

На правах рукописи

Закрива



004615506

Закрива Мария Германовна

**ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НИКЕЛЕМ И МОЛИБДЕНОМ
НА УСТОЙЧИВОСТЬ АУСТЕНИТА И ФОРМИРОВАНИЕ
СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ
МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ С ПОВЫШЕННЫМ
СОДЕРЖАНИЕМ УГЛЕРОДА**

**Специальность 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка
металлов и сплавов**

- 2 ДЕК 2010

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Нижний Новгород – 2010

Работа выполнена на кафедре «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» ГОУ ВПО Пермского государственного технического университета

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук
Спивак Лев Волькович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Глинер Роман Ефимович

кандидат технических наук
Пряничников Владислав Александрович

Ведущая организация:

НИУ ГОУ ВПО Южно-уральский государственный университет,
г. Челябинск

Защита диссертации состоится « 24 » декабря 2010 г. в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.165.07 при Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева по адресу: г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, НГТУ, корп. 1, ауд. 1258.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Автореферат разослан « 16 » ноября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Доктор технических наук, профессор



Ульянов В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Традиционные конструкционные стали с содержанием углерода 0,20-0,40% обладают недостаточной конструкционной прочностью и пониженной технологичностью при изготовлении термопроченных деталей. Комплексные исследования кинетики $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, структуры и характеристик механических свойств низкоуглеродистых мартенситных сталей (НМС) показали, что НМС имеют высокие прочность, пластичность и ударную вязкость. Для НМС характерна высокая устойчивость переохлажденного аустенита в области температур нормального и промежуточного превращения, в отличие от сталей бейнитного класса, для которых комплекс характеристик механических свойств в существенной мере определяет механизм $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения.

Требования, предъявляемые современным машиностроением к сталям – это высокая конструкционная прочность, низкая стоимость и технологичность в изготовлении деталей машин. Прочность широко применяемых в настоящее время, НМС составляет 1000 – 1200 МПа. Поэтому расширение химического состава низколегированных сталей мартенситного класса, повышение комплекса механических и технологических характеристик, в том числе и надежности деталей, изготовленных из НМС, является важным элементом в переходе от традиционных представлений в этой области знаний, к новым, инновационным, основанным на научных подходах к созданию сталей для изготовления деталей ответственного машиностроения. Одно из направлений дальнейшего прогресса в сталях мартенситного класса связано с повышением конструкционной прочности рациональным легированием, обеспечивающим мартенситное превращение при медленном охлаждении. Легирование мартенситных сталей позволяет обеспечить прокаливаемость в крупногабаритных изделиях при замедленном охлаждении на спокойном воздухе и, в результате, отказаться от использования экологически вредных закалочных сред.

Увеличение в стали содержания углерода дает возможность повысить характеристики прочности. Однако возникает при этом риск понижения устойчивости переохлажденного аустенита и развития крайне нежелательного, с точки зрения обеспечения вязкости, бейнитного превращения. Поэтому поиск составов сталей, позволяющих повысить характеристики прочности, и в тоже время сохранить преимущества сталей со структурой пакетного мартенсита, является актуальным как с научной, так и с практической точек зрения.

Тематика диссертации соответствует Приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ и Перечню критических технологий РФ. Работа выполнена при поддержке «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере», государственный контракт № 4293р/6718, гранта РФФИ 07-08-96007-р_урал_а, гранта РФФИ 09-08-99001-р_офи, аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы» (раздел «Проведение фундаментальных исследований в области технических наук», № 2.1.2/1225).

Цель и задачи исследования. Целью данной работы является исследование влияния легирования никелем и молибденом на устойчивость аустенита, закономерности структурообразования и формирование свойств при термической обработке НМС повышенной конструкционной прочности и технологичности с увеличенным содержанием углерода без введения сильных карбидообразующих элементов.

Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие задачи:

1. Обосновать составы и исследовать фазовые превращения в изотермических условиях, при непрерывном нагреве и охлаждении в низкоуглеродистых мартенситных сталях типа Х2Г2Н1 с повышенным содержанием углерода от 0,17 до 0,29%, никеля до 2,5%, молибдена 0,3-1,0%.

2. Изучить структуру и механические свойства сталей в зависимости от их состава и вида термической обработки с целью получения высокого комплекса характеристик механических свойств и технологических преимуществ.

3. Предложить составы сталей, обеспечивающие достижение высокой прочности, пластичности и вязкости.

4. Разработать технологические параметры термического упрочнения предложенных сталей.

5. Подтвердить работоспособность разработанных сталей в реальных условиях эксплуатации изделий буровой техники.

Положения, выносимые на защиту.

1. Закономерности превращений при нагреве и охлаждении низколегированных сталей мартенситного класса с повышенным содержанием углерода.

2. Получение структуры пакетного мартенсита в НМС с повышенным содержанием углерода, при охлаждении на воздухе с температур горячей деформации, а также при последующих циклах термической обработки новых НМС.

3. Пределы легирования углеродом, никелем и молибденом разработанных экономнолегированных НМС, обеспечивающие высокий комплекс характеристик механических свойств.

