

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Удода Кирилла Анатольевича

«Управление структурой коррозионностойких сталей мартенситного, мартенситно-аустенитного и ферритного классов для повышения механических свойств и коррозионной стойкости»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Диссертационная работа Удода К.А. посвящена решению нетривиальной научно-технической задачи, направленной на совершенствование химического состава и технологических схем производства стального проката, применяемого в природных зонах с экстремальными условиями эксплуатации, в частности в контакте с морской средой в Арктике и Антарктике. При нынешнем этапе освоения территорий с низкими климатическими температурами требуются современные материалы для создания конструкций различного назначения, обеспечивающих длительную работоспособность и надежность всего изделия. Такие материалы, в частности стальной прокат, должны обладать уникальным комплексом механических свойств, включая прочность, пластичность, хладостойкость, износостойкость, а также стойкостью против различных видов коррозионного и коррозионно-эрозионного разрушения. Обеспечение заданного уровня потребительских свойств требует от разработчиков, в первую очередь, от металлургов выбора класса сталей, которые заведомо могут эксплуатироваться в подобных условиях, подбора легирующих элементов, позволяющих повысить характеристики разрабатываемого продукта, выявления оптимального состава и определения необходимых режимов производства стального проката в условиях различных производителей. От выбора химического состава до подбора режимов производства материалов – большой, кропотливый и достаточно трудный путь. В связи с вышесказанным диссертационная работа Удода К.А. является особо **актуальной**.

Цель работы заключалась в установлении закономерностей формирования структуры и свойств хромистых коррозионностойких сталей мартенситного и мартенситно-аустенитного классов, легированных азотом, а также сталей ферритного класса, легированных алюминием, и разработка рекомендаций по оптимальному химическому составу и технологическим режимам производства указанных сталей с наиболее высоким и стабильным комплексом механических свойств и коррозионной стойкости.

Для достижения поставленной цели диссертантом были предложены решения целого **комплекса задач**, которые имеют существенное научное и практическое значение:

1. Теоретическое и экспериментальное исследование эволюции структурного состояния хромистых мартенситных и мартенситно-аустенитных сталей, легированных азотом, а также сталей, легированных алюминием, в зависимости от химического состава и технологических режимов, включая исследования характеристик основных и избыточных фаз.

2. Проведение комплексных механических испытаний проката из исследуемых сталей и установление закономерностей влияния химического состава и структурного состояния на показатели прочности, пластичности, вязкости и хладостойкости.

3. Проведение комплексных коррозионных испытаний проката из исследуемых сталей и установление закономерностей влияния химического состава и структурного состояния на показатели коррозионной стойкости.

4. Разработка рекомендаций по оптимальному химическому составу и технологическим режимам получения хромистых мартенситных и/или мартенситно-аустенитных сталей и ферритных сталей, легированных алюминием, с наиболее высоким и стабильным комплексом механических свойств и коррозионной стойкости.

Структура и основное содержание работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы. При стандартном объеме диссертационной работы в 161 страницу машинописного текста в ней содержится 64 рисунка и 40 таблиц, каждый рисунок, график или зависимость сопровождается подробными комментариями и рассуждениями. Список литературы представлен 133 источниками отечественных и зарубежных авторов, из которых 35 составляют ссылки на авторские свидетельства, патенты и заявки на патенты. Современные технологии открывают перед нами возможность использования источников не только в печатном виде, но и в электронном. Диссертант воспользовался ею и использовал в своей работе 5 электронных источников из сети интернет.

