

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Пумпянского Дмитрия Александровича «Научные основы разработки сталей, сплавов и высокоэффективных технологий для производства нефтегазовых и промышленных труб нового поколения», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17 –
Материаловедение

Актуальность работы, нацеленной на разработку научных основ создания высокопрочных коррозионно-стойких сталей и сплавов для высокоэффективного производства бесшовных труб специального назначения через установление закономерностей формирования фазового состава, структуры и комплекса свойств путем оптимизации химического состава и режимов термической обработки, определяется быстро растущими требованиями к продукции и необходимостью достижения уникального комплекса свойств. Экономическое развитие требует создания новых материалов, отличающихся высоким эксплуатационными свойствами, обеспечивающих надежность конструкций в сложных условиях эксплуатации.

В работе сделан подробный анализ причин выхода на новый уровень требований к трубам для различных отраслей. Применительно к разработке новых запасов углеводородов сформулированы сложные задачи, требующие решения. Это возможности достижения уникального комплекса свойств, заключающегося в сочетании высокой прочности и сопротивления разрушению в условиях экстремально низких температур, а также при интенсивном коррозионном воздействии вследствие высокой концентрации углекислого газа и/или сероводорода. В связи с этим исследование было направлено на целый ряд материалов различных классов и уровня легирования. По мере повышении силы коррозионного воздействия необходим переход от сталей, легированных хромом и молибденом в ограниченном количестве при целевом микролегировании сильными карбидообразующими элементами к высокохромистым нержавеющей сталям мартенситного, а затем и аустенитного класса. Наиболее стойкие из исследованных материалов -сплавы на железо-никелевой основе, упрочняемые до заданного уровня путем холодной пластической деформацией. Изучены особенности формирования свойств в нержавеющей сталях аустенитного класса, включая особенности сопротивления деформации при повышенных температурах, что важно для технологических трубопроводов различных отраслей и, в частности, энергетических установок. Специфические задачи обеспечения надежности теплообменных

аппаратов, работающих с морской водой, потребовал рассмотрения особенностей формирования структуры и свойств при изготовлении труб из ряда титановых сплавов.

Вышеуказанное применительно к условиям массового производства труб потребовало решить комплекс задач, направленных на установление особенностей формирования фазового состава и микроструктуры для всех классов материалов, рассмотренных в представленном исследовании. Результатом работы стали сформулированные на основе проведенных исследований требования к базовым химическим составам стали для изготовления труб всех групп прочности в обычном, хладостойком, сероводородостойком исполнении в соответствии с требованиями российских и международных стандартов, а также ключевых потребителей трубной продукции для их экономически эффективного производства и применения. Кроме того, проведенные исследования позволили разработать составы и способы упрочняющей обработки новых высокохромистых марок стали для изготовления хладостойких труб, стойких к углекислотной коррозии в условиях добычи углеводородов, а также труб, стойких к радиационному охрупчиванию и распуханию в активной зоне реакторов нового поколения, а также высоколегированных сплавов, в том числе титановых, с высокой стойкостью к различным видам коррозии.

Диссертационная работа изложена на 296 страницах, содержит введение, шесть глав, заключения, список литературы из 192 цитируемых источников, приложения. Она включает 104 рисунка и 54 таблицы.

В первой главе проанализированы современные требования к трубам, определяемые необходимостью решения крупных задач для ответов на вызовы в области обеспечения энергией на среднесрочный и долгосрочный период. Для топливно-энергетического комплекса это связано, в первую очередь, с истощением традиционных запасов углеводородов и необходимостью освоения новых технологий добычи в сложных условиях. Анализ состояния и перспектив развития ресурсной базы ТЭК показал, что тенденцией последних лет является перемещение добычи в удаленные районы Сибири и Крайнего Севера, увеличение глубин залегания, наличия в добываемом флюиде коррозионно-активных компонентов, в частности углекислого газа и сероводорода. Для добычи характерен высокий перепад температур от экстремально низких на поверхности в регионе добычи до высоких на забое, что характерно для глубоких скважин и требует использования новых высокопрочных материалов одновременно стойких к коррозионному воздействию при высоких температурах и к хрупкому

разрушению в условиях холодного и арктического климата. Это характерно как для добычи на суше, так и для работы на шельфе северных морей.

