

487294

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н. Э. Баумана

На правах рукописи

ЩЕРБАКОВА Елена Анатольевна

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
СТРУКТУРЫ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ
ДЛЯ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ УПРОЧНЕНИЯ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН

05.16.01 - Металловедение и термическая обработка металлов
06.03.07 - Оборудование и технология лазерной обработки

А в т с р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1993

Щербаков

Работа выполнена в Научно-исследовательском центре по технологическим лазерам РАН и Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Государствен.м техническом университете им.Н.Э.Баумана.

Научные руководители: профессор, д.т.н. А.Г.Васильева
д.т.н. А.Н.Сафонов

Официальные оппоненты: д.т.н. Крапошин В.С.
к.т.н. Радченко Р.Д.

Ведущее предприятие ЦНИИТМаш

Защита диссертации состоится "14" июня 1993 г. на заседании специализированного совета К053.15.13 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Государственном техническом университете им.Н.Э.Баумана по адресу : 107005, г.Москва, 2-я Бауманская, д.5.

Ваш отзыв на автореферат, заведенный под № _____, направлять по указанному адресу.

С диссертацией и
Желающие присутствовать
известить Совет пис
председателя Совета
Телефон для спра

Автореферат разо

Ученый секретарь
специализированного
к.т.н., доцент

Ш 87294

Зак. 284 Тираж /
Ротапринт МГТУ им.

Актуальность темы: В последние годы мощные CO_2 -лазеры находят широкое применение для поверхностной закалки деталей машин и инструмента в промышленности как у нас в стране, так и за рубежом. Применение лазерной термообработки (ЛТО) позволяет использовать для их изготовления обычные конструкционные стали вместо дорогостоящих легированных.

Исследования поверхностной ЛТО показали, что результат зависит сложным образом от переменных параметров процесса: мощности лазерного излучения, диаметра и формы лазерного пятна, скорости перемещения детали относительно лазерного луча, а также состава и исходного структурного состояния сталей и сплавов. Основные трудности исследований состоят в том, что на механизмы изучаемых явлений сильное влияние оказывают электромагнитные поля в зоне воздействия лазерного излучения. В этом случае температурное поле — единственная независимая характеристика, через которую определяются все остальные: движение фазовых границ, массоперенос химических составляющих сплава и т.д., позволяющие прогнозировать формирование структуры в зоне термического влияния (ЗТВ) после охлаждения.

Построение физико-математической модели процесса ЛТО с целью выбора рациональных режимов обработки и прогнозирования структуры в ЗТВ позволяет значительно ускорить и удешевить выполнение работ по упрочнению деталей машин, так как не требует проведения трудоемких и дорогостоящих экспериментов, а также металловедческих исследований.

Цель работы: Разработка расчетной методики прогнозирования основных закономерностей формирования структуры и свойств до- и заэвтектоидных углеродистых сталей в зоне термического влияния при лазерной закалке; разработка на их основе рекомендаций по выбору рациональных режимов лазерного упрочнения деталей машин.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи:

1) разработать алгоритм численного расчета температурного поля в ЗТВ при лазерной закалке с учетом зависимостей теплофизических коэффициентов от температуры и провести экспериментальную проверку точности расчетов;

2) провести исследование влияния режимов лазерной обработки при непрерывном действии излучения на температурное поле в ЗТВ различных сталей;

3) разработать алгоритм численного расчета фазового α - γ пре-



вращения и диффузионного перераспределения углерода между фазами исходной структуры в ЗТВ с экспериментальной проверкой точности расчетов;

4) разработать практические рекомендации по выбору режимов лазерного упрочнения деталей.

Научная новизна: Установлены основные закономерности диффузионных процессов, определяющих формирование структуры и свойств до- и заэвтектоидных углеродистых сталей при лазерной закалке.

Разработана методика прогнозирования структуры в ЗТВ сталей при лазерной закалке, включающая:

1) выбор режима термообработки без оплавления поверхности на необходимую глубину упрочнения по построенным диаграммам;

2) численный расчет трехмерной задачи теплопроводности при воздействии лазерного луча, движущегося по прямой и по спирали, с различным пространственным распределением плотности мощности на поверхности массивного твердого тела, а также с учетом зависимости теплофизических коэффициентов от температуры;

3) численный расчет диффузионной модели $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения в ЗТВ с учетом температурной и концентрационной зависимостей коэффициента диффузии, позволяющий оценить полноту протекания процесса перераспределения углерода между исходными фазами в ЗТВ.

В результате теоретических и экспериментальных исследований фазовых превращений при различном содержании углерода и после различной предварительной обработки установлены закономерности влияния исходной структуры на процесс аустенитизации углеродистых сталей.