4. Состав новых низколегированных повышенной прочности сталей мартенситного класса не содержащих сильные карбидообразующие элементы и режимы термообработки, обеспечивающих высокие эксплуатационные и технологические характеристики сталей.

5. Параметры технологических процессов термической обработки НМС, со структурой пакетного мартенсита, с пределом прочности не менее 1500 МПа и высокими характеристиками вязкости и пластичности.

Научная новизна.

1. На основании исследования фазовых превращений в изотермических условиях и при непрерывном нагреве и охлаждении установлены пределы легирования никелем и молибденом высокопрочных сталей с повышен-

ным содержанием углерода, имеющих структуру пакетного мартенсита. Разработаны составы НМС обеспечивающие высокую устойчивость переохлажденного аустенита без дополнительного введения сильных карбидообразующих элементов, таких как ванадий, ниобий, титан.

2. Доказано, что разработанная система легирования, при содержании углерода до 0,24%, гарантирует формирование структуры пакетного мартенсита обеспечивающей высокий уровень конструкционной прочности.

3. Показано, что в НМС, с повышенным содержанием углерода, процесс аустенитизации при нагреве в межкритическом интервале температур носит сложный характер, включающий бездиффузионную и диффузионную компоненты фазовых превращений.

4. Обоснованные пределы легирования НМС углеродом, хромом, марганцем, никелем, молибденом, обеспечивающие высокие характеристики прочности, пластичности и вязкости.

Практическая значимость.

1. На основании установленных в работе закономерностей фазовых превращений, формирования структуры и комплекса механических характеристик предложены составы и режимы термической обработки, существенно повышающие конструкционную прочность известных НМС при сохранении присущей этому классу сталей технологичности.

2. Реализовано на практике применение разработанной стали 19-24X2Г2НМ и технологии термической обработки для детали "карданный вал" диаметром 125 мм винтового забойного двигателя ООО "Фирма Радиус Сервис", что позволило снизить деформацию и коробление при термообработке, исключить правку и использование экологически вредных жидких охлаждающих сред (минеральные масла, щелочи), обеспечить ресурс до 800 часов.

Объект исследования. НМС с повышенным содержанием углерода, не содержащие сильных карбидообразующих элементов, обладающие высокой технологичностью при изготовлении термоупрочненных деталей

Предмет исследования. Устойчивость аустенита НМС с содержанием углерода 0,17-0,30%, хрома и марганца по 2% в зависимости от легирования никелем и молибденом. Структура и механические свойства.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: II Международной школе «Физическое металловедение» и XVIII Уральской школе металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов», Тольятти, 2006 г; VII Международной научно-технической конференции «Уральская школа-семинар металловедов – молодых ученых», Екатеринбург, 2006 г; «XVII Петербургские чтения по проблемам прочности», Санкт-Петербург, 2007 г; XIX Уральской школе металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов», посвященной 100-летию со дня рождения академика В.Д. Садовского, Екатеринбург, 2008 г; Восьмой ежегодной международной Промышленной конференции «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современ-

ных условиях», п. Славское, Карпаты, 11-15 февраля 2008 г; «X Международная научно-техническая уральская школа-семинар металлургов-молодых ученых», Екатеринбург, 7-11 декабря 2009 г; «V-я Евразийская научно-практическая конференция «Прочность неоднородных структур», ПРОСТ 2010, Москва, 2010 г; XX Уральской школе металлургов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов», посвященная 100-летию со дня рождения Н.Н. Липчина. Пермь, 2010, 1-5 февраля 2010 г.

Личное участие. Все экспериментальные исследования по теме диссертации, как в лабораторных, так и в производственных условиях, а так же обработка и анализ полученных результатов выполнены лично автором.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов по работе, приложений. Работа изложена на 130 страницах, включает 60 рисунков, 28 таблиц и 2 приложения. Список использованных источников содержит 68 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, изложены цели и задачи, сформулированы научная новизна, практическая значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Формирование структуры при мартенситном превращении, конструкционная прочность и технологичность низколегированных сталей мартенситного класса» рассмотрены особенности формирования структуры и свойства низкоуглеродистых мартенситных сталей. Глава завершается постановкой задачи для исследования.

Во второй главе изложены материалы и методики исследования.

Основные исследования проведены на НМС базового состава 17Х2Г2Н1, с различным количеством углерода и легирующих элементов. Стали экспериментальных плавок выплавляли в индукционной печи, разливали в слитки размерами 100 x 100 мм массой 100 кг, прокатывали на диаметр 19 мм. Химический состав исследуемых сталей приведен в табл. 1. Содержание вредных примесей в сталях: 0,02 - 0,05% Al, не более 0,025% S и P.

Для получения сопоставимых результатов кованые прутки подвергались термической обработке по режимам: а) закалка с 980 °С, выдержка 30 мин, охлаждение на воздухе (что при данной системе легирования позволяет получить структуру пакетного мартенсита, номер зерна 7-10, твердость 40-44 HRC); б) закалка с 980 °С, выдержка 30 мин, охлаждение на воздухе. Отпуск 650 °С, выдержка 2 часа, охлаждение на воздухе (в структуре получен отпущенный мартенсит). Проведенная фазовая перекристаллизация обеспечила величину зерна структуру и твердость такую же, как после горячей прокатки.

