

На правах рукописи

УДК 621.784.6.06; 621.785.616.1

ШЕВЧЕНКО Светлана Юрьевна

**РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДА
АНАЛИЗА И КОНТРОЛЯ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
ЗАКАЛОЧНЫХ СРЕД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАТЧИКА
ГРАДИЕНТНОГО ТИПА**

Специальность 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



Москва – 2005

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Б.А. Прусаков

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Б.К. Ушаков

кандидат технических наук, доцент
В.Н. Климов

Ведущее предприятие: АМО «ЗиЛ»

Защита диссертации состоится “ ” 2005 года на заседании диссертационного совета Д 212.141.04 Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Телефон для справок 267-09-63.

Автореферат разослан “ ” 200_ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

В.И. Семенов



Подписано к печати 14.12.2004

Объем 1 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ № 302

Типография МГТУ им. Н.Э.Баумана

Сл. в конве

735

Актуальность проблемы. Проблема повышения качества и увеличения конкурентоспособности выпускаемой продукции является весьма актуальной для машиностроения. В целом в промышленности наблюдается тенденция перехода от крупносерийного к мелко- и среднесерийному производству. Для обеспечения надлежащего качества необходима специализация технологических процессов изготовления деталей с учетом условий их последующей эксплуатации. В термическом производстве проблема специализации процессов закалки может быть решена путем расширения круга закалочных сред прежде всего за счет применения новых сред на основе водных растворов полимеров.

В последние годы разработаны различные среды для закалки, но их внедрение в термическое производство сдерживается отсутствием данных об их охлаждающей способности, необходимых для прогнозирования поведения деталей в процессе охлаждения. Возникает необходимость проведения большого числа экспериментов для определения рационального режима охлаждения различных групп деталей. Актуальность оценки охлаждающей способности закалочных сред в полной мере относится к полимерным закалочным средам, которые ввиду их экологической чистоты и пожаробезопасности были разработаны как альтернатива закалочным маслам. Характерная особенность полимерных закалочных сред - изменение их охлаждающей способности в процессе эксплуатации, что требует внедрения методов и средств для систематического контроля охлаждающей способности закалочных сред. Известные датчики охлаждающей способности имеют ряд недостатков, которые не позволяют успешно использовать их для целей выбора и контроля. Поэтому, несмотря на то, что разработка полимерных закалочных сред ведется уже многие годы, количество машиностроительных предприятий, на которых эти среды применяются в массовом термическом производстве, весьма невелико.

Таким образом, актуальной задачей для успешного решения проблемы повышения качества закалки является разработка методов и средств для исследования охлаждающей способности закалочных сред, прогнозирования результатов закалки в различных средах, а также методов контроля охлаждающей способности в промышленных условиях.

Цель работы. Повышение качества и эффективности термической обработки деталей в результате применения полимерных закалочных сред на основе разработки расчетно-экспериментального метода анализа и контроля их охлаждающей способности.

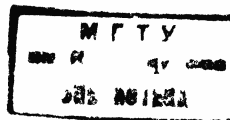
Для достижения указанной цели в работе были поставлены и решены следующие задачи:

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1708737

Шевченко С.Ю. Разработка р



1. Разработать метод оценки теплового потока при поверхностном растечении тепла в процессе закалочного охлаждения и конструкцию датчика охлаждающей способности градиентного типа.

2. Создать расчетно-экспериментальный комплекс, включающий в себя:

- датчик охлаждающей способности градиентного типа;
- оборудование для нагрева и охлаждения датчика и систему регистрации и обработки сигналов датчика;
- программное обеспечение для расчета тепловых полей и распределения твердости в деталях при закалке в различных полимерных средах.

3. Установить закономерности охлаждения и изменения структуры и свойств сталей при закалке в различных закалочных средах.

4. Разработать метод контроля охлаждающей способности закалочных сред в промышленных условиях.

5. Провести промышленное опробование полимерных закалочных сред для термообработки деталей и разработать рекомендации их применения для закалки типовых деталей машин и инструмента с целью повышения качества термической обработки.

Научная новизна работы заключается в:

1) разработке нового метода определения охлаждающей способности закалочных сред, включающего принцип оценки локального теплового потока на поверхности в процессе закалки, положенный в основу новой конструкции датчика градиентного типа а также математическую модель теплообмена на поверхности закаливаемого металла, позволяющую рассчитывать температурные зависимости коэффициентов теплоотдачи закалочных сред;

2) установлении экспериментальных зависимостей коэффициентов теплоотдачи от состава закалочных сред, выявленных путем оценки локального теплового потока с помощью датчика градиентного типа;

3) установлении закономерности влияния состава закалочных сред на структуру и свойства сталей после закалки;

4) сравнительном анализе кривых охлаждения различных закалочных сред, положенном в основу метода контроля охлаждающей способности закалочных сред в промышленных условиях;

5) анализе возможности применения нейросетевого моделирования для расчета распределения твердости по сечению после закалки.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

1. Создан расчетно-экспериментальный комплекс для оценки охлаждающей способности закалочных сред и прогнозирования свойств закаленных деталей, включающий в себя градиентный датчик, систему регистрации сигналов датчика, модели для расчета коэффициентов теплоотдачи закалочных сред, тепловых полей и распределения твердости в закаливае-

мых деталях. Применение комплекса обеспечивает научно обоснованный выбор состава закалочной среды для достижения требуемого качества и свойств закаливаемых деталей.

