

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Степанова Павла Петровича на тему «Роль микроструктурных факторов в сопротивлении разрушению сварных соединений стальных труб», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Трубопроводный транспорт – лидер среди всех видов доставки грузов по количеству тонно-километров в России. Поэтому надёжность этого вида транспорта очень важна и неизменно актуальна для нашей страны. Для перемещения жидких и газообразных грузов на большие расстояния применяют стальные прямошовные трубы с большой толщиной стенки, изготовленные из горячекатаной низко- или (реже) среднеуглеродистой низколегированной стали, требования к которым возрастают год от года. Поэтому интерес к повышению качества технологии получения сварного шва не может снизиться уже много лет. На качество сварного соединения влияют как состав и структура основного металла трубы, так и характеристики процесса сварки: тип нагрева, используемый при расплавлении металла; дополнительные компоненты (сварочная проволока, флюс, атмосферные газы), попадающие в материал сварного шва; параметры охлаждения (особенно его скорость; последующая термическая обработка. В конечном счёте все эти многочисленные факторы формируют состав и структурное состояние сварного шва. Интегральным показателем, определяющим стойкость сварного соединения против разрушения в процессе эксплуатации, является ударная вязкость. Ударная вязкость любого материала зависит от его микроструктуры. Поэтому диссертационная работа П.П. Степанова «Роль микроструктурных факторов в сопротивлении разрушению сварных соединений стальных труб» является **актуальным** научным исследованием, решающим важную **научную и техническую проблему**.

Рассматриваемая диссертация состоит из Введения, 6 глав, каждая из которых завершается Заключением, Основных выводов, Списка литературы и Приложений. Наличие отдельно выделенного Списка сокращений и условных обозначений делает чтение работы более удобным. Диссертация изложена на 416 страницах, включает в себя 247 рисунков, 33 таблицы, 403 наименования цитируемой литературы.

Во **Введении** автор описал состояние исследований в момент начала работы, охарактеризовал основные методы сварки, используемые для изготовления сварных труб: электродуговая сварка под флюсом (ДСФ) и сварка с нагревом токами высокой частоты (ТВЧ), описал вклад предшествующих научных работ и выявил, что ранее не проводилось систематических исследований, в которых были бы определены связи технологии сварных труб, металлографической структуры сварного шва и околошовной зоны и ударной вязкости. Отсюда автор определил **цель работы**: «повышение вязкости и хладостойкости сварных соединений за счёт целенаправленного управления структурой и

свойствами за счёт целенаправленного управления их структурой и свойствами на основе установленных закономерностей для разработки новых сталей, создания и совершенствования технологий и массового производства труб малого, среднего и большого диаметра с уникальным сочетанием свойств». То есть цель работы охватывает всю цепочку научных и технических задач от металловедческой теории до практического применения и вполне соответствует уровню диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Поставленные в работе **задачи исследования** демонстрируют пошаговую инструкцию по достижению поставленной цели. **Научная новизна** работы заключается именно в том, что поставленная в работе цель была достигнута. **Теоретическая и практическая значимость** работы не вызывает сомнений. Предложенная автором система исследований включает комплексное изучение сварного соединения и в ней недостаёт только определения усталостных и коррозионных свойств шва и околошовной зоны, чтобы дать однозначный ответ на вопрос о выборе материалов и технологий сварки труб.

Автор участвовал в разработке новых высокопрочных хладостойких трубных сталей, его работы позволили создать технологии и произвести 609 тыс. тонн труб для уникальных трубопроводов и получить **экономический эффект** более 12 млрд. рублей. Исползованные **методы исследования** соответствуют современному уровню материаловедческой науки. **Достоверность результатов** не вызывает сомнений. Результаты работы представлены на 19 научных конференциях, где были обсуждены и приняты ведущими специалистами в области металловедения и технологии сварки. **Личный вклад** автора в работу соответствует уровню доктора наук.

Глава 1 диссертации рассматривает процессы, проходящие при сварке, и выделяет основные зоны (участки) как расплавляемой части металла, так и в её окрестностях при различных видах сварки. Предложенная автором конечно-элементная математическая модель позволила достаточно подробно изучить зависимости температуры металла от времени в ходе сварочного нагрева и охлаждения как для относительно небольших имитирующих образцов (пластин), так и для труб реальных размеров. Модель была проверена путём использования термопар, расположенных внутри металла, что подтвердило её адекватность. Была также обоснована возможность проведения сварки имитационных образцов и переноса результатов в этих экспериментах на реальные трубы. В конечном счёте это дало возможность оптимизировать параметры сварки и последующей локальной термической обработки на АО «Выксунский металлургический завод».