Таблица 1 - Химический состав исследуемых сталей

Марка стали	Содержание элементов, %						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	V	Mo
17X2Г2Н1	0,17	0,30	1,84	2,46	1,08	0,02	0,04
18X2Г2Н2,5	0,18	0,45	1,99	2,60	2,39	0,01	0,05
17X2Г2НМ0,3	0,17	0,28	1,90	2,28	1,52	0,02	0,32
18X2Г2НМ0,6	0,18	0,46	2,05	2,41	1,49	0,02	0,55
24X2Г2НМ0,5	0,24	0,28	1,82	2,27	1,50	0,02	0,46
22X2Г2НМ1	0,22	0,37	1,68	2,31	1,45	0,01	0,84
29X2Г2НМ0,5	0,29	0,17	1,97	1,98	1,40	0,01	0,53

Структура сталей – пакетный мартенсит (рис. 1).

Структура исследуемых сталей послековки характеризуется большим размером зерна, чем после прокатки.



Рисунок 1 - Электронная микроструктура пакетного мартенсита стали 17X2Г2Н1, $\times 30000$

Основные исследовательские методы включали металлографический (Neophot-32) и электронно-микроскопический анализ (ЭМ-125) структуры. Фазовые превращения изучали дилатометрическим (дифференциальный дилатометр Шевенара), магнитометрическим (модернизированный анизометр Акулова с автоматизированной системой регистрации результатов измерений) и калориметрическим (дифференциальный сканирующий калориметр STA 449 C Jupiter) методами. Рентгеновский анализ проводили на приборе ДРОН-3М. Испытания на одноосное растяжение проводили в соответствии с ГОСТ 1497-84 на машине INSTRON 300 LX. Ударную вязкость (KCV) определяли согласно ГОСТ 9454-78 на маятниковом копре ИО 5003-0.3. Дюротметрические исследования – на твердомеоре Роквелла ТК – 2М.

В третьей главе "Влияние легирования на фазовые превращения, устойчивость аустенита и структуру низколегированных мартенситных сталей с повышенным содержанием углерода" приведены результаты изучения фазовых превращений.

Фазовые превращения наиболее подробно изучены методом дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC).

DSC кривые при нагреве сталей до 1000°C , 1150°C в качественном плане похожи. Для примера, на рис. 2 представлена DSC кривая стали 24X2Г2Н1,5М0,5. В стали состава 24X2Г2Н1,5М0,5, как и во всех других сталях, нагрев послековки или прокатки фиксирует появление в районе $750 - 830^{\circ}\text{C}$ хорошо выраженного эндотермического пика, обусловленного переходом в аустенитное состояние.

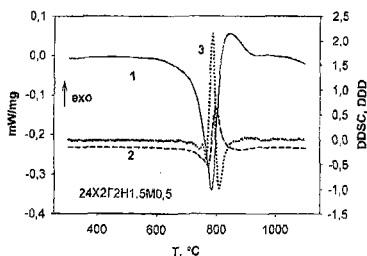


Рисунок 2 – DSC зависимость (1) и вид ее первой DDC (2) и второй DDD производных (3) при нагреве стали 24X2Г2Н1,5М0,5 со скоростью $40^{\circ}\text{C}/\text{мин}$

Выше температуры завершения аустенитизации, точки A_{c3} , в процессе первого нагрева происходят некоторые явления, сопровождающиеся калориметрическими эффектами. И только при нагреве выше $980 - 1000^{\circ}\text{C}$ поведение сплава в этом отношении стабилизируется.

Характер изменения в районе температур появления эндотермического пика второй производной сигнала DSC свидетельствует о том, что при нагреве реализуются несколько последовательно

следующих друг за другом механизмов аустенитизации (несколько четко выраженных максимумов на второй производной) (рис. 2).

Температуры точек A_{c1} , A_{c3} , определенных по данным DSC, представлены в соответствующих таблицах диссертационной работы.

Из данных DSC следует, что оптимальной температурой аустенитизации исследуемых сталей после прокатки иликовки следует считать температуру $980 - 1000^{\circ}\text{C}$. Нагрев до этих температур гарантирует получение в сталях гомогенного аустенита.

Результаты определения критических точек исследуемых сталей представлены в табл. 2.

Температуры критических точек, полученные с помощью DSC, сопоставляли с данными, полученными дилатометрическими методами. Различие между значениями критических точек, полученные из данных дилатометрического и DSC анализов, не превышает $\pm 3\%$ от определяемой температуры, что вполне отвечает точности проведения таких сравнительных сопоставлений. С увеличением в сталях содержания углерода наблюдается снижение температуры начала мартенситного превращения. Влияние молибдена на точку A_{c1} в исследованных интервалах легирования не отмечено.

Для исследуемых марок сталей были построены диаграммы изотермического превращения переохлажденного аустенита. Одна из них для стали 24Х2Г2Н1,5М0,5 представлена на рис. 3.

