

ОТЗЫВ

официального оппонента Гаврилова Геннадия Николаевича на диссертацию Степанова Павла Петровича «Роль микроструктурных факторов в сопротивлении разрушению сварных соединений стальных труб», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Структура работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, общих выводов, списка литературных источников из 403 наименований и приложений, содержит 416 страниц, 247 рисунков и 33 таблицы. Автореферат содержит 47 страниц, материалы, изложенные в нем, достаточно полно отражают содержание диссертационной работы.

Актуальность темы диссертации. Диссертационная работа П.П. Степанова посвящена решению важной и актуальной научно-технической проблемы повышения сопротивления разрушению сварных соединений труб для обеспечения надежности эксплуатации магистральных трубопроводов, а также прочего оборудования нефтегазовых отраслей промышленности. Сварка является одним из ключевых технологических этапов производства стальных труб. При этом свойства сварного соединения обеспечить существенно труднее, чем основного металла, в связи со сложностью происходящих в металле процессов и ограниченными возможностями воздействия на технологические параметры. Одним из наиболее важных требований, предъявляемых к свойствам электросварных труб, является обеспечение повышенного сопротивления хрупкому разрушению при температурах эксплуатации, но фактический уровень сопротивления разрушению сварных соединений труб заметно ниже, в сравнении с основным металлом. В этом направлении к моменту постановки диссертационной работы П.П. Степанова был ряд нерешенных проблем. Состояние вопроса характеризовалось сложностью установления связей между структурой и свойствами сварных соединений, отсутствием понимания комплекса структурных факторов, определяющих вязкость сварных соединений для различных видов сварки. Несмотря на опубликованное значительное количество работ по имитации термических циклов дуговой сварки под флюсом, не были установлены четкие связи между структурой и свойствами имитированного металла и реальных сварных соединений. Работ по высокочастотной сварке опубликовано мало, для данного вида сварки не были сформулированы представления о микроструктурных механизмах, определяющих хладостойкость сварных соединений. И в целом, не были сформулированы направления улучшения микроструктуры и свойств сварных соединений труб, выполненных различными видами сварки. Изложенное подтверждает актуальность исследований в области установления роли микроструктурных факторов в

сопротивлению разрушению сварных соединений стальных труб, выполненных дуговой и высокочастотной сваркой, а также поиска альтернативных видов сварки.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы П.П. Степанова обеспечена проработкой опубликованных по теме материалов, глубокой проработанностью темы диссертации, применением методов исследования, соответствующих цели и задачам исследований, в частности, комплекса современных методов исследования микроструктуры металла с использованием количественной световой, сканирующей (включая дифракцию обратно рассеянных электронов) и просвечивающей электронной микроскопии, локального энергодисперсионного анализа химического состава, дилатометрии, исследования поверхностей разрушения образцов, рентгеноструктурного анализа и др. Достоверность полученных результатов обеспечена проведением экспериментальных исследований на современном сертифицированном оборудовании и использованием статистической обработки результатов и современного лицензионного программного обеспечения, согласованностью результатов лабораторных и промышленных испытаний, большим объемом выполненных экспериментов, подтверждается результатами успешной реализации технологических решений в промышленных условиях, а также апробацией полученных результатов на научно-технических конференциях и семинарах различного уровня.

Результаты диссертационной работы обсуждены на 16 научно-технических конференциях и достаточно полно опубликованы (43 публикации), включая рецензируемые издания, рекомендованные ВАК РФ (29 работ), входящие в международную базу данных Scopus (13 работ) и 3 патента на изобретения.

Научная новизна диссертационной работы не вызывает сомнения. Среди результатов, характеризующихся научной новизной хотелось бы отметить следующие:

Установленный структурный механизм повышения ударной вязкости металла крупнозернистого участка зоны термического влияния при сварке, заключающийся в повышении плотности высокоугловых границ, которая обусловлена исчезновением зернограничного феррита и замещением гранулярного бейнита бейнитом речной морфологии.

Выявленный механизм противоречия, во влиянии двух типов бейнита (гранулярного и речного) в зависимости от размера и однородности исходного зерна аустенита перед $\gamma \rightarrow \alpha$ превращением.

В установлении более сильных факторов, чем микроструктура матрицы, охрупчивающих сварные соединения, включая неметаллические включения определенной морфологии и кристаллографическую текстуру.

В установлении роли кристаллографической текстуры в обеспечении хладостойкости сварных соединений для двух изученных сварочных процессов – дуговой сварки и сварки с использованием ТВЧ. При этом показано, что группы смежных зерен феррита (кристаллографические кластеры), у которых плоскости $\{001\}$ близки к поверхности разрушения ($\pm 20^\circ$), способствуют формированию транскристаллитного скола.

