

ПРИМЕНЕНИЕ ФОКУСАТОРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

С.П. Мурзин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Аннотация

Применение элементов компьютерной оптики (фокусаторов излучения) позволяет создать требуемое для проведения технологических процессов лазерной термической и комбинированной обработки материалов пространственное распределение плотности мощности энергетических потоков. Для формирования излучения технологических CO₂-лазеров разработано оптическое устройство, содержащее подвижный элемент компьютерной оптики и деформируемое вогнутое зеркало. Операции лазерной термической и комбинированной обработки автоматизированы с помощью специально созданных аппаратно-программных средств, введенных в состав лазерного технологического комплекса ЛК-1300 «Хебр-1А». Анализ результатов экспериментальных исследований свидетельствует о целесообразности применения технологических оптических систем на основе фокусаторов излучения при лазерном отжиге низколегированных титановых сплавов и термоупрочнении для повышения износостойкости стальных деталей, работающих в условиях трения. Построена расчетная модель формирования температурных полей в технологических объектах при плазменно-лазерном нанесении покрытий. Проведены исследования теплового воздействия на материалы комбинированных энергетических потоков. Расчетные значения температур для выбранной группы материалов в широких диапазонах скорости перемещения и мощности теплового источника удовлетворительно совпадают с результатами экспериментальной оценки (погрешность $\delta_{\pi} \leq 15 \dots 20\%$).

Введение

Технологические процессы обработки материалов концентрированными потоками энергии, к числу которых относится лазерное излучение, с высокой экономической эффективностью могут применяться при изготовлении деталей и узлов различных машин и агрегатов [1]. Реализация соответствующих условий взаимодействия излучения с веществом позволяет осуществить различные способы лазерной технологии, например, отжиг и термоупрочнение [2, 3]. Значительными потенциальными возможностями обладают методы высокоэнергетической обработки на основе интегрирования лазерного излучения с плазменной струей и дуговым разрядом. Потоки плазмы и электрическая дуга при газотермическом нанесении покрытий воздействуют на материалы с большой тепловой мощностью и относительно невысокой ее плотностью. Их совмещение с высокоорганизованным полем лазерного излучения при комбинированной обработке создает предпосылки для повышения эффективности использования энергии при сочетании преимуществ составляющих процессов [4, 5]. Наиболее значимым фактором, влияющим на формирование физико-механических свойств материалов и эксплуатационных характеристик изделий при воздействии концентрированных потоков энергии, является температура в зоне обработки. Характер тепловых процессов определяется пространственным распределением плотности мощности, временем воздействия, а также теплофизическими характеристиками обрабатываемого материала. Несоответствие температурно-скоростных режимов обработки деталей заданному изменению состояния технологических объек-

тов приводит уже на стадии обработки к образованию различных дефектов. Применение элементов компьютерной оптики (фокусаторов излучения) [6, 7] позволяет создать требуемое пространственное распределение плотности мощности энергетических потоков для успешного проведения технологических процессов лазерной термической и комбинированной обработки материалов. Обработка деталей полосовым тепловым источником имеет ряд технологических преимуществ и позволяет обеспечить наиболее однородное распределение механических свойств по ширине зоны термического влияния.

Целью данной работы является разработка рекомендаций для совершенствования оборудования, а также выбор рациональной схемы нагрева материалов при поведении лазерной термической и комбинированной обработки с использованием элементов компьютерной оптики, преобразующих излучение в отрезок прямой.