С точки зрения построения структуры диссертации работа выполнена грамотно, написана хорошим научно-техническим языком, относительно правильно оформлена. Содержание автореферата полно и точно отражает содержание и результаты диссертационной работы. Основные положения диссертации отражены в 6 печатных работах, 4 из которых в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Во введении рассматриваемой работы обоснована актуальность проблемы, сформулирована цель и задачи исследования, ее научная новизна, практическая значимость, а также основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертационной работы посвящена аналитическому обзору отечественной и зарубежной литературы по вопросам производства стального проката, предназначенного для оборудования и конструкций, эксплуатируемых в условиях контакта с морской средой Арктики и Антарктики, и для других видов техники, в том числе для нагруженных деталей, используемых в авиации, машиностроении и других отраслях. Как показано диссертантом, стальной прокат для указанных изделий, эксплуатируемых в агрессивных условиях, должен обладать целым комплексом свойств: стойкостью против различных видов коррозионного, коррозионно-механического разрушения, сочетанием высокой прочности и пластичности, а также хладостойкости. В результате выполненного аналитического обзора выбраны наиболее перспективные для исследования классы сталей, которые могут обеспечить требуемый уровень потребительских свойств (коррозионностойкие хромистые стали мартенситного или мартенситно-аустенитного класса с низким содержанием углерода, дополнительно легированные никелем, молибденом, азотом, а также карбонитридообразующими элементами; ферритные стали повышенной коррозионной стойкости, легированные алюминием), сформулирована цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе автором описаны материалы и методы исследования, проведенные в ходе выполнения рассматриваемой работы. Для уменьшения объема экспериментов использовались методы математического планирования. Весь объем исследований выполнен на металле лабораторных плавок (8 плавок хромистых

мартенситных и мартенситно-аустенитных сталей, 6 плавок ферритных сталей с высокой удельной прочностью). В диссертационной работе применялись следующие методы исследований: термодинамический анализ областей существования равновесных долей основных и избыточных фаз, металлографические исследования микроструктуры, измерения твердости и микротвердости, рентгенодифракционный анализ, механические испытания на разрыв и ударный изгиб, статистический анализ влияния химического состава и термической обработки на свойства, электронно-микроскопическое исследование структуры и частиц избыточных фаз, коррозионные испытания электрохимическим и химическим методами.

Третья глава посвящена исследованию формирования структуры и механических свойств хромистых коррозионностойких сталей. Применение термодинамического моделирования, а также оптической и электронной микроскопий показало, что стали с повышенным значением разности между хромовым и никелевым эквивалентами (более 12%) имеют двухфазную ферритно-мартенситную структуру. Стали с меньшим значением разности эквивалентов (9,3%), но с высоким значением отношения эквивалентов (2,5) обладают преимущественно мартенситной структурой. Стали с низким значением разности эквивалентов, но с высоким содержанием никеля имеют в структуре не менее 7% аустенита. В стали с повышенным содержанием никеля, азота, ванадия и молибдена содержится около 25% аустенита.

Исследование механических свойств проката после термической обработки по различным режимам показало, что наиболее высокий комплекс свойств (наиболее высокие значения ударной вязкости и относительного удлинения, при сравнительно высоких значениях прочностных характеристик) получен для стали с мартенситно-аустенитной структурой (около 25% аустенита), особенно после нормализации с последующим отпуском при 400°C. Отсутствие операции отпуска (после нормализации) или отпуск при более высоких температурах приводит к получению предела текучести на 200 МПа ниже. Повышение прочности исследованных сталей при отпуске при 400°C автором диссертационной работы объясняется образованием сегрегаций различных атомов на дислокациях с последующим образованием частиц, когерентных с матрицей, а в дальнейшем теряющих когерентность.

В четвертой главе рассмотрено влияние химического состава, микроструктуры и выделений избыточных фаз на механические свойства сталей повышенной коррозионной стойкости, легированных алюминием. Для всех исследованных вариантов легирования в независимости от химического состава и технологических режимов получения свойственна микроструктура в виде крупнозернистого феррита с различным размером зерна. Стали с повышенным суммарным содержанием титана, ниобия и азота имеют после горячей прокатки меньший размер и большую вытянутость зерна. При этом измельчение зерна в рассматриваемых сталях не приводит к повышению прочности металла. Особенностью горячекатаного состояния сталей, легированных алюминием в количестве не менее 5%, является формирование хорошо развитой дислокационной ячеистой субструктуры. С увеличением содержания алюминия и снижением температуры конца прокатки ячеистая субструктура становится более выраженной, что приводит к повышению прочностных характеристик горячекатаного проката.

