов разряда. Наиболее эффективно используется энергия в дуге постоянного тока прямой полярности (анод на обрабатываемом материале). Вначале возбуждают вспомогательный разряд между катодом и формирующим наконечником с тем, чтобы получить плазменную струю, вытекающую из сопла. Катод плазмотрона и обрабатываемая деталь включены в цепь источника рабочего тока, которая замыкается в момент касания факелом обрабатываемого материала. При этом возникает основная дуга «катод – обрабатываемый материал», подача распыляемого материала осуществляется на срез сопла – анода. Такая схема позволяет в 2-3 раза повысить эффективный к.п.д. нагрева порошковых частиц плазмой по сравнению с применяемыми плазмотронами косвенного действия и предоставляет возможность использования установок газотермического напыления мощностью до 3-5 кВт и технологических лазеров мощностью до 1 кВт.

На основе исследования характеристик пропускания лазерного излучения плазменной струей выявлены новые технологические возможности комбинированного плазменно-лазерного нанесения покрытий (повышение эффективности воздействия на материал, повышение адгезионной и когезионной прочности покрытий на 20-40% при сохранении исходной пористости материала 15-30%). Структура нанесенных покрытий исследовалась на поперечных шлифах с помощью оптического микроскопа (см. рис. 8).

Лазерное термоупрочнение стальных деталей может быть достаточно эффективным и позволяет существенно повысить надежность и ресурс отдельных деталей, узлов и механизмов в целом. При этом важными требованиями являются равномерность глубины закаленной зоны и отсутствие дефектов на ее поверхности. При проведении экспериментальных исследований определены температурно-скоростные режимы лазерного термоупрочнения деталей из сталей 40Х. Для снижения отражательной способности на поверхность обрабатываемого материала наносились специальные поглощающие покрытия.

Методами традиционной металлографии проведено сопоставление исследуемого температурного поля в конструкционном материале и характера структурных изменений. Исследования поперечных сечений упрочненной лазерным излучением зоны показали, что она состоит из нескольких слоев, микротвердость каждого из которых в различной степени отличается от исходной (см. рис. 9).

Формирование таких структур в области лазерного воздействия обусловлено характером распределения температурного поля и различием в скорости охлаждения по глубине зоны термического влияния.

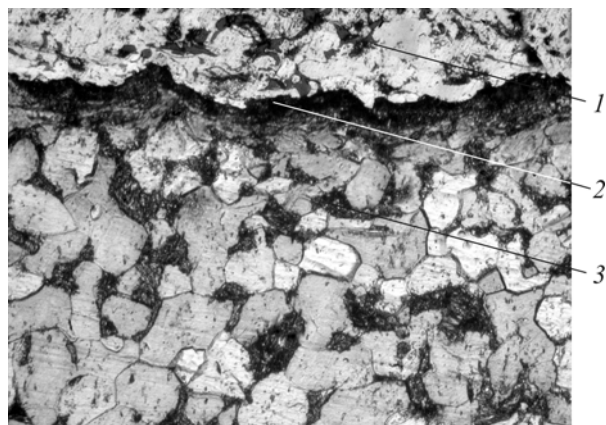


Рис. 8. Структура износостойкого покрытия никель-карбид титана (КТП35Н-85Н) после его плазменно-лазерного нанесения на основу из низкоуглеродистой стали с подслоем Ni-67 (никель+67% алюминия):

1 – покрытие; 2 – подслои; 3 – основа: шлиф травленный, увелич. х85.