2. Разработан и опробован в промышленных условиях метод контроля охлаждающей способности закалочных сред. Метод позволяет поддерживать требуемый состав закалочной ванны в процессе эксплуатации и тем самым дает возможность использовать прогрессивные экологически чистые закалочные среды, требующие более тщательного контроля по сравнению с традиционно применяемыми закалочными маслами.

3. Установлены оптимальные концентрации полимерных закалочных сред, обеспечивающие требуемое качество стальных деталей. Даны рекомендации по промышленному применению полимерных закалочных сред с обратимой растворимостью для закалки деталей из подшипниковых, конструкционных и инструментальных сталей.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены и обсуждены: на 4-м Собрании металлосведов России (Иенза, 1998); на Всероссийской научно-технической конференции «Машиностроительные технологии» в МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, 1998); на 5-м Собрании металлосведов России (Краснодар, 2001); на Всероссийской научно-технической конференции «Новые материалы и технологии» (Москва, 2002); на Научно-практической конференции Союза материаловедческих обществ России «Новые функциональные материалы и экология» (Москва, 2002).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 10 печатных работ, получен патент.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, общих выводов, списка литературы из 63 наименований, работа изложена на 170 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков, 20 таблиц.

Автор выражает глубокую признательность профессору, д.т.н. А.М. Макарову и доценту, к.т.н. А.Г. Ксенофонтову за научные консультации при выполнении и оформлении работы, а также коллективу кафедры «Материаловедение» за всестороннюю помощь и поддержку.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована ее цель, показана научная и практическая ценность.

В первой главе изложены современные представления о физических процессах, протекающих на поверхности закаливаемых деталей, методах исследования охлаждающей способности закалочных сред, методах математического моделирования тепловых процессов и процессов фазовых превращений при охлаждении. На основе литературных данных проведен анализ различных методов оценки охлаждающей способности закалочных сред. Сопоставление этих методов с точки зрения универсальности и возможности применения для прогнозирования результатов закалки приводит

к выводу, что наиболее прогрессивными методами оценки охлаждающей способности закалочных сред являются градиентные методы. Идея градиентного метода заключается в определении температур в двух точках: на самой поверхности и в непосредственной близости от нее, и последующего преобразования градиента температур в тепловой поток, отводимый средой от поверхности закаливаемого объекта. Рассмотрены несколько конструкций градиентных датчиков, позволяющие оценивать тепловой поток, отмечены их особенности и недостатки. В настоящее время в основном применяются датчики с измерением распределения температур по глубине. Конструктивно задача размещения термопар на поверхности и вблизи ее достаточно сложна, поэтому такие датчики весьма дороги и недолговечны.

Проведен анализ методов прогнозирования свойств детали после закалки. Метод наложения кривых охлаждения на термокинетическую диаграмму (ТКД) данной стали неточен ввиду изменения положения линий ТКД с изменением режима охлаждения и колебания химического состава стали в пределах марки. Метод, использующий для расчета структурных превращений данные об изотермическом распаде аустенита, также обладает рядом существенных недостатков. Так, открытым остается вопрос о правомерности применения уравнений кинетики изотермического превращения к кривой непрерывного охлаждения, преобразованной в ступенчатую функцию.

Рассмотрен нейросетевой подход к решению задачи прогнозирования результатов закалки. Нейросетевое моделирование в настоящее время применяется в целом ряде предметных областей (медицине, управлении, финансовом анализе и т.д.). При работе искусственная нейронная сеть принимает значения входных переменных и выдает значения выходных переменных. Нейронная сеть используется тогда, когда неизвестен точный вид связей между входами и выходами, и эта связь находится в процессе обучения сети. Для обучения нейронных сетей необходимо подготовить набор обучающих данных. Эти данные представляют собой примеры входных данных и соответствующих им выходов. Метод представляется весьма многообещающим, тем более что, насколько известно, в данной предметной области он еще никем не применялся.

На основании анализа литературных данных сформулированы задачи диссертационной работы и направления исследований.

Во второй главе приведен химический состав материалов, из которых изготовлены датчики для исследования охлаждающей способности закалочных сред. В работе были использованы образцы и детали из сталей 45, 40P, 40XH, 40X, 40XФА, 50XФА, У8, ШХ15, 18ХГТ, 20Х2Н4А, ХВГ, 9ХС, 60С2ВА, 30ХГСА, 3Х2В8, Р6М5. Приведены размеры образцов и деталей и режимы их термической обработки.

Описаны использованные в работе закалочные среды – водные растворы полимеров с обратимой растворимостью Камгидрол-ЗАК и ЗАК-ПГ производства ЗАО «Прокам», г. Нижнекамск (ТУ 6-57-78-92), Лапрол СП-50 производства НПО «Макромер», г. Владимир (ТУ 2226-338-10488057-97), а также среда УЗСП-1 (ТУ 38-403192-86) - водный раствор метакрилонитрильного сополимера.

