

На правах рукописи

УДК 621.785.6

АМПИЛОГОВ Алексей Юрьевич

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СТАЛЕЙ
В ОБЪЕМЕ ИЗДЕЛИЯ ПРИ ЗАКАЛКЕ И ОТПУСКЕ

Специальность 05.02.01 – Материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2008

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

Научный руководитель: заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Быков Юрий Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Крукович Марат Григорьевич

кандидат технических наук, доцент
Рябченко Евгений Васильевич

Ведущая организация: ИМЕТ им. А.А. Байкова

Защита диссертации состоится «___» _____ 2008 г. в ___ час. на заседании диссертационного совета Д212.141.04 в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5.

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

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

Автореферат разослан «___» _____ 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



В.И. Семенов

Телефон для справок: (499) 267-09-63.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Повышение качества продукции машиностроения неразрывно связано с рациональным выбором материала деталей и совершенствованием процесса их термической обработки. Основным видом упрочняющей термической обработки деталей является закалка и последующий отпуск.

При закалке сталей, за редким исключением – сквозной прокаливаемости, и при последующем отпуске по объему изделия формируются области с различными структурами и, следовательно, свойствами. В целом их совокупность определяет конструкционную прочность, включающую критерии прочности, надежности и долговечности.

Однако на практике при выборе материала деталей ориентируются лишь на его прокаливаемость и свойства одного или, в лучшем случае, двух структурных состояний. Для компенсации несовершенств выбора материала вводятся высокие значения коэффициентов запаса прочности и допускаются в широких пределах колебания величин прокаливаемости. Объясняется это тем, что учет реального структурного состояния изделий для оценки его свойств затруднен, так как металлографические методы анализа структуры требуют разрушения деталей. Использование с этой целью метода торцевой закалки образцов так же не решает задачи, так как позволяет рассчитывать только глубину закаленного слоя для простейших по форме изделий.

В широком плане актуальная проблема выбора материала изделий, условий их закалки и контроля качества может решаться путем создания и использования методики прогнозирования структурообразования в объеме деталей, учитывающей их форму и размеры, свойства партии поставки материала и характеристики охлаждающей среды в момент закалки. Следует отметить, что стадия закалки является основным объектом прогнозирования. В работе также предложена методика определения структурных превращений и изменения свойств при последующем отпуске деталей.

Цель работы: создание методических основ и программного комплекса, позволяющих прогнозировать распределение структуры и свойств по объему изделия при термической обработке, на основе моделирования тепловых процессов, обеспечивающих оптимизацию режимов закалки и последующего отпуска, выбор материала и достижение гарантированного качества.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методику расчета кинетики изменения температуры в объеме изделия при закалке, учитывающую его размеры и форму, а так же охлаждающую способность закалочной среды.

2. Для оценки охлаждающей способности последней в условиях производства разработать датчик и, применительно к нему, способ расчета теплофизических характеристик закалочной среды.

3. Предложить и научно обосновать гипотезу о возможности использования результатов торцевой закалки образцов для прогноза структурообразования и изменения твердости по объему различных деталей, базирующуюся на идентификации кривых охлаждения в различных точках торцевого образца и детали.

4. Разработать методику и соответствующее программное обеспечение, позволяющее для конкретных партий материала, закалочной среды, формы и размеров изделий определять закаливаемость и прокаливаемость, а так же структуру и свойства по их объему.

5. Предложить методику оценки структуры и твердости по объему изделий после отпуска.

6. Разработать систему мониторинга и его программное обеспечение, позволяющее осуществлять выбор материала и условий термической обработки на стадии проектирования деталей.

Методы исследования. Численное моделирование процессов закалки проведено методом конечных элементов с использованием соответствующих математических моделей в программном комплексе ANSYS (предоставленном МГТУ им. Н.Э. Баумана московским представительством фирмы CAD-FEM GmbH).

В качестве критерия, используемого для оценки механических свойств по сечению изделий, применялись значения твердости, которые измерялись по Роквеллу в соответствии с ГОСТ 9013-59. Измерения твердости применялись так же для определения прокаливаемости, наряду с металлографическим анализом, для идентификации структур по объему изделий. Торцевая закалка образцов осуществлялась в соответствии с ГОСТ 5657-69.

Научную новизну имеют следующие результаты:

1. Конструкция датчика для определения температурной зависимости коэффициента теплоотдачи при закалке и способ его расчета.

2. Решение тепловой задачи с целью определения кинетики охлаждения любых точек объема изделия при закалке, учитывающей физические свойства материала, геометрию и размеры деталей, свойства закалочной среды.

3. Решение задачи идентификации кривых охлаждения в любой точке изделия кривыми охлаждения образца при торцевой закалке.

4. Методика прогнозирования структуры и твердости по объему изделий при закалке, базирующаяся на решении тепловой задачи для изделий и определении адекватного изменения температуры и, следовательно, структуры и свойств образца при торцевой закалке.

5. Методика прогноза структуры и твердости стали по объему изделий в зависимости от температуры отпуска.

6. Система мониторинга для выбора материала деталей на стадии ее проектирования, включающая алгоритмические и программные средства, а также пополняемые базы данных.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

Использование предложенной методики прогнозирования структуры и свойств по объему деталей после закалки в условиях производства позволяет корректировать режимы закалки для различных партий материала, обеспечивает высокое качество и повторяемость свойств изделия. Применение системы мониторинга ускоряет процессы выбора марки стали на стадии проектирования деталей и разработки технологии ее термической обработки.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на V конференции молодых специалистов авиационных, ракетно-космических и металлургических организаций России «Новые материалы и технологии в авиационной и ракетно-космической технике» в г. Королеве 16-18 октября 2006 г. и на научных семинарах кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н. Э. Баумана (2004-2006 г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 3 научные работы, из них в журналах по перечню ВАК - 3.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов по работе, 1 приложения, списка литературы. Она содержит: 145 страниц машинописного текста, включая 70 рисунков, 16 таблиц и 49 наименований использованных литературных источников.

