

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу **Струина Алексея Олеговича**

**«Повышение сопротивления разрушению труб большого диаметра классов прочности К60, К65 из малоуглеродистых феррито-бейнитных сталей»**, представленную на

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

**Актуальность проблемы.** Современные наземные магистральные трубопроводы в России имеют большую протяженность, рассчитываются на работу при высоком рабочем давлении до 11,8 МПа и должны работать при пониженных температурах. Указанные факторы ставят на первое место задачу обеспечения надежности магистральных трубопроводов. Для этого необходимы физически обоснованные методики испытаний и расчета сопротивляемости металла труб распространению протяженных вязких разрушений. Современные трубные стали типа Х70 и Х80 имеют ферритно-бейнитную микроструктуру, обеспечивающую высокие показатели прочности, пластичности и вязкости, однако применяемые методики исследований качества металла (в том числе структуры, вязких свойств) ориентированы преимущественно на стали с более традиционной ферритно-перлитной микроструктурой. Кроме того, сварные соединения труб имеют пониженные характеристики пластичности и вязкости по сравнению с основным металлом и традиционно рассматриваются в качестве наиболее «слабого» звена при оценке надежности трубопроводов. Изучение этих вопросов далеко от завершения. В свете указанного, рассматриваемая работа Струина А.О., направленная на повышение сопротивляемости протяженным вязким разрушениям труб класса прочности К65 и, соответственно, обеспечение их надежности, является, безусловно, актуальной.

**Основной целью** рассматриваемой работы является выявление закономерностей влияния параметров дисперсной ферритно-бейнитной микроструктуры низкоуглеродистой трубной стали на механические и эксплуатационные свойства основного металла и металла зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений труб большого диаметра для установления механизмов разрушения металла и разработки на этой основе рациональных методик оценки его сопротивляемости протяженному вязкому разрушению.

Для достижения указанной выше цели автор диссертации последовательно и методично решал ряд важных задач, в том числе: оценки влияния параметров структуры и механических свойств основного металла и ЗТВ труб класса прочности К60 и К65 на характеристики сопротивления разрушению, в том числе при полигонных испытаниях; исследования локальной хрупкости металла ЗТВ на свойства металла труб; установления закономерностей распространения вязкой трещины в трубах, в том числе с учетом прохождения трещины через сварные соединения; определения энергоемкости разрушения в основном металле и металле ЗТВ для сталей с различными типами ферритно-бейнитной микроструктуры, содержанием легирующих и микролегирующих элементов; создания рациональных методик оценки сопротивляемости металла труб протяженному вязкому разрушению.

Материалом для исследования послужили промышленные низколегированные стали для труб классов прочности К60 и К65, в том числе использованные при полигонных испытаниях для оценки пригодности труб для газопровода «Бованенково-Ухта».

### **Анализ диссертации по главам**

**Первая глава** рассматриваемой работы посвящена описанию общего состояния и перспектив развития трубной отрасли в России и за рубежом, применяемых металлургических подходов, используемых схем легирования, вариантов технологии термомеханической обработки (ТМО) проката. Также представлен обзор результатов исследования микроструктуры и механических свойств основного металла труб К60, К65 и их сварных соединений, выполненных другими исследователями ранее. Литературный обзор

составлен последовательно и методично, охватывает различные аспекты проблемы, в нем используется большой объем современных и классических литературных источников (отечественных и зарубежных примерно в равных долях). Это показывает достаточную глубину проработки материала по рассматриваемой проблеме.

В заключении главы обоснована актуальность работы и обозначены два основных направления исследований: оценка сопротивляемости вязкому разрушению основного металла труб К60-К65 и разработка мер для ее повышения, а также определение влияния локальных областей хрупкости в сварных соединениях на свойства труб в целом и улучшение свойств металла ЗТВ.