На кинетических кривых при охлаждении сталей, как обычно, наблюдаются три стадии: медленное начало процесса, ускорение в средней части и медленное завершение, характерные для изотермического превращения.

Таблица 2 - Температуры критических точек исследуемых сталей.

Марка стали	Ас1		Ас3		Мн		Мк	
	Дилатометр	DSC	Дилатометр	DSC	Дилатометр	DSC	Дилатометр	DSC
17Х2Г2Н1	700	715	780	840	360	400	210	325
18Х2Г2Н2,5	710	715	830	815	340	370	260	245
17Х2Г2Н1,5М0,3	720	721	830	830	370	395	220	315
18Х2Г2Н1,5М0,6	700	710	830	845	360	395	190	280
24Х2Г2Н1,5М0,5	740	720	870	825	360	370	200	270
22Х2Г2Н1,5М1	740	720	870	840	360	400	200	260
29Х2Г2Н1,5М0,5	730	725	830	820	300	330	160	180

Примечание: температура аустенитизации 950 °С для дилатометрических исследований и 1000 – 1150 °С для исследований DSC.

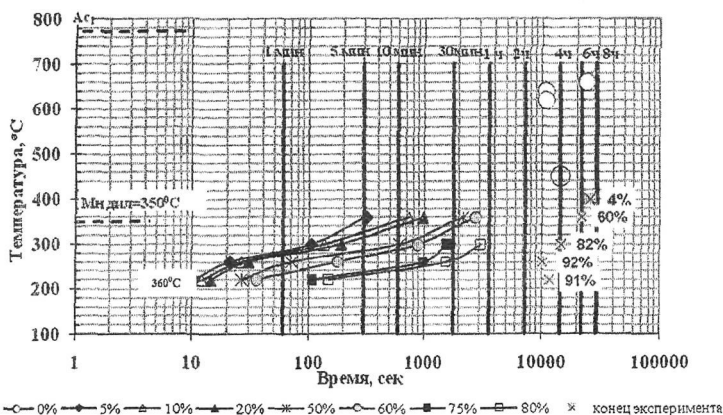


Рисунок 3 - Изотермическая диаграмма устойчивости переохлажденного аустенита стали 24Х2Г2Н1,5М0,5

В исследованных сталях, за исключением стали 17Х2Г2Н1, инкубационный период в области нормального превращения составляет не менее 6 часов. Устойчивость переохлажденного аустенита к нормальному превращению

нию в стали 17X2Г2Н1 – 1 час, что вполне достаточно для закалки на воздухе деталей сечением до 110 мм.

С увеличением содержания никеля до 2,5% повышается устойчивость аустенита. Нормальное превращение в стали 18X2Г2Н2,5 не фиксируется в течение 8 часов выдержки.

При выбранной системе легирования ни в одной из сталей, содержащих менее 0,24% углерода, бейнитное превращение не обнаружено. Однако увеличение содержания углерода до 0,29% (29X2Г2Н1,5М0,5) приводит к появлению признаков бейнитного превращения при изотермических выдержках в интервале температур 360 – 400 °С.

На рис. 4 показано, в качестве примера, изменение DSC сигнала и его второй производной при охлаждении стали 24X2Г2Н1,5М0,5 со скоростью 10 °С/мин. В районе температур мартенситного превращения наблюдается экзотермический пик, который, судя по характеру изменения в этом температурном интервале второй производной, представляет собой результат наложения

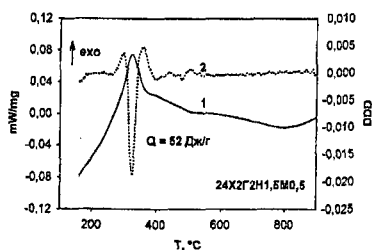


Рисунок 4 - DSC зависимость (1) и вид ее второй производной DDD (2) при охлаждении стали 24X2Г2Н1,5М0,5 со скоростью 10 °С/мин

тепловых эффектов от близких по температурам протекания этапов мартенситного превращения

Об отсутствии бейнитного превращения свидетельствуют данные по микроструктуре и микротвердости образцов. Результаты рентгеноструктурного анализа не выявили присутствия в сталях после закалки остаточного аустенита.

В зависимости от требуемой прокаливаемости оптимальное количество Ni в этих сталях должно находиться в пределах 1 - 2,5%.

Не обнаружено влияния молибдена (0,3-0,6%) на положение температурного интервала мартенситного превращения.

Рассмотрено влияние содержания углерода (0,17-0,24%) при одинаковом содержании молибдена на превращение переохлажденного аустенита. Оказалось, что примененная система легирования позволяет сохранить высокую устойчивость переохлажденного аустенита в области нормального превращения даже при содержании углерода 0,29%. Увеличение содержания углерода в стали с 0,18 до 0,29 % при одинаковой системе легирования (X2Г2Н1,5М0,5-0,6) незначительно снижает температуру начала мартенситного превращения (табл. 2).