Автор защищает:

1. Математическую модель изменения теплового поля по объему изделий произвольной формы, учитывающую теплофизические свойства материала, нестационарный характер взаимодействия поверхности изделия с охлаждающей средой, температурную зависимость охлаждающей способности среды.

2. Способ идентификации кривых охлаждения в любой точке объема детали через определение их соответствия кривым охлаждения на образце для торцевой закалки.

3. Новую конструкцию датчика и способ определения температурной зависимости коэффициента теплоотдачи.

4. Методику прогнозирования образования и распределения структур и твердости по объему деталей после закалки и отпуска.

5. Систему мониторинга, позволяющую осуществлять выбор материала изделия, закалочной среды и режимов термической обработки на стадиях проектирования деталей и разработки технологии термической обработки.

Автор выражает глубокую признательность к.т.н., доценту Третьякову В.И., д.т.н., профессору Крапошину В.С., д.т.н., профессору Герасимову С.А. и к.т.н., доценту Пучкову Ю.А. за помощь при подготовке настоящей работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели исследования и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены факторы, влияющие на структурообразование и прокаливаемость сталей при закалке и методы их исследования. Дается анализ подходов к решению задачи определения структурного состояния материала по объему изделия после термической обработки – закалки и отпуска.

Установлено, что в основном, прогнозирование сводится к использованию одного из показателей структурной неоднородности по сечению изделия – прокаливаемости. В основу прогноза положено использование справочных данных по прокаливаемости различных материалов. Поскольку прокаливаемость меняется от партии к партии поставок материала и не учитывает форму и размеры изделий, то результаты такого прогноза носят приближенный характер.

Понимание процессов структурообразования, в зависимости от скорости охлаждения, дают термокинетические диаграммы (ТКД). Знание кинетики ох-

лаждения материала в различных точках объема и использование ТКД позволяет провести необходимый анализ. Однако процесс построения таких диаграмм является чрезвычайно трудоемким. Помимо этого, затруднена возможность проведения такого анализа для практических целей из-за того, что положение линий структурных превращений на ТКД зависит от множества факторов, таких как химический состав сталей, размер зерна аустенита и т.д.

В работе был проведен анализ влияния колебания химического состава, допускаемого ГОСТом, углеродистых и легированных сталей на положение точек минимальной устойчивости аустенита при перлитном и промежуточном превращениях, а так же точки начала мартенситного превращения на ТКД. Границы интервала изменения температуры Δt_k для этих критических точек, соответствующих интервалу изменения химического состава, определялись при помощи функции регрессии по следующей зависимости:

$$\Delta t_k = \sum \frac{\partial t}{\partial C_i} \Delta C_i, \quad (1)$$

где $\frac{\partial t}{\partial C_i}$ - коэффициент влияния i -го элемента на значение температуры критической точки, ΔC_i – интервал изменения концентрации i -го элемента в пределах, допускаемых ГОСТом. Аналогичным образом определялись границы интервала изменения положения критических точек по оси времени:

$$\Delta \tau_k = e^{\sum \Delta C_i \frac{\partial f}{\partial C_i}}, \quad (2)$$

где f – функция, зависящая от концентрации легирующих элементов.

В результате такого анализа было установлено, что на положение точек минимальной устойчивости аустенита в области перлитного (t_p , τ_p), промежуточного (t_b , τ_b) и мартенситного t_M превращений существенно влияет колебание содержания химических элементов в пределах, допускаемых ГОСТом. Таким образом, положение линий на ТКД, характеризующих начало распада аустенита, могут существенно отличаться для разных плавов одной марки стали в зависимости от химического состава конкретной поставки. Строить ТКД для каждой плавки невозможно из-за чрезвычайной трудоемкости процесса.

Следующая сложность прогноза результатов закалки связана с корректным определением кинетики охлаждения изделий по объему при термической обработке. Трудности подобного рода задач обусловлены 3-мерностью и сложностью формы деталей, неопределенностью в задании граничных условий. В настоящее время созданы программы численного моделирования и анализа, которые позволяют провести расчет теплового поля 3-мерной модели изделия любой формы и размеров. Для проведения подобных расчетов требуется точное определение граничных условий. Граничные условия третьего рода наиболее полно характеризуют условия охлаждения при закалке. Однако сведения о значениях коэффициента теплоотдачи противоречивы, степень рассеяния этих данных не позволяет строго ставить тепловую задачу и получать решение, адекватно отвечающее реальному физическому процессу.

Сложность прогноза прокаливаемости обусловлена также трудноподдающемуся учету влияния на нее металлургических и природных примесей, природной склонности к росту аустенитного зерна и т.д. Учет этих особенностей возможен только в обобщенном виде. Конкретно он реализуется при использовании метода торцевой закалки для прогнозирования образования и распределения структур в объеме изделия. Однако в этом случае возможности прогноза ограничиваются изделиями простейшей формы. В последнее время была предложена методика прогнозирования прокаливаемости на основе экспериментального получения и статистического анализа вероятностных распределений твердости в полосах прокаливаемости сталей. Методика имеет ряд недостатков: требуется проведение большого количества экспериментов; не обеспечивается однозначность выбора сечения торцевого образца, который должен быть эквивалентен исследуемому сечению изделия.

Анализ данных литературы приводит к выводу, что разработка способа прогнозирования структуры и свойств по объему детали после закалки и отпуска, применяемого для практического использования, возможно лишь при учете партии материала, из которого она изготовлена, охлаждающей способности закалочной среды в момент закалки и учета размеров и формы детали.

Во второй главе решается задача определения теплового состояния изделия в процессе закалки. Для этих целей используется дифференциальное уравнение теплопроводности в совокупности с начальными и граничными условиями.