Показано, что в зависимости от условий эксплуатации требуются материалы с различным уровнем легирования и, соответственно, разных структурных классов. Для высокопрочных хладостойких и сероводородостойких обсадных и насосно-компрессорных труб в качестве основного материала определены хромомолибденовые стали, микролегированные сильными карбидообразующими элементами. При эксплуатации в условиях, осложненных углекислотной коррозией вследствие высокого парциального давления углекислого газа, высокой температуры на забое в условиях сильной минерализации, рационально применение сталей с содержанием хрома 12-14%. Однако, в связи с повышенными требованиями к прочности и хладостойкости решение может быть найдено на основе сложного комплексного легирования, обеспечивающего возможности достижения целевого фазового состава на всех стадиях производства труб. Одновременное воздействие высокой температуры и коррозионной среды при высоких содержаниях углекислого газа и сероводорода определяет необходимость применения сплавов на железо-никелевой основе, высокая прочность которых может быть достигнута путем холодной пластической деформации.

Решение сходных задач требуется для развития энергетики, включая разработку технологий производства труб, отличающихся повышенной жаропрочностью, стойкостью к радиационному распуханию и охрупчиванию и хорошей коррозионной стойкостью. Перспективным материалом в этом случае являются стали на основе 12 масс. % хрома, закономерности формирования структуры и свойств близки к другим материалам с близким содержанием хрома и других элементов таких как Mo, W, V и Nb. В результате были определены ряд групп сталей, важных для производства новых видов труб, востребованных для развития энергетического комплекса.

Во второй главе подробно изучены закономерности формирования микроструктуры и свойств стали для высококачественных нарезных хладостойких труб высокой прочности. Решение задачи было основано на получении преимущественно мартенситной структуры на всю толщину стенки при закалке и обеспечении высокой степени дисперсности структурных составляющих после отпуска. Аналогичный подход рассмотрен для обеспечения высокого сопротивления сульфидному коррозионному растрескиванию металла высокопрочных труб с пределом текучести не менее 758 МПа. На основе выявленных закономерностей эволюции микроструктуры на всех стадиях обработки были разработаны принципы

достижения требуемых показателей. Было установлено, что в зависимости от требуемого уровня прочности необходимо применять стали с различным целевым содержанием молибдена, при этом важную роль играет и микролегирование сильными карбидообразующими элементами ниобием и ванадием. В работе показана различная роль этих элементов, поскольку автором обосновано, что ниобий в значительной степени способствует формированию мелкого исходного аустенитного зерна, а ванадий участвует в упрочнении за счет дисперсионного твердения. Убедительно показано, что измельчение пакетов мартенсита в закаленном состоянии и отпуск заданной глубины является основой достижения требуемого комплекса свойств и заданного уровня прочности, хладостойкости и сопротивления сульфидному коррозионному растрескиванию. В результате разработаны стали типа 26ХМФБА, позволяющие достичь необходимый комплекс свойств. При этом созданы технологии для получения хладостойких труб группы прочности Q125, а сероводородостойких группы прочности С110 с пределом текучести не менее 758 и 862 МПа, соответственно. При этом определены оптимальные диапазоны концентрации Mo, V, Nb для каждой группы прочности, позволяющие обеспечивать достижение заданного предела текучести и порогового напряжения сопротивления сульфидному коррозионному растрескиванию за счет формирования карбидов сложного состава.

