

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию работу

Куклиной Александры Александровны

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

В настоящее время на металлургических предприятиях растёт потребность в применении сталей бейнитного класса, которые обладают повышенным комплексом механических и эксплуатационных свойств и при экономном легировании имеют пониженную стоимость. В связи с этим детальное изучение процессов, протекающих при бейнитном превращении аустенита, а также влияние различных факторов на кинетику бейнитного превращения, являются актуальными вопросами современного металловедения. Создание адекватной методики оценки структурного состояния сталей бейнитного класса при их непрерывном охлаждении существенно сокращает материальные затраты на опытные работы в цеховых условиях и способствует повышению качества выпускаемой продукции.

Со стремительным развитием вычислительной техники эта задача становится ещё более актуальной, так как в сочетании с методами численного моделирования это дает возможность разрабатывать рациональные режимы термической обработки различных изделий различного назначения, в том числе буровых коронок. В силу всего сказанного диссертационная работа А. А. Куклиной, посвящённая исследованию кинетики бейнитного превращения в конструкционных сталях в изотермических условиях и при непрерывном охлаждении, несомненно, актуальна.

Диссертация А. А. Куклиной состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы.

Во *введении* автор обосновывает актуальность темы исследования, формулирует его цель и основные задачи, описывает научную новизну и практическую значимость полученных результатов, приводит выносимые на защиту положения.

В *первой* главе даётся подробный обзор существующих работ, посвящённых аналитическому описанию кинетики бейнитного превращения. Отдельное внимание автор уделил подходам к описанию связи кинетики превращения при постоянной температуре и в условиях непрерывного охлаждения. Подробно описаны методы изучения тонкой структуры бейнита. На основе анализа литературных источников определена постановка задач исследования.

Работа А.А. Куклиной включает в себя заметное количество экспериментов, во *второй* главе диссертации описываются использованные экспериментальные методики, включающие дюрOMETрический анализ, дилатометрию, микроструктурные, рентгеноструктурные исследования.

Предметом *третьей* главы является ряд аналитических функций, описывающих кинетику превращения аустенита в бейнитной области в изотермических условиях и при непрерывном охлаждении. Автор исследовал кинетику бейнитного превращения конструкционных сталей 50ХМФА, 25Г2С2Н2МА, 20Х2Г2СНМА, 38ХНЗМФ, в результате чего были построены изотермические и термокинетические диаграммы. Установлено, что для изучения кинетики бейнитного превращения наилучшим образом реализуются непрерывные методы исследования, существенно уменьшающие абсолютную экспериментальную ошибку опытов. Далее, Куклина А. А. проводит аналитическое описание экспериментальное кинетики превращения аустенита в области бейнитного превращения. Выяснилось, что логистическая функция наилучшим образом описывает экспериментальную кинетику. Автором выявлена температурная

зависимость коэффициентов логистического уравнения  $a$  и  $b$ . В работе приведен алгоритм расчета кинетики бейнитного превращения при непрерывном охлаждении, в основу которого положено логистическое уравнение. К сожалению, методика описана в диссертации не вполне полно, однако достигнутый результат весьма важен в области практического применения.

*Четвертая* глава диссертации посвящена подробному исследованию наноразмерных особенностей строения бейнита. Используются современные методы и инструменты - растровый электронный микроскоп Zeiss Auriga Cross Beam с программно-аппаратным комплексом регистрации и анализа картин дифракции обратно-рассеянных электронов (ДОРЭ) NordlysHKLChannel5® и атомно-силовой микроскоп «ФемтоСкан».

Электронно-микроскопические исследования структуры стали 25Г2С2Н2МА после трехчасовой изотермической выдержки при 370 °С подтвердили наличие отдельных субпластин, расстояние между которыми составляет от 20 до 50 нм.

Методом атомно-силовой микроскопии выявлено наличие субпластин, составляющих бейнитную структуру, толщина субпластин явно зависит от температуры образования бейнита.

Предложена методика визуализации приповерхностного слоя по данным метода EBSD. При этом прослеживается визуальное сходство рельефа приповерхностной зоны по данным EBSD с рельефом поверхности бейнита стали 25Г2С2Н2МА, полученным с помощью атомно-силовой и электронной микроскопии.

В *пятой* главе с помощью разработанного программного алгоритма имитационного моделирования фазового перехода в твердом состоянии, оценено влияние первоначального состояния системы на кинетику образования второй фазы. Установлено, что начальное расположение зародышевых центров оказывает определяющее влияние на параметры  $k$  и  $n$  уравнения КДМА. Например, при расположении зародышевых ячеек

равномерно по объему куба, на ребрах, гранях куба значение показателя степени  $n$  изменяется в пределах  $2,3 \dots 3$  и остается постоянным во времени, а при наличии неравномерного заполнения зародышевых ячеек по объему куба наблюдается существенное изменение значения параметра  $n$  уравнения КДМА во времени.

Подтверждено, что кинетика фазового превращения для варианта с неравномерным расположением зародышевых ячеек при нулевой скорости зарождения, имеет близкое сходство с кинетикой изотермического бейнитного превращения аустенита в промышленных легированных сталях. Это свидетельствует о том, что особенности процесса фазового превращения могут быть связаны с неравномерным распределением зародышевых ячеек в объеме металла вследствие химической или структурной неоднородности стали.

Наконец, в *шестой* главе приводятся результаты механических испытаний после применяемой (улучшение) и перспективной технологии термической обработки промышленных буровых коронок. Предложено в качестве перспективного режима термической обработки ввести изотермическую обработку после аустенитизации в области температур бейнитного превращения, которая позволила повысить ударную вязкость в примерно  $3 \dots 4$  раза при сохранении комплекса прочностных свойств.

*Заключение* диссертации содержит основные выводы по работе. В нем, помимо всего, отражены результаты компьютерного моделирования, которое имеет перспективное направление дальнейшего развития исследования

В целом работа А.А. Куклиной представляет собой достаточно интересное законченное исследование, в котором решена задача выявления особенностей формирования бейнитной структуры в среднеуглеродистых конструкционных сталях для различных условий термической обработки.

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждается использованием большого набора современных методов



эмпирических исследований и согласием с имеющимися в литературе данными.

Практическая значимость работы обусловлена тем, что её результаты можно использовать для оптимизации режимов термической обработки различных изделий в промышленности, что продемонстрировано автором на конкретном примере.

Результаты работы опубликованы в девяти статьях в изданиях, входящих в список ВАК, и доложены на представительном ряде всероссийских и международных конференций. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

В качестве замечаний по работе можно высказать следующее.

1. Какие допущения и ограничения использовались при осуществлении имитационного моделирования, какие алгоритмы и программы применялись?
2. Обоснованно ли считать, что результаты имитационного моделирования адекватно коррелируют с процессами, протекающими в реальных сталях при бейнитном превращении, основываясь только на разности между экспериментальной и расчетной кинетикой образования бейнита?
3. Как известно, мартенсит и нижний бейнит в низкоуглеродистых сталях обладают весьма схожим металлографическим строением даже при большом увеличении, получаемом методами электронной микроскопии. В таком случае, каким образом была определена доля бейнита в структуре сталей 25Г2С2Н2МА и 20Х2Г2СНМА при изотермической выдержке ниже температуры начала мартенситного превращения?
4. Имеется какое-либо экспериментальное подтверждение тому, что экстремум на температурной зависимости коэффициентов  $a$  и  $b$  логистической функции отражает изменение морфологии образующейся бейнитной структуры?
5. С чем связано то, что в стали 25Г2С2Н2МА происходит выделение карбидов при бейнитном превращении уже после 300 с выдержки, а в стали

