

АНУФРИЕВ Николай Петрович

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДИФФУЗИОННОГО РАСПАДА ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО
АУСТЕНИТА ДОЭВТЕКТОИДНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ**

Специальность 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка
металлов и сплавов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург

2011

Работа выполнена на кафедре «Термообработка и физика металлов»
ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Юдин Юрий Вячеславович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Гервасьев Михаил Антонович

кандидат физико-математических
наук, доцент
Окишев Константин Юрьевич

Ведущее предприятие: Институт Машиноведения УрО РАН

Защита диссертации состоится «23» декабря 2011 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д212.285.04 при ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 28, 3-й учебный корпус, ауд. Мт-329. Телефон (343)375-45-74; факс (343)374-38-84, e-mail: nicksanuf@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Автореферат разослан «21» ноября 2011 г. Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации «21» ноября 2011 г. размещены на официальном сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»: www.ustu.ru и направлены для размещения в сети Интернет Министерством образования и науки Российской Федерации по адресу referat_vak@man.gov.ru.

Ученый секретарь совета Д 212.285.04
проф., д.т.н.

Мальцева Л.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Микроструктура стали, сформировавшаяся в результате проведения термообработки в условиях непрерывного охлаждения, является ключевым фактором, определяющим уровень механических и эксплуатационных свойств готовых изделий. Совершенствование технологии термической обработки на предприятиях нередко связано с заменой традиционных режимов закалки на более перспективные с применением водокапельных или водовоздушных охлаждающих устройств. Такие охлаждающие устройства обеспечивают широкий спектр скоростей охлаждения, по сравнению с традиционными режимами закалки, что существенно изменяет характер формирования микроструктуры конкретной стали по сечению изделия. Помимо внедрения нового закалочного оборудования возникает необходимость использования новых марок сталей, для которых особенности протекания фазовых и структурных превращений подробно не изучены.

Современные методики построения термокинетических диаграмм обычно ограничиваются постоянными скоростями охлаждения, поэтому результаты проведенных исследований не всегда непосредственно можно применить для оценки структурного состояния по сечению конкретных изделий. Особенно это касается широко применяемых доэвтектоидных низко- и среднелегированных сталей, для которых термокинетические и, в особенности, изотермические диаграммы распада переохлажденного аустенита обладают определенной неполнотой информации.

Расчетно-экспериментальное изучение кинетики распада переохлажденного аустенита в доэвтектоидных промышленных сталях может служить основой для разработки алгоритма расчета количества структурных составляющих в любой точке сечения крупных изделий при их охлаждении с различной интенсивностью.

Одним из перспективных способов моделирования кинетики $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в доэвтектоидных сталях при непрерывном охлаждении является использование экспериментальных термокинетических диаграмм распада переохлажденного аустенита с известными термическими траекториями, с помощью которых можно рассчитать изотермическую диаграмму распада переохлажденного аустенита, применив правило аддитивности Шейла. При этом появляется возможность использовать расчетную изотермическую диаграмму распада переохлажденного аустенита для определения температурных и структурных полей при произвольном охлаждении деталей любого сечения.

Задача повышения комплекса прочностных свойств в настоящее время актуальна для валков горячей прокатки вследствие появления новых стандартов, ужесточивших требования к уровню механических свойств валков в активном слое. Нередко, в результате проведения промышленных режимов термообработки валков в упрочненном слое образуются продукты диффузионного распада переохлажденного аустенита (избыточный феррит и

феррито-карбидная смесь), что может привести к значительному понижению твердости рабочей поверхности изделий и, следовательно, их эксплуатационной стойкости.

Поэтому представляется актуальной разработка достоверной методики расчета объемной доли феррита и перлита в структуре доэвтектоидных конструкционных сталей, образовавшихся в результате термообработки стальных изделий по различным режимам. Это даст возможность расчетным путем выбрать режим охлаждения, при котором для конкретной марки стали будет максимально подавлен распад переохлажденного аустенита по I ступени в поверхностном слое, что позволит существенно повысить уровень прочностных свойств готовых изделий.

Работа выполнена в соответствии с основными направлениями научной деятельности кафедры «Термообработки и физики металлов» ФГАОУ ВПО «Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (тема № 2218), федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2009-2013 гг), госконтракт 02.740.1105037 (2010-2012 гг).

Цель работы: Исследовать кинетику распада переохлажденного аустенита доэвтектоидных сталей для разработки методики расчета структурных полей стальных изделий при их охлаждении с различной интенсивностью.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи:

1. Провести аналитическое описание изотермических диаграмм распада переохлажденного аустенита доэвтектоидных сталей в перлитной области на основании известных экспериментальных данных.
2. Исследовать микроструктуру доэвтектоидных сталей и определить количество структурных составляющих, образовавшихся при непрерывном охлаждении.
3. Изучить кинетику распада переохлажденного аустенита доэвтектоидных сталей при термообработке в изотермических условиях и при непрерывном охлаждении.
4. На основе экспериментальных исследований предложить алгоритм расчета объемной доли продуктов диффузионного распада аустенита доэвтектоидных конструкционных сталей при охлаждении с постоянной и переменной скоростью.

Научная новизна:

1. Разработана методика, позволяющая с абсолютной погрешностью до 5 % рассчитывать количество феррита и перлита в структуре доэвтектоидных сталей с различным уровнем легирования при непрерывном охлаждении.
2. Расчетно-экспериментальным методом установлена температурная зависимость параметров уравнения Колмогорова-Джонсона-Мэйла-Аврами n и k при проведении изотермической обработки доэвтектоидных низколегированных сталей, на основании чего предложена модель аналитического расчета изотермических диаграмм распада переохлажденного аустенита в перлитной области.
3. Изучено структурообразование валковой стали 45Х5МФ при проведении термообработки в изотермических условиях и при непрерывном охлаждении. Построена изотермическая и термокинетическая диаграммы распада переохлажденного аустенита стали 45Х5МФ.
4. Предложена экспериментальная методика, позволяющая методом простого термического анализа с применением компьютерных технологий определять кинетику фазовых превращений доэвтектоидных сталей при охлаждении с переменной скоростью.

Достоверность основных положений и выводов диссертации обеспечивается использованием апробированных и контролируемых методик исследования в лабораторных и производственных условиях, статистико-вероятностной обработкой экспериментальных данных, воспроизводимостью полученных результатов и непротиворечивостью их литературным данным.

Практическая значимость работы заключается в разработке методики прогнозирования кинетики распада переохлажденного аустенита доэвтектоидных сталей при охлаждении с различной интенсивностью, что позволяет с абсолютной погрешностью менее 5 % рассчитывать количество избыточного феррита и перлита в любой точке сечения изделий. Результаты проведенных исследований можно использовать для промышленного внедрения при разработке технологий термической обработки валков горячей прокатки с применением регулируемого водокапельного охлаждения, что позволит существенно повысить эксплуатационную стойкость валков горячей прокатки и приведет к повышению качества листового и горячекатаного проката на металлургических заводах.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены на международных и всероссийских научно-технических конференциях и школах: IX Международной научно-технической уральской школе-семинаре металловедов-молодых ученых (Екатеринбург, 2008);

Всероссийской молодежной школы-конференции «Современные проблемы металловедения» (Пицунда, 2009); Всероссийской конференции «Физические свойства металлов и сплавов» (Екатеринбург, 2009); X Международной научно-технической уральской школе-семинаре металловедов-молодых ученых (Екатеринбург, 2009); XX Уральской школе металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» (Пермь, 2010); VIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых «КоМУ-2010» (Ижевск, 2010); XI Международной научно-технической уральской школе-семинаре молодых ученых-металловедов (Екатеринбург, 2010); IX Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии» (Санкт-Петербург, 2011); VI Всероссийской молодежной научной конференции «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений» (Тольятти, 2011).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 15 научных работ, из них: 3 статьи в рецензируемых журналах по перечню ВАК; 1 статья в зарубежном журнале; 5 статей в сборниках научных трудов; 6 работ, опубликованных в сборниках тезисов докладов международных и всероссийских конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка использованных источников. Работа изложена на 149 страницах, содержит 119 рисунков, 1 таблицу и библиографический список из 135 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы и определены цели исследования.

В первой главе проанализированы литературные данные о современных методиках моделирования фазовых превращений в сталях с различным уровнем легирования, расчете количества структурных составляющих и кинетики образования вторых фаз при термообработке сталей в изотермических условиях и при непрерывном охлаждении. На основании проведенного анализа сформулированы задачи исследования.

Во второй главе описаны материалы и методы исследования.