Третья глава посвящена решению задачи освоения производства труб стойких к углекислотной коррозии за счет высокого содержания хрома в количестве 12-14 масс.%. При проведении исследования убедительно показано, что известные нержавеющие стали мартенситного класса типа 20Х13 не могут быть применены, поскольку не обеспечивают ни требуемой прочности, ни хладостойкости. В то же время, использование сталей супермартенситного класса неоправданно, поскольку они отличаются высоким содержанием дорогостоящих легирующих элементов, а также сложны в производстве в условиях трубных заводов. В связи с этим потребовалось создание собственных марок на основе анализа закономерностей формирования фазового состава и микроструктуры на всех стадиях производства. Путем проведения термодинамических расчетов и сопоставления их результатов с наблюдениями за структурообразованием в сталях опытной и промышленной выплавки был установлен ряд важных закономерностей. Убедительно показано, что в зависимости от соотношения содержания аустенитообразующих и ферритообразующих элементов в сталях исследованного типа могут реализовываться различные последовательности фазовых превращений. Особенности влияния типа кристаллизации на однородность химического состава и негативное влияние дельта-феррита на

технологическую пластичность при горячей деформации и хладостойкость в конечном термообработанном состоянии позволили определить рекомендуемый диапазон значений хромового и никелевого эквивалентов. Сделанные рекомендации подтверждены экспериментально путем исследования фазового состава стали с различным соотношением содержания аустенитообразующих и ферритообразующих элементов. Изучено влияние температуры закалки и режима отпуска на количество остаточного аустенита. Показано, что повышение температуры отпуска (отжига) в двухфазную ($\gamma+\alpha$) область может способствовать стабилизации аустенита при максимальном его количестве до 18,5 %, что оказывает сильное влияние на комплекс механических свойств. Установленные закономерности использованы при разработке новых марок стали с 13 % хрома, предназначенных для изготовления труб различных групп прочности и исполнений от обычного до хладостойкого и особо хладостойкого. Разработанные стали прошли полный цикл освоения и постановки на производство, создана и согласована в установленном порядке нормативно-техническая документация. Проведенные испытания подтвердили соответствие продукции по показателю стойкости к углекислотной коррозии.

Исследованы возможности повышения прочности и коррозионной стойкости высокохромистых сталей за счет легирования и соответствующего изменения фазового состава. Установлено, что при повышении содержания хрома в стали до 15,5 масс. % возможны различные ситуации в зависимости от содержания остальных элементов. Так, при повышении содержания в такой стали ферритообразующих становится вероятным сохранения повышенного количества дельта-феррита, что негативно сказывается как на возможности достижения высокой прочности, так и вязкости (хладостойкости). Увеличение содержания аустенитообразующих элементов способствует стабилизации аустенита, сохранению его в структуре в количестве до 50-55%, что не позволяет достичь высоких значений предела текучести. Его количество может быть снижено за счет повышения температуры закалки либо за счет проведения промежуточного отжига, снижающего стабильность аустенита за счет выделения карбидов на основе хрома. Установлено, что оптимальное сочетание прочности и вязкости может быть обеспечено в стали оптимального состава за счет формирования мартенситной структуры и последующего отпуска при температуре ниже критической точки A_1 .

Выявленные закономерности влияния химического состава на образование фаз и формирование свойств в высокохромистых сталях подтверждены и при разработке технологии производства труб круглого и

шестигранного сечения для активной зоны реакторов нового поколения по схеме горячее прессование - холодная прокатка - профилирование. В результате разработана технология получения таких труб ферритно-мартенситного класса, обладающих необходимым комплексом свойств как при комнатной, так и высоких температурах. Разработана нормативно-техническая документация на новый вид продукции из сталей марок ЭП823-Ш и ЭП450-Ш с 10,0-12,0 и 11,0-13,5 % хрома, соответственно.