В работе использованы стандартные методики измерения твердости, выявления поверхностных дефектов после закалки, металлографических исследований, определения закалочных деформаций колец подшипников.

В третьей главе дано расчетное обоснование градиентного метода оценки теплового потока при поверхностном растечении тепла. Известна конструкция датчика, позволяющего оценивать тепловой поток от поверхности в закалочную среду. На поверхности массивного цилиндра заделана тонкая никелевая пластина. Под ней расположена цилиндрическая полость, препятствующая теплоотдаче от тела датчика пластине. Датчик нагревают до определенной температуры и помещают в закалочную среду. В центре и на краю пластины в процессе охлаждения измеряется температура. Таким образом, датчик регистрирует разность температур не вдоль, а перпендикулярно направлению теплового потока (т. е. между центром и периферией пластины). Этот метод был назван измерением плотности теплового потока при поверхностном растечении тепла (тепло поступает от массивной нагретой части датчика и распространяется по пластине, заделанной на поверхности датчика). Температура регистрируется с помощью нестандартных термодпар, причем температура периферии пластины усредняется по кольцевому шву, которым пластина приварена к телу датчика. В настоящей работе обоснована новая конструкция датчика с поверхностным растечением тепла, позволяющего измерять локальный коэффициент теплоотдачи закалочной среды с помощью трех стандартных термодпар.

Была разработана новая модель теплообмена в пластине датчика (рис. 1). При построении модели были приняты допущения об отсутствии подвода или отвода тепла через провода и чехлы термодпар, через воздух, который находится в цилиндрической полости под никелевой пластиной, а также об отсутствии излучения от дна полости.

Решали нестационарную задачу теплопроводности. Интегральный баланс тепла для пластины в целом:

$$\int_V \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \cdot dV + \int_S (q; n) \cdot dS = 0 \quad (1)$$

Дифференциальное уравнение теплопроводности для пластины в цилиндрических координатах имеет вид:

$$\rho \cdot c \cdot \delta \cdot \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \cdot \delta \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right) + \alpha \cdot (T_0 - T(r, \tau)) \quad (2)$$

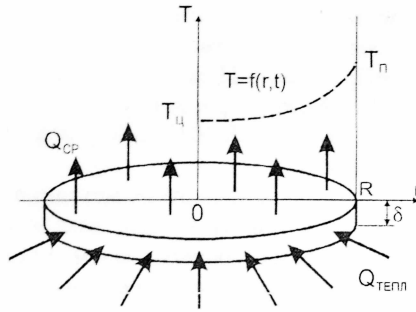


Рис. 1. Модель теплообмена в термочувствительной пластине датчика

где λ - теплопроводность материала пластины, Вт/(м·°C);

ρ - плотность материала пластины, кг/м³;

c - теплоемкость материала пластины, Дж/(кг·°C).

δ - толщина никелевой пластины, м;

T_0 - температура охлаждающей среды, °C.

Граничные условия задачи следующие. Температура периферии пластины в любой момент времени охлаждения равна температуре поверхности датчика, в котором размещена пластина. Условие отсутствия тепловой емкости границы (боковой поверхности пластины):

$$Q_{\text{тепл}} = Q_{\text{ср}},$$

где $Q_{\text{тепл}}$ - тепловой поток, входящий в пластину теплопроводностью, Дж;

$Q_{\text{ср}}$ - тепловой поток, отводимый в окружающую среду, Дж.

Начальное условие: температура во всех точках пластины $T(r,0)$ одинакова и равна температуре нагрева датчика.

Квазистационарное решение уравнения (1) имеет вид:

$$T(r, t) \approx C_1 \cdot e^{-\beta_1 t} \cdot J_0(\mu_1 \cdot r) \quad (3)$$

Зная вид $T(r, t)$, можно в любой момент времени охлаждения датчика извлечь из интегрального баланса тепла (1) неизвестную величину коэффициента теплоотдачи α .

Часть функции $T(r, t)$, зависящая от радиуса пластины r (функция Бесселя нулевого порядка первого рода J_0), представляет собой квадратичную зависимость:

$$J_0(\mu_1 \cdot r) = 1 - \frac{\mu_1^2 \cdot r^2}{2!} + \frac{\mu_1^4 \cdot r^4}{4!} + \dots$$

Часть функции $T(r, t)$, зависящая от времени, получается экспериментально в виде зависимостей $T_n(t)$ и $T_u(t)$.

Поэтому примем, что температура по радиусу пластины изменяется по параболическому закону:

$$T(r, \tau) = \frac{T_n(\tau) - T_u(\tau)}{R^2} r^2 + T_u(\tau)$$

где T_n - температура периферии пластины, °С;

T_u - температура центра пластины, °С;

R - расстояние между термопарами, м.

