

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу Созыкиной Анны Сергеевны "Моделирование превращений при аустенитизации и закалке и прогнозирование твердости высокохромистых сталей и чугунов на основе термодинамических и кинетических расчетов", представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 — "Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов"

### **1. Актуальность темы работы**

Повышение эксплуатационной стойкости сплавов было и остаётся одной из важнейших научно-технических задач, определяющих развитие новых и специальных отраслей машиностроения, которые предъявляют высокие требования к выбору материала рабочих органов машин и механизмов. Известно, что 80-90 % машин преждевременно выходят из строя не вследствие поломок, а в результате недопустимого изменения размеров, формы или состояния рабочих поверхностей в результате изнашивания. Сплавы с высоким содержанием углерода и хрома обладают высокой твердостью и износостойкостью и получили распространение во многих отраслях промышленности. Поскольку свойства закаленных сталей и чугунов зависят от множества факторов, то выбор химического состава сплава и режимов его термической обработки производят опытным путем. Поэтому, одной из современных актуальных проблем является создание методик прогнозирования структуры и эксплуатационных свойств высокохромистых сплавов, позволяющих сократить существенные затраты на экспериментальные исследования, что и является темой данной работы.

**Структура, объем и содержание диссертации.** Диссертация изложена на 153 страницах и состоит из введения, четырех глав, общих выводов по работе и приложений. Список литературы состоит из 148 наименований.

**Степень разработанности темы исследования.** Единая методика прогнозирования структуры и твердости высокохромистых сплавов в зависимости от их состава, несмотря на то, что отдельные аспекты, на которых она базируется, разрабатывались и ранее, создана впервые.

Для достижения поставленной цели исследования в работе решались задачи разработки базовой методики расчёта фазового состава и твёрдости с использованием термодинамического моделирования, проверка методики путём сравнения с экспериментальными данными и расчётов составов сплавов с заданными требованиями к структуре и твёрдости и уточнение методики за счёт учёта длительности выдержки сплавов при аустенитизации с использованием методов кинетической теории фазовых превращений.

Оценивалась возможность уточнения методов расчёта с учётом эффектов ближнего упорядочения атомов в аустените и его влияния на мартенситное превращение при закалке сплавов

## **2. Краткое содержание диссертационного исследования**

**Во введении** обоснована актуальность работы и освещена степень разработанности темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, а также раскрыта научная новизна.

**В первой главе** проведен анализ особенностей сплавов системы Fe-Cr-C, в частности, их химического и фазового состава, легирования, термической обработки и применения. Показано влияние содержания хрома в твердом растворе на коррозионную стойкость для коррозионно-стойких сплавов. Рассмотрены исследования по влиянию структуры металлической основы на износостойкость белых высокохромистых чугунов. Обоснована цель исследования: разработка методики прогнозирования фазового состава и твердости сплавов системы Fe-Cr-C с высоким содержанием хрома и углерода на основе термодинамических и кинетических расчетов.

**Во второй главе** рассмотрены результаты разработки методики расчета фазового состава и твердости сплавов с высоким содержанием углерода и хрома после закалки. В данную методику входит анализ термодинамического равновесия сплава при нагреве под закалку, расчет положения мартенситной точки по выражению, полученному автором для сплавов с высоким содержанием углерода и хрома, а также расчет твердости сплава.

В полученной автором зависимости начала мартенситного превращения от химического состава аустенита учтено взаимное влияние углерода и хрома.

**В третьей главе** приведена проверка точности и примеры практического применения предложенной методики. Представлено сравнение расчетных значений с экспериментальными данными автора и литературными данными о структуре и твердости некоторых высокохромистых сплавов.

Показаны примеры расчетных карт твердости и количества остаточного аустенита сплавов системы Fe-Cr-C в зависимости от химического состава после закалки.

**В четвертой главе** приведены данные анализа кинетики растворения карбидов при аустенитизации сплавов и представлено уравнение для расчета объемной доли карбида в зависимости от времени выдержки, определены параметры этого уравнения. Показано влияние исходной структуры на смещение максимума твердости.

Приведены также расчеты влияния ближнего упорядочения в растворах внедрения и замещения на положение мартенситной точки.

### **3. Научная новизна и теоретическая значимость работы**

Наиболее важными в научном отношении результатами рассматриваемой работы являются теоретически разработанная на основе классических подходов термодинамики и кинетической теории фазовых превращений обоснованная методика расчёта фазового состава и твёрдости сплавов системы железо-хром-углерод в закалённом состоянии, способная предсказывать соотношение структурных составляющих (мартенсита, остаточного аустенита и карбидов) в зависимости от химического состава сплава, температуры и длительности нагрева под закалку. В рамках методики получена эмпирическая зависимость положения мартенситной точки от химического состава аустенита, применимая в том числе для высоких значений содержания углерода и хрома.

