

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Ускова Дмитрия Петровича «Повышение эксплуатационных свойств высокопрочных комплекснолегированных сталей для обсадных труб в хладостойком и коррозионно-стойком исполнениях», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

### АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

В связи с истощением традиционных месторождений, открытых в 60-70-х годах XX века, развиваются масштабные проекты по освоению запасов нефти и газа с осложненными условиями добычи, что требует повышения эксплуатационных свойств скважинного оборудования и колонн обсадных и насосно-компрессорных труб.

Это предъявляет дополнительные требования к комплексу свойств стали для труб: наряду с высокой прочностью и пластичностью материал должен обладать повышенными характеристиками хладостойкости при температуре минус 60 °С и стойкостью к сульфидному коррозионному растрескиванию.

Обсадные трубы применяются для надежного крепления нефтяных и газовых скважин при их строительстве и эксплуатации. Они необходимы для предотвращения осыпания стенок скважины в процессе бурения в неустойчивых грунтах. Следует отметить, что новые месторождения имеют значительную глубину залегания запасов, что накладывает дополнительные условия по выбору прочностных характеристик для обсадных труб (предел текучести материала свыше 758 МПа).

Традиционно используемые среднеуглеродистые хромомолибденовые стали после термической обработки путем термоулучшения позволяют выполнить современные требования к обсадным трубам, но в условиях конкуренции встает вопрос об экономической целесообразности выбора химических составов сталей для решения конкретных задач. Помимо хрома и молибдена добавляют микролегирующие такие как ванадий и ниобий, что значительно улучшает эксплуатационные свойства труб.

Высокие прочностные характеристики, уровень ударной вязкости при отрицательных температурах и коррозионная стойкость в среде сероводорода зависят как от легирования стали, так и от технологии производства. Таким образом, важно понимать, как ключевые свойства стали этого класса изменяются в зависимости от содержания молибдена и дополнительного легирования ниобием и ванадием, а также режимов термической обработки.

### ДОСТОВЕРНОСТЬ И НОВИЗНА ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основные положения диссертационной работы Д.П. Ускова в достаточной степени обоснованы и достоверны. Достоверность результатов обес-



печена использованием современного оборудования и программного обеспечения. Она определяется применением взаимодополняющих методов исследования структуры, а также использованием результатов механических испытаний, проведенных в соответствии с ГОСТ, отраслевыми и международными стандартами. Достоверность проведенных исследований подтверждают положительные результаты их внедрения в производство бесшовных труб, предназначенных для обустройства обсадных колонн в условиях Крайнего Севера и на шельфовых месторождениях.

Новизна основных положений представленной диссертационной работы заключается в следующем:

- показано положительное влияние молибдена на стойкость высокопрочных трубных сталей к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением за счет повышения устойчивости переохлажденного аустенита с формированием преимущественно мартенситной структуры при закалке и замедления роста карбидов типа  $Me_3C$  при отпуске, что позволяет проводить его максимально близко к температуре  $A_{c1}$  с достижением заданной прочности при низкой плотности дислокаций, снижая чувствительность к водородному охрупчиванию;

- установлено необходимое количество молибдена для легирования трубных сталей с пределом текучести более 758 МПа в хладостойком до температур эксплуатации минус 60 °С исполнении (0,30÷0,35 мас.%) и в коррозионно-стойком исполнении с пороговым напряжением 85 % от минимально нормируемого предела текучести в водном растворе, насыщенном сероводородом, (0,70÷0,80 мас.%)

- определено влияние микролегирующих добавок на микроструктуру и свойства среднеуглеродистых хромомолибденовых сталей после улучшающей термообработки, при этом ниобий в количестве 0,02÷0,03 мас.% позволяет получить наследственное аустенитное зерно не более 12 мкм и повысить стойкость к разрушению как при пониженных температурах, так и в средах, насыщенных сероводородом, а ванадий в количестве 0,03÷0,05 мас.% способствует повышению прочности, но снижает ударную вязкость;

- показано, что требуемая стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжением достигается в сталях, легированных 0,70÷0,80 мас.% молибдена, с 0,02÷0,04 мас.% ниобия и 0,03÷0,05 мас.% ванадия благодаря формированию после закалки с температур  $A_{c3}+(50\div 60)$  °С и отпуска при температурах 680÷700 °С с продолжительностью не менее 1,5 часа мелкодисперсной однородной микроструктуры, обладающей минимальной плотностью дислокаций, с субмикронными частицами цементита, легированного молибденом и хромом, и наноразмерными специальными карбидами на основе ниобия и ванадия.

## ЦЕННОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДЛЯ НАУКИ И ПРАКТИКИ

Значимость полученных результатов для науки заключается в том, что исследовано влияние системы легирования Cr-Mo-V-Nb на микроструктуру,



механические свойства и, в частности, на хладостойкость сталей для высокопрочных обсадных труб;

- установлено влияние химического состава и режимов упрочняющей термообработки на стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию хромомолибденовой микролегированной стали;
- установлены закономерности влияния температуры аустенитизации, прокаливаемости стали и температуры отпуска мартенсита на стойкость металла обсадных труб в средах, насыщенных сероводородом;

Ценность полученных результатов для практики состоит в том, что:

- на основании результатов исследования разработан химический состав стали и режим термической обработки, позволившие впервые в отечественной практике произвести бесшовные горячедеформированные трубы группы прочности С110 в коррозионно-стойком и группы прочности Q125 в хладостойком исполнениях, предназначенных для обустройства нефтяных скважин, работающих в средах, содержащих сероводород, и в условиях Крайнего Севера в соответствии с современными требованиями, обеспечив полное импортозамещение в данном сегменте;
- результаты работы использованы при разработке стандарта СТО ТМК 56601056-0022-2011(ред.3) «Трубы стальные бесшовные для нефтяной и газовой промышленности и общего назначения» (Унифицированные химические составы сталей). Данный стандарт устанавливает требования к химическому составу сталей для производства труб на предприятиях Группы ТМК;
- внедрение результатов работы позволило за период с 2018 по 2022 год выпустить более 20 тыс. тонн обсадных труб в хладостойком исполнении и более 5 тыс. тонн высокопрочных труб в коррозионно-стойком исполнении, что обеспечило суммарный экономический эффект свыше 325 млн руб.

## ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

Представленная работа является завершённым исследованием, выполненным в достаточном объёме, с представлением всех необходимых научных, экспериментальных, расчетных и практических материалов. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе, списка использованных источников. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста, содержит 77 рисунков, 42 таблицы, список использованных источников из 103 наименований и 3 приложения.

**Во введении** указана степень проработки и обозначена актуальность тематики исследования, сформулированы цель работы и задачи диссертационного исследования, приведены научная новизна работы и практическая значимость исследований.

**В первой главе** описаны основные понятия и теоретические аспекты хладостойкости и коррозионной стойкости трубных сталей. Рассмотрены методы определения порога хладостойкости и виды коррозионных разрушений.



Подробно рассмотрен механизм сульфидного коррозионного растрескивания под напряжением.

Определены основные факторы, влияющие на хладостойкость и коррозионную стойкость под напряжением сталей, используемых для производства обсадных труб. Показано влияние легирующих элементов на эксплуатационные свойства труб.

Проведен подробный анализ технических требований и опыта производства обсадных труб с нормируемым пределом текучести свыше 758 МПа в хладостойком и коррозионно-стойком исполнении всех основных производителей труб, в частности заводов Группы ТМК.

**Во второй главе** произведен выбор составов стали экспериментальной (лабораторной) и промышленной выплавки.

Приведены методики и указаны приборы и оборудование, применявшиеся для исследования структуры стали, кинетики образования и распада аустенита, механических характеристик прочности, пластичности и вязкости.

Также описаны методики и оборудование для испытания на стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжением и испытания на сульфидное коррозионное растрескивание под напряжением SSC с определением критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_{ISSC}$ .

**В третьей главе** проведена оценка влияния легирования на свойства высокопрочных сталей в хладостойком исполнении. А именно, рассмотрено влияние изменения содержания молибдена от 0,15 до 0,53 мас.% на структуру и свойства хромомолибденовых сталей, а также в базовой стали, содержащей 0,25 мас.% С и 0,35 мас.% Мо, роль микролегирующих добавок ванадия и ниобия.

Установлено, что легирование стали сильными карбидообразующими элементами повышает прочность, но при этом увеличивает склонность к хрупким разрушениям, причем ванадий оказывает более существенное влияние, чем ниобий.

Проанализировано, как стали, имеющие различную склонность к хрупким разрушениям, ведут себя в условиях действия напряжений и агрессивной среды. Установлено, что легирование молибденом от 0,15 до 0,53 мас.% сопровождается не только ростом прочностных свойств, но и снижением времени до разрушения. Наименьшее сопротивление сульфидному растрескиванию под напряжением характерно для сталей, легированных ниобием и ванадием, имеющих как высокие прочностные свойства, так и пониженное сопротивление хрупким разрушениям.