Во второй главе работы приведены основные параметры исследованных сталей и использованные для их изучения методики. В исследованиях использованы 3 стали для труб класса прочности К60 и 9 сталей для труб категории К65. При этом особенно актуально и важно с практической точки зрения, что 10 сталей (из них - 8 сталей К65) были использованы в трубах, проходивших полигонные испытания.

Отличительной чертой данной работы по тематике металловедения трубных сталей является использование наряду с традиционными методиками также методик натурных гидравлических и полигонных пневматических испытаний труб большого диаметра. Описание этих методик может быть полезно для других исследователей.

С другой стороны, в работе использованы также стали, которые не в полной мере соответствуют тематике работы, в том числе: сталь (Б1) для «высокотемпературного процесса» (“НТР”) изначально разработанная для станов Стеклоля и непрерывных широкополосных станов для проката ограниченной толщины (до 20 мм); сталь (А3) после ТМО, но с последующим индукционным нагревом в потоке стана обработки, имеющая специфическую структуру с управляемым выделением МА-составляющей и предназначенная для труб с повышенной деформационной способностью (сейсмостойкого исполнения). Кроме того, представляется излишним использование в анализе также материалов по структуре, свойствам и результатам испытаний спиральношовной трубы (сталь А2), поскольку вся работа посвящена проблеме надежности прямошовных труб большого диаметра, активно используемым в отечественных проектах. Возможно, эти данные могут быть полезны для сравнения поведения сталей принципиально разных металловедческих концепций.

Третья глава работы является самой объемной и содержит комплексное исследование микроструктуры современных сталей К60, К65, в том числе прошедших полигонные пневматические испытания на остановку вязкого разрушения. Выполнена классификация типов ферритно-бейнитной микроструктуры таких сталей по основным морфологическим признакам, выявляемым с использованием широко распространенных методов световой (оптической) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), что важно для экспресс-анализа металла при прикладных исследованиях и в трубном производстве. На основании проведенных исследований определены параметры микроструктуры, приводящие к снижению сопротивления вязкому разрушению в ферритно-бейнитных сталях и показано, что наилучшие результаты по сопротивляемости распространению вязкой трещины достигаются на сталях с дисперсной структурой на основе игольчатого и глобулярного бейнита, с минимальным количеством полос полигонального феррита, реечного бейнита, вырожденного перлита и МА-составляющей. Однако следует отметить, что для достоверного определения наличия и объемной доли МА-составляющей (двойникованный мартенсит + остаточный аустенит) в работе следовало бы использовать наряду с СЭМ также специальные методы травления и исследования по методу просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

В главе также приведены результаты исследований и испытаний сварных соединений труб К60, К65, которые позволили определить типы микроструктур, обеспечивающие повышение трещиностойкости на участке крупного зерна зоны термического влияния. Важным металловедческим результатом является выявление особенностей внутризеренного

строения металла ЗТВ, в результате чего показано, что увеличение трещиностойкости металла для участка крупного зерна достигается при формировании структуры дисперсного игольчатого или реечного бейнита. Предложен механизм влияния МА-составляющей на распространение трещины в ЗТВ, по которому в структуре реечного и дисперсного игольчатого бейнита МА-составляющая в виде тонких прослоек может быть «препятствием» для трещин. При оценке размера зерна аустенита в ЗТВ следовало бы обратить внимание, что влияние V на структурообразование в металле ЗТВ не однозначно и существенно отличается от влияния Nb и Ti.

На основании выполненных исследований предложены рекомендации для выбора химического состава сталей для труб классов прочности K60 и K65.

К достоинствам работы следует отнести большой объем и высокое качество металлографических исследований по каждой из сталей для основного металла и металла ЗТВ. Положительной чертой исследования также является использование автором при описании структурных составляющих в низкоуглеродистой стали после ТМО терминологии, предложенной в работах профессора М.А. Смирнова, что делает описания структуры в диссертации ясными и понятными.