Материалами исследования являлись доэвтектоидные стали марок 09Г2С, 18ХГТ, 40Х, 35Х2НМ, 40Х2ГНМ, 45Х5МФ. Выплавка промышленных сталей проводилась в электродуговой печи. Химический состав исследуемых сталей был определен методом спектрального анализа, приведен в таблице 1.

Простой термический анализ проведен на прутках квадратного сечения 15×15 мм и длиной 60 мм. Стали нагревали до 860 °С, время выдержки при температуре аустенитизации составляло 15...20 минут. Последующее охлаждение образцов велось с различной интенсивностью: в воде, в масле,

вентиляторным обдувом, на спокойном воздухе, в закрытом теплоизолированном поддоне, с открытой печью, с печью. В центр прутков зачеканивали термопары типа ХА, сигнал с которых с помощью аналого-цифрового преобразователя I-7017F и компьютера записывался на цифровой носитель.

Торцевая закалка образцов на прокаливаемость была проведена в специальном охлаждающем устройстве в соответствии с ГОСТ 5657-69. Образцы сталей 09Г2С, 18ХГТ, 40Х аустенизировали при 900, 870 и 850 °С соответственно в течение 1 часа.

На расстоянии 10, 20 и 40 мм от охлаждаемого торца в образец на прокаливаемость на глубину 12 мм были зачеканены термопары типа ХА, с помощью которых записывали изменение температуры образца с частотой 2 Гц. Полученные термические траектории охлаждения ряда сечений образца использовали для решения обратной задачи теплопроводности, в ходе которой определены граничные условия при проведении стандартной торцевой заделки. Химический состав исследованных сталей приведен в таблице 1.

Таблица 1 Химический состав исследованных сталей

Марка стали	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	V	P	S
09Г2С	0,09	0,90	1,80	1,15	-	0,01	-	-	0,014	0,017
18ХГТ	0,18	0,38	0,43	1,62	-	0,02	0,02	-	0,020	0,014
35Х2НМ	0,35	0,14	0,40	1,93	0,75	0,26	-	-	0,014	0,020
38Х2ГНМ	0,38	0,29	0,74	2,17	0,82	0,12	-	-	0,016	0,008
40Х	0,40	0,21	0,42	0,20	-	-	-	-	0,018	0,015
45Х5МФ	0,44	0,25	0,35	4,82	-	0,25	-	0,17	0,014	0,017

* остальное - Fe

Дилатометрические исследования кинетики фазовых превращений при термообработке доэвтектоидных сталей в изотермических условиях и при непрерывном охлаждении проведены с помощью дилатометра марки Linseis L78 <<R.I.T.A.>>. Для определения критических точек стали 45Х5МФ A_{c1} и A_{c3} в интервале температур 700...910 °С скорость нагрева составила не более 5 °С/мин, время выдержки при температуре аустенитизации (τ_γ) – 15 минут. Непрерывное охлаждение вели с постоянной скоростью в интервале 0,025...5,000 °С/с. Изотермическая выдержка после аустенитизации проводилась в интервале температур 640...750 °С в течение 10 часов.

Микроструктурные исследования проводили на оптических микроскопах Reichert и Olympus – GX51 при увеличении 150...1000 крат. Травление образцов проводилось 3 % раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Расчет объемной доли структурных составляющих осуществляли с помощью программы «Промышленная система анализа изображений SIAMS – 700», предназначенной для обработки изображений в цифровом формате.

Электронно-микроскопические исследования проводились на растровом микроскопе PHILIPS SEM-535 с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа EDAX Genesis 2000 (ускоряющее напряжение 25 кВ, ток катода 40 мА) при увеличении 500...3000 крат.

Измерения твердости проведены в соответствии с ГОСТ 2999-75 на приборе Роквелла и на приборе Виккерса ТК-7 при нагрузке 1500 и 300 Н соответственно.

Для описания изотермической кинетики ферритного и перлитного превращения использовалось уравнение Колмогорова-Джонсона-Мэйла-Аврами:

$$P = 1 - \exp(-k \cdot \tau^n), \quad (1)$$

где P – объемная доля образованной фазы; τ – время изотермической выдержки, с; k , n – температурно-зависимые параметры уравнения (1).

Расчет кинетики образования продуктов диффузионного распада переохлажденного аустенита исследуемых сталей при непрерывном охлаждении проведен по данным экспериментальных изотермических диаграмм по правилу аддитивности Шейла.

Оценены погрешности результатов экспериментов для перечисленных методик.

В третьей главе приведены результаты отработки методики расчета кинетики перлитного и ферритного превращения при непрерывном охлаждении на примере доэвтектоидных конструкционных сталей с уровнем легирования не более 3 %.

Для сталей 18ХГ, 30ХМ, 45Х по данным известных изотермических диаграмм распада переохлажденного аустенита [1] на основании уравнения (1) установлена немонотонная зависимость температурно-зависимых параметров n и k от температуры изотермического превращения (рисунок 1).

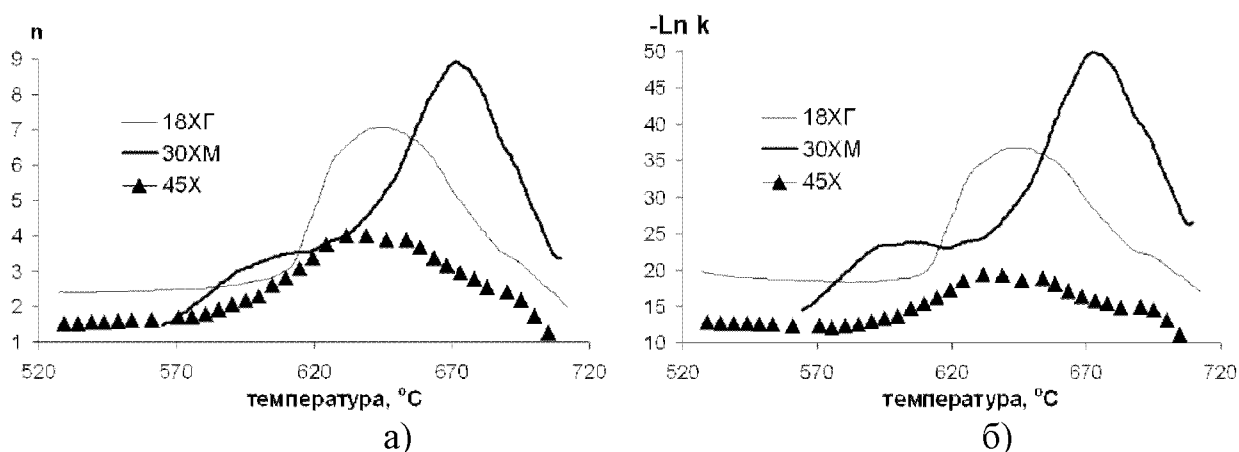


Рисунок 1 Зависимость параметров n (а) и $-\ln k$ (б) уравнения (1) от температуры изотермической выдержки

Отмечено влияние температуры аустенитизации на значение показателя степени n доэвтектоидных сталей 20ХМ и 12Х2Н2. При повышении температуры аустенитизации сталей от 870 °С до 1050 °С наблюдалось значительное уменьшение средних значений параметра n уравнения (1) от температуры изотермической выдержки.

Полученные зависимости показателя степени n_t уравнения (1) от температуры изотермической выдержки для ряда доэвтектоидных конструкционных сталей были аппроксимированы уравнением вида:

$$n_t = n_0 \exp(B(t - t_{n \max})^2) + C \quad (2)$$

где n_0 , B , C – коэффициенты; $t_{n \max}$ – температура изотермической выдержки, при которой коэффициент n_t достигает максимального значения.

На рисунке 2 приведены экспериментальные по данным [1] и расчетные зависимости показателя степени n от температуры изотермической выдержки для стали 18ХГ. Расчетные значения показателя степени n удовлетворительно коррелируют с экспериментальными данными, коэффициент детерминации составляет 0,98.