Магнитометрические измерения не фиксируют выделение из аустенита парамагнитных карбидных фаз. Однако их образование, меняя состав аустенита, может привести к изменению температур начала и конца мартенситного превращения. Изотермические выдержки в интервале температур нормального и предполагаемого бейнитного превращения не привели к изменению Mn. Следовательно, можно полагать, что при выдержке сталей в области

температур 660-450 °С не происходит перераспределение углерода в твердом растворе, карбиды не выделяются.

Для определения рациональной температуры аустенитизации, образцы из исследуемых сталей выдерживали один час при температурах: 850 °С, 900 °С, 950 °С, 1000 °С, 1050 °С, 1100 °С, 1150 °С с последующим охлаждением на воздухе или в масле. Заметный рост зерна аустенита начинается в интервале температур нагрева 950-1000 °С. Введение молибдена, как карбидообразующего элемента, оказывает сдерживающее влияние на рост зерна аустенита.

Один из главных факторов, влияющих на твердость и прочность стали, является химический состав (при сравнении сталей с одинаковой термической обработкой). Увеличение содержания Ni от 1% до 2,5% не приводит к заметному повышению твердости после различных температур аустенитизации.

При введении молибдена в количестве 0,3% твердость меняется незначительно после закалки с температур 950-1050 °С. Существенное снижение твердости (на 4 HRC) наблюдается только при закалке с 1100 °С. Это связано с высокой устойчивостью карбидов молибдена, которые растворяются полностью лишь при температурах выше 1050 °С. Сталь 18Х2Г2Н2,5 не имеет устойчивых карбидов, поэтому твердость этой стали снижается при меньших температурах аустенитизации.

На основании полученных результатов, оптимальная температура аустенитизации для данной группы сталей принята равной 980 ±10 °С. Это согласуется и с данными DSC. Установлено, что после закалки с температуры 980 °С у всех исследуемых сталей наблюдается структура пакетного (реечного) мартенсита. Рекомендуемое содержание никеля и молибдена должно находиться в пределах 1 - 1,5% и 0,3 - 0,6% соответственно.

Высокая температура начала мартенситного превращения исследуемых сталей в ходе охлаждения может способствовать самоотпуску. Закалка с различной скоростью охлаждения на воздухе (3-5 °С/с) и в масле (40-50 °С/с) оказала незначительное влияние на значения твердости. Следовательно, можно полагать, что изменение состава твердого раствора и структуры в температурном интервале мартенситного превращения не происходит. Возможно только частичное снятие при этом закалочных напряжений.

В четвертой главе на основании результатов исследований разработаны технологические параметры упрочнения НМС с повышенным содержанием углерода.

Результаты исследования свидетельствуют о высокой устойчивости аустенита, а, следовательно, о возможности закалки медленным охлаждением на воздухе деталей с сечением до 350 мм.

Решающим при выборе марки стали и режима ее термической обработки является комплекс механических характеристик и технологичность.

Температура аустенитизации для упрочняющей термической обработки равная 980 °С, была ранее обоснована по результатам влияния температуры аустенитизации на размер зерна и твердость, а также по данным DSC.

Анализ полученных в работе данных свидетельствует о том, что уровень твердости образцов из НМС без молибдена, закаленных в масле и на воздухе, сохраняется высоким до температуры отпуска 450 °С. В сталях, легированных молибденом, отмечена высокая отпускостойчивость - твердость сохраняется на высоком уровне до температур отпуска 500 °С. Твердость сталей, отпущенных на 650 °С, снижается в 1,5 – 2 раза и не зависит от скорости охлаждения после аустенитизации. В связи с тем, что твердость не является универсальной характеристикой, и по полученным данным нельзя назначить режим упрочняющей обработки, проведены исследования влияния температуры отпуска на механические свойства при растяжении и ударную вязкость рассматриваемых сталей. Полученные данные свидетельствуют о высоком комплексе характеристик механических свойств исследуемых сталей. В частности, сравнительный анализ сталей 17Х2Г2Н1 и 18Х2Г2Н2,5 показывает, что обе стали сохраняют высокую прочность и вязкость до температуры отпуска 250 °С ($\sigma_b = 1320$ МПа, $KCV = 70$ Дж/см² для стали 17Х2Г2Н1 и $\sigma_b = 1450$ МПа, $KCV = 75$ Дж/см² для стали 18Х2Г2Н2,5). Сталь с повышенным содержанием никеля имеет более высокие характеристики механических свойств. Установлено, что в исследуемой системе легирования уровень конструкционной прочности не зависит от скорости охлаждения.

Сталь 17Х2Г2Н1,5М0,3 после закалки и отпуска при 250 °С имеет прочность 1380 МПа при высоких характеристиках пластичности и вязкости ($\psi \% = 55$, $KCV = 80$ Дж/см²).

Прочность стали 18Х2Г2Н1,5М0,6, после закалки и отпуска при 250 °С увеличивается по сравнению со сталью 17Х2Г2Н1,5М0,3 и достигает 1470 МПа. Ее характеристики вязкости и пластичности : $KCV = 95$ Дж/см², $\delta \% = 16$, $\psi \% = 62$.