**В четвертой главе** проведен сравнительный анализ структуры и свойств традиционно используемой стали марки 26ХМФБ-1 и выбранной на основе патентного поиска и опыта работы с коррозионно-стойкими сталями в среде сероводорода сталью марки 26ХМФБА-2.

Ключевым отличием сталей является более узкая область существования бейнита в стали марки 26ХМФБ-2, что предполагает образование большего количества мартенсита при закалке и более дисперсных, преимущественно глобулярных карбидов при отпуске стали.



Установлено, что в исследованной хромомолибденовой стали 26ХМФБ-2 с мартенситной микроструктурой после закалки при высоком отпуске формируется сорбит отпуска с преимущественно речной морфологией структурных элементов матрицы.

С повышением температуры отпуска от 680 до 720 °С ударная вязкость возрастает, причем во всех случаях у стали марки 26ХМФБ-2 она была несколько ниже, чем у стали марки 26ХМФБ-1. Температура вязкохрупкого перехода  $T_{50}$  для обеих марок стали при всех температурах отпуска в интервале 680÷720 °С лежит ниже минус 80 °С. Исключение составляет сталь 26ХМФБ-2, отпущенная при 680 °С, у которой температура вязкохрупкого перехода  $T_{50}$  равна минус 65 °С.

Проведены обширные исследования сульфидного растрескивания под напряжением (СРН) и получены определенные взаимосвязи сопротивления разрушению с температурой аустенизации.

**Пятая глава** посвящена проведению опытно-промышленного опробования производства продукции из стали марок 26ХМФБ и 26ХМФБ-2, выбранных в ходе исследования.

Диссертационная работа оформлена с использованием современных компьютерных средств набора и печати. Большинство рисунков выполнено с использованием компьютерной графики, что обеспечило их наглядность и чёткость. Язык изложения технически грамотный, в работе практически отсутствуют опечатки и другие дефекты орфографии.

#### ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ОПУБЛИКОВАНИЯ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ В НАУЧНОЙ ПЕЧАТИ

Основное содержание диссертации опубликовано в 11 работах, что позволило научной общественности достаточно подробно ознакомиться с материалами и выводами диссертации. Имеется четыре публикации в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, а также публикация в издании, индексируемом в БД Scopus.

#### СООТВЕТСТВИЕ СОДЕРЖАНИЯ АВТОРЕФЕРАТА ОСНОВНЫМ ПОЛОЖЕНИЯМ ДИССЕРТАЦИИ

Автореферат полностью отражает основные положения диссертационной работы, соответствует требованиям к его форме и объему.

#### ЗАМЕЧАНИЯ

1. В работе идентификация карбидов осуществляется только на основании анализа карт распределения химических элементов, причем распределение углерода не приводится (рис. 30). Почему с этой целью не используются ре-

зультаты фазового рентгеноструктурного анализа и/или картины микродифракции при исследовании фольг на просвет?

2. На стр.92 диссертации обсуждается концентрация абсорбированного водорода (2,47 и 7,9 мл/100г.). Каким методом и на каком приборе определялась концентрация водорода? Здесь же приводится обсуждение взаимосвязи сульфидного коррозионного растрескивания под напряжением (СКРН) с плотностью дислокаций. После предлагаемого режима отпуска плотность дислокаций уменьшается и склонность к СКРН тоже. С чем еще может быть связана склонность к СКРН ?

3. При анализе размера аустенитного зерна сколько зёрен анализировали (каков объем выборки) и какова ошибка в определении среднего размера зерна?

4. На многих рисунках не указано увеличение: рис. 38, 39, 46, 47, на рис.2 в приложении 1 и рис. 13 в приложении 2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация Ускова Дмитрия Петровича «Повышение эксплуатационных свойств высокопрочных комплекснолегированных сталей для обсадных труб в хладостойком и коррозионно-стойком исполнениях» выполнена на достаточном научно-техническом уровне, является самостоятельной законченной научной квалификационной работой и соответствует требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Усков Дмитрий Петрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Официальный оппонент,

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, директор, главный научный сотрудник лаборатории системного моделирования,

620049 г. Екатеринбург, ул. Комсомольская 34

[Shveikin60@mail.ru](mailto:Shveikin60@mail.ru)

8 (912) 283 25 25

05.03.2024 г.



В.П. Швейкин