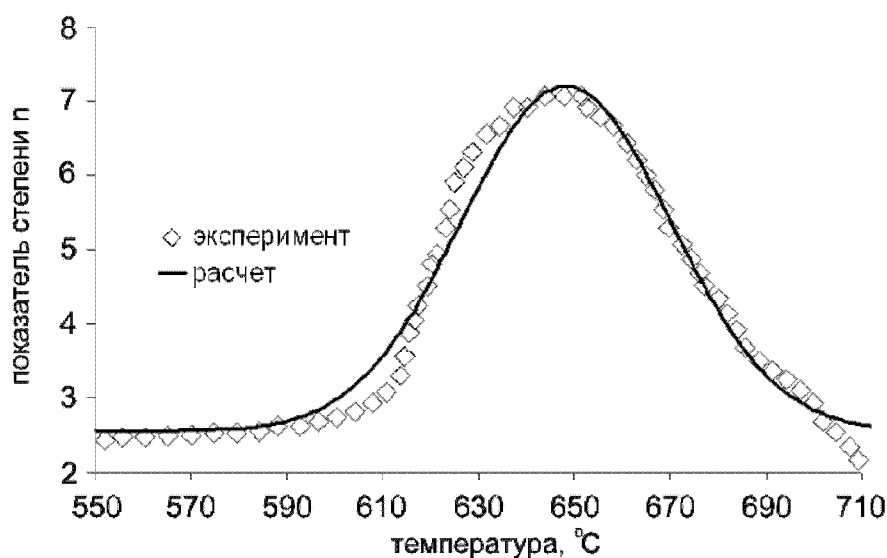


Рисунок 2 Изменение показателя степени n от температуры изотермической выдержки переохлажденного аустенита стали 18ХГ по экспериментальным данным ($\diamond$)[1] и расчетное по уравнению (2) (—)

Обобщая полученные значения коэффициентов уравнения (2) для ряда сталей методом линейной множественной регрессии получены зависимости, связывающие значения коэффициентов n_0 , B , $t_{n \max}$, C уравнения (2) с химическим составом сталей.

Для определения температуры изотермической выдержки, при которой в доэвтектоидных низколегированных сталях будет наблюдаться максимальное значение параметра n , получено уравнение линейной множественной регрессии (3), связывающее $t_{n \max}$ с легированием стали:

$$t_{n \max} = -412 + 210 C + 2446 Si + 129 Mn + 376 Cr - 239 Ni - 284 Mo \quad (3)$$

Для коэффициентов n_0 , B , C определены зависимости:

$$n_0 = 36,8 - 4,1C - 105,8 Si + 1,3 Mn - 11,0 Cr + 9,7 Ni + 13,8 Mo \quad (4)$$

$$B = 0,01 (-2,8 + 0,6 C + 6,6 Si + 0,3 Mn + 0,9 Cr - 0,6 Ni - 0,5 Mo) \quad (5)$$

$$C = 97,2 - 24,2 C - 207,2 Si - 14,9 Mn - 31,0 Cr + 18,4 Ni + 9,0 Mo \quad (6)$$

Уравнения (3)...(6) получены для содержания химических элементов в стали: $C - (0,13...0,44) \%$; $Si - (0,22...0,31) \%$; $Mn - (0,60...1,12) \%$; $Cr - (0,90...1,50) \%$; $Ni - (0...1,55) \%$; $Mo - (0...0,37) \%$.

Зависимость экспериментальных коэффициентов $t_{n \max}$, n_0 , C от рассчитанных по уравнениям (3)...(6) адекватно описывается линейной функцией $y = x$ с коэффициентом детерминации в пределах $0,92...0,98$.

Анализируя экспериментальные зависимости параметров уравнения (1), установлено, что численные значения $\ln k$ и n связаны линейно, коэффициент корреляции составляет $0,98...0,99$. Установленная линейная зависимость $\ln k$ от показателя степени n позволяет рассчитать для любой температуры изотермической выдержки коэффициент k по значению n по уравнению:

$$k = \exp(-(\alpha n + \beta)) \quad (7)$$

Получены уравнения линейной множественной регрессии, связывающие коэффициенты α и β с химическим составом сталей:

$$\alpha = -26,6 + 2,4 C + 61,71 Si + 4,9 Mn + 12,0 Cr - 6,4 Ni + 3,9 Mo \quad (8)$$

$$\beta = 127,9 - 33,8 C - 254,4 Si - 15,0 Mn - 44,9 Cr + 27,8 Ni + 21,1 Mo \quad (9)$$

Зависимость экспериментальных значений коэффициентов α и β от рассчитанных по уравнениям (8) и (9) описывается линейной функцией $y = x$. Коэффициенты детерминации составили $0,99$ и $0,96$ соответственно. Пределы изменения легирования сталей такие же, как для уравнений (3)...(6).

Соответственно, зная коэффициенты k и n , можно определить условное время начала $\tau_{0,01}$ и конца изотермического превращения $\tau_{0,99}$, построить расчетные изотермические диаграммы распада переохлажденного аустенита ряда сталей. На рисунке 3 приведены расчетная и экспериментальная [1] изотермические диаграммы распада переохлажденного аустенита стали 18ХГ.

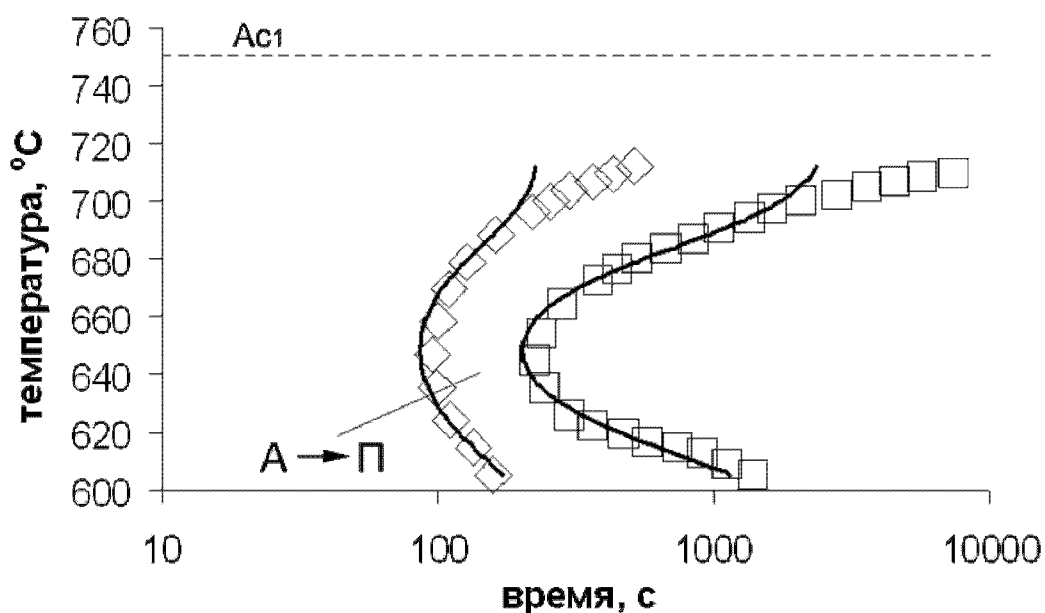


Рисунок 3 Экспериментальная (маркеры) [1] и расчетная (линии) изотермические диаграммы распада переохлажденного аустенита стали 18ХГ в перлитной области

Определение параметров уравнения (1) n и k в виде функции от температуры изотермической выдержки дало возможность, применив правило аддитивности Шейла, аналитически описать кинетику перлитного превращения доэвтектоидных низколегированных сталей в условиях непрерывного охлаждения.

Для сталей 15ХФ, 18ХГ, 35Х, 30ХМ, 45Х проведен расчет количества перлита, образованного при охлаждении по термическим траекториям, для которых изначально была известна доля второй фазы из экспериментальных термокинетических диаграмм распада переохлажденного аустенита [1]. Доля перлита, рассчитанная по правилу аддитивности Шейла, с точностью до 5 % совпала с долей перлита, приведенной на термокинетических диаграммах [1].

Для ряда доэвтектоидных сталей из изотермических диаграмм [1] расчетным путем определены температуры начала и конца перлитного превращения в интервале постоянных скоростей охлаждения 0,001...7,000 °C/с. На рисунке 4 приведены экспериментальная [1] и расчетная термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита стали 35Х в перлитной области.

Зная реальные термические траектории охлаждения, реализованные при построении термокинетической диаграммы и экспериментально полученное количество избыточного феррита, методом итераций была решена обратная задача – определен вид изотермической диаграммы выделения избыточного феррита для конкретной марки стали. При решении задачи предполагалось, что расчетная линия 50 % ферритного превращения лежит в интервале между линиями начала ферритного и конца перлитного превращений.

Для оценки максимально возможного количества феррита $\alpha_{\max}$, образующегося при непрерывном охлаждении в конструкционных доэвтектоидных сталях по известным экспериментальным данным [1] методом наименьших модулей получено уравнение линейной множественной регрессии, связывающее $\alpha_{\max}$ с химическим составом стали:

$$\alpha_{\max} = 129,7 - 140,0 C - 25,0 Mn - 20,0 Cr + 6,0 Ni - 11,0 Mo + 1,5 Si \quad (10)$$

Уравнение (10) получено для содержания химических элементов: C – (0,07...0,5) %; Mn – (0,43...1,98) %; Cr – (0,1...1,95) %; Ni – (0...3,03) %; Mo – (0...0,4) %; Si – (0,2...1,37) %.