На основе анализа источников литературы было установлено, что для численной оценки изменения тепловых полей в процессе термического воздействия целесообразно применять метод конечных элементов (МКЭ), который наиболее полно, по сравнению с конечно-разностными методами, учитывает условия нагрева и охлаждения при закалке во всем объеме изделия сложной формы. При решении нестационарной тепловой задачи с помощью МКЭ изменение температуры аппроксимируется семейством кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, составляющих объем закаливаемого изделия. Было установлено, что для аппроксимации температуры в пределах каждой подобласти кусочно-непрерывными функциями достаточно применение полиномов до 6-ой степени включительно.

Определение значений температуры в точках объема изделия основывается на решении уравнения теплопроводности, характеризующее изменение теплового состояния объема закаливаемого изделия.

Чтобы получить частное решение, соответствующее реальным условиям закалки, необходимо определить начальные и граничные условия протекания процесса закалки:

1. Начальные условия, определяющие распределение температуры в любой точке тела в начальный момент времени. При моделировании процесса нагрева, начальные условия определяют температуру изделия равной температуре окружающей среды. При моделировании охлаждения в процессе закалки начальные условия устанавливаются равенством температуры всех точек объема изделия температуре нагрева под закалку.

2. Граничные условия — условия теплового взаимодействия тела с окружающей средой. Они могут быть заданы в различной форме в зависимости от характера процесса. При определении теплового взаимодействия поверхности изделия с охлаждающей средой при закалке в данной работе были использованы граничные условия 3-го рода, как наиболее полно учитывающие особенности состояния поверхности закаливаемого изделия при охлаждении. В этом случае граничные условия определяются законом конвективного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой, т.е. разностью температур поверхности изделия и охлаждающей среды и значениями коэффициента теплоотдачи.

В результате моделирования тепловых процессов появляется возможность получения картины распределения тепловых полей и семейства кривых охлаждения для любого момента времени во всех интересующих точках объема изделия, которые впоследствии используются для прогнозирования распределения структурных составляющих по объему.

Таким образом, в процессе разработки методики решения тепловой задачи было установлено, что для решения задачи определения теплового состояния изделия в процессе закалки при помощи МКЭ необходимы следующие исходные данные:

1. Геометрическая трехмерная модель изделия, которая позволяет учитывать в процессе расчетов такие характеристики изделия, как массивность и неоднородность изменения теплового состояния поверхности изделия в зависимости от локальных граничных условий;

2. Теплофизические свойства, входящие в уравнение теплопроводности – плотность, теплоемкость и теплопроводность. Эти свойства характеризуют состояние материала изделия в процессе закалки и поэтому должны быть определены в температурно-зависимой форме;

3. Параметры моделируемого процесса закалки – начальные и конечные температуры изделия и охлаждающей среды, длительность процесса, температурная зависимость конвективного теплообмена между поверхностью изделия и охлаждающей средой.

Для проверки методики были использованы детали как простых, так и сложных форм, подвергнутых закалке (рис. 1).

Сравнение результатов, полученных расчетным и экспериментальным путем, показало их высокую сходимость, различие составляет не более 5%.

Третья глава посвящена описанию разработки датчика и способа определения температурной зависимости коэффициента теплоотдачи.

Необходимость создания нового датчика обусловлена тем, что численное решение тепловой задачи требует определения и контроля охлаждающей способности закалочной среды и, в частности, определения температурной зависимости коэффициента теплоотдачи.

Используемые датчики не приспособлены для оперативного контроля состояния закалочной среды в производственных условиях, поэтому был разработан специальный датчик, показанный на рис. 2.