Рис. 9. Структура области лазерного воздействия после термоупрочнения среднеуглеродистой стали 40Х: увелич. х30: 1 – закаленная зернистая структура мартенситного типа; 2 – область неполной закалки; 3 – переходная зона; 4 – исходная структура

Интенсивность изнашивания деталей из стали 40Х изучалась на специальном стенде в режиме трения скольжения по наиболее распространенной методике – схеме трения колодки, прижатой по образующей к вращающемуся диску. Диски из стали 40Х имели диаметр $d_d = (49,4...49,5) \cdot 10^{-3}$ м и ширину $b_d = (12,0 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$ м. Для определения величины износа образцов, абсолютная масса которых не превышает $m_n = 0,1$ кг, а конфигурация достаточно проста, применяется метод взвешивания. Испытания на износ поверхностей трения сопряженных пар методом взвешивания проводились с точностью до третьего знака на аналитических весах ВЛА-200 ГМ. Отмечено, что поверхности трения, прошедшие лазерную термообработку, после проведения испытаний не имели сетки микротрещин, характерных для образцов, подвергнутых стандартной объемной закалке. При этом на стадии установившегося износа скорость

изнашивания и коэффициент трения стабильны. Термоупрочнение деталей из стали 40Х позволяет повысить их износостойкость в 1,8...2,1 раза при увеличении микротвердости поверхностного слоя в 2...2,5 раза. Полученные данные свидетельствуют о целесообразности применения технологических оптических систем на основе фокусаторов излучения при термоупрочнении для повышения износостойкости деталей, работающих в условиях трения.

Заключение

При лазерной термообработке целесообразно принять схему нагрева непрерывным излучением, сфокусированным в неподвижный, установленный перпендикулярно траектории движения отрезок прямой. Определены изменения фокусного расстояния и длины фокального отрезка, а также пространственное перераспределение интенсивности лазерного излучения при различных углах поворота такого динамического отражающего оптического элемента.

Для проведения лазерной термической и комбинированной обработки материалов с использованием непрерывного излучения СО₂-лазеров разработано оптическое устройство на основе двух отражающих динамических фокусаторов.

Разработан единый вычислительный алгоритм определения параметров воздействующих потоков энергии для создания температурного поля, обеспечивающего заданное изменение состояния технологического объекта при проведении лазерной и комбинированной обработок. Расчет распределения мощности лазерного излучения проводится для однородного изменения состояния материала на заданной глубине по ширине зоны термического влияния.

Обосновано применение технологических оптических систем на основе фокусаторов излучения при лазерной термической и комбинированной обработке материалов. Получены экспериментальные данные, свидетельствующие о целесообразности применения технологических оптических систем на основе фокусаторов излучения при плазменно-

лазерном нанесении покрытий и термоупрочнении для повышения износостойкости деталей, работающих в условиях трения.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № НШ-1007.2003.1, а также российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» («BRHE»).

Литература

1. Барвинок В.А., Мордасов В.И., Шорин В.П. Высокоэффективные лазерно-плазменные технологии в машиностроении // М.: МЦНТИ, 1997. 76 с.
2. Головкин Л.Ф., Дувейк Д., Орешник В.И. Обеспечение качества слоев, полученных лазерной наплавкой или упрочняющей обработкой // Автоматическая сварка, 2001. №12. С.47-52.
3. Golub M.A., Sisakian I.N., Soifer V.A. Infra-red radiation focusators // Optics and lasers in engineering, 1991. Vol. 15. N 5. P. 297-309.
4. Методы компьютерной оптики // Под ред. В.А. Сойфера. М.: Физматлит, 2000. 688 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. A.M. Prokhorov, I.N. Sisakian, V.A. Soifer, V.P. Shorin, V.I. Mordasov, S.P. Murzin et al.
6. Мурзин С.П. Повышение эффективности лазерной обработки материалов при использовании элементов компьютерной оптики // Перспективные материалы, 2003, №2. – С.74-78.
7. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Мордасов В.И., Мурзин С.П., Харитонов С.И. Исследование оптических систем управления передачей высоких энергий // Компьютерная оптика, 2002. В. 23. С.40-43.
8. Устройство лазерно-газотермического нанесения покрытия: Патент РФ 2182189, МКИ⁷ С 23 С 4/12 / С.П. Мурзин, В.Н. Гришанов, В.И. Мордасов, А.А. Шуваев. Бюл.13, 10.05.2002.