После закалки сталей, легированных алюминием, наблюдается снижение прочности и пластичности по сравнению с горячекатаным состоянием. Последующий

отпуск для большей части исследованных сталей приводит к повышению указанных характеристик, что согласно предположению диссертанта связано со снижением уровня напряжений, возникающих при закалке и с формированием наноразмерных выделений, вызывающих дисперсионное твердение. В стали с повышенным содержанием титана, ниобия и азота повышения прочности при отпуске по сравнению с закаленным состоянием не наблюдается, что вероятно связано с формированием крупных частиц при отпуске на присутствующих в металле субмикронных частицах, не вызывающих дисперсионное твердение.

Заключительная пятая глава диссертационной работы посвящена коррозионным испытаниям исследуемых сталей на стойкость против питтинговой коррозии химическим и электрохимическим методами. Наиболее стойкими против локальной коррозии оказались хромистые стали с повышенным содержанием молибдена. Положительное влияние оказал отпуск при 400°C по сравнению с отпуском при 600°C. В процессе отпуска при 600°C происходит распад мартенсита и интенсивное выделение карбидов хрома, что приводит к снижению коррозионной стойкости из-за обеднения хромом твердого раствора и формирования гетерогенной структуры (мартенсита отпуска). Отпуск при 400°C не вызывает образования карбидов хрома и распада мартенсита. На коррозионную стойкость в морских условиях наибольшее влияние оказала температура отпуска. С повышением температуры отпуска скорость коррозии уменьшается.

Важным условием обеспечения стойкости против питтинговой коррозии сталей, легированных алюминием, является высокое содержание алюминия и/или высокое суммарное содержание алюминия и хрома – более 9%. Такие стали во всех состояниях имеют положительный базис питтингостойкости (не менее 180мВ), что свидетельствует об образовании пассивной пленки, как и на хромистых коррозионностойких сталях.

Научная новизна диссертационной работы. В результате проведения теоретических и экспериментальных исследований получены новые результаты. Впервые показана различная роль в упрочнении по механизму дисперсионного твердения наноразмерных выделений двух типов и размерных групп. Выделения комплексного карбонитрида размерами 10-30 нм, обогащенного ниобием, которые формируются в процессе нормализации в аустените, обеспечивают высокие значения временного сопротивления и практически не влияют на предел текучести. Повышение предела текучести достигается в процессе отпуска при 400-500°C, что по мнению автора работы связано с образованием на дислокациях в мартенсите сегрегаций или предвыделений избыточных фаз, которые при повышении температуры или продолжительности отпуска трансформируются в наноразмерные (толщиной не более 2-3 нм) выделения карбонитрида, обогащенного ванадием. При этом обеспечиваются наиболее высокие показатели не только прочности, но и коррозионной стойкости, а также пластичности. Показано, что одним из механизмов повышения прочности сталей, легированных алюминием, является формирование в процессе горячей прокатки дислокационной ячеистой субструктуры, развитой тем в большей степени, чем выше содержание алюминия и ниже температура окончания прокатки. Установлено, что подавление рекристаллизации при горячей прокатке сталей, легированных алюминием, в отличие от хромистых сталей, приводит к существенному снижению пластичности, что определяет нецелесообразность микролегирования таких сталей титаном и ниобием.

Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций по оптимальному химическому составу и технологическим режимам получения хромистых коррозионностойких сталей мартенситно-аустенитного класса и получения сталей с высокой удельной прочностью, легированных алюминием, для обеспечения наиболее высоких показателей механических свойств и коррозионной стойкости.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений и подтверждается исследованиями, проведенными на современном оборудовании при использовании адекватных методов экспериментальных исследований, которые включали в себя оптическую и электронную микроскопию, рентгеноструктурный анализ, механические испытания на разрыв и ударный изгиб, а также другие методы. Выводы работы соответствуют поставленным задачам исследования.