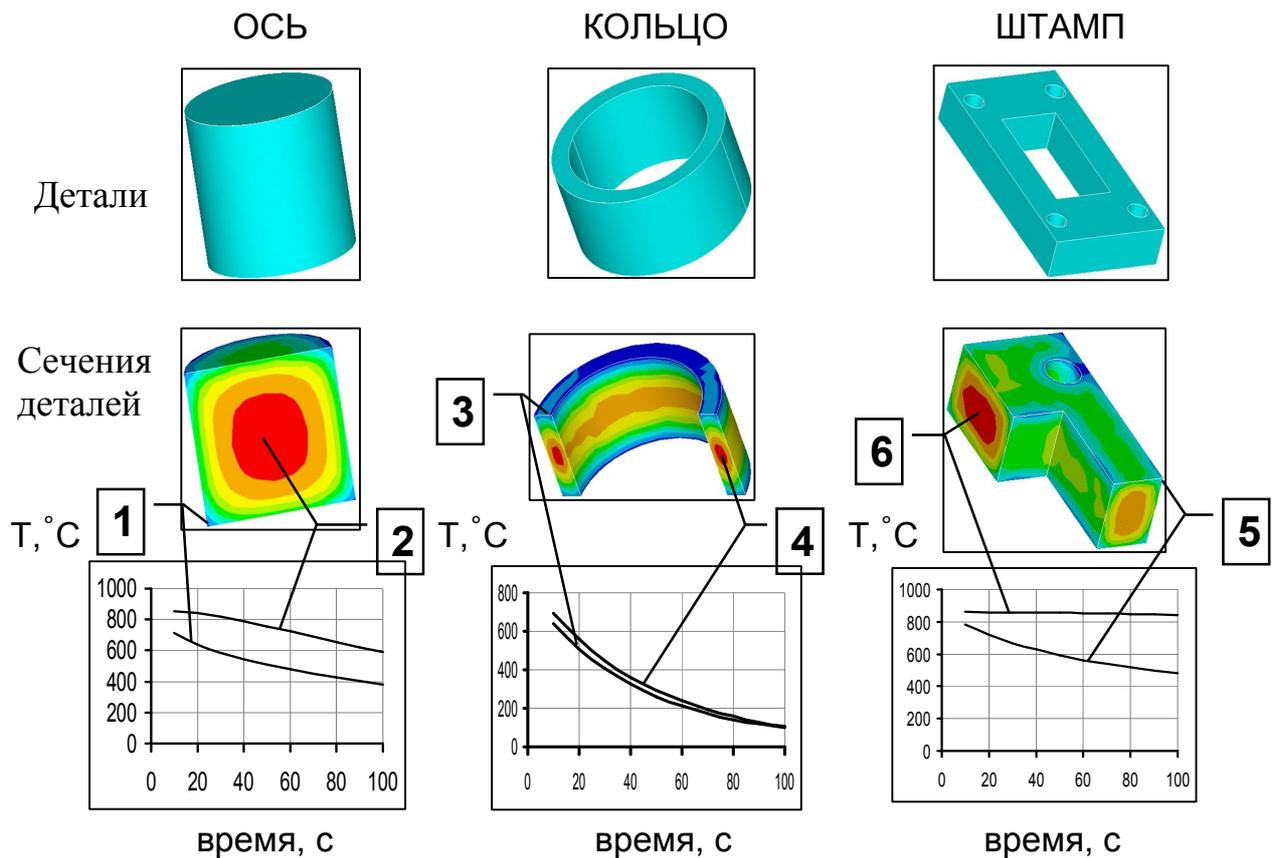


Рис. 1. Рассчитанные температурные поля и кривые охлаждения поверхности (1, 3, 5) и сердцевины (2, 4, 6) различных деталей при закалке

Диаметр тонкой центральной части такого датчика должен быть достаточным, что бы на тепловое состояние вблизи центральной точки не оказывали влияние торцы, т.е. такое тепловое состояние, которое будет эквивалентно состоянию бесконечно длинной пластины.

Размеры датчика определялись путем численного моделирования, исходя из условий, что первая и вторая производные температуры вблизи центральной точки стремятся к нулю. Эти требования следуют из анализа уравнения теплопроводности для бесконечно длинной пластины. Было установлено, что таким условиям удовлетворяет диаметр диска не менее 30 мм. При соблюдении этого условия появляется возможность разработки методики расчета коэффициента теплоотдачи по кривой охлаждения, определенной для центральной точки датчика.

В итоге, значение коэффициента теплоотдачи определяется по предлагаемой нами формуле:

$$\alpha = \frac{c \cdot \rho(t) \cdot h \cdot V_{\text{окси}}}{t - t_0}, \quad (3)$$

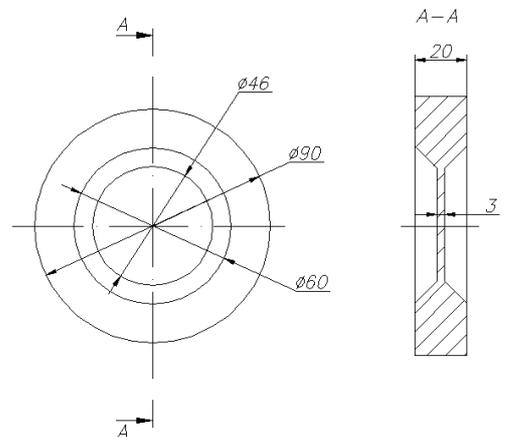


Рис. 2. Датчик для определения температурной зависимости коэффициента теплоотдачи

где $V_{\text{охл}}$ - скорость охлаждения; c – удельная теплоемкость; $\rho(t)$ – плотность; h – толщина центральной части датчика; t_0 - температура поверхности датчика; t – температура исследуемой охлаждающей среды.

В качестве материала для изготовления датчика предлагается использовать сплав Х20Н80 (нихром), обладающий высокой коррозионной стойкостью и отсутствием фазовых превращений при рабочих температурах. В центральную часть датчика установлена термопара ТХА.

Проведенный эксперимент для определения температурной зависимости коэффициента теплоотдачи при охлаждении в воде показал, что среднее значение коэффициента теплоотдачи в интервале температур от 850 до 20 °С, рассчитанное по формуле (3), находится в согласии с данными литературы.

Таким образом, разработан и предложен новый способ определения коэффициента теплоотдачи. Преимущества данного способа, в сравнении с известными, состоят в следующем:

1. Коэффициент теплоотдачи определяется прямым методом, т.е. как функция термоэдс при соответствующем масштабном множителе, что позволяет избавиться от дополнительных методических и вычислительных погрешностей;
2. Коэффициент теплоотдачи определяется с учетом температурной зависимости теплофизических свойств материала датчика, что делает его более адекватным реальным условиям.

Глава 4 посвящена разработке методики прогнозирования прокаливаемости, распределения структуры и твердости по объему деталей после закалки и при последующем отпуске.

Методика предназначена для определения этих характеристик без разрушения деталей и проведения последующих операций подготовки микрошлифов. Предлагается следующий алгоритм его проведения. С помощью датчика и предложенного способа (глава 3), оценивается охлаждающая способность закалочной среды. Используя полученные результаты и методику решения тепловой задачи, изложенную в главе 2, устанавливаются закономерности изменения температур при закалке в различных точках объема изделия. Подобная операция выполняется и для стандартного торцевого образца (ГОСТ 5657-69) в точках измерения твердости. Следует отметить, что метод торцевой закалки обеспечивает получение широкого спектра условий охлаждения. В качестве примера на рис. 3 схематично показан образец для торцевой закалки и кривые изменения температуры в некоторых