1. Совершенствование технологического оборудования для проведения лазерной термической и комбинированной обработки материалов

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования формирования лазерных пучков позволили создать оптические системы, обеспечивающие регулирование распределения плотности мощности по пятну нагрева. Предложен метод изменения интенсивности излучения и параметров энергетического воздействия на основе применения динамических фокусаторов (подвижных отражающих элементов компьютерной оптики) [8, 9]. Для проведения лазерной термической и комбинированной обработки материалов с использованием непре-

рывного излучения CO₂-лазеров разработано оптическое устройство, состоящее из узлов фиксации, охлаждения, юстировки и вращения элемента компьютерной оптики, а также деформируемого зеркала с электромагнитным приводом (см. рис. 1). Оптический элемент устанавливается и фиксируется в устройстве на втулке, передающей крутящий момент от электродвигателя. Регулируется угол падения излучения на оптический элемент, имеется возможность точной установки фокусатора излучения относительно центра лазерного пучка по двум взаимноперпендикулярным координатам. Устройство является универсальным, имеется возможность установить его практически в любой технологический модуль выпускаемых CO₂-лазерных комплексов для обработки материалов. Для порталных конструкций целесообразно его применение вместо последнего поворотного зеркала оптического блока. Достигается значительное расширение функциональных возможностей таких лазерных установок в связи с проведением дополнительной операции термообработки.

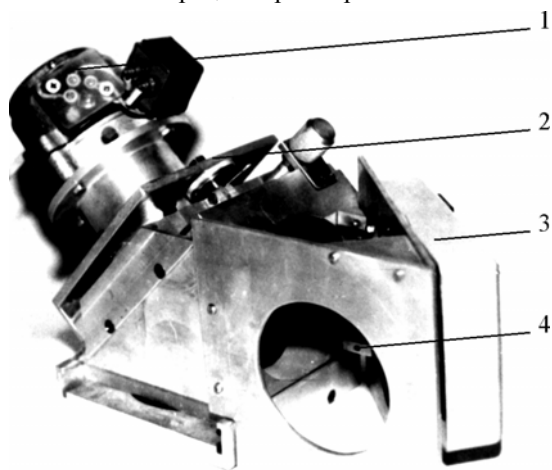


Рис. 1. Общий вид устройства для проведения лазерной термической и комбинированной обработки материалов: 1 – узел вращения фокусатора излучения; 2 – узел юстировки; 3 – электромагнитный привод деформируемого зеркала; 4 – вогнутое деформируемое зеркало

Выбор режимов обработки на основе данных экспериментального и теоретического моделирования должен сочетаться с текущим контролем и управлением в ходе проведения технологических операций. Применение средств для бесконтактного контроля температурного поля на поверхности деталей в составе систем компьютерного управления создает предпосылки для реализации сложных законов управления высокоэнергетическими технологическими процессами, в том числе и законов управления с адаптацией. Поскольку специфика взаимодействия высококонцентрированных потоков энергии с деталью делает невозможным использование контактных способов измерения температуры, то контроль температурных полей целесообразно осу-

ществлять опико-электронными системами анализа потоков теплового излучения. При температуре поверхности от 700 до 1500⁰С наибольшая часть энергии излучения с поверхности технологических объектов приходится на спектральный диапазон $d\lambda = (1...6) \cdot 10^{-3}$ м. В этой области ИК-спектра излучательная способность материалов в меньшей степени зависит от шероховатости их поверхности, так как длина волны излучения превосходит размеры самих неровностей. Использование тепловизоров (опико-электронных сканирующих инфракрасных радиометров пассивного типа) позволяет обеспечить однозначность и пропорциональность значения сигнала отклика контролируемому параметру при достаточно высоких пространственно-энергетических и временных разрешениях. Для проведения экспериментальных исследований быстроменяющихся температурных полей в реальном масштабе времени и применения в составе систем управления технологическими процессами создана автоматизированная система бесконтактной диагностики нестационарных тепловых процессов.

Разработаны аппаратно-программные средства автоматизации операций лазерной термической и комбинированной обработки материалов, введенные в состав лазерного технологического комплекса ЛК-1300 «Хебр-1А». Создана компьютерная система управления технологическими процессами, состоящая из следующих элементов:

- системы автоматизированной подготовки программ управления исполнительными элементами технологического модуля лазерного комплекса;
- системы контроля пространственного распределения интенсивности лазерного излучения, формируемого элементами компьютерной оптики;
- системы бесконтактного контроля температурного поля в зоне высокоэнергетической обработки материалов;
- средств обнаружения поверхностных дефектов обработанной поверхности деталей;
- устройства сопряжения блока управления технологическим модулем лазерного комплекса с персональным компьютером;
- программного обеспечения обмена данными и трансляции управляющих команд.