Коэффициент корреляции экспериментальных значений с рассчитанными по уравнению (10) составил 0,96 при отношении табличного критерия Фишера к расчетному 45,4.

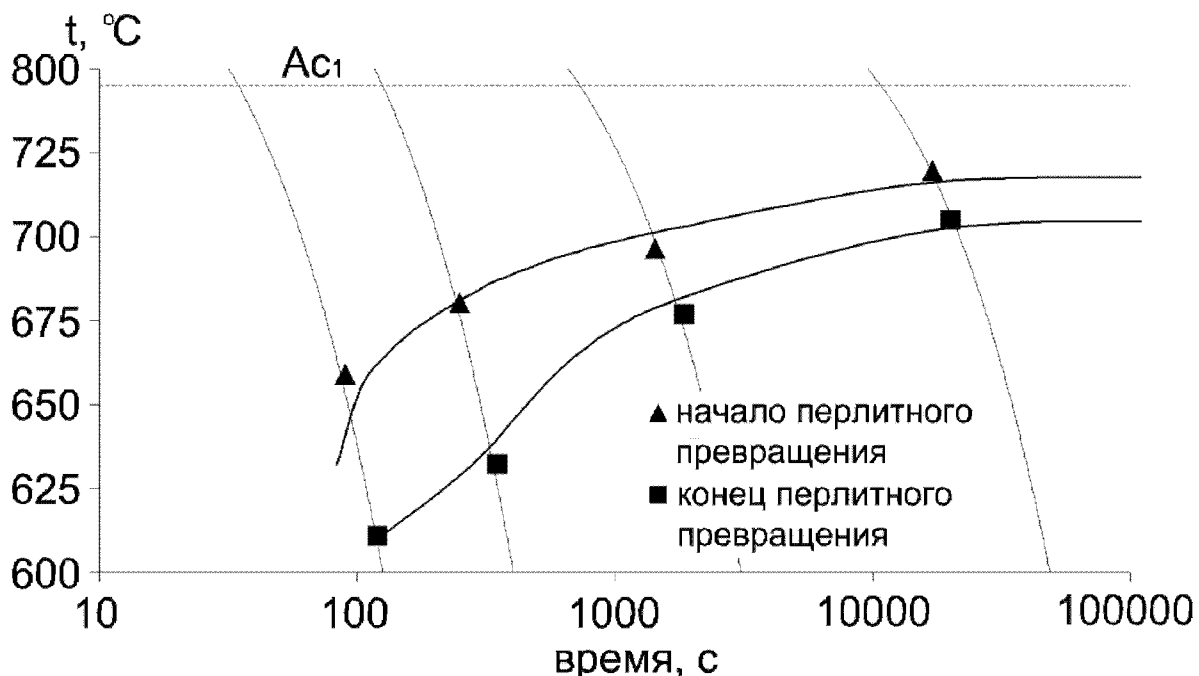


Рисунок 4 Фрагмент термокинетической диаграммы распада переохлажденного аустенита стали 35Х в интервале температур перлитного превращения (▲, ■ – эксперимент [1]; — - расчет)

Для сталей марок 15ХФ, 20ХМ, 50ХФ, 12Х2Н2 по ранее известным термокинетическим диаграммам распада переохлажденного аустенита [1] рассчитаны изотермические диаграммы распада переохлажденного аустенита в области образования феррито-перлитной структуры (рисунок 5).

Зависимость экспериментальной доли избыточного феррита [1], образовавшегося при непрерывном охлаждении стали 15ХФ, от расчетной приведена на рисунке 6.

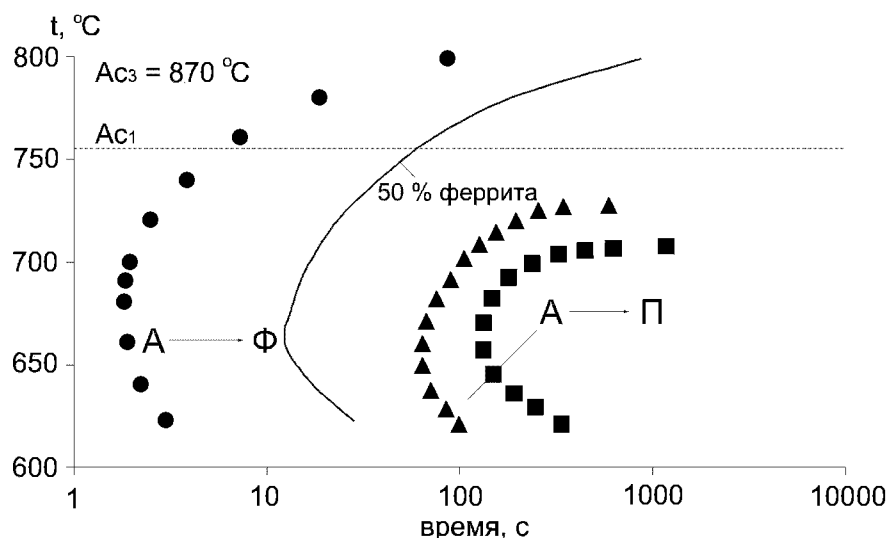


Рисунок 5 Фрагмент экспериментальной (●, ▲, ■) [1] и расчетной (—) изотермической диаграммы распада переохлажденного аустенита стали 15ХФ в феррито-перлитной области

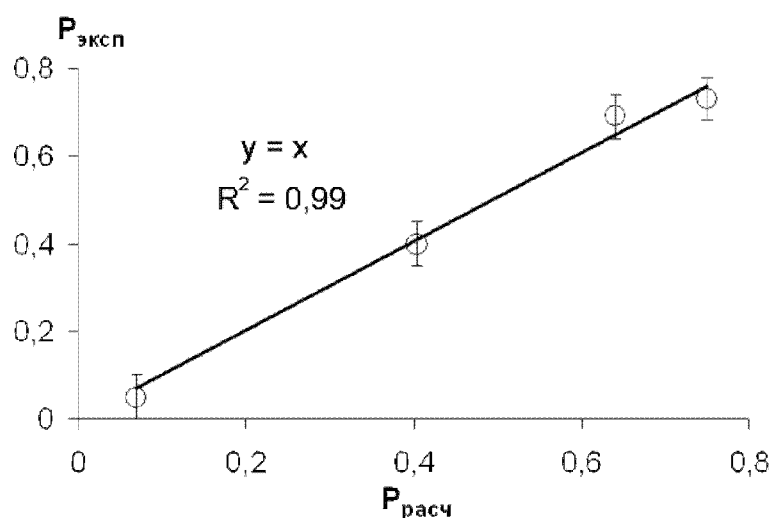


Рисунок 6 Зависимость экспериментальной [1] объемной доли избыточного феррита, образованного при непрерывном охлаждении, от расчетной ; сталь 15ХФ

Четвертая глава посвящена изучению и анализу кинетики ферритного и перлитного превращения при непрерывном охлаждении доэвтектоидных сталей на основании проведенных опытов торцевой закалки, простого термического анализа и дилатометрических экспериментов.

Для получения большего объема исходной информации (термических траекторий и соответствующей им объемной доли феррита и перлита) проведена торцевая закалка образцов на прокаливаемость из сталей 09Г2С, 18ХГТ и 40Х.

В процессе закалки проведено термометрирование образца Джомини в 3 точках на расстоянии 10, 20 и 40 мм от охлаждаемого торца. Полученные

термические траектории охлаждения ряда сечений образца использовали для решения обратной задачи теплопроводности, в ходе которой определены граничные условия, то есть зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности при струйном охлаждении (рисунок 7).

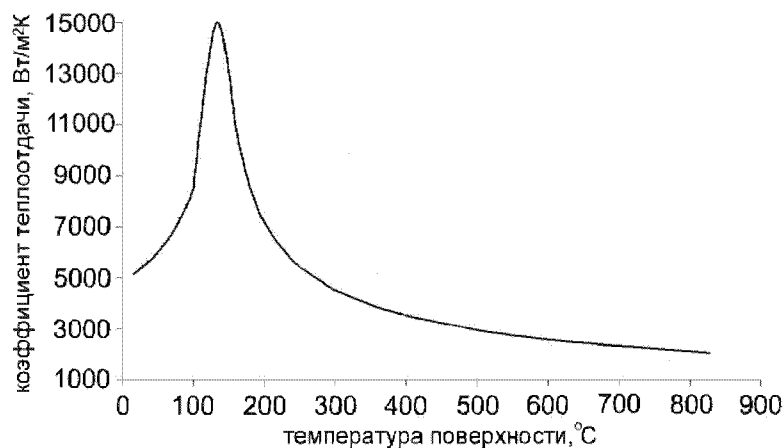


Рисунок 7 Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры охлаждаемого торца образца Джомини при стандартной торцевой закалке

Определение граничных условий позволило рассчитать термические траектории охлаждения в любой точке поперечных сечений образца на прокаливаемость.