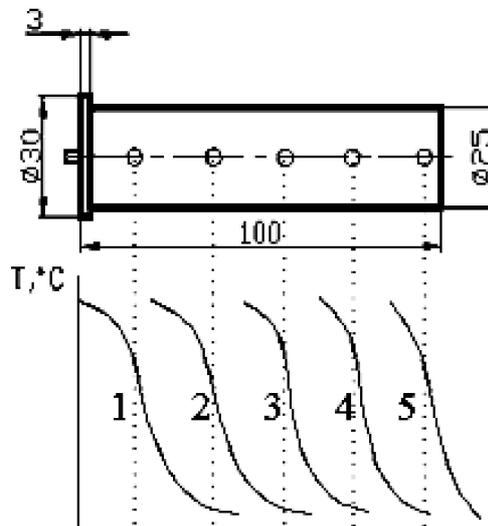


Рис. 3. Изменение температуры при охлаждении торцевого образца в некоторых (1, 2, 3, 4, 5) точках последующего измерения твердости

точках последующего измерения

Далее устанавливаются точки в объеме изделия и на торцевом образце с идентичными кривыми охлаждения. Кривые охлаждения детали и торцевого образца считаются идентичными, когда они наиболее близки по форме и численным значениям. Степень соответствия Δ кривых охлаждения на торцевой пробе (индекс - Т) и детали (индекс - Д) может быть оценена интегрально по формуле:

$$\Delta = \int_0^{\tau_k} (t^T(\tau) - t^D(\tau))^2 d\tau \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $t^T(\tau)$ – кривая охлаждения в произвольной точке образца торцевой закалки; $t^D(\tau)$ – кривая охлаждения в произвольной точке детали; τ – текущее время охлаждения; τ_k – время окончания процесса охлаждения.

Однако использовать ее в расчетах из-за большого объема числовых значений температур весьма затруднительно. Было установлено, что кривые охлаждения подчиняются экспоненциальной зависимости и могут быть представлены в виде аналитической функции:

$$t_{расч} = t_{зак} (1 + s \cdot \tau^m) \cdot e^{-k \cdot \tau^n}, \quad (5)$$

где $t_{зак}$ – температура закалки; τ – время протекания процесса закалки; s, m, k, n – параметры уравнения, определяемые в результате проведения оптимизационной процедуры по имеющимся экспериментальным данным. Таким образом, кривые охлаждения преобразуются в значения четырех параметров. При этом погрешность, возникающая при таком описании кривых, не превышает 10%. В результате расчетная формула, для определения степени соответствия двух кривых охлаждения для N измерений, будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta = \sum_1^N [(s^T - s^D)^2 + (m^T - m^D)^2 + (k^T - k^D)^2 + (n^T - n^D)^2] \rightarrow \min. \quad (6)$$

Области в объеме детали и торцевого образца, отвечающие этому условию, будут обладать одинаковой структурой и твердостью. Последние определяются путем измерения твердости и проведения металлографических исследований на торцевом образце как после закалки, так и после отпуска на различные температуры. Полученные при испытаниях на торцевых образцах значения твердости позволяют определить глубину закаленного слоя детали.

В результате устанавливается картина распределения структурных составляющих и твердости по объему изделия, определенных из соответствия кривых охлаждения для образца торцевой закалки и реального изделия. Создана программа, реализующая алгоритм определения структуры и твердости по объему детали и ее прокаливаемость.

Кроме определения твердости и типа структур по объему изделия, в программе рассчитывается ряд показателей: скорость и время охлаждения до температуры минимальной устойчивости аустенита или любой другой заданной; среднее значение погрешности расчетной кривой охлаждения детали. Возможности программы иллюстрируются рис. 4.

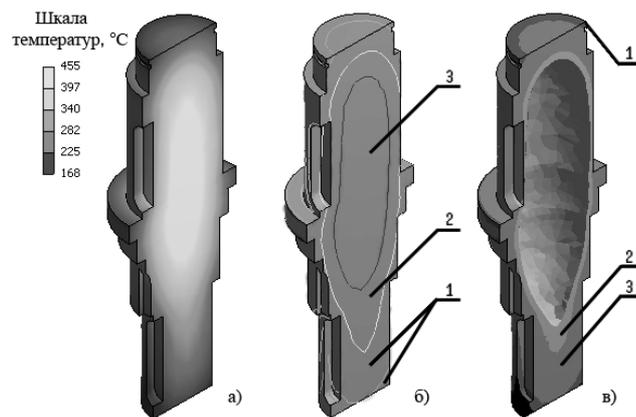


Рис. 4. Результаты прогнозирования: а) поле распределения температур по продольному сечению вала в один из моментов закалки; б) области вала с различными типами образующихся структур (отделены друг от друга температурными изолиниями): 1 – мартенситная область, 2 – мартенситно-трооститная область, 3 – сорбитная область; в) показана закалившаяся часть объема вала: 1, 3 – мартенситные зоны (60-62 HRC), 2 – полумартенситная зона (45-50 HRC)

Для проверки достоверности метода прогнозирования была проведена серия экспериментов, в которых использовались специальные разъемные цилиндрические образцы многоразового использования, позволяющие проводить измерения твердости без их разрезки. Адекватность проверялась по влиянию размера образцов, скорости охлаждения в различных средах, колебания химического состава в пределах ГОСТа и формы изделий на прокаливаемость и соответствию результатов расчетов экспериментальным данным.

В процессе охлаждения разъемные цилиндрические образцы можно считать единым целым, поскольку тепловые потоки распространяются в объеме от более нагретой сердцевины к менее нагретой остывающей поверхности и не испытывают со стороны границы раздела двух частей термического сопротивления.

Проводилась закалка образцов и определялась твердость по сечению образца (плоскость разъема) и прокаливаемость. Результаты сравнивались с данными, полученные расчетом. Проверка адекватности оценивалась для случая использования различных закалочных сред и изменения размеров деталей. В качестве сред использовались вода и промышленное масло. Диаметр цилиндров изменялся от 20 до 50 мм. Эксперименты показали высокую сходимость результатов, полученных различными способами.