Глава 2 посвящена исследованию процессов формирования микро- и макроструктуры при электродуговой сварке под флюсом и сварке с нагревом током высокой частоты. Автор исследовал влияние параметров сварки на размер и форму кристаллов δ -феррита, аустенитных зёрен и продуктов превращения аустенита при охлаждении. В работе показано, что после завершения

сварки при комнатной температуре в структуре могут присутствовать игольчатый, видманштеттов и зернограничный феррит, бейнит различной морфологии и мартенсит с остаточным аустенитом. В сварочном шве формируются также оксидные неметаллические включения различной формы и размеров.

Автор очень подробно экспериментально исследовал зависимости доли различных структурных составляющих, их размеров и морфологии в различных зонах сварного шва и прилегающего металла, а также ударной вязкости при комнатной и пониженной вплоть до -80°C температурах от скорости охлаждения в интервале $800 \rightarrow 500^{\circ}\text{C}$. Заслуживает отдельного упоминания очень качественно проведённое разделение вклада в свойства высоко- и малоугловых границ в α -фазе. Все исследования проведены на нескольких низколегированных трубных сталях для двух технологий сварки. Для сварки с нагревом током высокой частоты также было изучено влияние локальной термической обработки после сварки на структуру шва и околошовной зоны.

Глава 3 посвящена установлению влияния микроструктуры на ударную вязкость сварного шва и околошовной зоны. Автор очень грамотно определил, как основные структурные составляющие влияют на ударную вязкость и фрактографические особенности изломов после дуговой сварки под флюсом и сварки с нагревом токами высокой частоты. Он проранжировал структурные составляющие по степени их опасности как фактора, понижающего энергию разрушения при ударном изгибе, повышающего рассеяние результатов измерения удельной энергии и/или повышающего температуру хрупко-вязкого перехода. Особенно хочу отметить показанное в работе влияние кристаллографической ориентации и текстуры.

Мне представляется очень важным обнаруженное П.П. Степановым неоднозначное влияние нитридных/карбонитридных частиц на развитие скола при испытаниях на ударный изгиб. Автор заметил, что эти включения очень негативно влияют на ударную вязкость, когда они окружены одной и той же структурной составляющей. Когда же они располагаются на границах между структурными составляющими, то их неблагоприятное влияние гораздо меньше. Очень интересный факт.

Глава 4 продолжает анализ влияния различных структурных составляющих на процесс разрушения сварного соединения, начатый в главе 3. Автор выявил иерархию структурных факторов, снижающих ударную вязкость, повышающих температуру хрупко-вязкого перехода и рассеяние значений ударной вязкости, причём показал это и для дуговой сварки, и для сварки с нагревом токами высокой частоты как на имитационных образцах, так и на реальных трубах. В работе убедительно показано, что для катастрофическое снижение ударной вязкости вызывается сочетанием как минимум двух охрупчивающих факторов, одним из которых является крупное зерно в зоне термического влияния, а вторым – любой из списка: неметаллические включения, неблагоприятная текстура, большая доля мартенсита и т.д.

Поскольку для недопущения снижения ударной вязкости необходимо не допускать излишнего роста зерна в зоне термического влияния, следует минимизировать время нахождения металла при температурах, где это зерно растёт, то есть уменьшить удельное количество теплоты, передаваемое металлу, окружающему сварной шов. В качестве параметра, определяющего это время, автор взял погонную энергию сварки, то есть энергию, подводимую на единицу длины шва. **Глава 5** посвящена поискам технологических решений, позволяющих минимизировать указанную погонную энергию. Для дуговой сварки под флюсом это выбор полярности подключения электродов, использование переменного тока, оптимизация вылета и диаметра сварочной проволоки, добавление «холодной» сварочной проволоки. Для оптимизации микроструктуры автор рассмотрел возможность использования ультразвуковых колебаний в зоне сварки, принудительного охлаждения. Указанные меры дали возможность повысить ударную вязкость при -40 и -60°C .

В этой главе автор описал результаты исследований по применению дополнительных видов нагрева сварного шва, в частности, лазерного и электронно-лучевого. Это помогает избежать или уменьшить торможение теплоотвода слоем флюса и таким образом повысить скорость охлаждения толстостенных труб, что приводит к измельчению зерна. Для улучшения свойств сварных соединений автор после сварки проводил термическую обработку: одно- или двукратный отжиг с ускоренным охлаждением, что позволило существенно измельчить зерно.

В этой же главе описаны и другие способы влияния на структуру с целью повышения ударной вязкости: оптимизации химического состава стали (в пределах марки), выбор сварочной проволоки, содержащей дополнительно Ti и В, увеличение угла схождения кромок с соответствующим увеличением скорости осадки и локальная термическая обработка по режиму нормализации при сварке с нагревом током высокой частоты.

Всё это позволило автору оптимизировать технологические процессы сварки и получить структуры сварного шва и околошовной зоны, обеспечивающие высокую ударную вязкость, в том числе при низких температурах.

В **главе 6** диссертации описано применение результатов исследований П.П. Степанова в промышленности. Научно обоснованное воздействие на микроструктуру позволило разработать новые технологические решения, применённые на Альметьевском, Выксунском металлургическом, Ижорском трубном заводах, АО «Трубодеталь», АО «Газпром трубоинвест».

