

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора, профессора высшей школы физики и технологий материалов института машиностроения, материалов и транспорта Кондратьева Сергея Юрьевича на диссертационную работу Пумпянского Дмитрия Александровича «Научные основы разработки сталей, сплавов и высокоэффективных технологий для производства нефтегазовых и специальных труб нового поколения», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности: 2.6.17. Материаловедение

**Актуальность темы диссертации.** Снижение ресурсного потенциала старых нефтегазовых месторождений и ввод новых сверхглубоких скважин сложного профиля с повышенным содержанием сероводорода, углекислого газа и т. д. требуют развития технологических проектов извлечения нефти и газа в более сложных условиях эксплуатации обсадных и насосно-компрессорных труб. Это требует разработки новых прогрессивных подходов к повышению работоспособности высоконагруженного металла нефтегазовых труб из легированных сталей различных структурных классов повышенной прочности и удовлетворительной пластичности без применения индустриальной сварки. повышение работоспособности оборудования актуально и для специальных труб, применяемых в атомной и тепловой энергетике и в других отраслях машиностроения. Создание и применение бесшовных труб из коррозионно- и хладостойких сталей и технологий их изготовления актуализирует комплекс вопросов научного и системного обоснования работоспособности материалов для получения линейных трубных изделий требуемых типоразмеров с повышенным комплексом служебных характеристик. В связи с этим разработка сталей и сплавов, а также технологий изготовления из них высокопрочных бесшовных труб для нефтегазовой, энергетической и других отраслей промышленности является, безусловно, актуальной задачей современного материаловедения.

**Структура и основное содержание работы.** Диссертационная работа Пумпянского Д.А., изложенная на 296 страницах машинописного текста, состоит из введения, шести глав, выводов и списка литературы, который включает 192 источника, а также приложения в виде акта внедрения результатов исследования.

В **первой главе** проанализированы особенности материалов и технологии изготовления бесшовных труб, определены требования к металлу обсадных труб из сталей в хладостойком и антикоррозионном исполнениях.

В качестве материалов труб рассматривались следующие группы:

1. для нефтегазового сортамента – низко- и среднеуглеродистые хромомолибденовые стали перлитного класса, устойчивые к коррозионно-агрессивному сероводороду;

2. для нарезных труб, имеющих повышенную концентрацию напряжений в резьбовом соединении на внешней поверхности, - низкоуглеродистые высокохромистые стали мартенситно-ферритного класса, не склонные к радиационному распуханию и поэтому перспективные для трубных связей во внутрикорпусных устройствах(ВКУ) атомных энергетических установок;

3. для нефтяного сортамента – высоколегированные и стабилизированные аустенитные стали на традиционной Fe-Cr-Ni основе с микродобавками.

4. для систем скоростной перекачки морской воды, транспортировки хлорсодержащих сред при температурах до 350 °С, теплообменников конденсации пара в судовой и морской технике, гидросистем летательных аппаратов – титановые альфа и псевдо-альфа сплавы.

Во **второй главе** представлена разработка химических составов трубной стали, обеспечивающих одновременно сочетание повышенной прочности и хладостойкости за счёт достаточного запаса пластичности и вязкости.

Изучено влияние легирования на фазовый состав, структуру и свойства Cr-Mo сталей с целью достижения предела текучести от 758 до 862 Н/мм<sup>2</sup>.

Содержание углерода составляло 0,24-0,28%, что типично для сталей Cr-Mo и Cr-Mo-V, применяемых в энергомашиностроении. Содержание хрома и молибдена ограничено 0,92 и 0,55% соответственно. Вариации Mo, V и (или) Nb оценивались на двух сериях экспериментальных составов. Первая серия – стали типа 26ХМ, где Mo = 0,15–0,53%; во второй – концентрация Mo меньше и составляла 0,28-0,33% с разным сочетанием тугоплавких карбидов, более устойчивых к высокотемпературному отпуску(старению).

Установлено, что увеличение содержания Mo способствует повышению прочности стали, но ее величина не удовлетворяет необходимым требованиям.

Результаты исследований позволили предложить хромомолибденованадиевую сталь 26ХМФА (26Х1МФА) с пониженным содержанием хрома и марганца (до 0,5%), но содержащую не менее 0,7% Mo и с микродобавками Nb, которые в сумме с V составляют не более 0,15%.