Методика прогноза и его программное обеспечение позволяют осуществлять в производственных условиях:

- контроль качества термической обработки, особенно массивных, сложных и дорогостоящих деталей, поскольку способ, в отличие от традиционного, не требует разрушения последних;

- входной контроль поступающих партий материала с целью коррекции режимов термической обработки и, соответственно, повышения качества и повторяемости свойств.

Для получения исходных данных для этой цели необходимо провести закалку торцевого образца и измерить охлаждающую способность закалочной среды с помощью предложенного датчика.

В пятой главе рассматривается система мониторинга, позволяющая осуществлять выбор материала детали на стадии проектирования, а также закалочную среду и режимы термической обработки, обеспечивающих получение после закалки и отпуска заданных величин закаливаемости и прокаливаемости или в более сложном случае – распределение структур и твердости по объему изделий.

Этим условиям по результатам мониторинга могут отвечать различные марки стали и охлаждающей среды. Поэтому, далее осуществляется традиционный выбор из этой ограниченной группы материала с учетом специальных требований, например, по коррозионной стойкости, хладноломкости и т.д., а также экономической целесообразности использования сталей и охлаждающих сред. Система мониторинга основывается на методике прогнозирования образования структур и твердости по объему закаленного и отпущенного изделия, изложенной в главе 4, т.е. она включает в себя:

- расчет изменения температурного состояния изделия в разных точках его объема в процессе охлаждения при закалке и отпуске;
- использование результатов торцевой закалки – твердости и структуры в различных точках по длине образца, а также расчет кинетики охлаждения при закалке материала в этих точках;
- установления идентичности кинетики охлаждения при закалке в различных точках торцевого образца и изделия с целью установления структуры и твердости по объему изделия;
- использование результатов измерения твердости и оценки структуры в различных точках по длине образца, прошедшего торцевую закалку в зависимости от температуры последующего отпуска.

Мониторинг структуры и свойств по объему закаливаемого стального изделия предполагает применение в качестве исходных данных набора справочных значений определенных физических и теплофизических свойств материала и охлаждающей среды, а также результатов испытаний торцевых образцов. Поскольку такие данные представляют собой объемный набор числовых значений, то для их хранения и обработки были разработаны соответствующие базы данных (БД).

БД «Стали» содержит необходимую информацию о свойствах марки материала - зависимость от температуры значения плотности, теплопроводности и удельной теплоемкости для различных марок материалов.

Для возможности использования в расчетах значений охлаждающей способности закалочных сред была разработана БД «Охлаждающие среды». В БД содержатся данные закалочной способности различных сред, определенных при помощи оригинального метода и датчика, разработанных в рамках данной работы (глава 3).

Характеристики охлаждающей способности закалочных сред хранятся в БД в виде коэффициентов полинома. При помощи интерфейса БД имеется возмож-

ность ввода экспериментальных значений скорости охлаждения $V_{\text{охл.}}$ образца определенных в аттестуемой охлаждаемой среде и определения по этим данным зависимости значений коэффициента теплоотдачи от температуры.

Для хранения информации о кривых охлаждения и свойствах торцевых образцов, была разработана БД «Торцевой образец», в которой хранятся следующие данные:

1. Кривые охлаждения (в виде четырех коэффициентов – k, n, m, s);
2. Химический состав материала;
3. Критические точки материала, т.е. точки минимальной устойчивости аустенита для перлитной и бейнитной областей, а также точка начала мартенситного превращения;
4. Критические параметры охлаждения - критическая скорость охлаждения и критический диаметр;
5. Значения твердости и структуры в точках по длине образца после торцевой закалки и отпуска при различных температурах.

На начальном этапе работы системы мониторинга в программу вводятся исходные данные вручную или из БД. Они включают в себя:

1. Теплофизические свойства предполагаемого материала изделия;
2. Геометрическая модель проектируемого изделия;
3. Начальные и граничные условия охлаждения;
4. Уровень требуемых свойств или требования к оптимальному распределению структурных составляющих по объему изделия.

Теплофизические свойства в зависимости от температуры – удельная теплоемкость $c(t)$ и теплопроводность $\lambda(t)$, а так же плотность $\rho(t)$ – могут быть введены в программу либо в виде коэффициентов полинома, либо в виде табличных значений «Температура» - «Свойство». В последнем случае табличные значения температуры и свойства, а также количество этих значений определяет пользователь, а значения свойства вне определенных пользователем точек рассчитываются, при необходимости, путем интерполяции программой при помощи метода наименьших квадратов. Для тех случаев, когда отсутствует информация о температурной зависимости какого-либо из свойств, предусмотрена возможность ввода в программу его среднего значения. В этом случае точность расчетов будет снижаться.

Геометрическая модель проектируемого изделия в программу вводится в виде ссылки на заранее подготовленный файл. Эти файлы могут быть созданы в одной из специализированных программ САD-класса для проектирования геометрической модели изделий: Catia, Pro/Engineer, Unigraphics, SolidWorks, Inventor и т.д.

Для ввода в программу начальных и граничных условий охлаждения необходимо и достаточно указать температуру закалки t_z , температуру охлаждающей среды t_c , длительность процесса закалки τ_z и коэффициент теплоотдачи α . Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи может быть задана в программе одним из рассмотренных ранее способов, при помощи которых вводятся значения теплофизических свойств.

Уровень требуемых свойств вводится в программу в виде трех параметров: тип требуемого свойства (например, твердость); область изделия, в которой будет контролироваться уровень заданного свойства (поверхность, сердцевина, определенная глубина); интервал допустимых значений заданного свойства (минимальное и максимальное значения).

После ввода в программу всех необходимых для проведения мониторинга исходных данных выполняется определение оптимальности выбора охлаждающей среды и марки материала.