Практическая ценность: На основе расчетов построены диаграммы для выбора мощности (или рабочей плотности мощности) лазера и интервала скоростей перемещения детали относительно луча для данных диаметра луча, коэффициента поглощения покрытия и содержания углерода в стали, позволяющие найти рациональные режимы обработки детали на необходимую глубину упрочнения.

Разработаны способы лазерной термообработки:

1) крупногабаритных деталей при непрерывном изменении расстояния от фокусирующей системы до плоскости обработки с целью поддержания постоянной глубины упрочнения;

2) деталей типа тел вращения при поддержании температуры на поверхности одного витка в интервале от температуры кипения металла до температуры начала мартенситного превращения при одновременном охлаждении участков поверхности детали перед пятном

лазерного нагрева и после него с целью повышения глубины упрочнения и твердости.

Апробация работы: Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на:

1. Научно-техническом краткосрочном семинаре "Новые стали и сплавы, режимы их термической обработки" (Ленинград, 1989).
2. Областном научно-техническом семинаре "Применение лазеров в науке и технике" (Тольятти, 1989).
3. Научно-техническом семинаре "Новые разработки и опыт внедрения лазерной техники и технологии" (г. Ужгород, 1990)
4. Научно-техническом семинаре "Новые материалы и ресурсосберегающие технологии термической и химико-термической обработки деталей машин и инструмента" (Пенза, 1990).
5. IV национальной конференции и технической выставке "Laser and their applications" (Пловдив, Болгария, 1990).
6. Научно-технических семинарах Научно-исследовательского центра по технологическим лазерам.

Публикации: Основное содержание диссертации отражено в 3 статьях, тезисах 5 докладов и 2 авторских свидетельствах.

Объем работы: Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, приложений и содержит 203 страницы машинописного текста, включая 11 таблиц, рисунков, список литературы из 147 наименований.

Содержание работы.

В введении обоснована актуальность работы, ее цель, научная новизна и практическая ценность результатов исследований.

В первой главе дан литературный обзор современных представлений о сущности лазерного термоупрочнения, методах определения параметров ЛТО, кинетике аустенитного превращения, термодинамических аспектах теории диффузии углерода в аустените, методах расчета температурных полей и краевых задач с подвижными фазовыми границами, а также математическом моделировании процесса ЛТО.

При воздействии температурного поля в структуре металла происходят фазовые изменения, кинетика которых до сих пор представляется неоднозначно. Дискуссионным остается вопрос о механизме зарождения γ -фазы. Показано, что в случае ЛТО возникновение зародышей γ -фаз критического размера не влияет на кинетику превращения.

Характерные размеры систем (1...50 мкм), рассматриваемых в рамках теории диффузии углерода в аустените, позволяют считать систему находящейся в каждый момент времени в термодинамическом равновесии и использовать для ее описания термодинамические потенциалы.

Универсальных методов решения тепловой и диффузионной задач не существует. Для практического применения, когда требуется получение детальной информации о параметрах лазерного нагрева реальных металлов, распределении концентрации углерода и положении фазовых границ на стадиях нагрева и охлаждения, целесообразно использовать численные методы решения данных задач. Они позволяют достаточно просто учесть температурные зависимости теплофизических коэффициентов и концентрационную зависимость коэффициента диффузии. Математическое моделирование процесса ЛТО является очень актуальным, так как оно позволяет сократить дорогостоящие экспериментальные работы. Существующие до сих пор модели недостаточно просто описывают процесс ЛТО: либо не учитывают зависимости входящих в тепловую и диффузионную задачи коэффициентов от соответствующих переменных процесса, либо опускают некоторые стадии фазового превращения. Все это пока еще не дает возможности быстро и надежно прогнозировать структуру в ЗТ после охлаждения.

Во второй главе приведены сведения об исследуемых сталях, оборудовании для металловедческих и микроскопических исследований, методиках оценки размеров зерен и экспериментального измерения температуры, а также определения погрешности измерений.

В качестве объектов для исследования процесса перераспределения углерода в аустените внутри перлитной колонии, между перлитными и избыточными (ферритными для доэвтектоидной и цементитными для заэвтектоидной стали) зернами при лазерной обработке выбрали широко распространенные в машиностроении простые углеродистые стали 20, 45 и У9 в различных исходных состояниях.

Исходное состояние структуры стали 20 - после прокатки; размер перлитного зерна $l_p=30$ мкм, размер ферритного зерна $l_f=30$ мкм, межластинное расстояние в перлите $\Delta_0=0.6$ мкм.

Исходное состояние стали 45 - после нормализации; структурные параметры: $l_p=50$ мкм, $l_f=5.3$ мкм, $\Delta_0=0.6$ мкм.