В четвертой главе работы представлены результаты полномасштабных гидравлических и пневматических испытаний труб классов прочности K60, K65. На основании экспериментальных данных описаны особенности деформирования и разрушения труб при распространении вязкой трещины. При этом рассмотрение в главе процесса разрушения спиральношовной трубы представляется излишним.

Важным результатом является установление зависимости внешнего вида излома и способности металла к остановке вязкой трещины в трубе от величины пластической деформации перед вершиной трещины. Показано, что максимальная пластическая деформация происходит на стадии зарождения трещины, а при распространении трещины деформация существенно меньше. Результаты позволили предложить методику определения энергоемкости разрушения труб, основанную на измерениях зоны пластических деформаций стенок труб вдоль пути трещины.

Определено влияние локально низких вязких свойств сварного соединения на конструктивную прочность труб. При анализе результатов полигонных испытаний удалось установить, что локальная хрупкость ЗТВ сварного соединения существенно влияет на способность труб к торможению трещины только в случае начала разрушения в сварном соединении, что приводит к возникновению опасной хрупкой трещины, распространяющейся быстрее декомпрессии газа. В целом же, кольцевые сварные соединения не оказывают существенного влияния на процесс вязкого протяженного разрушения, что объяснено малой площадью их поперечного сечения.

Пятая глава посвящена разработке критериев и методов механических испытаний, позволяющих объективно оценить сопротивление распространению вязкого разрушения в лабораторных условиях. Исследованы существующие методы оценки сопротивления вязкому разрушению (на ударный изгиб (KCV), CTOD). Показано, что они не могут достоверно охарактеризовать вязкие свойства современных трубных сталей.

На основании изученных особенностей деформирования и разрушения труб разработаны два новых метода оценки вязкости разрушения трубных сталей, которые хорошо соотносятся с результатами полномасштабных пневматических испытаний труб: испытания на ударный изгиб образцов после предварительной деформации и испытание пластин с краевым надрезом на растяжение. Первый метод испытаний на ударный изгиб образцов после предварительной деформации позволяет «усилить» неблагоприятные структурные факторы, приводящие к возникновению расщеплений в изломе и уменьшению ударной вязкости, однако при этом результаты сильно зависят от величины предварительной деформации, которая выбирается эмпирически. Поэтому, по мнению оппонента, предпочтительным является метод испытания пластин с краевым надрезом на растяжение,

поскольку он более соответствует физическому процессу пластической деформации трубы у вершины трещины и позволяет оценить удельную работу распространения трещины.

В целом работа А.О. Струина производит весьма благоприятное впечатление. Ее отличает последовательность и методичность выполнения исследований влияния параметров ферритно-бейнитной структуры стали после ТМО и механических свойств основного металла и металла ЗТВ труб на сопротивление металла протяженным вязким разрушениям. Автором проведено серьезное исследование проблемы, проанализированы разработанные ранее подходы и предложены собственные направления для решения проблемы. Грамотно определена цель и задачи исследования. Каждый этап работы имеет четкую постановку задачи, методическое обеспечение, лабораторные исследования или анализ данных полигонных испытаний, анализ полученных результатов, выводы и разработку посылки для выполнения следующей стадии исследования. В работе использованы современные металловедческие подходы, при этом диссертант в своих теоретических построениях опирался на работы уральской школы металловедения, являющейся одной из сильнейших в России.

Результатом работы соискателя явились полезные и реализованные на практике рекомендации и методики. Положительной чертой рассматриваемой работы является применение современных методик исследования структуры и свойств трубной стали, в том числе сканирующей электронной микроскопии, результатов полигонных испытаний, а также испытаний, выполненных по собственным оригинальным методикам. Конечно, в работе присутствует элемент субъективности, но это характерно современных металловедческих исследований по тематике ферритно-бейнитных сталей с ультрамелким зерном.

Таким образом, исследование является законченной квалификационной работой в области металловедения и прочности низколегированных сталей.