Коррекция выбора охлаждающей среды осуществляется по требованиям к механическим свойствам изделия путем подбора оптимальных значений коэффициента теплоотдачи на этапе охлаждения изделия. Подбор осуществляется с помощью итерационного поиска таких значений коэффициента теплоотдачи, при которых распределение структуры и показателей механических свойств C_p , будут соответствовать требуемому уровню C_T , задаваемому в программе технологом. В качестве исходных данных для каждого прохода итерационного поиска в программе формируется набор значений, включающий в себя новую запись, выбираемую из БД «Охлаждающие среды». На основе введенных данных осуществляется прогнозирование распределения структуры и свойств в результате закалки. Подобный прогноз основывается на расчете теплового состояния изделия и торцевого образца в процессе закалки и отпуска с последующим определением для изделия и образца кривых охлаждения во всех точках их объемов. Методика прогнозирования подробно рассмотрена в главе 4. Одним из результатов такого прогноза являются значения твердости по объему изделия. При окончании каждого прохода итерационного поиска осуществляется сравнение полученных данных C_p со значениями требуемого уровня этого свойства C_T . Если уровень найденных значений твердости находится в заданном в программе интервале ($C_T^{\min} \geq C_p \geq C_T^{\max}$), принимается решение о нахождении оптимальных значений коэффициента теплоотдачи, используемых в качестве исходных данных в данном проходе итерационного поиска. В противном случае выполняется новый проход итерационного поиска, для которого значения коэффициента теплоотдачи выбираются из следующей записи в БД «Охлаждающие среды». Алгоритм процедуры коррекции выбора охлаждающей среды показан на рис. 5.

Поиск оптимальных значений коэффициента теплоотдачи заканчивается при наступлении хотя бы одного из двух событий - оптимальное значение найдено или достигнута последняя запись БД «Охлаждающие среды». В последнем случае выводится сообщение о том, что оптимальное решение не найдено.

Коррекция марки стали также осуществляется по требованиям к механическим свойствам изделия, но при постоянных значениях коэффициента теплоотдачи на всем этапе поиска. Поиск всех удовлетворяющих условиям марок сталей осуществляется путем варьирования теплофизических свойств материала, которые являются частью исходных данных для каждого прохода такого поиска и выбираются в виде отдельной записи из БД «Стали». На основе исходных данных выполняется указанное ранее прогнозирование распределения структурных составляющих и свойств в результате закалки.

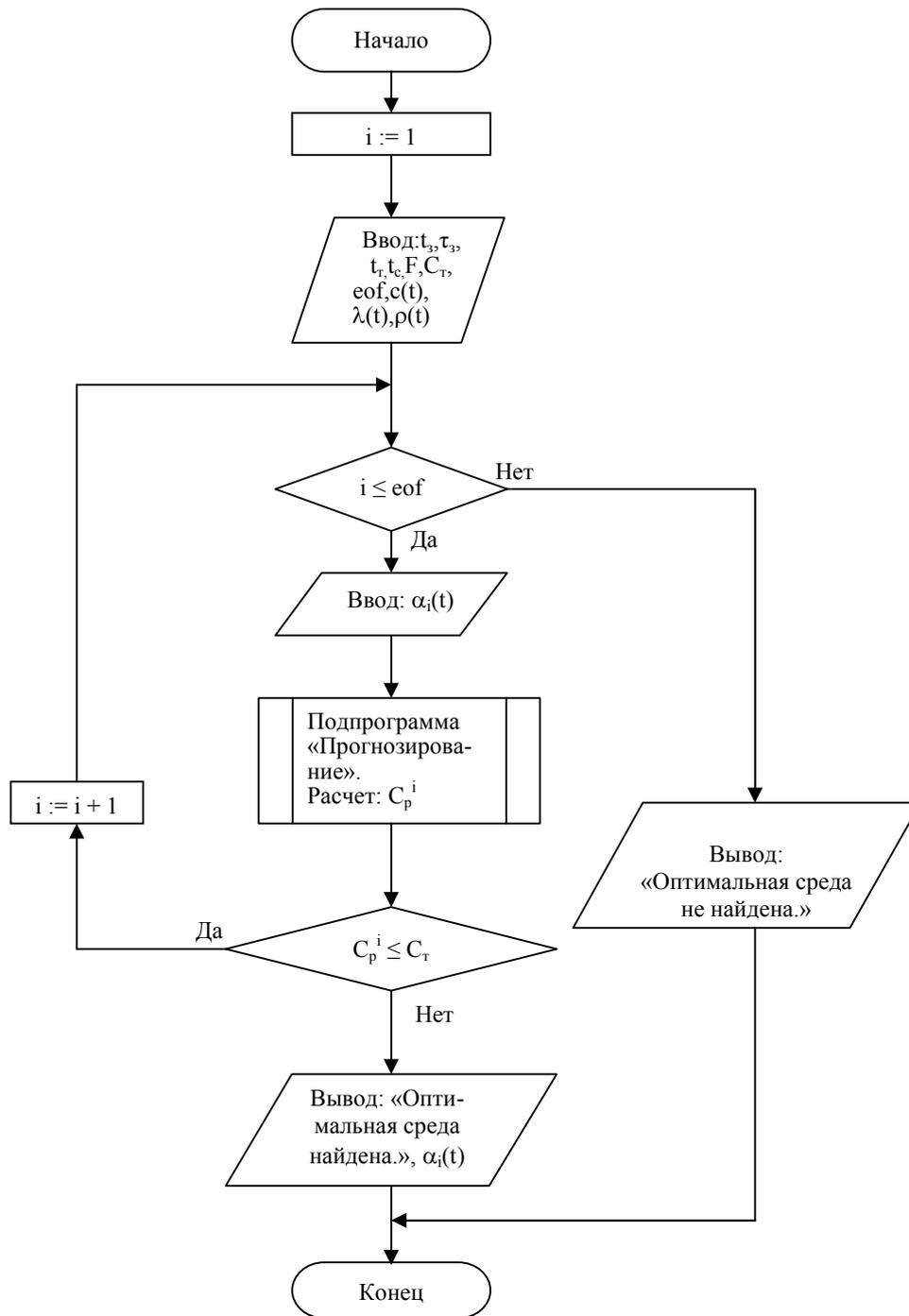


Рис. 5. Алгоритм коррекции выбора закалочной среды. F – указатель на файл с геометрической моделью, eof – указатель на последнюю запись БД «Охлаждающие среды»

По определенным в результате такого прогнозирования значениям твердости и сравнении их с требуемым уровнем свойства делается заключение о правильности выбора марки стали для данного изделия.