С увеличением содержания углерода с 0,17 до 0,22% и молибдена с 0,3 до 1,0% (сталь 22Х2Г2Н1,5М1) после закалки с 980 °С на воздухе и отпуска при 250 °С повышается прочность и незначительно снижается пластичность и вязкость ($\sigma_b = 1580$ МПа, $\delta \% = 15$, $\psi \% = 50$, $KCV = 65$ Дж/см²).

С дальнейшим повышением углерода в сталях эта тенденция сохраняется. Так, например, в стали 29Х2Г2Н1,5М0,5 достигается прочность после закалки и отпуска при 250 °С 1660 МПа ($\delta \% = 15$, $\psi \% = 50$, $KCV = 60$ Дж/см²). Однако в этой стали в больших сечениях может частично протекать бейнитное превращение. Поэтому в дальнейшем более подробно исследована сталь 24Х2Г2Н1,5М0,5 с меньшим содержанием углерода. Результаты такого исследования представлены в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что при закалке в масло достигли предела прочности 1600 МПа в сочетании с высокой пластичностью и вязкостью. Несмотря на то, что предел прочности стали, закаленной на воздухе, несколько ниже, чем после закалки в масло, прочность отпущенной на 250 °С не зависит от

скорости охлаждения после аустенитизации, что может быть следствием релаксации термических напряжений при отпуске.

Таблица 3 – Влияние скорости охлаждения и температуры отпуска на механические свойства термообработанной стали 24X2Г2Н1,5М0,5

Термическая обработка	Температура отпуска	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ %	ψ %	KCV
		МПа				Дж/см ²
Зак. на воздухе с температуры горячей деформации	-	1580	1240	14	50	76
Закалка 980 °С (1ч, воздух)	-	1590	1180	15	41	56
	250 °С (1ч, в-х)	1550	1220	12	40	74
	450 °С (1ч, в-х)	1410	1110	15	42	25
	550 °С (1ч, в-х)	1270	1080	15	47	-
Закалка 980 °С (1ч, масло)	-	1600	1280	14	50	-
	250 °С (1ч, в-х)	1530	1240	13	49	66
	450 °С (1ч, в-х)	1360	1130	15	48	-
	550 °С (1ч, в-х)	1210	1040	15	52	-

Повышение температур отпуска до 450 – 500 °С привело к снижению величин относительного сужения и ударной вязкости. Поверхность разрушения образцов после одноосного растяжения или ударных испытаний свидетельствует о появлении доли хрупкой составляющей. Снижение характеристик вязкости и пластичности происходило в результате проявления отпускной хрупкости I рода.

Самые высокие характеристики ударной вязкости были получены на стали 17X2Г2Н1 в горячекатаном состоянии. Последующая закалка стали приводит к снижению величины ударной вязкости практически вдвое (KCV от 131 до 66 Дж/см²). Введение молибдена приводит к менее существенному снижению ударной вязкости при повторной закалке. Максимальной конструкционной прочностью из всех исследованных сталей обладала закаленная и низкоотпущенная НМС 24X2Г2Н1,5М0,5 ($\sigma_b=1550$ МПа, KCV=70 Дж/см²).

Следует отметить, что введение молибдена не устраняет проявление отпускной хрупкости, что подтверждает снижение величины относительного сужения и характер поверхности разрушения образцов.

В пятой главе «Практическая реализация исследований и проведение натуральных испытаний деталей винтовых забойных двигателей из низкоуглеродистой мартенситной стали с повышенным содержанием углерода» рассмотрена возможность применения экономнолегированных НМС с повышенной прочностью и увеличенным содержанием углерода взамен традиционных улучшаемых сталей.

В результате комплексного исследования показано, что сталь 24X2Г2Н1,5М0,5 обладает рядом преимуществ перед применяемыми в настоящее время сталями со структурой сорбита отпуска. Освоено производство детали винтового забойного двигателя «вал карданный» из стали

24X2Г2Н1,5М0,5. Опытные детали успешно выдержали ресурсные испытания в составе винтовых забойных двигателей. В связи с положительными результатами испытаний принято решение о серийном изготовлении деталей «вал карданный» из стали 24X2Г2Н1,5М0,5 на пермском предприятии ООО «Фирма «Радиус–Сервис».

Расчет экономической эффективности внедрения НМС для детали «вал карданный», проведенный ООО «Фирма «Радиус–Сервис», показал возможность сокращения производственных и эксплуатационных расходов на сумму, превышающую 3,2 млн. руб. в год.

ВЫВОДЫ

1. Изучено влияние легирования никелем и молибденом при повышенном содержании углерода на устойчивость переохлажденного аустенита экономно легированных сталей мартенситного класса. Установлено, что легирование в пределах С – 0,17 – 0,24%, Cr и Mn – 2%, Ni – 1,5 – 2,5%, Mo – 0,3 – 1%, обеспечивает устойчивость аустенита в нормальной области превращения от 3 до 8 часов, отсутствие бейнитного превращения, повышение температуры начала мартенситного превращения до 380 °С.

2. Показано, что состав стали с повышенным содержанием углерода и размером зерна 10 мкм обеспечивает получение структуры пакетного мартенсита, при охлаждении на спокойном воздухе в деталях размером до 350 мм.