Научная новизна работы, по нашему мнению, состоит в следующих положениях:

- Выявлено, что структурными факторами, влияющими на торможения вязкой трещины в основном металле труб класса прочности К60 и К65 является морфология бейнитной  $\alpha$ -фазы, наличие прослоек полигонального феррита, тип распределения высокоуглеродистой структурной составляющей. Наличие в структуре стали крупных зерен бейнитной  $\alpha$ -фазы, полос феррита прерывистых строчечных островков вырожденного перлита или МА-составляющей увеличивает число расщеплений в изломе и существенно снижает энергоемкость разрушения;

- Установлено, что способность к остановке вязкой трещины в основном металле труб класса прочности К60 и К65 определяется величиной работы пластической деформации в зоне разрушения, которая во многом определяется параметрами структуры стали и ее способностью к наклепу;

- Выявлено, что энергоемкость разрушения максимальна на стадии зарождения разрушения и мало меняется на стадии его распространения. Установлена пороговая величина энергоемкости для труб, не выдержавших полигонных испытаний, которая составляет 1400 Дж/см<sup>2</sup>;

- Показано, что трещиностойкость металла для участка крупного зерна ЗТВ определяется главным образом характером внутризеренной структуры, а роль размера зерна аустенита меньше. Повышение трещиностойкости металла для участка крупного зерна достигается при формировании структуры дисперсного игольчатого или реечного бейнита, в котором МА-составляющая в виде тонких прослоек может быть «препятствием» для трещин;

- Установлено, что зоной локальной хрупкости сварных соединений труб класса прочности К60 и К65 является участок крупного зерна шириной до 4 зерен в ЗТВ. Однако экспериментально показано, что эта зона влияет только на протяженность разрушения, а условия инициирования разрушения, определяемые по давлению разрушения, являются практически одинаковыми при расположении дефекта в такой зоне или в основном металле.

Достоверность и обоснованность основных научных положений, результатов, выводов и рекомендаций работы обусловлена воспроизводимостью и согласованностью

полученных данных, применением современных средств исследования микроструктуры стали и обработки информации, большим набором материалов для исследований и значительным объемом исследовательских работ.

Научные положения, развиваемые в работе, основываются на базовых положениях материаловедения низколегированных сталей и не противоречат имеющимся современным представлениям.

Выводы соответствуют поставленным задачам исследования.

**Практическая ценность работы** состоит в том, что полученные результаты могут быть эффективно использованы при изучении влияния химического состава и параметров ферритно-бейнитной структуры стали, получаемой в результате ТМО, а также структуры металла ЗТВ на механические свойства и характеристики разрушения труб большого диаметра; для интерпретации результатов полигонных испытаний труб большого диаметра классов прочности К60 и К65; для исследования металла по новым предложенным методикам; для разработки мероприятий для улучшения качества проката и труб в условиях ведущих отечественных металлургических предприятий и в научно-исследовательских учреждениях. Практическая значимость результатов работы подтверждается в том числе: использованием разработанных рекомендаций к химическому составу стали в условиях ОАО «ВТЗ» при изготовлении труб для проекта ГТС «Сила Сибири»; включением разработанных методов испытания в нормативные стандарты ОАО «Газпром».

#### **Оценка содержания и оформления диссертационной работы**

Рассмотренная диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов и списка литературы. Содержание автореферата достаточно полно и точно отражает содержание и результаты диссертации. Основные положения диссертации отражены в 8 статьях в изданиях, входящих в перечень ВАК, а также в 6 докладах, обсужденных на отечественных и международных научно-технических конференциях. Стиль изложения четкий. В тексте диссертации и на ряде рисунков выявлен ряд опечаток, но они не затрудняют понимания текста. Работа характеризуется аккуратностью оформления текста диссертации и автореферата, применением цветной печати для представления рисунков, отличным качеством представления результатов металлографических исследований, что создает благоприятное отношение к работе в целом.