В интегральном балансе тепла (1):

$$\int_V \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \cdot dV = \rho \cdot c \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \delta \cdot \frac{(T_u^* - T_u) + 2 \cdot (T_n^* - T_n)}{3 \cdot \Delta \tau} \quad (4)$$

где T_u^* , T_n^* - температура центра и периферии пластины, °С, через промежуток времени $\Delta \tau$, с.

Тепло, входящее через боковую поверхность пластины и распространяющееся по радиусу:

$$Q_{\text{тепл}} = \lambda \cdot 2\pi \cdot R \cdot \delta \cdot 2 \frac{T_n - T_u}{R} = 4\pi \cdot \lambda \cdot \delta \cdot (T_n - T_u) \quad (5)$$

Тепло, отводящееся охлаждающей средой с торцевой поверхности пластины:

$$Q_{\text{ср}} = \alpha \cdot (T_{\text{сред}} - T_0) \cdot \pi \cdot R^2 = \alpha \cdot \left(\frac{T_n + 2 \cdot T_u}{3} - T_0 \right) \cdot \pi \cdot R^2 \quad (6)$$

где $T_{\text{сред}}$ - средняя температура по пластине, °С.

Из (4), (5) и (6) получаем:

$$\alpha = \frac{12 \cdot \lambda \cdot \delta \cdot (T_n - T_u) - R^2 \cdot \rho \cdot \delta \cdot c \cdot ((T_u^* - T_u) + 2 \cdot (T_n^* - T_n)) / \Delta \tau}{3 \cdot \left(\frac{(T_n + 2 \cdot T_u)}{3} - T_{\text{ср}} \right) \cdot R^2}$$

Сделана оценка правомерности допущений, принятых при построении модели, и на ее основании определены соотношения геометрических размеров элементов градиентного датчика. При глубине полости 10 мм величина суммарного подводимого со стороны полости тепла не превышает 10% от теплового потока, отводимого в охлаждающую среду с поверхности пластины.

Разработана конструкция датчика, позволяющего определять локальный тепловой поток на поверхности. Тело датчика изготовлено из нержавеющей стали Х18Н9Т (рис. 2 а), не имеющей фазовых превращений в интервале температур (20...1000) °С. Термочувствительный элемент вмон-

тирован на середине высоты цилиндрического тела датчика (рис. 2 б) и изготовлен из сплава Х20Н80. В верхней части термочувствительного элемента заделана никелевая пластина с приваренными к ней тремя стандартными термопарами типа хромель-алюмель. Под никелевой пластиной расположена цилиндрическая полость, которая препятствует теплоотдаче от тела датчика пластине. Было разработано два варианта конструкции градиентных датчиков. Первый - с расположением термопар вдоль образующей (вертикальным в рабочем положении). Второй – датчик с расположением термопар в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра (горизонтальным в рабочем положении).

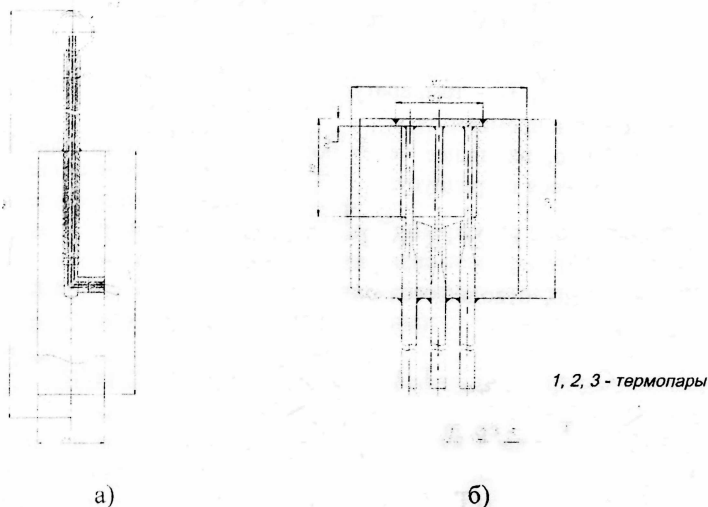


Рис. 2. Конструкция датчика градиентного типа

Для исследования процессов охлаждения создана установка, состоящая из шахтной печи, в которой проводится нагрев датчиков, закалочного бака с исследуемой средой и устройства регистрации кривых охлаждения. Регистрация кривых охлаждения осуществляется с помощью компьютера, к которому через устройство сопряжения подключены провода термопар датчика. Устройство сопряжения представляет собой аналого-цифровой преобразователь, с помощью которого показания датчика с программируемой частотой в цифровом виде поступают на параллельный порт компьютера. Для работы с преобразователем была создана программа. В процессе охлаждения датчика на экране строится график в координатах температура-время, а по окончании эксперимента кривые охлаждения сохраняются в текстовом файле. Далее с помощью программы Excel проводятся тепловые расчеты. Результатами расчетов являются зависимости коэффици-

циента теплоотдачи исследуемой охлаждающей среды от времени и от температуры.