2. Разработка технологических процессов лазерной и комбинированной обработки материалов с применением фокусаторов излучения

Применение лазерного отжига для местного разупрочнения перед формообразованием металлических сплавов значительно улучшает схему пластического течения листового металла, что позволяет повысить точность изготовления деталей, уменьшить пружинение и радиусыгиба [3, 10]. С целью увеличения удельной прочности и жесткости изделий в штамповочном производстве деталей летательных аппаратов и их двигателей используются

титановые сплавы. Средне- и высоколегированные титановые сплавы практически не поддаются холодному формообразованию из-за высокого сопротивления металла деформации, интенсивного упрочнения, склонности к растрескиванию и разрывам. Низколегированные сплавы также имеют пониженные характеристики пластичности, что в ряде случаев вызывает необходимость нагрева деформируемого металла. Наиболее важными специфическими особенностями, определяющими комплекс технологических свойств таких конструкционных материалов, наряду с ограниченными возможностями холодного деформирования, являются их низкая теплопроводность и высокая активность взаимодействия с окружающей средой. Лазерный нагрев является более предпочтительным, так как он обеспечивает возможность значительного сокращения времени пребывания металла при температурах интенсивного окисления и газонасыщения поверхностных слоев. Разработаны рекомендации к выбору рациональной схемы нагрева для обеспечения качества технологического процесса отжига перед холодной листовой штамповкой низколегированных титановых сплавов. Принимается схема нагрева непрерывным излучением, сфокусированным в неподвижный (установленный перпендикулярно, под углом и параллельно траектории движения) или вращающийся полосовой энергетический источник. Выполняется условие неоднородного распределения интенсивности излучения по длине полосового источника с ее максимумом по краям, что компенсирует повышенные тепловые потери периферийных участков [8].

В результате проведенных экспериментальных исследований на примере конструкционного материала ОТ4-1 определены температурно-скоростные режимы лазерного отжига низколегированных титановых сплавов, обеспечивающие снятие наклепа. На рис. 2 представлено экспериментально определенное температурное поле, имеющее место на поверхности листового титанового сплава ОТ4-1 толщиной $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м при проведении лазерного отжига. Скорость движения полосового теплового источника, сформированного элементом компьютерной оптики, составляла $v = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м/с.

Характер структурных изменений в материалах изучался методами традиционной металлографии. На рис. 3 приведена структура листового титанового сплава ОТ4-1 после проведения лазерного отжига. Исходный материал - в состоянии поставки (после прокатки и объемного отжига). Использование элементов компьютерной оптики - фокусаторов излучения позволяет обеспечить режимы обработки в заданных интервалах температуры и времени выдержки. Достигается одинаковая степень развития структурных превращений по ширине зоны термического влияния.

Для определения предельной пластичности сплава и его способности выдерживать заданную пластическую деформацию проведены испытания на изгиб образцов из листовых материалов. Приме-

нение рациональной схемы нагрева обеспечивает увеличение предельного угла изгиба при холодном деформировании образцов из титанового сплава ОТ4-1 толщиной $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м на 50...60%, что позволяет проводить формообразование деталей без их дополнительного подогрева. Замена операции нагрев-гибка холодным формообразованием позволяет повысить производительность в 2...2,5 раза, снизить энергозатраты на 40...50%, снизить трудоемкость на 30...40% при экономии материалов 10...15%. Анализ полученных результатов указывает на перспективность применения фокусаторов излучения при лазерном отжиге низколегированных титановых сплавов.