В четвертой главе исследовано влияние химического состава и технологии производства труб на предел текучести массовых марок нержавеющей сталей аустенитного класса. Показано, что отличия по пределу текучести могут составлять 90–120 МПа, а по пределу прочности – на 95–145 МПа. Это наблюдается во всем диапазоне температур испытания от 20 до 500 °С. Установлены факторы, оказывающие наибольшее влияние на прочность. Согласно проведенному анализу ими являются размер зерна и концентрация углерода, азота или титана в твердом растворе, которые могут составлять до 45 % предела текучести стали. Показано, что особенность деформационного поведения таких сталей состоит в немономтонном изменении временного сопротивления при повышении температуры испытания вследствие развития динамического деформационного старения в характерном диапазоне скорости деформации. Обнаруженные закономерности использованы при разработке стандарта «Трубы бесшовные и сварные из коррозионно-стойкой стали для трубопроводов, работающих под давлением». На основе выполненных исследований предложен способ производства бесшовных горячедеформированных коррозионно-стойких труб из сталей аустенитного класса типа (08-12)X18H10T, который защищен патентом РФ и предполагает получение бесшовных труб ответственного и специального назначения на непрерывных станах из непрерывнолитой или предварительно деформированной заготовки с заданной микроструктурой и механическими свойствами. Новый способ производства бесшовных горячедеформированных труб из сталей марок 08X18H10T и 12X18H10T использован для производства продукции из коррозионно-стойких сталей на Волжском трубном заводе, и полученные свойства изделий подтвердили его эффективность.

Исследование особенностей структуры и свойств аустенитных сплавов на железо-никелевой основе показало, что композиции, легированные молибденом, медью, вольфрамом и другими элементами в состоянии после холодного наклепа могут обеспечивать высокую прочность в сочетании с хорошей коррозионной стойкостью в широком диапазоне температур и парциальных давлений углекислого газа и сероводорода. Изучено влияние

содержания основных элементов на склонность к образованию σ -фазы при старении и установлены рекомендуемые соотношения содержания никеля, молибдена и вольфрама. Показано, что предварительная холодная пластическая деформация (ХПД) с относительно небольшими степенями (коэффициент вытяжки до 1,5) вызывает значительное повышение склонности сплавов к формированию σ -фазы. Увеличение степени предварительной ХПД приводит к дальнейшему ускорению выделения интерметаллидов и смене их морфологии. Экспериментально подтверждено, что выделение интерметаллидов в структуре значительно снижает запас вязкости сплава в высокопрочном состоянии. Выявленные закономерности позволили разработать состав коррозионно-стойкого сплава марки ТМК-С и технологию производства высокопрочных труб класса прочности Р110 для применения в особо сложных условиях. Промышленное опробование, а в последующем и освоение массового производства из нового сплава ТМК-С осуществлено на Волжском и Синарском трубных заводах. Состав сплава защищен патентом РФ. Впоследствии разработанная технология была применена на Челябинском трубопрокатном заводе и предприятии «ТМК-Инокс».

В пятой главе рассмотрены технологии производства передельных горячепрессованных и холоднокатаных труб из α - и псевдо- α сплавов титана. Показано, что упрочнение таких сплавов может быть обусловлено только легированием и деформацией за счет повышения плотности дефектов кристаллического строения и измельчения зерна, а эффекты дисперсионного упрочнения за счет низкой легированности твердого раствора практически отсутствуют. Диссертантом предложена технология, включающая процесс горячего прессования передельных труб по предложенным температурно-скоростным режимам и последующую многопроходную холодную прокатку с рекомендованными степенями деформации, с промежуточным и окончательным отжигами при заданных температурах, которая позволяет обеспечить формирование комплекса механических свойств в холоднокатаных трубах конечного размера 25x2мм (ПТ-1М), 50x4мм (ПТ-7М), 38,1x5,36 мм (Ti-3Al-2,5V), удовлетворяющего требованиям российских ТУ (сплавы ПТ-1М, ПТ-7М) и зарубежных стандартов (сплав Ti-3Al-2,5V).