В четвертой главе исследована охлаждающая способность полимерной закалочной среды Камгидрол-ЗАК двух концентраций – 10 и 15%. Регистрировали кривые охлаждения градиентных датчиков с вертикальным и горизонтальным расположением термопар, по которым рассчитывали коэффициенты теплоотдачи в исследуемых средах. Для сравнения изучали охлаждающую способность минерального масла и воды. Регистрировали кривые охлаждения, по которым рассчитывали температурные зависимости коэффициентов теплоотдачи закалочных сред.

Для проверки адекватности расчетов проведена серия экспериментов. Цилиндрические образцы из сталей 40Х, 40ХФА, 50ХФА, У8, ШХ15 закаливали в полимерной среде Камгидрол-ЗАК с концентрациями 15 и 10%, масле, воде. В каждой среде закаливали по одному образцу с термопарами и одному такому же образцу без термопар из каждой стали. Во время закалки проводили регистрацию кривых охлаждения в трех точках каждого образца с термопарами: в геометрическом центре, на половине радиуса и вблизи поверхности. Образцы без термопар после закалки разрезали и измеряли твердость в поперечном сечении на половине высоты.

С помощью программы ANSYS моделировали закалочное охлаждение стальных цилиндров. Если в качестве граничных условий использовать зависимости коэффициентов теплоотдачи, полученные для градиентного датчика, то расчетные кривые охлаждения в трех точках цилиндров в той или иной степени отличаются от экспериментальных. На рис. 3 приведены температурные зависимости коэффициентов теплоотдачи четырех исследованных закалочных сред. Поля рассеяния показывают, насколько коэффициенты теплоотдачи, адекватно отражающие охлаждение стальных образцов, отличаются от рассчитанных для градиентного датчика. Видно, что для полимерных сред поля рассеяния относительно невелики и практически не перекрываются. Также на рис. 3 приведена зависимость коэффициента теплоотдачи воды, взятая из литературных источников, которая близка к экспериментально полученной зависимости.

Для прогнозирования твердости после закалки использовали нейросеть. В качестве исходных данных использованы результаты закалки стальных образцов - расчетные кривые охлаждения в пяти точках каждого образца и химический состав сталей. Каждая кривая охлаждения представлена в виде набора точек «время – температура». Химический состав представлен содержанием химических элементов в %. Таким образом, один пример – это одна кривая охлаждения данной стали с данным химическим составом, а входами нейросети являются наборы точек «время – температура» и содержание элементов, всего 26 входов. Примеры были разбиты на две группы – тренировочные и тестовые. На 75 тренировочных примерах

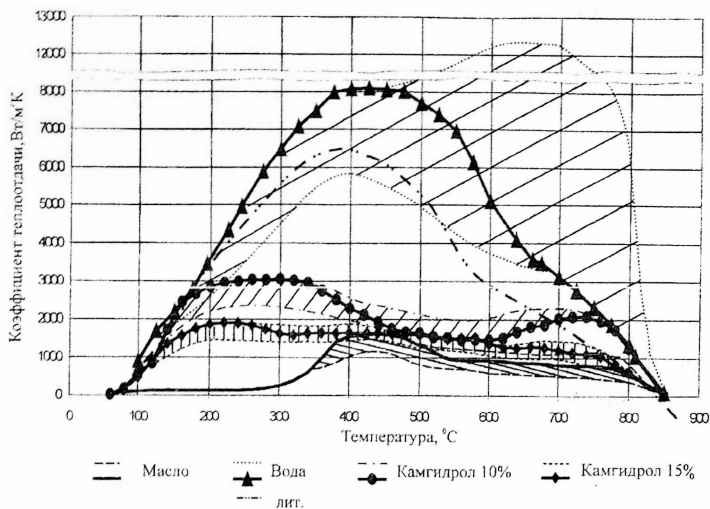


Рис. 3. Коэффициенты теплоотдачи закалочных сред

проводили подбор коэффициентов сети, а на 20 тестовых – проверку качества ее работы. Для построения нейросети входные данные были нормированы, т.е. приведены к одному диапазону значений в пределах (0...1).

Строили нейросеть с последовательными связями (рис. 4 а).

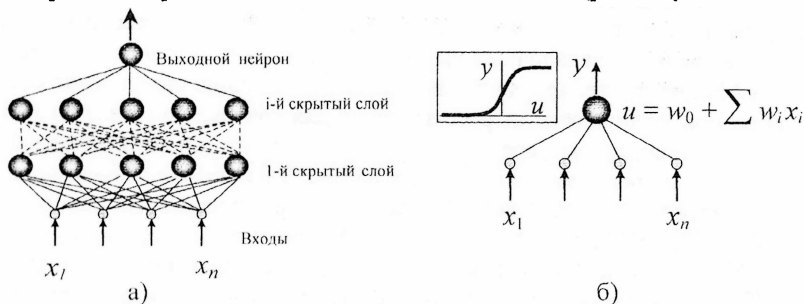


Рис. 4. Структура и принцип действия нейросети

Каждый пример содержит входы $x_1, x_2, \dots, x_n$. Один нейрон взвешивает значения входов x_i со своими весовыми коэффициентами w_i и производит над их суммой нелинейное преобразование:

$$y = f(u) = \text{th}\left[w_0 + \sum_i w_i \cdot x_i\right],$$

где w_0 – смещение;

$f(u)$ – функция активации (рис. 4 б).