По рассматриваемой диссертационной работе можно сделать **следующие замечания:**

Замечания к оформлению и изложению материала:

1. На стр. 15 автореферата на рис. 3 на обоих рисунках по оси стоят значение предела текучести. А должны быть значения предела текучести и предела прочности.

2. Подрисуночные надписи в автореферате оформлены по-разному. В списке используемой литературы нет единого стиля оформления источников. При написании диссертационной работы необходимо придерживаться одного стиля оформления, как автореферата, так и самой диссертации.

Замечания к тексту диссертационной работы:

1. Диссертационная работа начинается с фразы: «Активное расширение деятельности России при освоении арктического шельфа и других природных зон с экстремальными условиями эксплуатации...», но при этом в работе толком нет исследований хладостойкости сталей. Для хромистых коррозионностойких сталей проведено испытание при температуре -100°C на ударный изгиб на образцах Менаже (КСУ). Для ферритных сталей, легированных алюминием, исследований хладостойкости нет. При отсутствии испытаний всех сталей при различных температурах с построением серийных кривых ударной вязкости или работы разрушения, с определением доли вязкой составляющей в образцах и температуры вязко-хрупкого перехода говорить о хладостойкости исследованного металла не совсем корректно.

2. Работа значительно выиграла, если бы использовались известные марки сталей для сравнения, выплавленные в тех же лабораторных условиях. В таком случае оптимизация химического состава и технологических режимов получения сталей с заданным комплексом свойств оказались бы более наглядными.

3. Задача 2 диссертации заключалась в проведение комплексных механических испытаний проката из исследуемых сталей и установление закономерностей влияния химического состава и структурного состояния на показатели прочности, пластичности, вязкости и хладостойкости. При этом в выводах работы нет упоминания про вязкость сталей.

4. В работе, посвященной оптимизации химического состава и технологическим режимам производства сталей для обеспечения наиболее высоких показателей механических свойств и коррозионной стойкости оборудования и конструкций для эксплуатации в суровых климатических регионах, не рассмотрен вопрос свариваемости данных материалов.

5. В главе 2, пункт 2.2.9 диссертационной работы написано: «Для разработки методики определения скорости общей коррозии в морской воде хромистых сталей был проведен анализ морских условий в различных регионах мира...». Не совсем понятно, как именно был проведен данный анализ? Это был некий собственный анализ, выполненный диссертантом, или использовались результаты, полученные другими исследователями. Тогда необходимы ссылки на используемую литературу.

6. В диссертационной работе отсутствуют расчеты растворимости азота в исследуемых сталях. Азот в качестве легирующего элемента в металле может содержаться в двух состояниях в растворенном при атмосферном давлении и в сверхравновесном состоянии. Из текста диссертации не совсем ясно, в каком состоянии азот находится в исследуемых сталях?

7. Формулировка научной новизны постулируется, а не высказывается предположение. В пункте 2 научной новизны написано «...Повышение предела текучести достигается в процессе отпуска при 400–500 °С, что может быть связано с образованием на дислокациях в мартенсите сегрегаций или предвыделений избыточных фаз...». Здесь выдвигается предположение, а не указывается открытый в работе научный факт.

Сделанные замечания не снижают положительной оценки работы, так как не затрагивают ее основные положения и полученные в диссертации результаты.

Работа Удоды К.А. выполнена на хорошем научно-техническом уровне и отвечает требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней (Постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013г. №842), а сам автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Официальный оппонент:

Главный специалист по металловедению
и термообработке

Инженерно-технологического центра
АО «ВМЗ», кандидат технических наук
607060, Нижегородская обл., г. Выкса
ул. Братьев Баташевых, д.45
тел.: +7(83177)-9-54-49,
E-mail:naumenko_vv@vsw.ru

подпись

Науменко Виталий Владимирович
«10» 10 2016г.

Подпись Науменко В.В. заверяю:
Директор Инженерно-технологического центра,
АО «ВМЗ», к.т.н.

подпись

Степанов Павел Петрович
«10» 10 2016г.