Установлено, что повышенная концентрация Mo целесообразна для получения мартенситной структуры при закалке и замедления процессов выделения и коагуляции карбидных фаз при последующем отпуске.

После отпуска в интервале температур 680-720 °С получены значения пластичности по критериям относительных удлинения и сужения в пределах 16-20 и 62-69% соответственно. Это достаточно типично для энергомашиностроительной стали композиции 25Х1МФ(ЭИ10) по ГОСТ 20072-74 (21CrMoV5-7 ФРГ, Франция, Великобритания; A193B14 США; 25CrMoVA Китай). Технические требования к стали 25Х1МФ(ЭИ10) сформулированы в ГОСТ 20700-75.

В третьей главе представлена разработка составов и режимов обработки трубных сталей повышенной и высокой прочности, стойких к углекислотной коррозии. Известно, что композиции типа стали марки 20Х13 мартенситно-ферритного класса не обладают хладостойкостью, что ограничивает ее применение в различных климатических поясах страны.



При создании новой стали принимали во внимание главный фактор: после кристаллизации, горячей деформации и термической обработки сталь должна иметь квазиоднородную мартенситную структуру без или с минимумом дельта-феррита и крупных включений карбидных фаз. В таблице 2 приведены большие содержания дельта-ферритной фазы в пределах 6,4-15,3% для составов 2-1 и 2-2 с содержаниями хрома 13 и 12,62% соответственно. Известно, что наличие дельта-феррита может не только снижать сопротивление металла труб хрупкому разрушению, но и способствовать образованию сигма фазы, которая также способствует охрупчиванию металла. В соответствии с диаграммой состояния в сталях состава Fe-(12-13)%Cr-C при температурах выше 1200 °С могут протекать процессы, связанные как с растворением «старого» дельта-феррита, так и с образованием из аустенита «нового» дельта-феррита, содержание которого может возрасти в соответствии с квадратичной функцией в виде параболы.

В **четвертой главе** установлено, что вариации химического состава нержавеющей сталей аустенитного класса и особенности технологических параметров производства труб приводят к изменению механических свойств. Так, например, металл труб разных производителей существенно различается по значениям пределов текучести и прочности: 90-120 и 95-145 Н/мм<sup>2</sup> соответственно в интервале температур 20-500 °С. Размер зерна и содержание С, N или Ti в твердом растворе, способствующие образованию карбидов, карбонитридов и нитридов титана, являются наиболее значимыми факторами упрочнения, обеспечивая до 45% уровня предела текучести. Обобщение опыта производства аустенитной стали, например, 08X18H10T, по нескольким десяткам параметров показало, что режимы термомеханической и термической обработки являются определяющими, влияние же легирующих элементов в пределах марочного состава стали на предел текучести металла заготовки в аустенитном состоянии менее значительно. В частности, наиболее существенным фактором, определяющим прочность стали в аустенитном состоянии, является

понижение температуры окончания прокатки и аустенизации. Эффект старения при стабилизирующей обработке усиливается при повышенном содержании в стали титана и углерода.

По результатам исследований предложен способ производства бесшовных горячедеформированных труб из сталей марок 08X18H10T и 12X18H10T (AISI 321) (патент на изобретение RU 2788284-C1), апробированный при изготовлении коррозионностойких труб диаметром 325x12 на Волжском трубном заводе. В таблице 5 механические свойства труб после термической обработки, уровень которых удовлетворительный.

В **пятой главе** приведены данные по физическому моделированию процесса горячей осадки титановых сплавов – российских ПТ-1М, ПТ-7М и зарубежного Ti-3Al-2,5V, позволившие выбрать и рекомендовать к практическому использованию следующие диапазоны температур нагрева при прессовании труб: (50-75);(20-40) и (50-75) °С соответственно.

Установлено, что при холодной прокатке горячепрессованных труб максимальная степень деформации имеет следующие ограничения для ПТ-1М, ПТ-7М и Ti-3Al-2,5V – до 55, 50 и 40% соответственно.

Показано, что разработанная технология, включающая процесс горячего прессования передельных труб по предложенным температурно-скоростным режимам и последующую многопроходную холодную прокатку с рекомендованными степенями деформации, промежуточным и окончательным отжигами, позволяет обеспечить требуемый уровень механических свойств металла труб следующих типоразмеров 25x2 (ПТ-1М); 50x4 (ПТ-7М) и 38,1x5,36 (Ti-3Al-2,5V).