**Замечания по работе.** На основании рассмотрения диссертационной работы можно сделать следующие замечания:

1. Сравнение характеристик структуры и свойств стали для высокотемпературной обработки («НТР») со сталями К60 и К65, реально использованными для труб класса прочности К65 диаметром 1420 мм с толщиной стенки 23 и 27,7 мм, представляется не совсем правомерным, так как сталь «НТР» разработана для прокатки на станах Стэккеля и непрерывных широкополосных станах, имеет специальную схему легирования для учета особенностей именно такого оборудования, а не толстолистовых реверсивных станов, вследствие чего в прокате формируется специфическая структура, а толщина проката на практике ограничивается 14-19 мм.

2. Структурными факторами, определяющими характер разрушения основного металла труб и металла ОШЗ, помимо изученных в работе морфологических особенностей ферритно-бейнитной структуры, также являются наличие, доля и распределение малоугловых границ в структуре, что определяется методом дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD), однако данные по подобным исследованиям в работе не представлены.

3. С целью более достоверного определения наличия именно МА-составляющей в структуре стали следовало бы использовать при сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) специальные методы травления (ЛеПера, комбинацию химического и электролитического травления), а также применять просвечивающую электронную микроскопию (ПЭМ).

4. Результаты оценки сопротивления протяженному вязкому разрушению основного металла труб класса прочности К65 по методу с использованием предварительно



деформированных образцов для испытаний на ударный изгиб в целом могут рассматриваться как качественные, а не количественные, поскольку при увеличении предварительной пластической деформации сжатием результаты могут изменяться немонотонно для сталей со структурой промежуточного типа (от равномерной к структуре с эффектом «двухфазности», например, сталь Б4), трубы оказываются «годными» по результатам пневматических испытаний, однако при этом величина деформации назначается опытным путем. Более оправданным выбором является способ испытаний пластин с краевым надрезом, отражающий физическую сущность развития трещины в условиях пластической деформации.

5. Диссертация содержит в заключительном разделе 12 общих выводов, что представляется излишним количеством для диссертации на соискание степени кандидата технических наук. Следовало бы объединить некоторые выводы (2 и 3; 4 и 5; 7 и 8; 11 и 12 с логическими связками) для лучшего структурирования достигнутых в работе результатов. Кроме того, количество выводов в тексте работы (12 шт.) не совпадает с числом выводов в тексте автореферата (9 шт.), хотя целостность работы и значимость результатов от этого не страдают.

Сделанные замечания не снижают положительной оценки работы, так как не затрагивают ее основные положения и выводы.

### Заключение

Диссертационная работа Струина Алексея Олеговича является законченной научно-квалификационной работой в области металловедения и термической обработки металлов и сплавов, в которой решена задача установления влияния химического состава и параметров микроструктуры низколегированной стали на свойства и сопротивляемость вязкому разрушению основного металла и металла сварного соединения труб классов прочности К60-К65, а также разработаны новые критерии и методики испытаний, позволяющие адекватно полигонным испытаниям оценить сопротивляемость вязкому разрушению труб. Результаты научных изысканий можно классифицировать как новые и обоснованные, они имеют существенное научное и практическое значение.

Таким образом, считаю, что по актуальности темы диссертации, научной новизне полученных результатов, практической значимости, уровню научно-методических разработок и качеству оформления рассмотренная работа удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а автор диссертации Струин Алексей Олегович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Официальный оппонент,  
доктор технических наук,  
Заместитель директора Центра сталей для труб  
и сварных конструкций (ЦТСК)  
ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»

С.Ю. Настич

Подпись С.Ю. Настича заверяю:

Ученый секретарь  
ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»

Т.П. Москвина

Адрес организации: 105005, Москва, ул. Радио, д. 23/9,  
стр. 2, ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина».  
Настич С.Ю., контактный телефон: (495) 777-93-31  
(Центр сталей для труб и сварных конструкций  
(ЦТСК) ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»);  
моб. т: (910) 457-89-58