В шестой главе приведены результаты широкомасштабного внедрения разработанных технологий на крупнейших трубных заводах России – ВТЗ, ЧТПЗ, ТАГМЕТ, СинТЗ, СТЗ, ПНТЗ. Разработки легли в основу комплексной реконструкции производств, направленных на создание новой технологии

производства высокопрочных труб специального назначения из высококачественной непрерывно-литой заготовки собственного производства. В результате внедрения обеспечена технологическая независимость предприятий ТЭК от поставок продукции импортного производства. Освоение производства высокопрочных труб из сталей исследованных структурных классов согласно представленной справке, утвержденной генеральным директором ПАО «ТМК» позволило в 2018-2023 гг. получить значительный экономический эффект в размере 95 млрд рублей.

Результаты проведенного исследования обладают несомненной **научной новизной**. Она состоит в формулировании особенностей микроструктуры высокопрочных сталей, определяющих стойкость к разрушению в условиях как низких температур, так и воздействия сероводородсодержащих сред с конкретными рекомендациями по составу и параметрам термической обработки. Показана роль основных легирующих элементов, а также микролегирования, необходимого для достижения целевой микроструктуры. Важным результатом работы стало описание особенностей формирования микроструктуры в нержавеющей сталях мартенситного класса на основе составов с 13 масс.% хрома и содержащих ряд элементов, определяющих возможность достижения требуемого комплекса свойств. При этом показано, что устойчивое обеспечения требуемых характеристик в высокопрочном состоянии может быть достигнуто за счет формирования мартенситной структуры при соблюдении правильного баланса содержания ферритообразующих и аустенитообразующих элементов. При этом оптимальный химический состав позволяет обеспечить благоприятное фазовое состояние на всех стадиях обработки, включая кристаллизацию при разливке, горячую пластическую деформацию и термическую обработку. Дан анализ влияния химического состава и микроструктурных факторов на прочностные характеристики сталей аустенитного класса в широком интервале температур с определением наиболее сильных. Для сплавов на железо-никелевой основе, отличающихся высокой коррозионной стойкостью и упрочняемых путем холодной деформацией, определено влияние содержания основных легирующих элементов на склонность к формированию нежелательных интерметаллидных фаз. При проведении исследования использованы различные современные взаимно дополняющие методы анализа, что обеспечивает высокую достоверность полученных результатов.

Практическая значимость работы для развития страны чрезвычайно высока, поскольку полученные результаты позволили разработать новые марки стали для изготовления специальных видов труб. Разработаны и

внедрены в массовое производство высокоэффективные технологии изготовления труб по различным технологическим схемам. Найденные решения защищены патентами РФ. Освоение производства новых видов труб позволило исключить зависимость от импорта, открыть новые возможности применения труб в ряде ключевых отраслей экономики, что позволило получить значительный экономический эффект, который составляет согласно приложенной справке около 95 млрд. рублей.

Достоверность результатов и выводов работы обеспечивается использованием комплексных взаимодополняющих методов исследования структуры и свойств на сертифицированном оборудовании и практическими результатами применения изготовленных труб в промышленности.

Результаты диссертации представлены на профильных научно-технических конференциях и семинарах международного уровня. Основное научное содержание диссертации изложено в научных трудах соискателя. Опубликовано 28 научных работ, включая 14 статей в рецензируемых научных журналах из списка ВАК РФ, в том числе 13 опубликовано в изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science. Кроме того, опубликована монография и получено 9 патентов РФ. Диссертация изложена последовательно, логично, написана грамотным научным языком с использованием признанной терминологии, обозначений и сокращений. Название, содержание и текст диссертации соответствуют паспорту специальности 2.6.17 – Материаловедение. Содержание автореферата полностью соответствует тесту диссертации.

Замечания по работе.

1. В ряде случаев, при сопоставлении различных вариантов, например, показателей пластичности и вязкости исследованных сталей в зависимости от температуры закалки (табл. 4.7) полученные результаты было бы полезно дополнить соответствующими статистическими оценками.