Образцы из стали У9 специально подготавливали для исследования влияния различной дисперсности на полноту завершения процесса аустенитизации. После отжига в печи при $T=1273$ К в течение $t=2$ ч и охлаждения на воздухе, образцы выдерживали в печи при $T=1053$ К

в течение $t=45$ мин, а затем I серию образцов охлаждали с печью (здесь получено $\Delta_0=0.7$ мкм), II серию - на воздухе ($\Delta_0=0.3$ мкм), III серию - в масле ($\Delta_0=0.14$ мкм). Для всех образцов $l_p=30$ мкм, сетка избыточного цементита отсутствует.

Металлографические исследования проводили по традиционной методике на оптическом микроскопе "Neophot-32"; микроскопические исследования - на микроскопе "Leitz Metallover" с телевизионной приставкой; электронномикроскопические исследования - в сканирующем электронном микроскопе "Camscan - 4VD" при использовании сигнала вторичных электронов; количественный анализ изображений структуры (оценку Δ_0) - с помощью характеристического рентгеновского излучения K_α углерода системы анализа изображений "Videolab - 2" с использованием двумерного Фурье-анализа изображения структуры; микрорентгеноспектральные измерения - с помощью системы анализа с дисперсией по длинам волн "Microspec 3PS"; исследования механических свойств - на микротвердоме PMT-3.

Для оценки размеров зерен использовали методику линейного анализа для многофазно-полиэдрической структуры.

Разработали методику измерения температурного поля в образце на различных расстояниях от обрабатываемой поверхности. Методика включает подготовку образцов к эксперименту, выбор режима обработки и способ крепления термопары в образце. Для записи температурного цикла на многолучевой шлейфовый осциллограф Н117 использовали гальванометры с собственной частотой 400 Гц, алюмель-хромелевые термопары с диаметром проволоки 200 мкм и осциллографную бумагу УФ. Крепление термопары в образце было жестким механическим, таким, что горячий спай термопары, обмазанный теплопроводящей пастой КПТ-8, упирался в конусное окончание расточки внутри образца. В эксперименте использовали лазерную установку SP-820 мощность до 1.5 кВт и гауссовым распределением плотности мощности по пятну.

Погрешность измерения диаметра оплава рассчитывали по отношению средней погрешности среднего значения к среднему значению d_p .

Методическая погрешность при контактном измерении температур зависит, в частности, от разницы термических сопротивлений приемника температур (ИПТ) и того участка тела, где размещается ИПТ, а также от разницы в удельных теплоемкостях и плотностях ИПТ и исследуемого объекта. Погрешность измерения внутренних температур состоит из: величины температурного возмущения внутри ИПТ, вызванного существующем в теле температурным полем с известным пер-

воначальным градиентом; динамической погрешностью, обусловленной зависимостью температуры тела от времени; погрешностью измерения, обусловленной влиянием границ тела.

В третьей главе приведены постановка трехмерной нестационарной нелинейной тепловой задачи для ЛТО, численная схема ее решения и описание компьютерной программы, реализующей данную схему. Проведена экспериментальная проверка результатов расчетов температурного поля в стальном образце. Исследовано влияние параметров процесса ЛТО (мощности, диаметра пятна и скорости обработки) на максимальную температуру нагрева поверхности. Разработан пакет программ, позволяющий выполнить графическое изображение процесса ЛТО. На основе расчетов по представленному пакету программ построены диаграммы выбора рациональных режимов обработки.

В общем виде тепловая задача описывается уравнением:

$$\rho C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div} [\lambda(T) \operatorname{grad} T] \quad (1)$$

где T — температурное поле, являющееся функцией координат и времени, ρ — плотность материала, $C(T)$ — теплоемкость, $\lambda(T)$ — теплопроводность.

В случае термобработки плоских тел, когда по поверхности полубесконечного тела, толщина которого больше $3d_{\text{п}}$, вдоль оси x прямолинейно с постоянной скоростью v движется лазерный луч с распределением плотности мощности $q(x', y')$, уравнение (1) должно быть записано в неподвижных декартовых координатах x, y, z . Задача симметрична относительно оси луча, расчетная область имеет пределы: $0 \leq x \leq \infty$, $0 \leq y \leq \infty$, $0 \leq z \leq \infty$. Начальные и граничные условия имеют вид:

$$T(x, y, z, t=0) = T_0 \quad (2)$$

$$T(x=\infty, y, z, t) = T(x, y=\infty, z, t) = T(x, y, z=\infty, t) = T_0 \quad (3)$$

Условие на поверхности:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = A q(x', y') \quad (4)$$

где $x' = x - vt$ ($-d_{\text{п}x}/2 \leq x' \leq d_{\text{п}x}/2$); $y' = y$ ($-d_{\text{п}y}/2 \leq y' \leq d_{\text{п}y}/2$). Здесь A — коэффициент поглощения, $d_{\text{п}x}$, $d_{\text{п}y}$ — диаметры пятна по осям x и y .