Окончательный вывод о структуре и возможных свойствах термически обрабатываемого материала можно сделать после рассмотрения процесса отпуска, следующего за закалкой. Для этого используется БД «Торцевой образец», где приведены значения твердости данной стали после различных температур отпуска.

Общие выводы и результаты работы:

1. Показано, что использование термокинетических диаграмм, а так же другой справочной информации о марках сталей (критическом диаметре, критической скорости охлаждения, прокаливаемости) не обеспечивают точности прогноза структуры по объему детали, требуемой при решении практических задач. Это связано, прежде всего, с тем, что не учитывается геометрия деталей и их размеры, изменение охлаждающей способности закалочных сред в процессе эксплуатации, а также влияний колебания химического состава сталей, допускаемых ГОСТ, на положение характерных точек диаграмм превращений переохлажденного аустенита. Расчетные методы, основанные на использовании результатов торцевой закалки образцов, так же не решают поставленной задачи, так как позволяют определить только глубину закаленного слоя простейших по форме изделий.

2. Разработан способ прогнозирования структуры и свойств по объему изделий при закалке, основанный на:

- учете формы и размеров изделий, химического состава, характерного для каждой партии поставки материала и охлаждающей способности закалочной среды в момент закалки;

- использовании новых подходов к определению температурной зависимости коэффициента теплоотдачи и решении тепловой задачи, определяющей кинетику охлаждения материала в различных точках объема изделий, определении идентичности кривых охлаждения при закалке и, следовательно, структуры и свойств, в различных точках по длине торцевого образца и в объеме детали.

3. Создана новая конструкция датчика для определения температурной зависимости коэффициента теплоотдачи в производственных условиях. Применительно к термочувствительному элементу датчика разработана тепловая модель на основе которой определены размеры элемента и предложен более точный, по сравнению с традиционными, способ расчета коэффициента теплоотдачи.

4. Решена задача определения теплового состояния детали в процессе закалки путем моделирования ее геометрии, использования МКЭ для постановки и решения тепловой задачи и результатов расчета коэффициентов теплоотдачи предложенным способом.

5. Для решения задачи идентификации кривых охлаждения в любой точке объема детали через определение ее соответствия кривой охлаждения на образце для торцевой закалки было найдено общее выражение, описывающее семейство всех возможных кривых охлаждения через параметры. Установлено, что достаточно 4-х параметров для описания кривых охлаждения.

6. Предложена методика определения структуры и твердости по объему деталей, подвергнутых после закалки отпуску. Методика основана на том, что области изделия и торцевого образца закалки с одинаковой структурой и твердостью после закалки сохраняются и после отпуска. Поэтому отпуску подвергается образец для торцевой закалки и полученный результат трансформируется на изделие.

7. Разработана система мониторинга для выбора на стадии проектирования деталей марки стали, закалочной среды и режимов термической обработки. Система включает в себя способ прогнозирования структуры и свойств по объему изделия, соответствующие алгоритмические и программные средства, базы данных о свойствах сталей, охлаждающих сред, а также результаты закалки и отпуска образцов для торцевой закалки.

8. В практическом плане, использование датчика, способа прогнозирования структуры и свойств по объему изделий при закалке и отпуске и системы мониторинга обеспечит ускорение технологической подготовки производства и повышение качества продукции, что обуславливается следующим:

- предложенный датчик позволяет проводить оперативный и высокоточный контроль охлаждающей способности закалочных сред в производственных условиях;

- использование в условиях производства способа прогнозирования структуры и свойств по объему изделий при закалке позволяет осуществить неразрушающий контроль. Это дает возможность вносить коррективы в технологический процесс, учитывающие особенности партии материала и закалочной среды, обеспечивая, таким образом, высокую повторяемость свойств;

- на стадии проектирования деталей и разработки технологии их термической обработки система мониторинга упрощает процесс выбора марки стали, охлаждающих сред и режимов термической обработки. Ее применение для крупногабаритных, сложных по форме и дорогостоящих изделий позволяет избежать проведения технологических проб.

9. В перспективном плане применение системы мониторинга и способа оценки структуры и свойств по объему изделия могут стать основой разработки новых, более рациональных подходов к выбору материала изделий и технологии их термической обработки.

10. Система мониторинга и способ оценки закаливаемости и прокаливаемости деталей при закалке и последующем отпуске прошел экспериментальную апробацию и рекомендуется для практического использования. Результаты работы используются в учебном процессе для студентов специальности «Материаловедение» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Основное содержание работы отражено в следующих печатных работах:

1. Ампилогов А.Ю., Быков Ю.А., Третьяков В.И. Новый метод определения охлаждающей способности закалочных сред//Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-штамповое, литейное и другие производства). – 2006. – № 6. – С. 35-37.

2. Быков Ю.А., Ампилогов А.Ю., Третьяков В.И. Метод прогнозирования структуры и твердости по объему стальных деталей при закалке //Металловедение и термическая обработка металлов. – 2008. – № 2. – С. 21-24.

3. Ампилогов А.Ю., Быков Ю.А., Третьяков В.И. Прогноз образования структур при закалке стальных деталей//Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-штамповое, литейное и другие производства). – 2008. – № 6. – С. 45-48.