Для каждого нейрона набор весовых коэффициентов w_i будет различным. Выходной нейрон суммирует значения выходов нейронов скрытого слоя y_i :

$$r = w_{e0} + \sum_i w_{ei} \cdot y_i$$

где w_{e0} – выходное смещение;

w_{ei} – весовые коэффициенты выходного нейрона.

Подбор значений весовых коэффициентов модели проводили с использованием библиотеки генетических алгоритмов GALIB из условия минимизации значения среднеквадратичной ошибки:

$$\frac{\sum_{i=1}^P (\text{HRC}_{\text{расч}} - \text{HRC}_{\text{эксп}})^2}{P} \rightarrow \min$$

где P – число тренировочных примеров, $\text{HRC}_{\text{расч}}$ – значение твердости, рассчитанное сетью, $\text{HRC}_{\text{эксп}}$ – экспериментальное значение твердости.

Средняя ошибка расчета твердости с помощью нейросети составляет 5%. Удовлетворительный прогноз твердости сеть дает в случаях, когда твердость по сечению изменяется незначительно – в пределах 2...4 единиц Роквелла. Если же перепад твердости по сечению значителен – до 20 единиц, как в случае образца из стали 40Х, закаленного в воду, то предсказанная твердость оказывается заниженной. Тем не менее, сравнение разработанного метода с традиционным (наложение кривых охлаждения на термодинамическую диаграмму стали) показало, что нейросеть обеспечивает в 3 раза меньшую ошибку прогноза твердости. Для повышения точности прогноза необходимо расширить массив экспериментальных данных, на которых проводится обучение сети.

Таким образом, показана возможность прогнозирования твердости после закалки с использованием нейросети. Создан расчетно-экспериментальный комплекс, включающий в себя датчик охлаждающей способности градиентного типа, программное обеспечение для расчета тепловых полей и распределения твердости в сталях при закалке в различных полимерных средах. С помощью этого комплекса может быть решена задача выбора закалочной среды для конкретной детали без проведения множества экспериментов. Эта задача особенно актуальна при переходе от пожароопасного дорогостоящего закалочного масла к новым экологически чистым средам на основе полимеров.

В пятой главе разработан метод контроля охлаждающей способности закалочных сред в промышленных условиях. Выбран метод сравнительного анализа кривых охлаждения цилиндрического датчика из хромоникелевого сплава.

Разработана установка, состоящая из шахтной печи, в которой проводится нагрев датчика, закалочного бака с исследуемой средой и устройства регистрации кривых охлаждения: компьютера и аналого-цифрового преобразователя, через который подключаются провода термодатчика. С помощью программных средств проводится регистрация и обработка кривых охлаждения, в частности, получение зависимости скорости охлаждения от температуры. Установка может быть размещена в цеховой лаборатории, либо выполнена в портативном варианте на базе компьютера типа Notebook для контроля закалочной среды непосредственно в цеховом закалочном баке.

Разработана методика проведения испытаний полимерных закалочных сред. За основу взят международный стандарт ISO 9950 "Индустриальные закалочные масла - Определение охлаждающей способности - Метод никелевого образца". Методика была видоизменена применительно к полимерным закалочным средам. При испытаниях закалочного масла для достижения стабильных показаний проводят 6 тарировочных испытаний нового датчика. Обнаружено, что перед работой с полимерными закалочными средами необходимо провести не менее 20 тарировочных испытаний. Исследовано влияние способа очистки поверхности датчика после испытания на воспроизводимость кривых охлаждения. В соответствии со стандартом поверхность датчика после охлаждения в масле необходимо протирать растворителем до удаления следов масла. Показано, что полимерные среды с обратимой растворимостью могут испытываться без специальной очистки датчика между испытаниями.

Разработана методика корректировки концентрации полимера в растворе, сущность которой поясняется рисунком 5. Пусть рабочая концентрация полимера должна находиться в пределах 9...12%. В процессе эксплуатации закалочной ванны из нее периодически отбираются пробы среды и записываются кривые охлаждения. Путем сравнения их с кривыми охлаждения растворов разных концентраций (на рис. 5 приведены кривые охлаждения для 3, 6, 9, 12, 15, 18%-ных растворов) определяется необходимость корректировки состава закалочной ванны и рассчитывается количество воды или полимерного концентрата, которое необходимо добавить в раствор. После добавления в раствор нужных компонентов необходимо вновь записать кривую охлаждения и убедиться в том, что она находится в интервале рабочих концентраций.