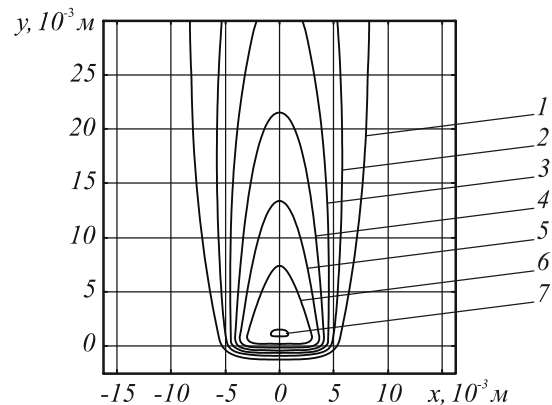


Рис. 2. Температурное поле на поверхности листового титанового сплава ОТ4-1 толщиной $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м при проведении лазерного отжига. Скорость движения полосового теплового источника $v = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м/с. Мощность излучения CO_2 -лазерной установки $Q = 500$ Вт: 1 - $T = 400$ К; 2 - $T = 500$ К; 3 - $T = 600$ К; 4 - $T = 700$ К; 5 - $T = 800$ К; 6 - $T = 900$ К; 7 - $T = 1000$ К

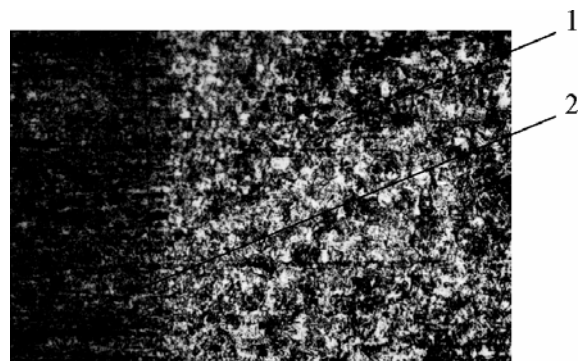


Рис. 3. Структура листового титанового сплава ОТ4-1 после лазерного отжига: 1 - зона отжига; 2 - исходная структура

Практика разработки и внедрения лазерного термоупрочнения деталей машин показывает, что этот процесс может быть достаточно эффективным и позволяет существенно повысить надежность и ресурс отдельных деталей, узлов и механизмов в целом [1, 2]. При этом одними из основных требований являются равномерность глубины закаленной зоны и отсутствие дефектов на ее поверхности.

При проведении экспериментальных исследований определены температурно-скоростные режи-

мы лазерного термоупрочнения деталей из стали 40ХНМА. Температурное поле на поверхности обрабатываемого материала представлено на рис. 4. Скорость движения полосового теплового источника, сформированного элементом компьютерной оптики, составляла $v = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м/с. Мощность излучения CO₂-лазерной установки Q=950 Вт. Для снижения отражательной способности на поверхность обрабатываемого материала наносились специальные поглощающие покрытия.

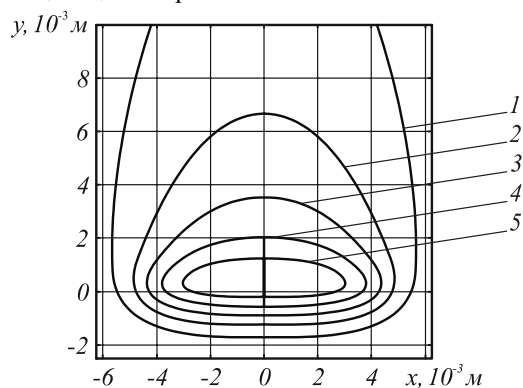


Рис. 4. Температурное поле на поверхности обрабатываемого материала при проведении термоупрочнения деталей из стали 40ХНМА.

Скорость движения
полосового теплового источника $v = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м/с.
Мощность излучения CO₂-лазерной установки
 $Q = 950$ Вт: 1 – $T=500$ К; 2 – $T=700$ К;
3 – $T=900$ К; 4 – $T=1100$ К; 5 – $T=1300$ К

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. 5). При обработке без оплавления поверхности верхний, наиболее твердый слой пониженной травимости представляет собой мартенсит с микротвердостью $H_{\mu} = 7500 \dots 8000$ МПа. Под ним расположена область неполной закалки из мартенсита и феррита. Третий слой – переходная зона. При лазерном воздействии на предварительно термообработанную деталь в этом слое имеет место снижение микротвердости, связанное с образованием структур отпуска – троостоферрита, троостита или сорбита. Исходная структура материала – сорбит. Формирование таких структур в области лазерного воздействия обусловлено характером распределения температурного поля и различием в скорости охлаждения по глубине зоны термического влияния.