В случае термобработки тел вращения, имеющих радиус R ($R \geq 3d_{\text{п}}$), вращающихся вокруг своей оси с постоянной угловой скоростью ω , и при движении луча вдоль оси x с постоянной скоростью v , уравнение (1), записанное в цилиндрических координатах, имеет

вид:

$$\rho C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right] \quad (5)$$

$$0 \leq x \leq +\infty; 0 \leq r \leq R; 0 \leq \varphi \leq 2\pi.$$

Начальное и граничные условия принимают вид:

$$T(x, r, \varphi, t=0) = T_0 \quad (6)$$

$$T(x=\infty, r, \varphi, t) = T(x, r=0, \varphi, t) = T_0 \quad (7)$$

Условие на поверхности:

$$-\lambda(T) \left[\sin \varphi \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r=R} + \frac{\cos \varphi}{R} \frac{\partial T}{\partial \varphi} = A_0(x', y') \quad (8)$$

$$\text{где } x' = x - vt \quad (-d_{\text{пх}}/2 \leq x' \leq d_{\text{пх}}/2); \quad y' = R \cos(\varphi - \omega t) \quad (-d_{\text{пу}}/2 \leq y' \leq d_{\text{пу}}/2).$$

При расчетах тепловых полей принимаем $A = \text{const}$, конвективными потерями и потерями тепла при $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращении пренебрегаем.

В работе рассмотрены следующие формы распределения плотности мощности: гауссово, равномерное по кругу, равномерное по прямоугольнику, а также в форме "полочки", характерное для многоканального лазера. Условием равномерности распределения в последнем случае является пересечение гауссовых распределений излучения двух соседних трубок в точке с плотностью мощности, равной половине максимальной.

Для решения тепловой задачи выбрали "шахматную" численную схему, являющуюся абсолютно устойчивой и имеющую скорость сходимости $\sim h$. Отметим, что для сокращения времени счета и объема оперативной памяти по осям y и z , перпендикулярным направлению движения луча, введены логарифмические координаты расчетных узлов. Предложенная схема реализована в компьютерных программах SICL, MTL и ROT_G расчета температурных полей соответственно: в плоских образцах при гауссовом распределении плотности мощности, в плоских образцах при распределении плотности мощности в форме "полочки" и в цилиндрических образцах при гауссовом распределении плотности мощности.

Установлено, что предложенная численная схема позволяет с точностью $\sim 10\%$ определять температурные поля, возникающие в твердом теле под воздействием лазерного излучения.

По разработанной программе проведен расчет температурных полей при варьировании значений мощности от 0.3 до 10 кВт, диаметра пятна - от 2 до 10 мм и скорости обработки - от 0.2 до 30 м/мин.

Коэффициент поглощения принят равным $A=0.7$, распределение плотности мощности – гауссово. На основании расчетов построены зависимости максимальной температуры разогрева поверхности от одного из параметров процесса ЛТО при постоянных значениях двух других, позволяющие выбрать наилучшее их сочетание. Построен график зависимости интервала скоростей обработки от диаметра пятна при постоянном значении плотности мощности, который можно использовать в качестве операционной карты.

Для графического изображения процесса ЛТО разработан пакет программ на языке Фортран-77, в который, кроме программ расчета температурных полей входят: программа MAX для определения глубины и ширины ЗТВ; программа SCOR для определения интервала скорости обработки без оплавления поверхности при постоянных P и $d_{\text{п}}$.

По расчетным данным для углеродистых сталей с содержанием углерода 0.2; 0.45; 0.8; 0.9 и 1.2% и значений диаметра пятна $d_{\text{п}}=3$; 5 и 10 мм построены диаграммы выбора рациональных режимов обработки без оплавления поверхности. Как показало сравнение с экспериментальными данными, погрешность определения глубины ЗТВ по диаграммам составляет $\sim 20\%$.

В четвертой главе представлены постановка задачи диффузии углерода в аустените, численная схема расчета одномерного нелинейного нестационарного уравнения диффузии, описание компьютерной программы, реализующей данную схему, а также результаты расчета кинетики аустенитизации стали в изотермических и неизотермических условиях.

Для более точного определения глубины упрочненного слоя, а также для прогнозирования структуры после охлаждения необходимо решить задачу диффузии углерода в аустените. Полнота прохождения процесса аустенитизации зависит от температурного цикла и первоначальной структуры стали, определяющей расстояния, которые необходимо преодолеть атому углерода во время диффузии.

Для всех рассмотренных в работе исходных состояний стали задачу диффузии принимали одномерной.