Приведены примеры применения разработанного метода контроля для сравнения закалочных сред различных концентраций и с различным содержанием бактерицидных и антикоррозионных добавок. Статистическая оценка значимости влияния добавок на охлаждающую способность среды показала, что метод весьма чувствителен к изменению состава зака-

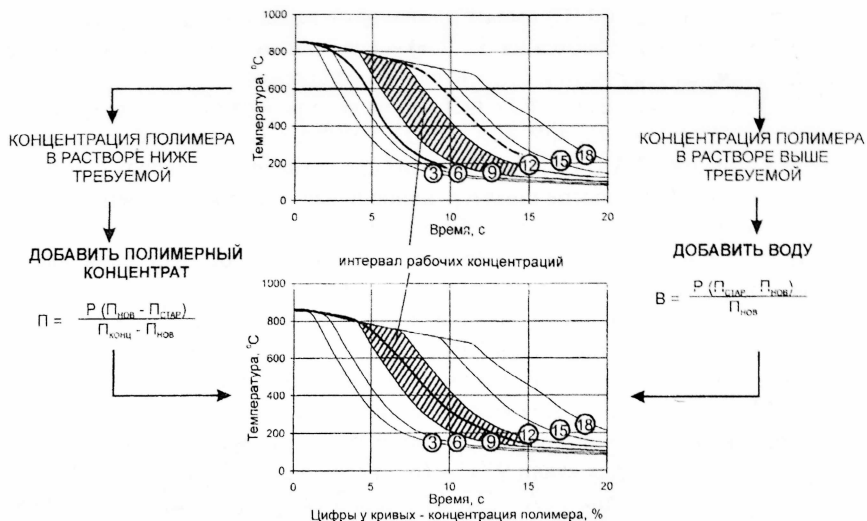


Рис. 5. Алгоритм корректировки концентрации полимера в закалочном баке

P - объем добавляемого полимерного концентрата, л;
 V - объем добавляемой воды, л;
 P - объем имеющегося раствора, л;
 $P_{\text{нов}}$ - требуемая концентрация полимера в растворе, %;
 $P_{\text{стар}}$ - имеющаяся концентрация полимера в растворе, %;
 $P_{\text{конц}}$ - содержание полимера в концентрате, %

лочной ванны и может применяться в производстве для контроля охлаждающей способности полимерных закалочных сред.

В шестой главе приведены результаты промышленного опробования полимерных сред с обратимой растворимостью. На ЗАО «Московский подшипник» (ГПЗ-1) исследовано влияние концентрации ЗАК-ПП на свойства подшипниковых сталей и деталей подшипников. Установлено, что в интервале концентраций ЗАК-ПП (19...23)% для шариков и (18...23)% для роликов из стали ШХ15 обеспечиваются требуемые свойства закаленных деталей. Концентрация ЗАК-ПП в диапазоне (5...27)% обеспечивает качественную закалку колец подшипников из цементуемых сталей 20Х2Н4А и 18ХГТ, при этом величина закалочных деформаций колец оказывается меньше, чем при закалке в масло. На промышленном оборудовании в 23% растворе ЗАК-ПП закалена партия роликов из стали ШХ15 (17000 штук), при этом обеспечено необходимое качество изделий в соответствии с требованиями заводской технической документации.

Испытания на растяжение образцов из стали ШХ15 показало, что образцы, закаленные в ЗАК-ПП и масло, при всех исследованных температу-

рах отпуска (180...500 °С) имеют одинаковые механические свойства (значения свойств различаются на 5...7%) – временный предел прочности, условный предел текучести и относительное удлинение.

В кузнечном цехе АМО «ЗиЛ» проведена работа по закалке образцов и поковок из сталей 45, 40Р, 40Х, 40ХН, 50ХФА в полимерной закалочной среде Камгидрол-ЗАК. Обнаружено, что при закалке в растворах с концентрациями (6...9)% обеспечивается наибольшая твердость поверхности и сквозная прокаливаемость всех образцов и деталей, кроме фланца из стали 45 (где она и не требуется). Во всех случаях микроструктура является удовлетворительной и отвечает требованиям к поковкам.

Исследовано влияние закалки в полимерной среде Камгидрол-ЗАК на структуру и свойства сталей ХВГ, 9ХС, 60С2ВА, 30ХГСА, У8А, 3Х2В8, используемых в инструментальном цехе ОАО «Респиратор» (г. Орехово-Зуево Московской обл.). Для каждой стали определен оптимальный интервал концентраций полимера, при котором твердость максимальна: для стали ХВГ – (6...9)%, для стали 9ХС – (6...12)%, для 60С2ВА – (3...6)%, для 30ХГСА – (3...6)%, для У8А – (3...6)%, для 3Х2В8 – (6...12)%. В условиях единичного производства все исследованные стали можно закаливать в среде с концентрацией полимера (6...9)%.

На ЗАО «ГПЗ-2» получены положительные результаты по закалке быстрорежущей стали Р6М5 в растворах Камгидрол-ЗАК (6...15)%. Исследован вопрос применения полимерной среды для закалки с высоких температур нагрева (1250 °С), а также влияние загрязнения солью после нагрева деталей в соляной ванне. Отрезные резцы с пластинами, закаленными в Камгидрол-ЗАК, показали стойкость не хуже резцов, закаленных в масло.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Разработан расчетно-экспериментальный метод анализа и контроля охлаждающей способности закалочных сред, который дает возможность повысить качество и эффективность термической обработки деталей с применением полимерных закалочных сред оптимального состава. При достижении поставленной цели были решены следующие научно-прикладные задачи:

1. Разработана математическая модель теплообмена в условиях поверхностного растечения тепла, на основе которой выполнено расчетное обоснование градиентного метода оценки теплового потока и определены геометрические размеры термочувствительного элемента датчика градиентного типа.