В **шестой главе** изложены результаты опытно-промышленного освоения изготовления и апробации серийно-массового производства большого количества типоразмеров бесшовных труб из непрерывнолитой заготовки для весьма обширного сортамента сталей и сплавов различных марок и структурных классов.

В разделе Заключение приведены основные выводы по работе.



**Научная новизна результатов диссертационной работы** заключается в разработке научных и технологических основ для создания высокопрочных сталей и сплавов с гарантированно улучшенными эксплуатационными свойствами для изготовления бесшовных труб требуемых типоразмеров и длин универсального применения из непрерывнолитой заготовки с учётом закономерностей формирования фазового состава, структуры и свойств металла в процессе их изготовления и обработки.

Теоретически сформулирован и экспериментально обоснован системный оптимизационно-прочностной подход к выбору химического состава и технологии термомеханической и термической обработки высокопрочных и вязкопластичных трубных сталей и сплавов, обеспечивающих работоспособность бесшовных труб в широком интервале температур и коррозионной агрессивности среды.

С использованием современных методов исследования изучено влияние различных факторов на фазовый состав, структуру, процессы карбидообразования, загрязненность неметаллическими включениями, а также на механические свойства, хладостойкость, коррозионную стойкость, радиационное охрупчивание и распухание высокохромистых марок стали и титановых сплавов различного химического состава.

Установлено, что легирование трубных Cr-Mo сталей карбидообразующими элементами Nb и V обеспечивает измельчение зерна аустенита за счёт выделения термодинамически более устойчивых карбидов Nb и дисперсного упрочнения карбидами V, которые образуются в процессе отпуска (старения).

Показано, что контроль аналитико-эмпирических никелевого и хромового эквивалентов для стали мартенситно-ферритного класса с 13% Cr обеспечивает однофазную кристаллизацию и, за счет этого, однородность микроструктуры стали, предел текучести которой составляет 760-860 Н/мм<sup>2</sup>,

а повышение температур квазиоднофазного аустенита позволяет получить требуемую пластичность при горячей деформации.

Выявлено, что для нержавеющей и упрочняемых аустенитных сталей состава X18H10T (AISI 321) наиболее значимыми факторами упрочнения являются концентрации C,N, Ti в твердом растворе и размер зерна.

**Основная практическая значимость работы заключается в разработке** составов сталей и технологии их металлургической и термической обработки в процессе изготовления бесшовных труб различного сортамента и применения, которые защищены патентами РФ и использованы при крупносерийном производстве труб без сварного шва.

Разработана технология изготовления труб из псевдо-альфа титановых сплавов, включающая горячее прессование передельных труб с учётом специальных температурно-скоростных режимов, последующей многопроходной холодной прокатки с промежуточным и окончательным отжигами. Предложенная технология позволила обеспечить уровень механических свойств для холоднокатаных бесшовных труб в соответствии с требованиями российских ТУ (сплавы ПТ-1М, ПТ-7М) и зарубежных стандартов (сплав Ti-3Al-2,5V, ASTM B338 Titanium Gr. 9).

Организовано новое производство стальных труб широкого сортамента из непрерывнолитой заготовки для нефтегазовой, энергетической и машиностроительной отраслей, характеристики которых не уступают требованиям международных стандартов.

Экономический эффект от внедрения разработок трубных сталей и сплавов в производство бесшовных труб в период 2018–2022 гг. составил около 94 млрд Р.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается комплексностью и взаимосвязанностью широкого спектра исследований влияния химического и фазового состава и структурных факторов на механические свойства, сопротивление хрупкому и коррозионному



разрушению, общей и локальной коррозии металла трубных сталей и сплавов до и после термической обработки с использованием современных методов и методик. Выводы работы базируются на теоретическом обосновании и большой базе экспериментальных результатов, а также их эффективном применении в промышленном производстве.

**По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:**

1) Известно, что повышение прочности металла бесшовной трубы возможно при условии снижения пластичности по критериям относительных удлинения и сужения поперечного сечения, а также склонности к хрупкости при наличии дефектов типа надреза и трещины при предельных значениях пластичности. В диссертации не обоснована допустимость полученных значений служебных свойств на цилиндрических и плоских образцах относительно предельной пластичности с установлением запаса прочности для бесшовных труб.