Интенсивность изнашивания деталей из стали 40ХНМА изучалась на специальном стенде в режиме трения скольжения. 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 40ХНМА позволяет повысить их износостойкость в 1,8...2 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.

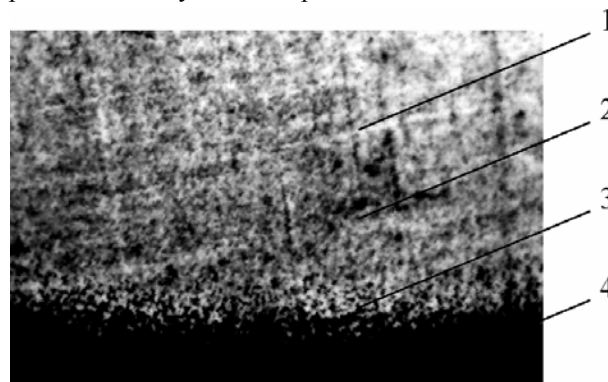


Рис. 5. Структура области лазерного воздействия после термоупрочнения стали 40ХНМА:

1 – твердый слой пониженной травимости;
2 – область неполной закалки; 3 – переходная зона;
4 – исходная структура

На основе исследования характеристик пропускания лазерного излучения плазменной струей выявлены новые технологические возможности комбинированной плазменно-лазерной и лазерно-дуговой обработки материалов. Управление пространственным распределением плотности мощности энергетических потоков предоставляет возможность значительно повысить эффективность воздействия. С учетом требований воспроизводимости технологических процессов обоснован выбор схем комбинированной обработки, обеспечивающих снижение поглощения и рефракции лазерного излучения в двухфазном плазменном потоке и дуговом разряде. Для проведения плазменно-лазерного и лазерно-дугового нанесения покрытий доработана конструкция лазерной технологической установки.

Построена расчетная модель формирования температурных полей в технологических объектах при плазменно-лазерном нанесении покрытий. Проведены исследования теплового воздействия на материалы комбинированных энергетических потоков.

Расчеты температурных полей в материалах проводились для трех вариантов привязки полосового лазерного энергетического источника в зоне плазменного нагрева: перед участком воздействия плазменной струи, в его центре и позади зоны нанесения покрытия (см. рис. 6) [11]. Увеличение плотности лазерного излучения по краям полосы компенсирует повышенные тепловые потери периферийных участков. Расположение полосового лазерного энергетического источника перед участ-

ком воздействия плазменной струи позволяет осуществить режимы термоактивации обрабатываемой поверхности основы. Достигается повышение адгезионной прочности наносимого пористого покрытия.

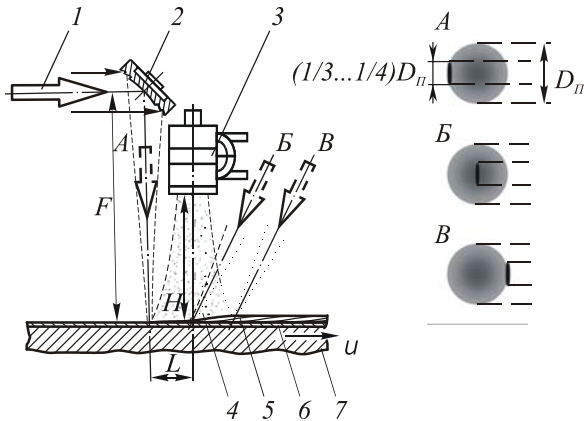


Рис. 6. Схема плазменно-лазерного нанесения покрытий: 1 - лазерное излучение, вводимое перед участком воздействия плазменной струи (A), в его центре (B) или позади зоны нанесения покрытия (B); 2 - динамический фокусатор излучения (элемент компьютерной оптики); 3 - плазмотрон; 4 - плазменная струя; 5 - нанесенное покрытие; 6 - основа; 7 - подслои. H - дистанция напыления; F - фокусное расстояние оптического элемента; L - расстояние от центра области плазменного воздействия до центра светового пятна лазерного излучения; D_p - диаметр пятна нагрева материала плазменной струей

Обоснована принятая для расчетов температурных полей схема нагрева деталей при плазменно-лазерном нанесении покрытий. Деталь перемещается с постоянной скоростью v в положительном направлении оси Oy в системе координат (x, y, 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, а граница фазового перехода тонкого слоя расплава находится на поверхности детали.

