

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу

Куклиной Александры Александровны

на тему: «Расчетно-экспериментальная кинетика бейнитного превращения среднеуглеродистых конструкционных сталей в изотермических условиях и при непрерывном охлаждении», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

### **Актуальность темы диссертации**

В настоящее время на предприятиях металлургической и машиностроительной отраслей для производства изделий ответственного назначения все шире используются стали бейнитного класса, которые обладают повышенным комплексом механических и эксплуатационных свойств при сравнительно экономном легировании. В связи с этим детальное изучение процессов, протекающих при бейнитном превращении аустенита, а также влияние различных факторов на кинетику бейнитного превращения, являются актуальными вопросами. Создание адекватной методики оценки структурного состояния сталей бейнитного класса при их непрерывном охлаждении позволяет существенно сократить временные и материальные затраты на проведение экспериментальных исследований.

Стремительное развитие цифровых технологий позволяет, используя на более высоком уровне методы математического моделирования, разрабатывать рациональные режимы термической обработки изделий различного назначения, в том числе из перспективных марок сталей. Таким образом, тема диссертационной работы А.А. Куклиной, связанная с исследованием кинетики бейнитного превращения в конструкционных сталях в изотермических условиях и при непрерывном охлаждении, несомненно, актуальна.

### **Структура, объем и содержание диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, общих выводов по работе, изложена на 125 страницах машинописного текста,

включающего 90 рисунков, 3 таблицы, список использованных источников из 150 наименований отечественных и зарубежных авторов.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, показана степень разработанности тематики исследования, сформулирована цель работы, определены задачи исследования, раскрыта научная новизна, показана теоретическая и практическая значимость работы, описана методология и методы исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, оценка достоверности результатов исследования, апробация работы и публикации.

**В первой главе** представлен подробный обзор работ, посвящённых изучению и расчетно-экспериментальному моделированию кинетики бейнитного превращения в сталях при термической обработке в изотермических условиях и при непрерывном охлаждении. Отдельное внимание уделено методам изучения тонкой структуры бейнита. На основе анализа литературных источников сформулированы цель и задачи исследования.

**Во второй главе** приведены химические составы исследуемых сталей, операции и режимы лабораторной термической обработки. Описаны использованные в работе методики исследований: микроструктурные (оптическая микроскопия, растровая электронная микроскопия, в том числе, с анализом картин дифракции обратно рассеянных электронов, атомно-силовая микроскопия), дилатометрия, дюрометрические исследования, определение прокаливаемости, рентгеноструктурные исследования. Показаны подходы, использованные при аналитическом описании кинетики бейнитного превращения и статистической обработке экспериментальных данных.

**В третьей главе** представлены результаты исследований микроструктуры конструкционных сталей марок 50ХМФА, 25Г2С2Н2МА, 38ХН3МФА, 20Х2Г2СНМА с использованием оптической и растровой электронной микроскопии. Установлено, что образование бейнита происходит преимущественно в виде пластин. С увеличением времени изотермической выдержки растущие пластины сталкиваются и образуют сложную каркасную объемную структуру.

Результаты выполненных металлографических и дилатометрических исследований позволили построить изотермические диаграммы распада

переохлажденного аустенита исследуемых сталей. Предложен ряд аналитических функций для описания кинетики распада переохлажденного аустенита в бейнитной области при изотермических условиях, которые по сравнению с ранее применяемым уравнением Колмогорова-Джонсона-Мейла-Аврами обладают существенно большей адекватностью с экспериментальными данными. Наилучшим образом описывает экспериментальную кинетику бейнитного превращения предложенная логистическая функция.