3. Впервые разработаны НМС с повышенным содержанием углерода, в которых, рациональным легированием достигнута высокая устойчивость переохлажденного аустенита в области нормального превращения, исключено бейнитное превращение и обеспечено формирование структуры реечного мартенсита при охлаждении на воздухе в больших сечениях. В результате получены высокие значения прочности, при сохранении высокой вязкости и технологичности, присущей НМС с содержанием углерода до 0,12%. Наилучшие результаты достигнуты на стали 24X2Г2Н1,5М0,5 получены следующие значения прочности $\sigma_b = 1550$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1240$ МПа, пластичности $\delta = 15$ %, $\psi = 50$ % и вязкости KCV = 75 Дж/см², прокаливаемость не менее 350 мм. У менее легированной стали 17X2Г2Н1 прочность составляет $\sigma_b = 1320$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1060$ МПа, пластичность $\delta = 15$ %, $\psi = 55$ %, вязкость KCV = 66,3 Дж/см² и обеспечена прокаливаемость в деталях размером не менее 110 мм.

4. Методом ДСК установлено, что при нагреве НМС с повышенным содержанием углерода до 0,24%, без применения сильных карбидообразующих элементов, превращение аустенита в межкритическом интервале температур начинается по сдвиговому механизму и завершается по диффузионному.

5. Разработаны параметры термического упрочнения НМС, заключающегося в закалке на воздухе с температуры 980 °С или с деформационного нагрева и последующем отпуске при 250 °С.

6. Показано, что в зависимости от требований по прокаливаемости, для конкретных деталей возможно применение НМС со следующим сочетанием

легирующих элементов С - 0,17%, Cr – Mn – Ni обеспечивающим устойчивость аустенита в нормальной области от 1 часа при содержании Ni 1% и 8 часов при содержании Ni 2,5%. Установлено, что применение системы легирования Cr – Mn – Ni – Mo, приводит к увеличению устойчивости аустенита до 8 часов в нормальной области и отсутствию бейнитного превращения при повышении содержания углерода (до 0,24%). Доказана возможность достижения высокой устойчивости аустенита без введения в сталь сильных карбидообразующих элементов V, Nb, Ti.

7. На основании комплексного исследования рекомендована для использования сталь 24X2Г2НМ0,5, в которой после аустенитизации и охлаждения на воздухе достигается предел прочности 1550 МПа, в сочетании с высокими характеристиками вязкости и пластичности. Применение этой стали позволяет унифицировать процесс термоупрочнения и заменить несколько марок сталей одной. Охлаждение на спокойном воздухе обеспечивает экологически чистоту технологического процесса, поскольку исключены вредные закалочные среды, такие как минеральные масла, техническая вода, синтетические жидкости.

8. Применение НМС 24X2Г2НМ взамен среднеуглеродистых сталей 40ХН2МА, 38ХН3МФА, легированных дефицитным никелем, для детали винтового забойного двигателя «вал карданный» позволяет значительно повысить эксплуатационные характеристики (ресурс), повысить технологичность, повысить конкурентоспособность продукции. В результате проведенных испытаний двигателей с деталями из НМС 24X2Г2НМ полностью выдержали ресурсные испытания, отказа по причине использования экспериментальных «валов карданных» не произошло. Расчет экономической эффективности внедрения НМС и разработанных технологий термического упрочнения в условиях производства ООО «Фирма «Радиус–Сервис», показал возможность сокращения производственных и эксплуатационных расходов на сумму, превышающую 3,2 млн. руб. в год.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Клейнер Л.М. Симонов Ю.Н. Ермолаев А.С. Закирова М.Г. Структура и свойства низкоуглеродистых мартенситных сталей, закаленных из межкритического интервала температур // Конструкции из композиционных материалов. – 2006. – Выпуск 4. – С. 172-177. *(рецензируемое издание, рекомендованное ВАК РФ)*

2. Панов Д. О., Заяц Л.Ц., Закирова М.Г. Структурная наследственность и перекристаллизация при «быстрой» аустенитизации системнолегированных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2008. – №10. – С. 18–23. *(рецензируемое издание, рекомендованное ВАК РФ)*

3. Корниенко Т.Г., Бердар Ю.Ю., Закирова М.Г., Заяц Л.Ц. Исследование влияния положения температурного интервала сдвигового превращения на структуру и свойства низкоуглеродистых сталей // Механика и технология материалов и конструкций: Вестник ПГТУ. – Пермь: Изд-во ПермГТУ, 2004. – № 8. – С. 134-140.

4. Закирова М.Г., Быкова П.О. Влияние термической обработки на размер зерна низкоуглеродистой мартенситной стали // Сборник научных трудов Молодежная наука Прикамья. – Пермь: Изд-во ПермГТУ, 2005. – Выпуск 6. – С. 11-15.

5. Заяц Л.Ц., Закирова М.Г., Быкова П.О. Повышение прочности низкоуглеродистых мартенситных сталей путем измельчения зерна при аустенитизации // Перспективные процессы и технологии в машиностроительном производстве: Сборник научных трудов Юбилейной международной конференции. – Пермь: Изд-во ПермГТУ, 2005. – С. 23–24.