Общие выводы по работе содержат основные научные результаты, технологические решения и примеры практического применения работы П.П. Степанова. Также сформулированы перспективные направления дальнейших исследований и разработок в области технологии сварки стальных труб малого, среднего и большого диаметра.

В **список литературы** включены практически все серьёзные работы в области изучения структуры и сварки труб из малоуглеродистых низколегированных сталей.

В **Приложениях** приведены составы исследованных сталей, сварочной проволоки и сварных соединений, а также акты, подтверждающие экономическом эффект работы, а также использование её результатов на промышленных предприятиях.

В целом диссертационная работа П.П. Степанова является очень качественно выполненным исследованием, направленным на решение важной народнохозяйственной проблемы. Она содержит огромное количество экспериментального материала, теоретическое обобщение которого позволило автору разработать важнейшие технологические решения. **Автореферат** полностью отражает основное содержание диссертации. Основные научные результаты исследований опубликованы автором в открытой печати в журналах, рекомендованных ВАК РФ. Технические решения защищены патентами РФ.

Однако, наряду с несомненными достоинствами диссертационной работы П.П. Степанова, следует отметить ряд её недостатков:

1. Слова о том, что автором создана «научно-обоснованная система разработки и освоения новых технологий» получения сварных труб в названии главы 1 и выводе 1 представляются не совсем корректными. Во-первых, возникает ощущение, что ранее всё это проходило бессистемно, а во-вторых, для многих применений указанную «систему» необходимо дополнять усталостными, коррозионными или иными необходимыми испытаниями.
2. Математическое моделирование температурных полей, описываемое в главе 1, естественно, очень важно. Но, по моему мнению, было бы полезно его дополнить оценками возникающих микроструктур, напряжений и деформаций. Напряжения и деформации вызываются градиентами температур и тепловыми потоками, которые в работе практически не учтены, по крайней мере не формализованы. Материал для такого дополнения в большом объёме содержится в диссертации.
3. Не проведено жёсткого разграничения, в каких случаях неметаллические включения повышают, а в каких – понижают ударную вязкость сварного соединения при электродуговой сварке под флюсом (вывод 2, подпункт 3).
4. Формулировки выводов излишне длинные. Часть выводов, например, вывод 2, следовало бы разделить на несколько.
5. Неоправданное смешение кириллических и латинских аббревиатур. Например, ГЗ ЗТВ и CGHAZ в главе 3.
6. Неудобно, когда размер зёрен в одном и том же разделе диссертации характеризуется разными параметрами, которые однозначно связаны друг с другом. Например, в главе 2 это средний диаметр (рис. 2.79, стр. 139 диссертации), средняя площадь (рис. 2.88, стр. 150 диссертации) и номер (балл) зерна (рис. 2.89, стр. 151 диссертации).
7. Не всегда понятно, как именно определяли границы зёрен бывшего аустенита (например, рис. 3.42 на стр. 225 диссертации).
8. Некоторые замечания корректорского типа:
– ускоряющее напряжение (стр. 17 диссертации) было 30 кВ, а не кэВ;

- на стр. 72 диссертации упомянуты «эксперименты авторов», хотя автор у диссертации один;
- на рис. 2.81, стр. 141 диссертации одинаковыми цветами обозначены разные температурные интервалы;
- в табл.4.5, стр.275 диссертации сварное соединение обозначено СВ, а не СС;
- на рис. 2.89, стр. 150 диссертации средняя площадь ферритного зерна должна быть измерена в мкм^2 , а не мкм .

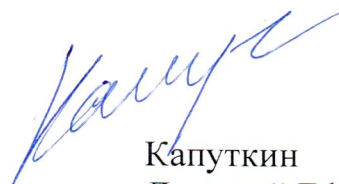
Сделанные замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы Степанова П.П. Работа выполнена на высоком теоретическом и экспериментальном уровне, полученные результаты являются новыми и имеют научную и практическую значимость. Поставленные в работе цели и задачи исследования достигнуты, а положения, выносимые на защиту, доказаны экспериментально.

Диссертационная работа «Роль микроструктурных факторов в сопротивлении разрушению сварных соединений стальных труб», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук, соответствует требованиям Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней.

Считаю, что соискателю Степанову Павлу Петровичу может быть присвоена степень доктора технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Я, Капуткин Дмитрий Ефимович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,
профессор кафедры физики доктор технических наук по специальности 05.16.01 –
Металловедение и термическая обработка металлов, доцент



Капуткин
Дмитрий Ефимович

06.02.2024

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» («МГТУГА»),

Адрес : Российская Федерация, 125493, г. Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20.

Тел.: +7-499- 459-07-01

E-mail: info@mstuca.aero

Сайт: <http://www.mstuca.ru>

Подпись
заверяю



Капуткин Д.Е.
В. Бунин



Личную подпись
начальник УП

Вашукина Д.В.
З