На продольном шлифе образца Джомини из стали 18ХГТ металлографически определено изменение количества избыточного феррита, перлита, бейнита и мартенсита в структуре стали 18ХГТ в зависимости от расстояния от охлаждаемого торца (рисунок 8).

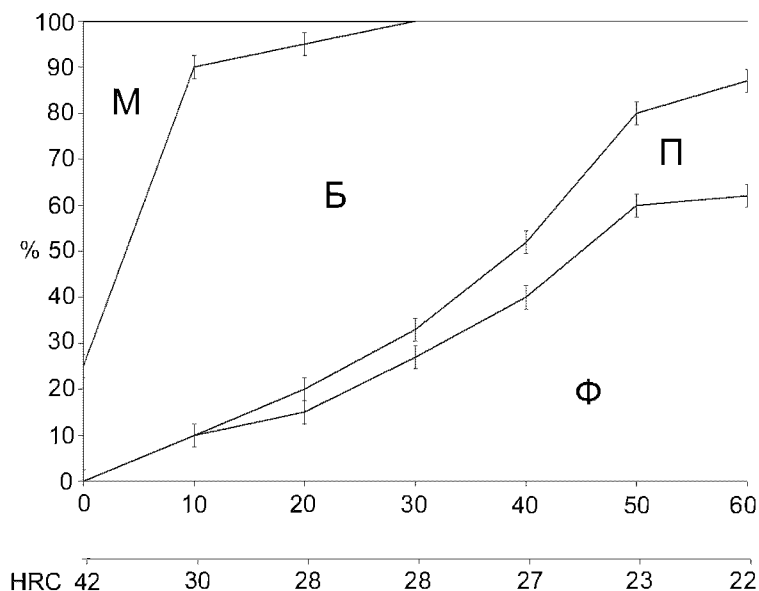


Рисунок 8 Соотношение структурных составляющих и твердости по высоте образца Джомини из стали 18ХГТ после торцевой закалки

Полученные экспериментальные результаты явились исходными данными для расчета изотермической диаграммы распада переохлажденного аустенита стали 18ХГТ в феррито-перлитной области. Определено положение линии 50 % ферритного превращения и скорректированы линия начала образования феррита и линии начала и конца перлитного превращения, в результате чего расчетные значения доли структурных составляющих и экспериментальные совпали с абсолютной погрешностью не более 5 % (рисунок 9).

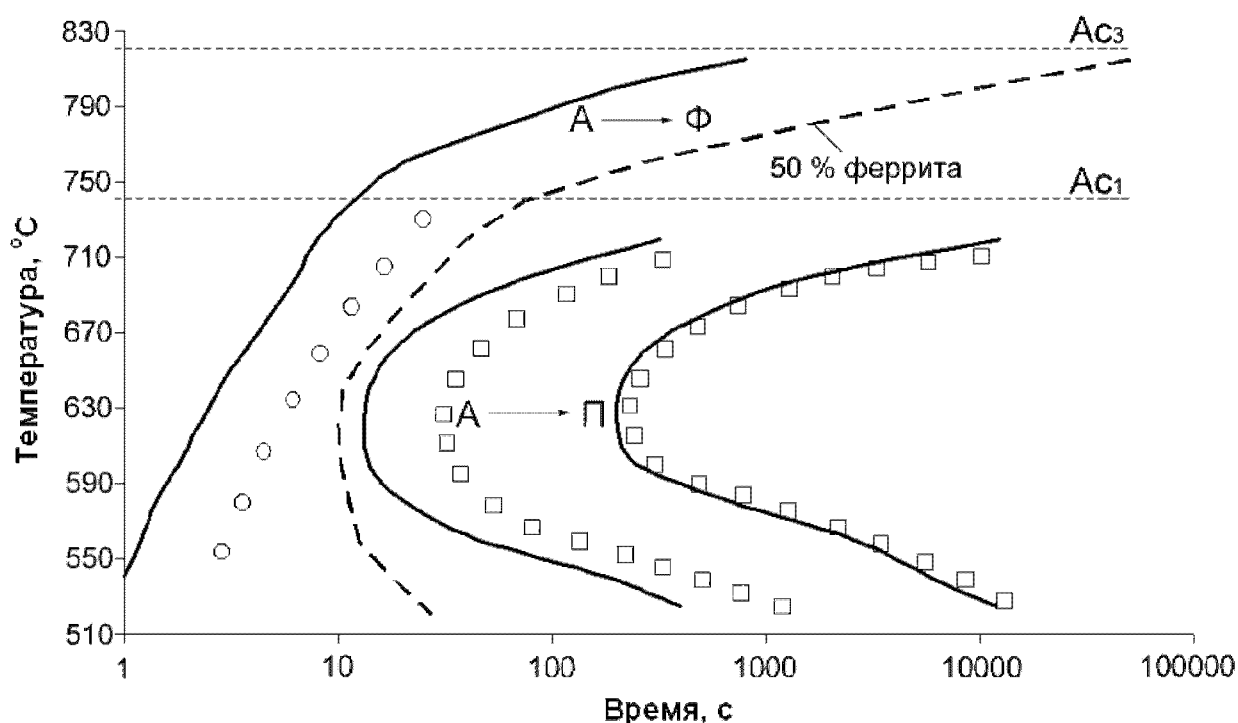


Рисунок 9 Расчетная и экспериментальная изотермические диаграммы распада переохлажденного аустенита стали 18ХГТ (сплошные и штриховая линии – расчет; маркеры – экспериментальные данные [1])

Предложена методика построения термокинетических диаграмм распада переохлажденного аустенита доэвтектоидных сталей методом простого термического анализа. При определении температурно-временных интервалов начала и конца фазовых превращений проводилось численное дифференцирование изменения температуры образца по времени охлаждения. В результате дифференцирования получали зависимости мгновенной скорости охлаждения образца от текущей температуры. Температуры начала и конца превращений фиксировали по резкому уменьшению значений скорости охлаждения вследствие проявления тепловых эффектов.

Методом простого термического анализа с применением компьютерных технологий получена термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита стали 35Х2НМ (рисунок 10).

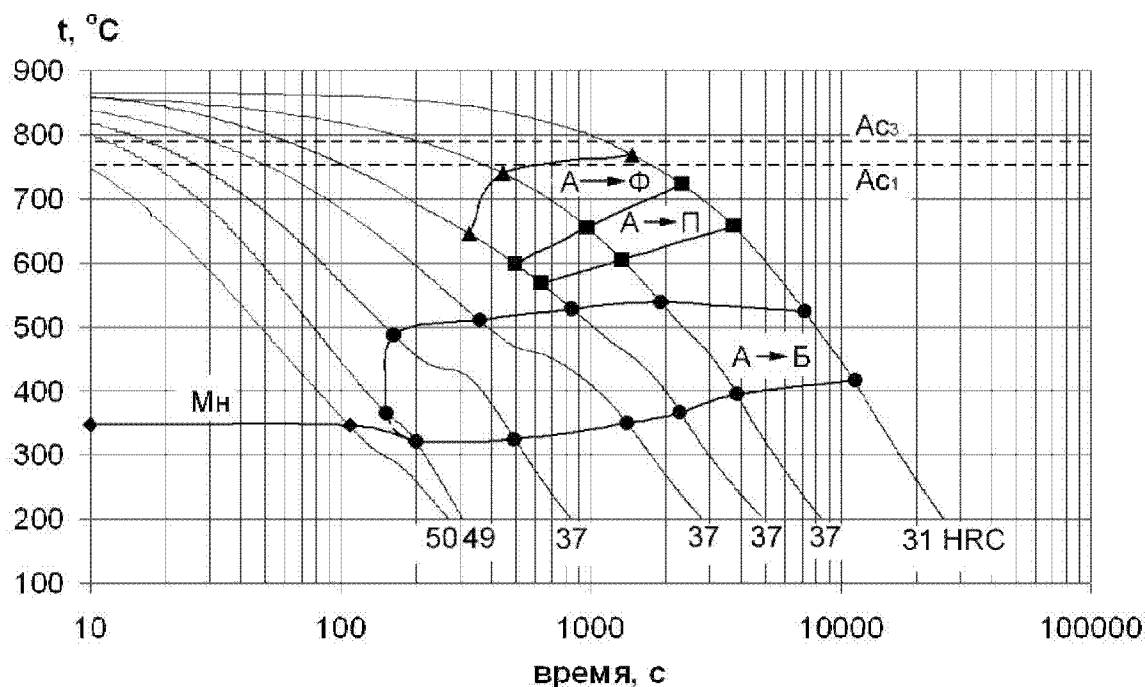


Рисунок 10 Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита стали 35Х2НМ ($t_{\gamma} = 860 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\gamma} = 20 \text{ мин}$), построенная по результатам простого термического анализа