Расчет процесса аустенитизации проводили в два этапа. На первом этапе рассматривали превращение перлит → аустенит, где задача диффузии представляет собой одномерную задачу Стефана с двумя подвижными границами: цементит-аустенит – $x_1(t)$ и аустенит-феррит – $x_2(t)$. Систему уравнений принимаем в следующем виде:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(C, T) \frac{\partial C}{\partial x} \right] \quad (9)$$

$$C(x, t) \Big|_{x=x_1(t)} = C_{\max}(T) \quad (10)$$

$$D(C_{\max}, T) \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=x_1(t)} = (C_{\text{ц}} - C_{\max}(T)) \frac{dx_1(t)}{dt} \quad (11)$$

$$C(x, t) \Big|_{x=x_2(t)} = C_{\min}(T) \quad (12)$$

$$-D(C_{\min}(T), T) \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=x_2(t)} = (C_{\min}(T) - C_{\text{ф}}) \frac{dx_2(t)}{dt} \quad (13)$$

Зависимость коэффициента диффузии от концентрации и температуры имеет вид:

$$D(C, T) = D_0(C) \cdot \exp \left[-E(C)/RT \right] \quad (15)$$

где R - универсальная газовая постоянная, $D_0(C)$ - предэкспоненциальный множитель, $E(C)$ - энергия активации. Зависимости $D_0(C)$ и $E(C)$ известны из справочной литературы.

Для каждой температуры T концентрацию углерода в аустените $C_{\max}(T)$ на границе $\text{Ц}-\text{А}$ ($x_1(t)$) находили по линии SE , а $C_{\min}$ на границе $\text{А}-\text{Ф}$ ($x_2(t)$) - по линии GS диаграммы $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$.

Задачу (9)-(13) решаем до смыкания движущихся навстречу друг другу фронтов аустенита от двух соседних пластин цементита ($x_2 \leq \Delta\text{ц}/2 + \Delta\text{ф}/2$) и до полного растворения пластинки цементита ($x_1 \geq 0$). Начало координат - посередине цементитной пластинки. Выполнение обоих равенств означает завершение аустенизации и начало гомогенизации в границах зерна перлита. На этой стадии процесса решаем уравнение диффузии (9) с граничными условиями (10) и (12) до полного выравнивания концентрации.

Для эвтектоидной стали на этом процесс завершается. Для до- и заэвтектоидных сталей необходимо приступить ко второму этапу решения задачи диффузии, когда растворяется зерно избыточной фазы, и граница аустенита продвигается в глубь этого зерна. Для всех исходных структур решаем уравнение диффузии (9) в расчетной области $0 \leq x \leq l_{\text{п}}/2 + l_{\text{изб}}/2$, начало координат которой находится посередине зерна перлита.

В соответствии с практическими потребностями при математичес-

ком моделировании фазовых переходов необходимо в большинстве случаев производить явное выделение движущихся границ, что не каждый численный метод позволяет осуществить. Наиболее простой и удобный в реализации является экономичная разностная схема "с ловлей фронта в узел расчетной сетки". Предлагаемый разностный алгоритм явно рассчитывает положение границы раздела фаз и учитывает немонотонное ее поведение. На основе предложенной разностной схемы разработана программа расчета диффузии углерода в аустените DIF, написанная на языке Фортран-77.

При расчетах по разработанной программе можно получить информацию, необходимую для исследования кинетики аустенитного превращения, об изменении под воздействием температурного поля координат фазовых границ и точек с различной концентрацией углерода, а также о распределении концентрации углерода в аустените на различных этапах превращения в любой момент времени, что позволяет прогнозировать структуру в ЗТВ.

В пятой главе представлена расчетная методика прогнозирования структуры стали при ЛТО, исследовано влияние на полноту прохождения процесса аустенитизации расстояния от обрабатываемой поверхности, а также межпластиночного расстояния и режима обработки.

Расчетная методика прогнозирования структуры углеродистых сталей при ЛТО включает: выбор по диаграммам режима обработки; расчет температурных полей на различных расстояниях от обрабатываемой поверхности в ЗТВ; расчет диффузии углерода в аустените. Расчет полноты прохождения диффузии углерода в аустените позволяет определить глубину упроченной зоны $h_{\text{зак}}$, а также прогнозировать структуру стали после охлаждения. Глубину $h_{\text{зак}}$ определяли как расстояние от обрабатываемой поверхности, на котором за время длительности термоцикла происходит превращение перлита в аустенит и гомогенизация аустенита. В расчетах полагали гомогенизацию аустенита полностью завершившейся, когда максимальная разность значений концентрации углерода в расчетной области не превышает 0.01.

Проверку адекватности представленной расчетной методики прогнозирования структуры провели, используя исследования на установке "Samscan" образца из стали 20 после прокатки, обработанного на лазере ЗР-Б20. Для сравнения расчетного и экспериментального результатов процессов перераспределения углерода в аустените при ЛТО выбран участок микроструктуры на расстоянии $z=0.06$ мм от обрабатываемой поверхности. Получено хорошее качественное совпаде-

ние экспериментальной и расчетной кривых распределения концентрации углерода после окончания термоцикла. Экспериментальное определение количества углерода невозможно вследствие больших помех вносимых атмосферным углеродом.