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 обрабатываемых материалов.

Распределение плотности мощности лазерного излучения q_A в пятне нагрева определяется соответствующими оптическими расчетами в зависимости от исходных характеристик излучения [8, 9]. При

определении температуры поверхности вследствие кратковременного действия теплового потока отдельных частиц, нагрев напыляемым материалом принимается интегральной оценкой. Принято считать [12], 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. На рис. 7 представлены результаты расчета температурного поля, имеющего место на поверхности детали из сплава ЭП718ВД (ХН45МВТЮБР) с подслоем НА-67 при плазменно-лазерном нанесении покрытия АНБ (алюминий-нитрид бора). Скорость перемещения комбинированного теплового источника $v=5 \cdot 10^{-2}$ м/с.

Для определения достоверности результатов теоретической оценки температурного поля проведено экспериментальное исследование воздействия комбинированных энергетических потоков. Использовался контактный способ измерения температуры терморезистором, тарированным по показаниям ртутного термометра и платино-родиевой термопары. Для регистрации временной зависимости температуры разработано устройство сопряжения - асинхронный логический анализатор, выполненный в виде платы расширения персонального компьютера [13]. Определение плотности теплового потока плазменной струи и коэффициентов теплообмена материалов в зависимости от технологических параметров и условий напыления проводилось по методике, разработанной в [14], на специальном контрольном стенде.

Структура нанесенных покрытий исследовалась на поперечных шлифах с помощью оптического микроскопа (см. рис. 8). Скорость перемещения комбинированного теплового источника составляла $v=(2...20) \cdot 10^{-2}$ м/с. Мощность лазерного излучения изменялась в пределах $Q_A = 40...180$ Вт. Дистанция напыления уменьшалась от 0,25 м до 0,1 м. Результаты расчета и экспериментальной оценки термического цикла материала в центре зоны комбинированного воздействия при плазменно-лазерном нанесении покрытия АНБ на деталь из сплава ЭП718ВД с подслоем НА-67 представлены на рис. 9. Сравнение результатов экспериментальной оценки и теоретического исследования показало достаточную степень их сходимости (погрешность $\delta_n \leq 15...20\%$) и подтвердило достоверность принятых допущений.

Заключение

Применение элементов компьютерной оптики (фокусаторов излучения) позволяет создать требуемое пространственное распределение плотности мощности энергетических потоков для успешного проведения технологических процессов лазерной термической и комбинированной обработки материалов. Обработка деталей полосовым тепловым источником имеет ряд технологических преимуществ

и позволяет обеспечить наиболее однородное распределение механических свойств по ширине зоны термического влияния.