Впервые для изученных типов сварки ранжированы микроструктурные факторы по степени охрупчивающего влияния на сварное соединение. Установлены наиболее опасные инициаторы хрупкого разрушения.

В работе выявлена общая картина микроструктурных механизмов, определяющих вязкость сварных соединений и основного металла исследованных сталей.

Установлены структурные механизмы, определяющие комплекс свойств сварных соединений, выполненных электронно-лучевой и гибридной лазерно-дуговой сваркой, заключающиеся в измельчении зерна аустенита и формировании реечного бейнита в ЗТВ, что улучшает хладостойкость; а в сварном шве – в формировании бейнита взамен игольчатого феррита, что ухудшает хладостойкость.

Теоретическая значимость работы состоит в:

- развитии научного направления и разработке металлургических основ получения сварных соединений стальных труб с высокой вязкостью и хладостойкостью;

- предложенных путях совершенствования структуры и свойств сварных соединений, открывающих перспективы новых разработок в этом направлении;

- создании системы исследований и разработок, которая является методической основой создания новых и совершенствования существующих технологий и материалов.

Практическая значимость работы состоит в разработке и опробовании технологических приемов управления структурой и свойствами сварных соединений, установлении эффектов, позволяющих улучшать свойства сварных соединений труб.

Предметом внедрения стали новые составы сталей различных классов прочности, мероприятия по снижению тепловложения при сварке (повышению скорости охлаждения); комплекс мероприятий по повышению чистоты стали, усовершенствованные технологии высокочастотной сварки для гарантии удаления жидкого металла и окислов в грат, новые схемы термической обработки.

Практическая значимость работы подтверждается внедрением результатов на ряде предприятий, значительным объемом новых видов продукции, произведенной с использованием разработок автора и фактическим подтвержденным экономическим эффектом более 12 млрд. рублей.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность. Изложение работы соответствует диссертационному формату и включает введение, разделы, в которых описываются экспериментальные результаты (главы 1-3), раздел, посвященный систематизации и обобщению полученных результатов (гл.4), далее на основе полученных результатов сформулированы подходы и технологические пути совершенствования структуры и вязкостных свойств сварных соединений (гл.5), далее описаны результаты промышленного опробования и внедрения предложенных технологий при производстве новых видов продукции (гл.6), завешают работу общие выводы, которые вполне обоснованы.

Во введении обоснована актуальность проблемы, степень ее разработанности, описано состояние вопроса, сформулированы цель и задачи исследования, описана общая схема проведения работы и использованный

методический подход, а также научная новизна и научная и практическая значимость работы.

В первой главе диссертации проведен металловедческий анализ технологий сварки, применяемых при производстве труб (дуговой сварки под слоем флюса и высокочастотной сварки), выявлены их особенности. Кроме того, данный раздел посвящен формированию и использованию собственной системы исследований и разработок для создания и совершенствования технологий сварки и материалов. Здесь хотелось бы отметить, что логичная схема (моделирование – имитация процессов – лабораторное воспроизведение – промышленное опробование – оценка результатов) на всех стадиях наполнена адекватными моделями, лабораторным оборудованием, методиками и др., а также экспериментально установлены критерии переноса данных между стадиями, что позволило получить действительно работающую систему исследований и разработок и создать на этой основе эффективные технологии и новые продукты.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию микроструктуры сварных соединений, выполненных различными видами сварки. Здесь хотелось бы отметить эффективность применения современной методики дифракции обратно рассеянных электронов для количественной оценки сложных структур и кристаллографической текстуры металла различных зон сварных соединений. В комплексе с просвечивающей электронной микроскопией, количественной металлографией и рентгеноструктурным анализом удалось получить большое количество полезных и новых результатов, в том числе количественно охарактеризовать структуру исследуемых материалов, в том числе размер зерна γ и α фаз, включая плотность высокоугловых границ.

Глава 3 диссертации П.П. Степанова посвящена исследованию связей между микроструктурой, ударной вязкостью и хладостойкостью, а также изучению особенностей и механизмов разрушения сварных соединений.

Установлен ряд важных связей между структурой и свойствами сварного соединения. В том числе, для металла сварного шва, выполненного дуговой сваркой под флюсом установлено, что на величину ударной вязкости влияет размер и пространственная ориентация столбчатых зерен бывшего аустенита, размер зерен зернограничного феррита их форма и расположение, их сочетание с неметаллическими включениями, а также размер кристаллографических кластеров $\{001\}$ параллельных плоскости разрушения ударных образцов.

Для крупнозернистой зоны термического влияния при дуговой сварке также установлены основные взаимосвязи между микроструктурой и ударной вязкостью. Показано, что основным механизмом повышения вязкости при этом является увеличение плотности высокоугловых границ за счет формирования пакетов реечного бейнита и повышения вклада от границ зерен бывшего аустенита, из них первый фактор является определяющим.