Выведены зависимости кинетических параметров растворения карбидной фазы  $(\text{Cr}, \text{Fe})_y \text{C}_z$  в аустените во время выдержки перед закалкой от состава сплава и температуры. С учетом новых термодинамических данных построена уточнённая кинетическая модель ближнего упорядочения атомов внедрения и замещения в исследуемых сплавах.

### **4. Практическая значимость работы**

Разработанная методика может быть использована для расчётного прогнозирования химических составов высокохромистых сплавов с заданными требованиями к структурному составу и твёрдости с целью значительно сократить затраты на экспериментальные исследования, а также для выбора оптимальных температур и выдержек при аустенитизации сплавов. В частности, с её помощью для ЗАО «Метаб» (г. Челябинск) даны рекомендации по выплавке экономно легированных высокохромистых чугунов, о чём свидетельствует акт внедрения. Результаты работы могут быть использованы для дальнейшего совершенствования методов математического моделирования фазовых превращений в сплавах и внедрены в учебный процесс подготовки бакалавров и магистров по направлениям 22.03.02, 22.04.02 «Металлургия» и 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов».

### **5. Оценка содержания диссертации**

Диссертация Созыкиной А.С. является научно-квалификационной работой, результаты которой на основании выполненных автором исследований вносят вклад в решение значительной научно-технической проблемы в части разработки научных основ выбора составов и технологии обработки высокоуглеродистых хромистых сплавов ледебуритного класса для направленного получения структурного состояния с целью обеспечения повышенной твёрдости и износостойкости деталей машин.

Работа представляет собой ценное по научной и практической значимости исследование, подчинена единой цели, содержит оригинальные результаты, написана аргу-

ментировано с научной точки зрения и грамотным языком.

## **6. Степень достоверности и участие автора в получении результатов**

Достоверность и воспроизводимость полученных экспериментальных результатов работы обеспечена использованием совокупности современных взаимодополняющих методов и оборудования для металлофизического исследования (растровой электронной микроскопии с микроанализом, оптической микроскопии, а также рентгеноструктурного анализа), что повышает степень надёжности сделанных оценок и выводов. Достоверность практических рекомендаций дополнена проведением испытаний износостойкости и результатами успешного использования экономно легированного чугуна в промышленности.

В рассматриваемой работе личный вклад диссертанта сомнения не вызывает. При участии автора теоретически разработана на основе классических подходов термодинамики и кинетической теории фазовых превращений обоснованная методика расчёта фазового состава и твёрдости сплавов системы железо-хром-углерод в закалённом состоянии. Созыкина А.С. представила к защите логически завершенное описание и обсуждение собственных теоретических исследований и обобщенные результаты экспериментальных работ, выполненных по заявленной теме.

## **7. Замечания по диссертационной работе**

Основные выводы работы по способности разработанной методики расчёта фазового состава и твёрдости сплавов системы железо-хром-углерод в закалённом состоянии предсказывать соотношение структурных составляющих (мартенсита, остаточного аустенита и карбидов) в зависимости от химического состава сплава, температуры и длительности нагрева под закалку логично следуют из экспериментальных результатов и не вызывают возражений, как и их трактовка в принципе, однако некоторые существенные моменты металловедческого обоснования и практической реализации предлагаемой методики не получили в диссертации достаточного объяснения:

1. В выводе 4 утверждается, что при температурах нагрева выше 1000 °C в высокохромистых чугунах основную роль играет растворение крупных первичных и эвтектических карбидов, хотя известно, что крупные первичные и эвтектические карбиды сохраняются вплоть до температур плавления сплавов, поэтому может идти речь о растворении в основном вторичных карбидов, что и следует из приведённых в диссертации фотографий микроструктур (при максимальных температурах закалки размеры первичных и эвтектических карбидов не уменьшаются, см. рис. 16, 18, 19, 20, 21,

22). По нашему мнению, при расчёте модели, следует дифференцировать первичные, эвтектические и вторичные карбиды вследствие различий в их происхождении и морфологии.

2. Применение разработанной модели превращений при аустенитизации и закалке требует формулирования граничных условий по скорости нагрева и особенно охлаждения, поскольку в работе использовано охлаждение образцов в воде со скоростью вышеkritической, однако на практике такое резкое охлаждение для отливок из белых высокохромистых чугунов не применяется, поэтому и моделирование для реальных отливок подлежит корректировке, о чём свидетельствует прикладная часть работы.