В качестве объекта исследования полноты прохождения процесса аустенитизации на различных расстояниях от обрабатываемой поверхности использовали образец из стали 45 после нормализации, обработанный на лазерной установке МТЛ-2 с равномерным в форме "полочки" распределением плотности мощности по пятну. Получено хорошее качественное совпадение всех экспериментальных и расчетных кривых распределения углерода по исследуемому участку. Прогнозирование структуры по предложенной расчетной методике дает хорошее соответствие структуре, полученной экспериментально.

Для проведения расчетных и экспериментальных исследований влияния межпластиночного расстояния и режима обработки на полноту превращения перлита в аустенит использовали специально подготовленные образцы из стали У9, имеющие различные значения Δ_0 . Образцы обрабатывали на лазерной установке МТЛ-2 с равномерным в форме "полочки" распределением плотности мощности по пятну. Изменение режима обработки Γ изводили, варьируя скорость перемещения образца относительно луча.

Получено, что абсолютная погрешность определения $h_{\text{зак}}$ примерно одинакова для всех режимов и всех Δ_0 . Следовательно, глубину упрочненного слоя можно определять расчетно: поправка на ошибку легко осуществима.

Построены зависимости глубины упрочненного слоя $h_{\text{зак}}$ от Δ_0 для трех значений v , а также $h_{\text{зак}}$ от v для трех значений Δ_0 . При уменьшении Δ_0 в 2-2.5 раза $h_{\text{зак}}$ увеличивается на 0.02-0.03 мм. Анализ зависимостей $h_{\text{зак}}(v)$ показал, что при изменении режима обработки с началом оплавления поверхности на режим без оплавления происходит резкое уменьшение значения $h_{\text{зак}}$ на 0.11-0.13 мм. При дальнейшем увеличении скорости обработки на 0.5 м/мин в случае постоянной мощности лазерного излучения $h_{\text{зак}}$ уменьшается на 0.01-0.02 мм для всех рассмотренных значений Δ_0 .

В шестой главе описаны способ упрочнения длинномерных изделий (защищенный авторским свидетельством № 1464480) и способ упрочнения поверхности цилиндрических деталей (защищенный авторским свидетельством № 1617007).

При ЛТО длинномерных изделий, таких как станочные направляющие, возникает необходимость коррекции режимов лазерного излуче-

ния, поскольку при перемещении лазерного луча вдоль детали его диаметр значительно увеличивается, а это приводит к заметному уменьшению глубины упрочненного слоя и увеличению его ширины. Описанная в главе 5 методика позволяет проводить выбор и коррекцию режимов без большого объема экспериментальных работ.

Предлагаемый способ упрочнения длинномерных деталей заключается в непрерывном изменении положения фокусирующей лазерный луч линзы относительно поверхности детали. Относительное изменение, то есть величина перемещения оптики на единицу длины упрочняемой детали, называемое изменением дефокусировки, равно:

$$\Delta h = \frac{2 \times d_{\text{п}} \times f \times \varphi}{D^2} \quad (25)$$

где $d_{\text{п}}$ — диаметр пятна лазерного излучения, f — фокусное расстояние линзы, φ — расхожимость, D — диаметр апертуры.

Эксперименты по определению влияния степени дефокусировки на глубину и ширину упрочненной зоны в начале и конце детали проводили на лазерной установке SP-973 с равномерным распределением плотности мощности, обрабатывая детали из стали 40X длиной 200 мм и из чугуна СЧ20 длиной 2000 мм. Показано, что только при точном уменьшении степени дефокусировки на расчетную величину глубина и ширина ЗТВ оказываются равномерными по всей длине детали; при всех других значениях Δh упрочненная зона оказывается неравномерной.

Предложенный способ внедрен на Ивановском станкостроительном ПО для упрочнения направляющих обрабатывающих центров. Кроме того данный способ предложен для внедрения на АвтоВАЗе для упрочнения направляющих фрезерных станков.

При лазерном упрочнении деталей, имеющих форму тел вращения, таких как валки прокатных станов и валы, при повторном нагреве от последующего витка уже упрочненной полосы появляются зоны отпуска, приводящие к снижению твердости. В связи с этим возникла проблема определить интервал температур, который необходимо поддерживать на обрабатываемом участке, чтобы не происходило разупрочнения и при этом была обеспечена как можно большая глубина упрочненной зоны, одинаковая по всей обрабатываемой поверхности.