Показано, что методом простого термического анализа можно достаточно точно и быстро определить температурно-временные интервалы протекания фазовых превращений в условиях непрерывного нагрева и охлаждения. Использование современных аналого-цифровых преобразователей позволяет провести одновременно 6...8 экспериментов по определению критических точек сталей на 6...8 образцах, что существенно ускоряет получение информации. Применение данной методики дает возможность в производственных условиях в короткий промежуток времени и с минимальными затратами строить термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита конкретных плавок с целью выбора наиболее рациональной технологии термической обработки конкретных изделий.

В последнее время на машиностроительных заводах, производящих прокатные валки, достаточно широко применяется сталь 45Х5МФ, для которой практически нет информации по кинетике фазовых превращений.

Построена экспериментальная изотермическая диаграмма распада переохлажденного аустенита стали 45Х5МФ в перлитной области. Критические точки A_{c1} и A_{c3} стали 45Х5МФ, составили 775 ± 2 и $811 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Условные линии начала и конца образования перлита соответствуют 1 и 99 % фазы.

Проведено исследование микроструктуры и построена термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита стали 45Х5МФ после охлаждения из аустенитной области с постоянной скоростью в интервале скоростей $0,025 \dots 5 \text{ }^{\circ}\text{C/с}$. Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита стали 45Х5МФ приведена на рисунке 11.

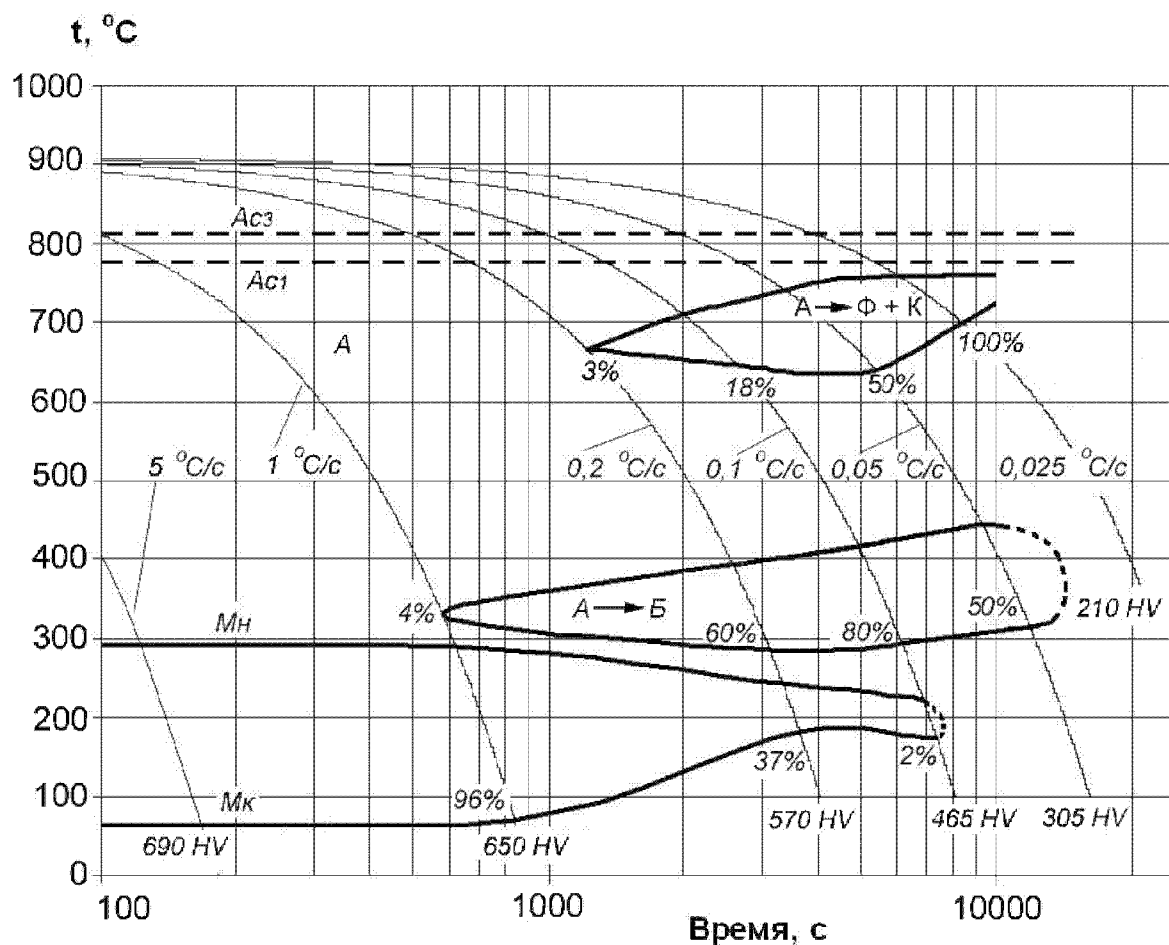


Рисунок 11 Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита стали 45Х5МФ ($t_{\gamma} = 910\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\gamma} = 15\text{ мин}$)

Практически полное подавление перлитного превращения происходит при скорости охлаждения более $0,2\text{ }^{\circ}\text{C/c}$, бейнитного – более $1\text{ }^{\circ}\text{C/c}$. При скорости охлаждения $1...5\text{ }^{\circ}\text{C/c}$ в структуре наблюдается более 95 % мартенсита. Максимальная твердость образцов стали 45Х5МФ наблюдается при охлаждении со скоростью $5\text{ }^{\circ}\text{C/c}$ и составляет $690 \pm 10\text{ HV}$.

По данным дилатометрических исследований получена зависимость доли образующегося перлита от температуры для постоянных скоростей охлаждения в интервале от $0,1$ до $0,025\text{ }^{\circ}\text{C/c}$ (рисунок 12). Это позволило, корректируя положение линий начала и конца перлитного превращения на экспериментальной изотермической диаграмме распада переохлажденного аустенита получить удовлетворительное совпадение расчетной кинетики перлитного превращения с экспериментальной в диапазоне постоянных скоростей охлаждения $0,1...0,025\text{ }^{\circ}\text{C/c}$ (рисунок 13).

Полученная расчетная изотермическая диаграмма образования перлита стали 45Х5МФ является основой для прогнозирования количества перлита, образующегося по сечению изделий из данной стали при их охлаждении в различных средах.

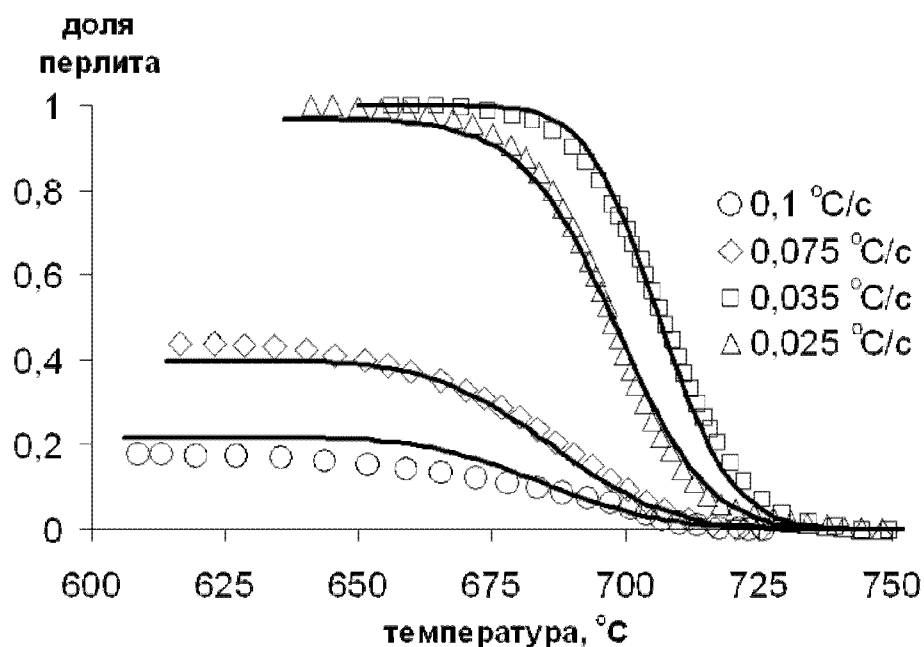


Рисунок 12 Экспериментальная (маркеры) и расчетная (непрерывные кривые) кинетика образования перлита при охлаждении стали 45X5МФ с постоянной скоростью в интервале 0,1...0,025 °C/c ($t_\gamma = 910$ °C, $\tau_\gamma = 15$ мин)