3. В работе не проведены дилатометрические исследования по определению критических точек при нагреве и охлаждении исследуемых сплавов, в результате чего не ясно, как проведено сравнение экспериментальных данных с расчётными по предлагаемой автором формуле положения мартенситной точки в зависимости от состава высокохромистых сплавов и какие значения состава аустенита следует подставлять в формулу при наличии нерастворённых карбидов в аустените, которые есть всегда в сплавах ледебуритного класса. Точное совпадение экспериментальных значений с рассчитанными по предлагаемой формуле у разных авторов имеет место скорее всего для тех сплавов, где при нагреве под закалку весь углерод растворён в аустените.

4. Встречаются несовпадения результатов и на разных экспериментальных графиках. Например, рис. 4, который должен свидетельствовать о хорошем совпадении расчёта с опытом: на рис. 4б максимальная твёрдость (69 HRC) при 1070 °C, а на рис. 4а при такой температуре закалки для того же сплава уже имеется 60 % остаточного аустенита, а твёрдость 60 HRC, что для такого количества остаточного аустенита, слишком много.

5. Представляется не совсем корректной математическая зависимость твёрдости многофазных закалённых ледебуритных сплавов от суммы произведений объёмной доли фаз на их микротвёрдость, т.к. много неопределённых факторов вносят вклад в это выражение, тем более, что потом приходится использовать эмпирические формулы перевода значений микротвёрдостей фаз в твёрдость по Роквеллу.

6. К сожалению, в работе не обсуждается роль метастабильности остаточного аустенита матрицы чугунов в обеспечении не исходной, а так называемой эффективной твёрдости хромистых чугунов, которая создаётся на рабочей поверхности при абразивном изнашивании диссипативной структуры метастабильного аустенита, хорошего закрепления карбидов и, как следствие, высокого сопротивления абразивному изнашиванию, а изучение взаимосвязи состава с абразивной износостойкостью в работе не проводилось.

Отмеченные замечания имеют детализирующий, частный характер и не снижают общей положительной оценки этой методически изобретательно поставленной, убедительной по основным результатам, получившим современную трактовку, и грамотно написанной диссертационной работы, являющейся законченным исследованием. Об этом свидетельствуют обоснованные практические рекомендации по результатам исследований для разработки экономно легированных чугунов применительно к использованию в песковых насосах. Автор работы обладает достаточными теоретическими и научно-техническими знаниями и владеет информацией о современном состоянии термодинамических и кинетических представлений для обоснованного моделирования поведения многофазных структур при термической обработке и эксплуатационной стойкости деталей машин, что позволило ей получить в работе новые научные и практические результаты по прогнозированию структуры и свойств, представляющие существенное значение для металловедения и термической обработки металлов.

## **8. Соответствие специальности**

Оценивая результаты проведенного Созыкиной А.С. исследования, следует отметить, что оно полностью соответствует специальности 05.16.01 - "Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов" в области теоретических и экспериментальных исследований фазовых и структурных превращений в сплавах, происходящих при термической обработке металлов и направлено на моделирование термической обработки в широком диапазоне температур нагрева и охлаждения с целью получения заданных структуры, и служебных свойств высокохромистых сталей и чугунов.

## **9. Научный уровень диссертации**

Научные результаты работы вносят вклад в теорию легирования, технологию получения и термической обработки износостойких сплавов, расширяя представления о возможностях направленного регулирования состава и структуры высокохромистых сплавов при нагреве и охлаждении. Обсуждение результатов базируется на современных положениях термодинамики и теории фазовых и структурных превращений и не противоречит имеющимся в литературе представлениям о формировании структуры и комплекса физико-механических и функциональных свойств важного класса износостойких материалов.

Это дает основание считать диссертационную работу отвечающей требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автора - Созыкину А.С. заслуживающей присуждения ученой степени кандидата технических наук.Автореферат

и значительное количество публикаций в рецензируемых журналах соответствуют и с исчерпывающей полнотой отражают основные положения диссертации.

#### **10. Соответствие диссертации требованиям «Положения ВАК РФ»**

Рецензируемая диссертация Созыкиной А.С. «Моделирование превращений при аустенитизации и закалке и прогнозирование твердости высокохромистых сталей и чугунов на основе термодинамических и кинетических расчетов», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 — "Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов" является законченной научно-исследовательской работой, имеющей значение как для теории, так и для практики металловедения. Диссертация соответствует требованиям п.п; 9, 10, 11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г, № 842, а ее автор - Созыкина Анна Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 - "Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов".

Официальный оппонент, доктор  
технических наук, профессор, профессор  
кафедры металловедения ФГАОУ ВО  
«Уральский федеральный университет  
имени первого президента России Б.Н.  
Ельцина»

Адрес почтовый: 620002, Екатеринбург,  
ул. Мира, 19, УрФУ;  
filma1936@mail.ru  
тел: 89122524342  
11.12.2018

Подпись  
заверяю



Филиппов М.А.

М.Филиппов