2) Хромомолибденованадиевая сталь марки 26ХМФА (26Х1МФА), рекомендованная для бесшовных труб, при повышенной прочности может иметь значительную склонность к хрупкости при пониженных температурах. В настоящее время в РФ и за рубежом применение таких сталей, например композиции 25Х1МФ (ЭИ 10), ограничено пределом текучести и временным сопротивлением не более 800 и 900 Н/мм<sup>2</sup> соответственно, а сталь 26ХМФА имеет прочность на 15-20% выше. За счёт каких ресурсов прочности и пластичности при высоком сопротивлении хрупкому разрушению предложенная в диссертации сталь имеет такое значительное преимущество?

3) Применение высокохромистой стали мартенситно-ферритного класса с 13% хрома для бесшовных труб рекомендовано без систематических исследований негативного влияния содержания дельта-феррита в стали композиции типа 20Х13 на служебные свойства вплоть до охрупчивания. При нагреве до 1200 °С и выше происходит растворение дельта-ферритной



составляющей, но в этом же процессе в зависимости от времени из аустенита начинает интенсивно выделяться «свежий» дельта-феррит, количество которого может превышать исходное. В диссертации эти процессы не проанализированы.

4) Нарезные бесшовные трубы не имеют обоснования хрупкой прочности металла при наличии часто встречающегося дефекта типа трещины во впадине резьбового надреза на внешней поверхности трубы по допускаемым напряжениям относительно прочностных характеристик металла. Как показал опыт изготовления и эксплуатации бесшовных труб с резьбой, распределение причин разрушения труб нефтяного сортамента даёт более 50% случаев именно разрушению резьбового соединения, которое имеет значительную перегрузку. А случаи разрушения тел трубы и муфты составили в разы меньшие значения – всего лишь 12 и 11% соответственно. Такое число разрушений труб с резьбой имеет место, несмотря на тщательный контроль при изготовлении и сборке труб нефтяного сортамента, однако в работе этому не было уделено должного внимания.

5) Какими возможностями располагают в перспективе исследованные титановые сплавы (ПТ-1М, ПТ-7М и В338 Gr.9) для обеспечения повышенной прочности при увеличении диаметра и толщины стенки бесшовной трубы, изготовленной из исходной горячедеформированной заготовки методом горячего прессования?

6) Возможно ли при изготовлении крутоизогнутых бесшовных отводов из нержавеющей стали аустенитного класса (08-12)X18H10T (AISI 321) сохранение высокой прочности металла без снижения его деформационной способности?

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не снижают ее научной и практической значимости. Диссертация представляет собой завершённую работу, в рамках

которой проведено большое количество уникальных экспериментальных исследований и получены новые значимые для науки и практики результаты.

Диссертационное исследование соответствует паспорту специальности 2.6.17 Материаловедение (технические науки), а именно: в ней разработаны новые металлические материалы с заданным комплексом свойств путем установления фундаментальных закономерностей влияния состава, структуры, технологии, а также эксплуатационных и иных факторов на функциональные свойства материалов, а также выполнены теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры металлических материалов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности деталей, изделий, машин и конструкций различных областей промышленности.

Содержание автореферата Пумпянского Д.А. соответствует содержанию диссертации.

Результаты работы доложены на 10 российских и зарубежных научных конференциях. Основные результаты исследований опубликованы в 28 научных статьях, 13 из которых – в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикаций основных научных результатов диссертаций, представленных на соискание ученой степени доктора наук. Также опубликована 1 монография и 9 патентов РФ на изобретение.

Считаю, что диссертационная работа «Научные основы разработки сталей, сплавов и высокоэффективных технологий для производства нефтегазовых и специальных труб нового поколения» полностью удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ», предъявляемым к докторским диссертациям. В ней изложены новые научно обоснованные технологические решения для производства высокопрочных бесшовных стальных и титановых труб,



обладающих повышенным уровнем свойств, для использования в нефтегазовой и энергетической областях современной и перспективной промышленности. Внедрение результатов работы в промышленность вносит значительный вклад в развитие страны.

Автор работы Пумпянский Дмитрий Александрович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение.

**Официальный оппонент:**

профессор, доктор технических наук



Кондратьев С.Ю.

Кондратьев Сергей Юрьевич, профессор, доктор технических наук (специальность 05.16.01), профессор Высшей школы физики и технологий материалов ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»;

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

Тел: +7(812)-552-80-90. E-mail: kondratyev\_syu@spbstu.ru

Даю согласие на обработку моих персональных данных и на размещение их в свободном доступе в сети информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» и в единой информационной системе.