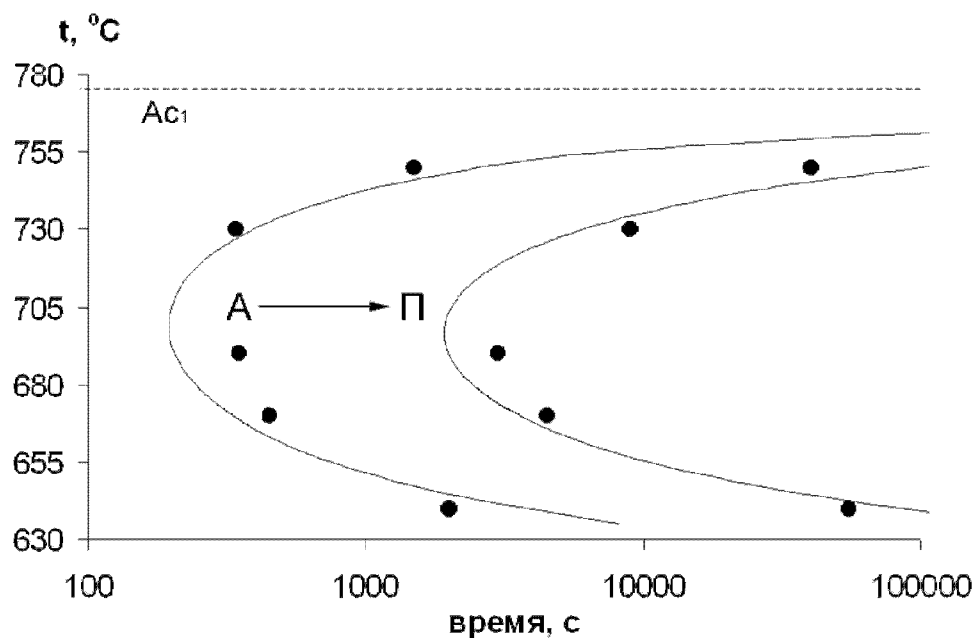


Рисунок 13 Экспериментальная (●) и расчетная (—) изотермические диаграммы распада переохлажденного аустенита стали 45X5МФ ($t_\gamma = 910$ °C, $\tau_\gamma = 15$ мин)

В пятой главе представлены результаты расчетов температурных и структурных полей, образовавшихся при водокапельной закалке по сечению валков горячей прокатки диаметром бочки 300...900 мм из стали 45X5МФ после объемного нагрева.

В настоящее время остро стоит вопрос качества рабочих валков горячей прокатки. Ряд машиностроительных заводов продолжают использовать традиционные режимы окончательной термической обработки рабочих валков горячей прокатки диаметром 300...900 мм: нормализацию и неполный отжиг (отпуск) при температуре 640...680 °С, или улучшение (закалка в масло и высокий отпуск). В первом случае имеет место низкая твердость поверхности бочки, что приводит к быстрому износу валков. Во втором случае происходит резкое увеличение уровня остаточных напряжений. Повышение температуры высокого отпуска только частично решает данную проблему, так как одновременно с остаточными напряжениями существенно падает поверхностная твердость бочки.

Достаточно новым направлением в развитии технологий термоупрочнения крупных прокатных валков является применение водокапельной закалки.

ОАО «Машиностроительный концерн ОРМЕТО-ЮУМЗ» (г. Орск) ведет работы по внедрению подобных технологий для термообработки прокатных валков. Совместно с кафедрой термообработки и физики металлов УрФУ разработано техническое задание на рабочее проектирование специализированной установки водокапельной закалки рабочих валков горячей прокатки производительностью до 10 тыс. тонн валков в год.

При разработке задания на проектирование определены основные технические параметры установки водокапельной закалки: интегральный расход воды и значения коэффициента теплоотдачи. В промышленных условиях на МК «ОРМЕТО-ЮУМЗ» спроектированы и изготовлены стенд для теплотехнических испытаний и термозонд массой 320 кг из стали 45Х5МФ, с помощью которых проведены натурные эксперименты с использованием водокапельного охлаждения. В тело термозонда были зачеканены термопары, горячие спаи термопар находились на расстоянии 15...16 мм от охлаждаемой поверхности.

На основании зависимостей изменения температуры от времени путем численного решения обратной задачи теплопроводности получено изменение коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности при водокапельном охлаждении (рисунок 14).

Используя полученные граничные условия, проведен расчет температурных и структурных полей, формирующихся при водокапельной закалке прокатных валков диаметром бочки 300...900 мм из стали 45Х5МФ после объемного нагрева.

Установлено, что при водокапельном охлаждении прокатных валков диаметром бочки 300 мм происходит практически сквозная закалка на мартенсит. Увеличение диаметра бочки до 900 мм приводит к получению до 80 % мартенсита и 20 % бейнита на глубине 110 мм от поверхности бочки валка. Перлит в количестве 1...2 % появляется на расстоянии 135 мм от поверхности бочки, его количество в осевой зоне валка не превышает 28 %.

Рекомендованы рациональные режимы закалки прокатных валков диаметром бочки 300...900 мм с применением водокапельного охлаждения

(рисунок 15). После проведенной заковки оценочное значение твердости поверхности бочки рабочих валков составило 530...570 НВ, которое значительно превышает значения поверхностной твердости валков после проведения нормализации (310...380 НВ).

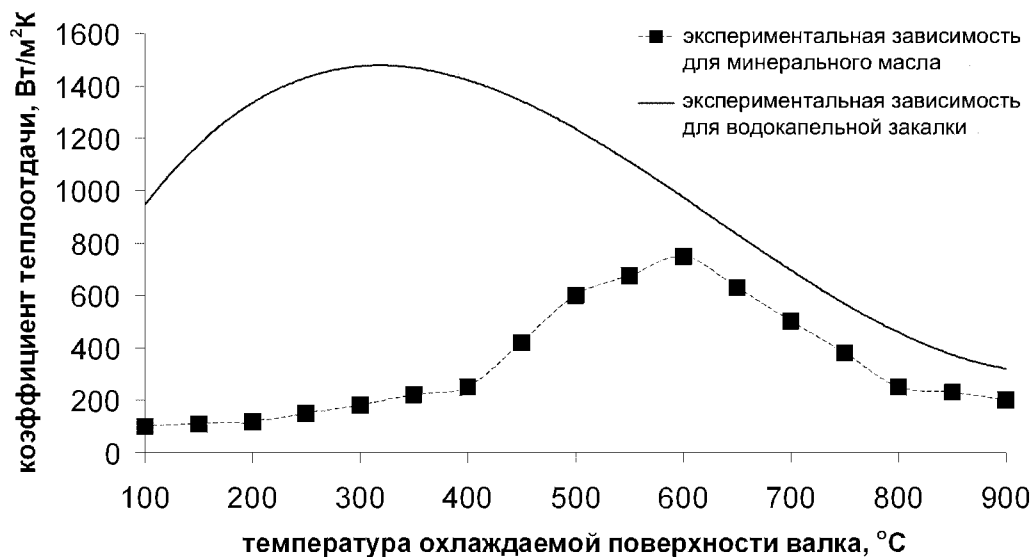


Рисунок 14 Изменение коэффициента теплоотдачи от температуры охлаждаемой поверхности термозонда при водкапельном охлаждении и при заковке в масло типа И20