Предложенный способ лазерного термоупрочнения поверхности цилиндрических деталей включает, во-первых, определение по методике, описанной в главе 5, режима обработки, который обеспечивает разогрев поверхности до температуры кипения металла; во-вторых, дополнительное охлаждение перед лазерным лучом газом или жид-

костью при комнатной температуре. а также охлаждение после лазерного луча газом или жидкостью при температуре M_k обрабатываемой стали. Такое охлаждение позволяет достигать больших скоростей нагрева и охлаждения, препятствуя распаду аустенита на ферритно-карбидную смесь при многоцикловом нагреве, а также обеспечивает наилучшее сочетание значений глубины упрочненного слоя и микротвердости по сравнению с результатами обработки при других способах охлаждения.

Общие выводы:

1. Предложена трехмерная численная схема расчета температурного поля в ЗТВ при лазерной термообработке массивных тел на основе "шахматного" метода, учитывающая температурные зависимости теплофизических коэффициентов. Схема может быть применима для любого материала и для любой формы лазерного луча, движущегося по прямой и по спирали. Для сокращения машинного времени и объема оперативной памяти по осям, перпендикулярным движению луча, введены логарифмические координаты. Представленная схема расчета позволяет с точностью $\approx 10\%$ определять температурные поля, возникающие в твердом теле под воздействием лазерного излучения.

2. Разработан пакет программ, ключающий:

1) расчет температурного поля в ЗТВ;
2) оценку для рассчитанного температурного поля глубины и ширины слоя, нагретого выше температуры начала фазового $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения, а также времени пребывания выше этой температуры расчетных слоев на различном расстоянии от поверхности;

3) оценку по полученной глубине ЗТВ для нескольких режимов ЛТО при фиксированных значениях мощности лазера и диаметра луча интервала скоростей перемещения детали относительно луча для обработки без оплавления поверхности детали.

3. На основе расчетов по разработанному пакету программ построены диаграммы для выбора мощности (или рабочей плотности мощности) лазера и интервала скоростей перемещения детали относительно луча при данном диаметре луча на поверхности детали и содержании углерода в стали (для покрытия с коэффициентом поглощения $A=0.7$), позволяющие определить рациональные режимы обработки детали без оплавления поверхности. Погрешность определения глубины упрочненного слоя по диаграмме для выбранного режима составляет $\approx 20\%$.

4. Разработана программа численного расчета процесса аустенит-

ного слоя по диаграмме для выбранного режима составляет ~20%.

4. Разработана программа численного расчета процесса аустенитного превращения до- и заэвтектоидной углеродистой стали на основе диффузионной модели перераспределения углерода соответственно между перлитом и ферритом или перлитом и цементитом, а также между цементитными и ферритными пластинами внутри перлитного зерна. Схема расчета для решения одномерной задачи Стефана базируется на экономичной разностной схеме с ловлей фронта в узел расчетной сетки и учитывает зависимость коэффициента диффузии от температуры и концентрации углерода. Разработанная программа позволяет получать полезную информацию о распределении концентрации углерода, движении фазовых границ и полноте прохождения аустенитного превращения на различных его стадиях. Полученные расчетные данные позволяют проследить кинетику аустенитизации стали под воздействием лазерного излучения и прогнозировать ожидаемую после охлаждения структуру. Достигнута хорошая корреляция с экспериментально измеренным распределением углерода между исходными фазами.

5. Выявлены особенности влияния исходной структуры на протекание процесса аустенитизации углеродистых сталей в ЗТВ. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований структурных превращений в углеродистых сталях с различным содержанием углерода, при различном исходном состоянии (после прокатки, отожженном и нормализованном) сделано заключение, что при лазерной термообработке для обеспечения достаточной полноты протекания процессов фазового $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения и последующей гомогенизации на большую глубину ЗТВ необходимо выбирать углеродистые стали в нормализованном состоянии, с малыми размерами перлитных колоний, с небольшим межпластиночным расстоянием в перлите.

6. Разработана расчетная методика прогнозирования структурных превращений в ЗТВ при лазерной закалке, которая включает предварительный выбор режима лазерной обработки на заданную глубину по построенным с помощью ЭВМ диаграммам; расчет точного температурного цикла для данного режима закалки; расчет диффузионного перераспределения углерода в аустените в границах бывшего зерна перлита и между исходными фазами; определение равномерности распределения углерода в ЗТВ на различных расстояниях от поверхности, что дает возможность определять глубину упрочненного слоя и с хорошей точностью прогнозировать структуру после закалки. Все расчеты полностью подтверждены экспериментальными данными.

7. По предложенной методике исследовано влияние межпластиночно-

го расстояния и режима обработки на полноту превращения перлита в аустенит. Получено, что при уменьшении Δ_0 в 2-2.5 раза глубина упрочненного слоя, то есть такого расстояния, на котором полностью завершилось превращение перлита в аустенит и последующая гомогенизация аустенита, увеличивается на 0.02-0.03 мм при всех проанализированных скоростях обработки. При изменении режима обработки с началом оплавления поверхности на режим без оплавления происходит резкое уменьшение глубины упрочненного слоя на 0.11-0.13 мм. При последующем увеличении скорости обработки на 0.5 м/мин в случае постоянной мощности лазерного излучения глубина упрочненного слоя уменьшается на 0.01-0.02 мм для всех рассмотренных значений Δ_0 .