2. Создана установка для исследования охлаждающей способности закалочных сред, для функционирования которой разработаны и изготовлены два типа конструкции градиентных датчиков и создана компьютерная программа для расчета коэффициентов теплоотдачи закалочных сред по результатам их испытания с помощью градиентных датчиков.

3. Получены температурные зависимости коэффициентов теплоотдачи различных закалочных сред на основе исследований их охлаждающей способности.

4. На основе применения нейросетевого моделирования показана возможность прогнозирования твердости закаленных сталей с использованием в качестве исходных данных расчетных кривых охлаждения и химического состава сталей.

5. Разработан метод контроля охлаждающей способности закалочных сред в промышленных условиях, основанный на сравнительном анализе кривых охлаждения закалочных сред. Метод позволяет поддерживать оптимальный состав закалочной ванны в процессе эксплуатации и тем самым дает возможность использовать в термическом производстве экологически чистые полимерные закалочные среды, которые требуют более тщательного контроля по сравнению с традиционно применяющимися закалочными маслами.

6. Проведено промышленное опробование охлаждающих сред с обратимой растворимостью для закалки деталей из различных сталей. Установлено, что требуемые свойства деталей обеспечиваются при закалке:

- шариков и роликов подшипников из стали ШХ15 в (19...23)% растворах среды ЗАК-ПГ;
- колец из цементуемых сталей 20Х2Н4А и 18ХГТ в (5...27)% растворах среды ЗАК-ПГ, при этом величина закалочных деформаций колец в 1,3 раза меньше, чем при закалке в масло;
- поковок деталей автомобиля из сталей 45, 40Р, 40Х, 40ХН, 50ХФА, а также заготовок и инструментов из сталей ХВГ, 9ХС, 60С2ВА, У8А, 3Х2В8, Р6М5 в (6...9)% растворах среды Камгидрол-ЗАК.

7. Показана высокая эффективность полимерных закалочных сред оптимального состава при обработке промышленной партии роликов подшипника (17000 штук) в 23% растворе ЗАК-ПГ. В результате применения 9% раствора Камгидрол-ЗАК для закалки пластин отрезных резцов из стали Р6М5 резцы показали стойкость не хуже, чем резцы с пластинами, закаленными в масло.

8. Даны рекомендации по рациональным составам полимерных закалочных сред для их эффективного применения в термическом производстве при проведении закалки деталей из подшипниковых, конструкционных и инструментальных сталей.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Исследование закалки деталей подшипников в полимерной закалочной среде / Н.Н. Истомин, А.Г. Ксенофонтов, С.Ю. Шевченко и др. // 4-е Собрание металловедов России.: Тез. докл. – Пенза, 1998. – Ч.1. – С. 52-53.

2. Исследование охлаждающей способности закалочных сред / А.Г. Ксенофонтов, Б.А. Прусаков, С.Ю. Шевченко и др. // Машиностроительные технологии.: Тез. докл. Всеросс. науч.-техн. конф. – М., 1998. – С. 273-275.

3. Комплекс оборудования для оценки охлаждающей способности закалочных сред / А.Г. Ксенофонтов, А.П. Кутьев, С.Ю. Шевченко и др. // Машиностроительные технологии.: Тез. докл. Всеросс. науч.-техн. конф. – М., 1998. – С. 275-276.

4. Исследование полимерной закалочной среды ЗАК-ПГ / А.А. Беланов, А.П. Кутьев, С.Ю. Шевченко и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1999. – №2 – С. 7-8.

5. Пат. 2221226 (РФ). Датчик теплового потока / А.Г. Ксенофонтов, Б.А. Прусаков, С.Ю. Шевченко // Б.И. – 2004. – №1.

6. Захарова Е.Д., Ксенофонтов А.Г., Шевченко С.Ю. Исследование охлаждающей способности закалочных сред с помощью датчиков градиентного типа // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2001. – №11 – С. 37-38.

7. Ксенофонтов А.Г., Прусаков Б.А., Шевченко С.Ю. Разработка портативной установки для определения охлаждающей способности закалочных сред // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2001. – №11 – С. 39-40.

8. Шевченко С.Ю. Разработка расчетно-экспериментального комплекса на основе датчика градиентного типа для исследования охлаждающей способности закалочных сред // Новые материалы и технологии.: Тез. докл. Всеросс. конф. – М., 2002. – Т.1. – С. 81-82.

9. Ксенофонтов А.Г., Шевченко С.Ю. Применение экологически чистых закалочных сред в термической обработке // Металловедение. Термическая и химико-термическая обработка сплавов: Сб. науч. тр. / Под ред. Б.Н. Арзамасова. – М., 2003. – С. 237-244.

10. Шевченко С.Ю. Применение нейронных сетей для прогнозирования твердости сталей после закалки // Заготовительные производства в машиностроении. – 2004. – №9. – С. 15-18.