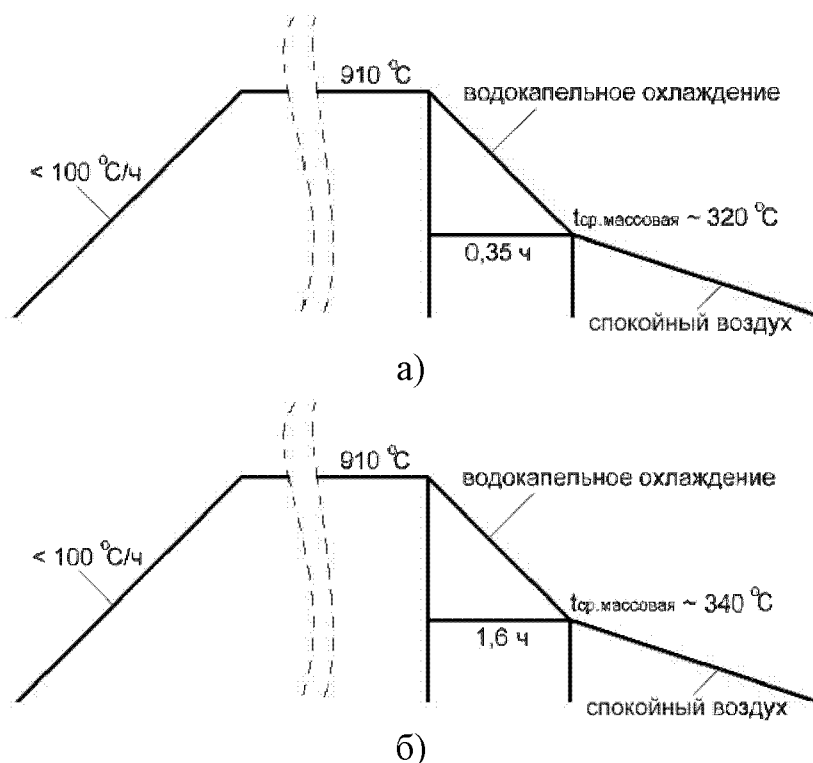


Рисунок 15 Режимы заковки рабочих валков горячей прокатки диаметром бочки 300 мм (а) и 900 мм (б) с применением водкапельного охлаждения

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На основании обобщения известных экспериментальных данных установлена взаимосвязь параметров уравнения Колмогорова-Джонсона-Мэйла-Аврами n и k , предложена модель аналитического расчета изотермических диаграмм распада переохлажденного аустенита в температурном интервале перлитного превращения для ограниченной области изменения химического состава доэвтектоидных конструкционных сталей.

2. Изучена микроструктура и кинетика протекания фазовых превращений при термообработке доэвтектоидных сталей марок 09Г2С, 18ХГТ, 40Х, 35Х2НМ, 38Х2ГНМ, 45Х5МФ в условиях непрерывного охлаждения со скоростью $0,025 \dots 5$ °С/с.

3. Разработан алгоритм расчета кинетики ферритного и перлитного превращения при непрерывном охлаждении доэвтектоидных конструкционных сталей по данным экспериментальных термокинетических и расчетных изотермических диаграмм распада переохлажденного аустенита. Расчетным методом определено положение линии 50 % ферритного превращения на изотермических диаграммах распада переохлажденного аустенита, что позволяет прогнозировать объемную долю феррита и перлита, образовавшихся при непрерывном охлаждении сталей с абсолютной погрешностью не более 5 %.

4. Методом простого термического анализа с использованием компьютерных технологий построены термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита сталей 35Х2НМ и 40Х2ГНМ при охлаждении с переменной скоростью в интервале $0,02 \dots 1,5$ °С/с. Дилатометрическим методом построены изотермическая и термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита промышленной стали 45Х5МФ.

5. Оработана расчетно-экспериментальная методика, позволяющая по данным опытов торцевой закалки моделировать кинетику образования феррита и перлита при непрерывном охлаждении. Решением обратной задачи теплопроводности определены граничные условия охлаждения при стандартной торцевой закалке.

6. Предложены рациональные режимы закалки рабочих валков горячей прокатки диаметром 300...900 мм из стали 45Х5МФ с использованием водокапельного охлаждения, позволяющие получить глубину упрочненного слоя до 135...150 мм.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

В рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. Ануфриев Н.П., Майсурадзе М.В., Юдин Ю.В. Численное моделирование структурных превращений в доэвтектоидных низколегированных сталях // Металловедение и термическая обработка металлов. 2011. №4. С. 40-45.
2. Ануфриев Н.П., Каманцев С.В., Майсурадзе М.В. Исследование фазовых и структурных превращений стали 45Х5МФ при непрерывном охлаждении // Известия Вузов. Черная Metallургия. 2011. №6. С. 54-55.
3. Ануфриев Н.П., Майсурадзе М.В., Юдин Ю.В. Особенности формирования микроструктуры стали 45Х5МФ для производства валков горячей прокатки // Сталь. 2011. №10. С. 61-64.

В прочих изданиях:

4. Anufriev N.P., Maisuradze M.V., Yudin Yu.V. Numerical simulation of structural transformations in hypoeutectoid low-alloy steels // Metal Science and Heat Treatment. 2011. V. 53. № 3-4. P. 189-194.
5. Ануфриев Н.П., Юдин Ю.В. Влияние интенсивности охлаждения валков диаметром от 400 до 1200 мм из стали 45Х5МФ на кинетику распада переохлажденного аустенита // Материалы докладов VI Всероссийской молодежной научной конференции «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений»: Тольятти: ТГУ, 2011. С. 8-12.
6. Ануфриев Н.П., Майсурадзе М.В. Изучение кинетики распада переохлажденного аустенита стали 25ХГМ при непрерывном охлаждении // Труды IX Международной школы-конференции металлосведов молодых ученых. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. С. 67-69.
7. Ануфриев Н.П., Галушин В.А., Майсурадзе М.В. Определение критических точек конструкционных сталей при нагреве-охлаждении методом термического анализа // Труды X Международной научно-технической уральской школы-семинара металлосведов-молдых ученых. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. С. 8-10.
8. Ануфриев Н.П., Горлова Е.В., Майсурадзе М.В. Численное моделирование диффузионного распада метастабильного аустенита доэвтектоидных конструкционных сталей при произвольном охлаждении // Труды XI Международной научно-технической Уральской школы-семинара молодых ученых-металлосведов: сборник статей. Екатеринбург: УрФУ, 2010. С. 60-62.
9. Ануфриев Н.П., Майсурадзе М.В., Юдин Ю.В. Исследование гидравлических характеристик устройства для водокапельной закалки валков горячей прокатки // Труды XI Международной научно-технической Уральской школы-семинара молодых ученых-металлосведов: сборник статей. Екатеринбург: УрФУ, 2010. С. 259-261.
10. Ануфриев Н.П. Исследование влияния скорости охлаждения на кинетику перлитного превращения // Труды Всероссийской школы-конференции «Современные проблемы металлосведения». Пицунда: МИСиС, 2009. С. 95-96.

11. Ануфриев Н.П., Майсурадзе М.В., Юдин Ю.В. Моделирование кинетики ферритного превращения в стали 40Х на примере торцевой закалки образца на прокаливаемость // Труды VIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых «КоМУ-2010»: сборник тезисов докладов. Ижевск: ФТИ УРО РАН, УдГУ, ИжГТУ, 2010. С. 19-20.
12. Ануфриев Н.П., Майсурадзе М.В., Хмелева Ю.А. Аналитическое описание изотермических диаграмм распада переохлажденного аустенита в температурно-временном интервале перлитного превращения // Труды международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии (СММТ-2011)». СПб: Издательство Политехнического Университета, 2011. С. 300-301.
13. Ануфриев Н.П., Майсурадзе М.В. Определение параметров уравнения Колмогорова-Джонсона-Мэйла-Аврами для ферритного и перлитного превращения стали 25ХГМ // Труды Всероссийской конференции «Физические свойства металлов и сплавов»: сборник тезисов докладов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. С. 240.
14. Ануфриев Н.П., Горлова Е.В., Майсурадзе М.В. Оценка доли структурных составляющих при произвольном охлаждении доэвтектоидных низколегированных сталей // Труды XX Уральской школы металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов»: сборник материалов. Пермь-Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. С. 76.
15. Ануфриев Н.П., Майсурадзе М.В., Юдин Ю.В. Расчетно-экспериментальное исследование закалочного охлаждения конструкционных сталей водокапельными форсунками // Труды XX Уральской школы металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов»: сборник материалов. Пермь-Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. С. 91.

Список цитируемой литературы:

1. Попова Л.Е., Попов А.А. Диаграммы превращения аустенита в сталях и β -раствора в сплавах титана: справочник термиста. // М.: Металлургия. 1991. 503 с.

Плоская печать

Формат 60 x 84 1/16
Тираж 120

Бумага писчая
Заказ № 516

Ризография НИЧ УрФУ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19