2. Логичным было бы уделить большее внимание вопросам, связанным с механизмами разрушения опытных композиций, особенно в связи с сопоставлением уровня их хладостойкости. Углубленное понимание механизмов разрушения позволило бы более полно оценить факторы, определяющие технологически неизбежную неоднородность качества металла. В этой связи фрактографический анализ мог бы занять соответствующее его возможностям место в работе.

3. Программный комплекс Thermo-Calc получил широкое распространение при поиске оптимальных составов. Однако он предусматривает использование при предсказании термодинамических

констант веществ (из пакета результатов предыдущих экспериментов, откуда их нашли), но в них нередко отсутствуют сведения о погрешности констант (из давних и не всегда надежных опытов) и оценки из них ошибки прогноза. Эти вопросы следовало более подробно обсудить в работе, в связи с уточнением возможностей программного комплекса и границ его эффективного применения.

4. Соискатель совершенно справедливо при создании новых составов сталей исходил из положения о необходимости учета последующей эволюции структур этих составов в процессе кристаллизации, горячей деформации и термической обработки (с. 20 автореферата). Такой подход, основанный на представлении о технологической наследственности при производстве материалов, является принципиально важным и далеко не всегда применяется на практике. С учетом масштаба составов сталей, исследованных в работе, объемов их производства, было бы целесообразно обобщить данный опыт, если не в рамках отдельной главы диссертации, то в рамках отдельного научного труда в перспективе.

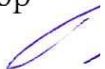
5. Оценка качества сталей по структуре в работе основывалась, в первую очередь, на нормативных документах, действующих в отрасли, что вполне оправдано с учетом практической направленности работы. Однако с учетом накопленной базы данных (цифровых изображений разнородных структур) можно получить более полную информацию о неоднородности строения структур, критических параметров структур, определяющих разброс качества. На этой основе можно разработать более совершенную линейку стандартов (основанных на цифровизации измерений структур), оценивающих и регламентирующих структуры. Отсюда возможность не только более детальной оценки качества металла по структуре, но и более глубокого понимания механизмов влияния неоднородности структур на свойства металлопродукции (их повышенный разброс). С учетом этого возможна выработка физически обоснованных технологических решений (в рамках действующих технологий), направленных на улучшение качества металлопродукции – повышения уровня его однородности на верхнем пределе распределения (для однотипных видов металлопродукции).

Однако указанные замечания не влияют на общую оценку работы, которая является законченным целостным исследованием на актуальную тему, в котором изложены новые научно обоснованные технические, технологические или иные решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны. Работа выполнена на высоком научном уровне, а ее результаты внедрены в широком масштабе на ряде крупнейших предприятий трубной промышленности России, а новая

продукция получила широкое применение в сфере добычи углеводородов, энергетике, включая атомное машиностроение. В связи с вышеизложенным считаю, что представленная работа полностью соответствует требованиям, пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ», предъявляемым к докторским диссертациям. В ней изложены новые научно обоснованные технологические решения для разработки составов и производства высокопрочных бесшовных стальных и титановых труб, обладающих повышенным уровнем свойств, для применения в нефтегазовой и энергетической областях промышленности, а автор Пумпянский Дмитрий Александрович заслуживает присвоения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17 – Материаловедение.

Официальный оппонент,
профессор кафедры металловедения и
физики прочности
Федерального государственного
автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский
технологический университет «МИСИС»,
доктор технических наук по специальности
05.16.01 – Металловедение и
термическая обработка металлов,
профессор

Кудря Александр Викторович


119049, Москва, Ленинский проспект,
д. 4, стр. 1,
Электронная почта: avkudrya@misis.ru

Тел.: 8-495-638-46-86


07.06.2024
ПОДПИСЬ А.В. Кудря ЗАВЕРЯЮ
Проректор по безопасности
и общим вопро
НИТУ МИСИ