8. Разработан способ термообработки крупногабаритных деталей лазерным лучом непрерывного действия (а.с. № 1464480), основанный на постоянном уменьшении степени дефокусировки излучения в процессе перемещения оптической системы от лазера. Улучшение качества упрочнения при такой обработке достигается за счет увеличения равномерности геометрических размеров упрочненных зон по длине детали.

В течение 1985 - 1990 гг. проведены разработка и внедрение технологии лазерного термоупрочнения направляющих обрабатывающих центров серии IC500, IC800, IP200, IP300 на Ивановском станкостроительном ПО (совместно сотрудниками НИЦ ТЛ при участии автора и сотрудниками Ивановского станкостроительного ПО).

Экономический эффект от предложенного способа составил 50 тыс. руб. в год.

9. Разработан способ термообработки деталей типа тел вращения (а.с. № 1617007) с помощью непрерывного лазера. Этот способ включает осевое смещение детали относительно луча, вращение детали с высокой скоростью и одновременное охлаждение участков поверхности детали перед пятном лазерного нагрева и после него, позволяющее поддерживать температуру на поверхности одного витка в интервале от температуры кипения металла до температуры начала мартенситного превращения. Улучшение качества упрочнения детали при такой обработке достигается путем повышения глубины упрочнения и твердости.

Публикации по теме диссертации.

1. Расчет кинетики аустенизации сталей при лазерном нагре-

- ве /А.Н.Сафонов, Е.А.Щербакова, М.Н.Ивлиева и др.// Инженерно - физический журнал - 1989. - Т.57, № 6.- С.959-964.
- 2.Щербакова Е.А., Сафонов А.Н. Кинетика аустенитного превращения в углеродистых сталях при лазерном нагреве // Новые стали и сплавы, режимы их термической обработки: Тезисы докл. научно-технического краткосрочного семинара (к 150-летию со дня рождения Д.К.Чернова) -Л., 1989.
 - 3.Сафонов А.Н., Щербакова Е.А. Исследование особенностей кинетики аустенизации углеродистых сталей при лазерном нагреве // Применение лазеров в науке и технике: Тезисы докл. областного научно-технического семинара.-Тольятти, ВАЗ, 1989. -С.23.
 - 4.Сафонов А.Н., Щербакова Е.А. Математическая модель лазерной закалки сталей // Новые разработки и опыт внедрения лазерной техники и технологии: Тезисы докл. семинара, 12-13 сентября 1990 г., г.Ужгород.-Киев, 1990.-С.13-15.
 - 5.Щербакова Е.А., Сафонов А.Н. Расчет температурных полей при лазерной термообработке сталей // Новые материалы и ресурсосберегающие технологии термической и химико-термической обработки деталей машин и инструмента: Тезисы. докл.-Пенза, 1990.-С.69-70.
 - 6.Shcherbakova Ye.A., Safonov A.N. A kinetic model of the austenite transformation of plain-carbon steels under laser heating.//IV national conference and technical exhibition with international participation. Laser and their applications: Abstracts, oct. 23-26., 1990.- Plovdiv (Bulgaria), 1990.-P.164-165.
 - 7.Васильева А.Г., Сафонов А.Н., Щербакова Е.А. Кинетика аустенитного превращения углеродистых сталей при лазерном нагреве // Перспективные материалы и технологии в автомобилестроении: Межвузовский сборник научных трудов.-М: Московский автомобилестроительный институт (ВТУЗ-ЗИЛ), 1991.-С.58-66.
 - 8.Особенности формирования структуры излучения при фокусировке излучения многоканального лазера / С.Ю.Денисов, Е.В.Зеленов, Е.А.Щербакова и др.//Кван. электр.- 1991.- Т.18, № 5.-С.648-650.
 - 9.А.с. 1464480 СССР, МКИ С 21 D 1/09. Способ упрочнения металлических изделий / Г.А.Абильситов, А.Н.Сафонов, Е.А. Щербакова, и др.- № 4273161/31-02; Заяв.15.06.87; Опубл. 12.01.89 // Открытия, изобретения...- 1989.- № 9.
 - 10.А.с. 1617007 СССР, МКИ С 21 D 1/09. Способ термической обработки деталей / А.Г.Васильева, А.Н.Сафонов, В.М.Тарасенко, Е.А.Щербакова - № 4659655/31-02; Заяв. 24.01.89; Опубл.30.12.90 // Открытия, изобретения...- 1990.- № 48.