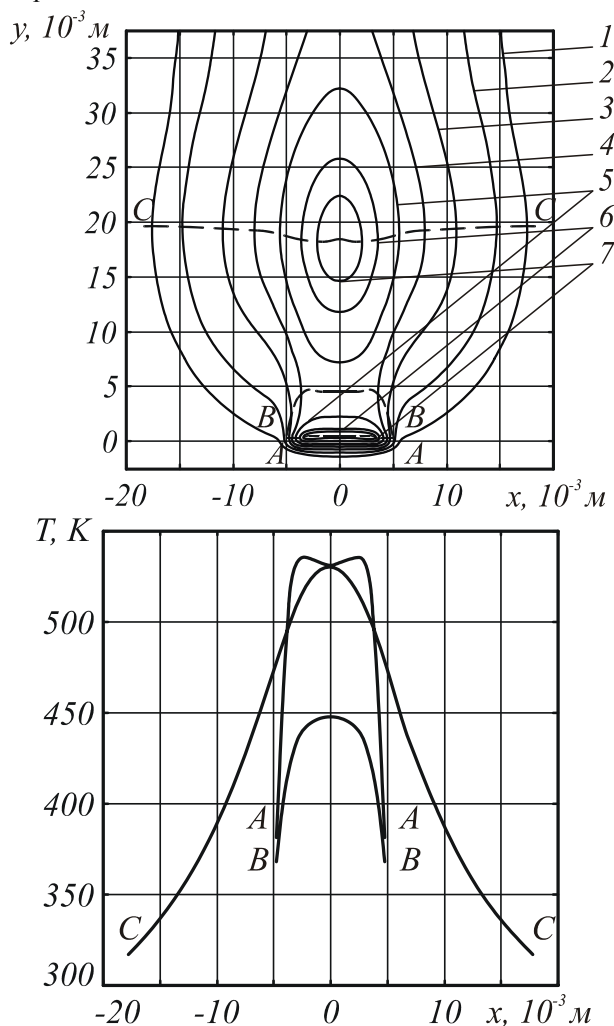


Рис. 7. Результаты расчета температурного поля, имеющего место на поверхности детали из сплава ЭП718ВД с подслоем НА-67 при плазменно-лазерном нанесении покрытия АНБ. Скорость перемещения комбинированного теплового источника $v = 5 \cdot 10^{-2}$ м/с. Мощность лазерного излучения $Q_L = 180$ Вт: 1 – $T = 320$ К; 2 – $T = 340$ К; 3 – $T = 380$ К; 4 – $T = 420$ К; 5 – $T = 460$ К; 6 – $T = 500$ К; 7 – $T = 520$ К

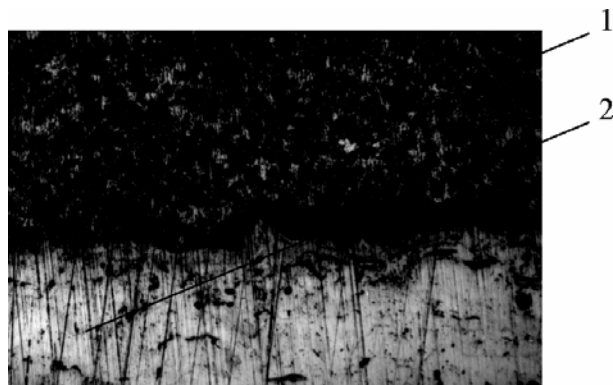


Рис. 8. Структура системы АНБ+НА-67+ЭП718ВД после плазменно-лазерного нанесения покрытия: 1 – покрытие; 2 – основа

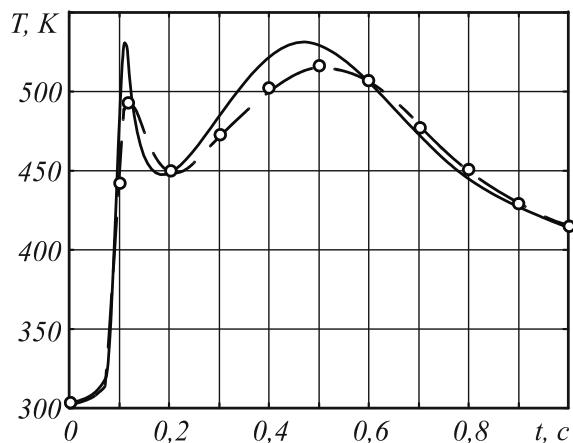


Рис. 9. Результаты расчета и экспериментальной оценки термического цикла материала в центре зоны комбинированного воздействия при плазменно-лазерном нанесении покрытия АНБ на деталь из сплава ЭП718ВД с подслоем НА-67. Скорость перемещения комбинированного теплового источника $v = 5 \cdot 10^{-2}$ м/с. Мощность излучения CO_2 -лазерной установки $Q_L = 180$ Вт:

— результаты расчета,
○ - - - - - ○ 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 элемента компьютерной оптики, а также деформируемого зеркала с электромагнитным приводом.