По результатам дилатометрических исследований построены термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита перспективных конструкционных сталей марок 50ХМФА, 25Г2С2Н2МА. Предложен и реализован алгоритм расчета кинетики бейнитного превращения при непрерывном охлаждении, который показал удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

**В четвертой главе** приведены результаты электронно-микроскопических исследований структуры стали марки 25Г2С2Н2МА, которые позволили расширить представление об особенностях строения бейнита. Используя методику растровой электронной микроскопии, удалось обнаружить наличие отдельных субпластин бейнита. При этом разнонаправленные колонии бейнита разделены большеугловыми границами. Применение методики атомно-силовой микроскопии позволило определить, что толщина субпластин зависит от температуры образования бейнита: с повышением температуры от 330 до 450 °С толщина субпластин увеличивается от  $20 \pm 2$  до  $75 \pm 5$  нм.

Предложена методика визуализации приповерхностного слоя образцов исследуемой стали по результатам анализа информации, полученной методом дифракции обратно рассеянных электронов. При этом прослеживается сходство рельефа приповерхностного слоя образцов, полученного по результатам дифракции обратно рассеянных электронов с аналогичными результатами, полученными с помощью атомно-силовой и растровой электронной микроскопии.

**В пятой главе** представлены результаты разработки программного алгоритма имитационного моделирования фазового перехода в твердом состоянии, позволяющего оценить влияние исходного состояния системы на кинетику образования второй фазы. Установлено, что начальное расположение зародышевых

центров оказывает существенное влияние на параметры  $k$  и  $n$  уравнения Колмогорова-Джонсона-Мейла-Аврами.

Результаты имитационного моделирования позволяют судить, что кинетика фазового превращения для варианта с неравномерным расположением зародышевых ячеек при скорости зарождения, равной нулю, подобна кинетике изотермического бейнитного превращения аустенита в промышленных легированных сталях. Это можно объяснить тем, что особенности процесса фазового превращения могут быть связаны с неравномерным распределением зародышевых центров в объеме металла вследствие химической или структурной неоднородности стали.

**В шестой главе** представлены результаты испытаний механических свойств образцов из стали марки 25Г2С2Н2МА, используемой для изготовления буровых коронок. Приведены результаты прочностных и пластических свойств материала после используемого в промышленных условиях режима термической обработки и разработанных режимов с использованием изотермической закалки в области температур бейнитного превращения.

После каждой главы и в целом по работе сделаны выводы.

#### **Степень обоснованности положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Актуальность и постановка задач исследования обоснованы детальным обзором отечественных и зарубежных источников научно технической информации и подробным анализом современного состояния и тенденций развития методологии фазовых и структурных превращений, протекающих в сталях.

Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации аргументированы и обоснованы:

- применением фундаментальных положений и методов исследования фазовых и структурных превращений в сталях;
- большим комплексом применяемых методик исследований, многие из которых оригинальные, особенно для исследования тонкой структуры бейнита;
- разработкой методики аналитического описания кинетики бейнитного превращения в изотермических условиях и при непрерывном охлаждении;
- нацеленностью работы на практический результат, опробованием разработанного рационального режима термической обработки реальных изделий.

## **Методы исследования и достоверность научных результатов**

Для решения поставленных задач при выполнении работы использовано большое количество разнообразных методик исследований: микроструктурные (оптическая микроскопия, растровая электронная микроскопия, в том числе, с анализом картин дифракции обратно рассеянных электронов, атомно-силовая микроскопия), дилатометрия, дюрOMETрические исследования, определение прокаливаемости, рентгеноструктурные исследования, инструментальные методы измерения механических свойств. Показаны подходы, использованные при аналитическом описании кинетики бейнитного превращения и статистической обработке экспериментальных данных. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений.

## **Новизна результатов работы**

К основным результатам диссертации, обладающими научной новизной можно отнести следующие:

- на основе изучения кинетики изотермического бейнитного превращения перспективных конструкционных сталей 50ХМФА, 25Г2С2Н2МА, 20Х2Г2СНМА и применяемой стали 38ХНЗМФ, обосновано применение логистической функции для аналитического описания бейнитного превращения;
- построены изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита перспективных сталей 50ХМФА и 25Г2С2Н2МА;
- методом атомно-силовой микроскопии подтверждено наличие наноразмерных субпластин бейнита, а также выявлена зависимость межпластиночного расстояния от температуры изотермического превращения;
- разработана методика наноразмерного исследования приповерхностной зоны образцов с бейнитной структурой по результатам метода дифракции обратно рассеянных электронов. Полученные данные аналогичны результатам атомно-силовой и растровой электронной микроскопии.
- методами компьютерного моделирования исследована кинетика образования второй фазы, отражающая особенности бейнитного превращения.