6. Закирова М.Г., Югай С.С. Особенности $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращения в низкоуглеродистых мартенситных сталях // Перспективные процессы и технологии в машиностроительном производстве: Сборник научных трудов Юбилейной международной конференции. – Пермь: Изд-во ПермГТУ, 2005. – С. 20–21.

7. Заяц Л.Ц., Ермолаев А.С., Закирова М.Г., Игнатова Н.И. Структура и свойства низкоуглеродистых мартенситных сталей, закаленных из межкритического интервала // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: Сборник тезисов II Международной школы «Физическое металловедение», XVII Уральской школы металловедов-термистов. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2006. – С. 94.

8. Закирова М.Г., Заяц Л.Ц., Ермолаев А.С., Быкова П.О. Измельчение зерна при циклической фазовой перекристаллизации стали 12Х2Г2НМФТ // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: Сборник тезисов II Международной школы «Физическое металловедение», XVII Уральской школы металловедов. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2006. – С. 97.

9. Ермолаев А.С., Клейнер Л.М. Закирова М.Г. Конструкционная прочность низкоуглеродистых мартенситных сталей, закаленных из межкритического интервала // Уральская школа-семинар металловедов – молодых ученых: Материалы VII Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2006. – С.

10. Клейнер Л.М. Закирова М.Г. Дислокационный механизм упрочнения – основа конструкционной прочности сталей // Сборник материалов XVII Петербургские чтения по проблемам прочности, посвященные 90-летию со дня рождения профессора А.Н. Орлова. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбПУ, 2007. – Часть 2 – С. 137-138.

11. Клейнер Л.М., Закирова М.Г., Ларинин Д.М. Конструкционные мартенситные стали для высокопрочных сварных конструкций // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: Материалы Восьмой ежегодной международной Промышленной конференции. – Славское, Карпаты: Изд-во ДНТУ, 2008. – С. 368-370.

12. Заяц Л.Ц., Панов Д.О. Закирова М.Г. Структурная наследственность и перекристаллизация при «быстрой» аустенитизации системно-легированных сталей // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: Сборник материалов XIX Уральской школы металловедов-

термистов, посвященной 100-летию со дня рождения В.Д.Садовского. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2008. – С. 34.

13. Клейнер Л.М., Шацов А.А., Ермолаев А.С., Закирова М.Г., Ларинин Д.М., Ряпосов И.В. Закономерности структурообразования, фазовых переходов и диффузии в низкоуглеродистом мартенсите с блочной и блочно-реечной структурой // Результаты научных исследований, полученные за 2007 г: Сборник статей Региональный конкурс РФФИ-Урал. – Пермь, Екатеринбург, 2008. Часть 1. – С.195–199.

14. Клейнер Л.М., Ларинин Д.М., Спивак Л.В., Закирова М.Г., Шацов А.А. Фазовые превращения в сплаве 07X3ГНМ // Вестник пермского государственного университета. Физика. – Пермь: Изд-во ПГУ, 2009. – Выпуск 1 (27). – С. 100-103.

15. Закирова М.Г., Гребеньков С.К. Фазовые превращения в низкоуглеродистых мартенситных сталях с содержанием углерода до 0,29% // Сборник трудов X Международной научно-технической уральской школы-семинара металлослов-молодых ученых. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2009. – С. 35-36.

16. Клейнер Л.М., Спивак Л.В., Шацов А.А., Закирова М.Г. Мультиплетный характер процессов аустенитизации и распада аустенита низкоуглеродистых мартенситных сталей // Вестник пермского государственного университета. Физика. – Пермь: Изд-во ПГУ, 2010. – Выпуск 1 (37). – С. 111-114.

17. Закирова М.Г., Ряпосов И.В., Гребеньков С.К. Влияние содержания никеля и молибдена на структуру и свойства низкоуглеродистых мартенситных сталей с содержанием углерода до 0,22%. // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: Сборник материалов XX Уральской школы металлослов-термистов, посвященной 100-летию со дня рождения Н.Н. Липчина. – Пермь: Изд-во УГТУ-УПИ, 2010.– С. 111.

18. Ряпосов И.В., Закирова М.Г., Шацов А.А. Наноструктурирование сплавов на основе α -железа термическим воздействием. // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: Сборник материалов XX Уральской школы металлослов-термистов, посвященной 100-летию со дня рождения Н.Н. Липчина. – Пермь: Изд-во УГТУ-УПИ, 2010.– С. 87.

19. Клейнер Л.М., Закирова М.Г. Конструкционная прочность низкоуглеродистого реечного мартенсита // Прочность неоднородных структур: Сборник трудов V-ой Евразийской научно-практической конференции. – Москва: Изд-во НИТУ «МИСиС», 2010. – С. 13.

Подписано в печать 09.10.2010. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 120 экз.
Заказ № 1968/2010.

Издательство
Пермского государственного технического университета
614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к.113
тел. (342) 219-80-33