Экспериментальные исследования быстротеменяющихся температурных полей в реальном масштабе времени выполнены с применением автоматизированной системы бесконтактной диагностики нестационарных тепловых процессов. Обоснована целесообразность ее применения в составе систем управления технологическими процессами. Операции лазерной термической и комбинированной обработки автоматизированы с помощью специально созданных аппаратно-программных средств, введенных в состав лазерного технологического комплекса ЛК-1300 «Хебр-1А».

Разработаны рекомендации к выбору рациональной схемы нагрева для обеспечения качества технологического процесса отжига перед холодной листовой штамповкой низколегированных титановых сплавов. Определены температурно-скоростные режимы лазерного термоупрочнения деталей из стали 40ХНМА. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о целесообразности применения технологических оптических систем на основе фокусаторов излучения при лазерном отжиге низколегированных титановых сплавов и термоупрочнении для повышения износостойкости стальных деталей, работающих в условиях трения.

Построена расчетная модель формирования температурных полей в технологических объектах при плазменно-лазерном нанесении покрытий. Рас-

четы температурных полей в материалах проводились для трех вариантов привязки полосового лазерного энергетического источника в зоне плазменного нагрева: перед участком воздействия плазменной струи, в его центре и позади зоны нанесения покрытия. Проведены исследования теплового воздействия на материалы комбинированных энергетических потоков. Расчетные значения температур для выбранной группы материалов в широких диапазонах скорости перемещения и мощности теплового источника удовлетворительно совпадают с результатами экспериментальной оценки (погрешность $\delta_{\pi} \leq 15 \dots 20\%$).

Литература

1. Handbook of laser processing // Ed. J. F. Ready. – Orlando: Laser Institute of America. Magnolia publ. Inc., 2001. 715 p.
2. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов // М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
3. Мордасов В.И. Возможности локальной лазерной обработки при формообразовании листовых материалов // Изв. Академии наук «Металлы», 1997. №3. С. 111-118.
4. Барвинок В.А., Мордасов В.И., Шорин В.П. Высокоэффективные лазерно-плазменные технологии в машиностроении. // М.: МЦНТИ, 1997. 76 с.
5. Сом А.И., Кривцун И.В. Лазер + плазма: поиск новых возможностей в наплавке // Автоматическая сварка, 2000. №12. С. 36-41.
6. 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.
7. Методы компьютерной оптики // Под ред. В.А. Соифера. М.: Физматлит, 2000. 688 с.
8. Барвинок В.А., Мордасов В.И., Мурзин С.П. К вопросу формирования температурных полей при лазерной поверхностной обработке // Изв. Академии наук «Металлы», 1995. N3. С.147-152.
9. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Мордасов В.И., Мурзин С.П., Харитонов С.И. Исследование оптических систем управления переносом высокой энергии // Компьютерная оптика, 2002. В. 23. С.40-43.
10. Устройство для локального отжига листовых заготовок: А.С. 1706219 СССР, МКИ⁵ С 21 D 1/09 // Сисакян И.Н., Шорин В.П., Соифер В.А., Мордасов В.И., Мурзин С.П. 15.09.1991.
11. Способ лазерно-газотермического нанесения покрытия: Патент РФ 2165997, МКИ⁷ С 23 С 4/12 // Гришанов В.Н., Мордасов В.И., Мурзин С.П., Скляренко К.В. Бюл. 12. 27.04.2001.
12. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование // М.: Металлургия, 1992. 432 с.
13. Новиков Ю.В., Калашников О.А., Гуляев С.Э. Разработка устройств сопряжения для персонального компьютера типа IBM PC: Практ. пособие // М.: ЭКОМ, 1997. 224с.
14. Барвинок В.А., Богданович В.И., Докукина И.А., Плотников А.Н. Математическое моделирование и физика процессов нанесения плазменных покрытий из композиционных плакированных порошков // М.: МЦНТИ, 1998. 96 с.