## **Практическая значимость**

Предложено аналитическое описание кинетики бейнитного превращения в изотермических условиях, которое позволяет прогнозировать получаемую структуру конструкционных сталей и их механические свойства, дает возможность применить научно-обоснованный подход при разработке рациональных режимов термической обработки изделий ответственного назначения

## Апробация работы и публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 9 печатных работах в рецензируемых научных журналах, в том числе в 5 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК России.

Результаты исследований доложены и обсуждены на российских и международных научно-технических конференциях и семинарах.

### Замечания по работе

1 Из названия диссертационной работы следует, что объектом исследования являются среднеуглеродистые конструкционные стали. Однако сталь марки 20Х2Г2СНМА правильнее отнести к низкоуглеродистым (содержание углерода до 0,25 масс. %).

2 В главе 2, разделе ДюрOMETрические исследования указано, что «Измерения твердости были проведены в соответствии с ГОСТ 2999-75 на приборах Роквелла и Виккерса ТК-7, CSM instrument Micro-Hardness Tester, твердомере ПМТ- 3...». При этом ГОСТ 2999-75 регламентирует проведение измерений только по методу Виккерса.

3 Замечания к иллюстративному материалу:

- в случае, если подразумевается сопоставление результатов исследований, представленных в виде графиков (например, рис. 3.9 а, б, в, г), желательно приводить их в одном масштабе;

- по тексту (стр. 99, 100) двум рисункам присвоен номер 5.9.

4 Из выводов по главе 6 следует, что применение рекомендованного (перспективного) режима термической обработки образцов из стали марки 25Г2С2Н2МА, а именно, изотермической выдержки при температуре 370°C, «...приводит к повышению ударной вязкости в 4 раза, а прочностные и пластические свойства остаются на прежнем уровне относительно применяемого режима термической обработки: временное сопротивление разрыву  $\sigma_b$  около 1200 МПа, предела текучести  $\sigma_{0,2}$  1100 МПа, относительное удлинение  $\delta$  17 %; относительное сужение  $\psi$  37 %». Это не соответствует данным приведенным ранее (стр. 103 и рис. 6.3) – для указанного режима изотермической выдержки значение предела текучести на уровне 850 МПа.

Отмеченные замечания имеют частный характер, не снижают научную и практическую значимость диссертационной работы и не влияют на ее положительную оценку.

## Заключение

Диссертационная работа, подготовленная А.А. Куклиной представляет законченную научно-квалификационную работу, которая выполнена на актуальную тему и позволяет применить научно-обоснованный подход при разработке рациональных режимов термической обработки изделий ответственного назначения, в том числе из перспективных марок сталей. Результаты научных исследований, выполненных автором, имеют теоретическую и практическую значимость. Аналитическое описание кинетики бейнитного превращения в изотермических условиях, позволяет прогнозировать получаемую структуру конструкционных сталей и их механические свойства. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Материалы диссертации опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК России. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» и отвечает критериям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор Куклина Александра Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Официальный оппонент

канд. техн. наук, старший научный сотрудник,  
директор Екатеринбургского филиала института,  
заведующий лабораторией материаловедения  
30 ноября 2018 г.

И.Н. Веселов

Веселов Игорь Николаевич кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник

ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной  
промышленности», Екатеринбургский филиал  
620026, г. Екатеринбург, ул. Р. Люксембург, 51,  
тел. +7(343) 310 33 00, e-mail: [VeselovIN@tmk-group.com](mailto:VeselovIN@tmk-group.com)

*Подпись И.Н. Веселова заверяю.*  
*С.М. Гбитюков*  
*Директора Екатеринбургского филиала ОАО «РосНИИТ»*