В случае нагрева грубозернистой зоны термического влияния в межкритическую $\gamma+\alpha$ область установлено повышение доли, размера МА - составляющей и неблагоприятное расположение этих участков в виде цепочек по границам зерен. Это дает основание считать МА - составляющую основной причиной снижения ударной вязкости в данном случае.

Установлено влияние сильных охрупчивающих факторов на ударную вязкость и механизм разрушения имитированной грубозернистой области зоны термического влияния исследованных сталей, в первую очередь - включений нитрида титана, находящихся в крупном бейнитном пакете, ориентация преимущественных плоскостей скола которого близка к плоскости разрушения.

При изучении микроструктуры, особенностей разрушения и ударной вязкости сварных соединений, выполненных высокочастотной сваркой, в работе установлены следующие закономерности. При отсутствии сварочных окислов появление аномально низких значений ударной вязкости наблюдали при достаточно низких температурах испытания (-40°C и ниже).

В качестве охрупчивающих факторов установлены крупные очаговые фасетки скола, группа смежных очаговых фасеток, очаговая фасетка с линзовидным неметаллическим включением. Снижение ударной вязкости при разрушении крупной фасетки скола без неметаллических включений указывает на совместное влияние неблагоприятной кристаллографической текстуры и повышенного размера зерен феррита в зоне линии сплавления. Во всех случаях размер фасеток скола в несколько раз превышал средний размер зерна α -фазы, что соответствовало размерам выявленных кристаллографических кластеров $\{001\}$.

Глава 4 посвящена исследованию характера разрушения сварного соединения и основного металла трубных сталей, микроструктурных факторов, определяющих рассеяние ударной вязкости, и обобщению полученных результатов. В этом разделе важнейшим результатом является ранжирование охрупчивающих микроструктурных факторов для различных зон и видов сварки. Также установлено, что характер температурной зависимости ударной вязкости (ее плавное снижение при понижении температуры испытания или рассеяние значений вплоть до нулевых значений) зависит от того, оказывает ли определяющее влияние матрица микроструктуры, либо вступают в действие более сильные дополнительные охрупчивающие факторы, в том числе – неметаллические включения, области структурной неоднородности, кристаллографическая текстура. Показано, что охрупчивающее влияние неметаллических включений проявляется при величине зерна матрицы превышающем критический размер (50–80 мкм), а кроме того зависит от размера, формы, ориентировки включения и характера его связи с матрицей.

Весьма важной с практической точки зрения является глава 5 рассматриваемой диссертации, поскольку в ней анализируются возможности применения полученных результатов и установленных закономерностей в промышленных условиях, сформулирована концепция управления микроструктурой сварных соединений на основании выявленных связей между структурой и свойствами и ранжирования охрупчивающих механизмов. Предложены и опробованы технические решения, получены значимые эффекты в части повышения ударной вязкости и хладостойкости сварных соединений исследованных видов сварки.

Рассматриваемую работу отличает широкое внедрение полученных автором результатов в производство и полученный значительный фактический экономический эффект (глава 6). Разработки внедрены в производство в ряде

трубоэлектросварочных цехов АО «Выксунский металлургический завод», а также других предприятиях: АО «Трубодеталь», АО «Газпром трубинвест», Альметьевском заводе ОМК, АО «ИТЗ» с общим объемом произведенной трубной продукции более 600 тыс. тонн.

Освоено производство труб с уникальными характеристиками: класса прочности до К80; с минимальной температурой эксплуатации $-42...-60^{\circ}\text{C}$; с толщиной стенки до 41 мм и др., в том числе для уникальных проектов трубопроводов: «Турецкий поток», «Северный поток-2» и др. Освоено производство нефтегазопроводных труб ТВЧ для эксплуатации во всех климатических регионах РФ, стойких к CO_2 и H_2S , обсадных труб группы прочности Дс в хладостойком исполнении, хладостойких (-20°C) труб класса прочности до К60 для ПАО «Газпром», ПАО «Новатэк» и ПАО «Транснефть».

По работе есть ряд замечаний и вопросов:

1. Сталь 05ХГБ используется для производства нефтегазопроводных труб, для которых коррозионная стойкость в нефтепромысловых средах является не менее важной характеристикой, чем механические свойства, поэтому отсутствие соответствующих испытаний, а тем более связи структурного состояния с коррозионной стойкостью вызывают сожаление.

2. Оценивалось ли в работе влияние субструктуры на механизм разрушения при испытаниях исследованных сталей?

3. Не совсем ясно, как был выбран и обоснован критерий отнесения границ к высокоугловым при разориентировке границ зерен до $<15^{\circ}$, в литературе встречаются и другие значения углов разориентировки ($<7^{\circ}$, $<10^{\circ}$).

4. Приведенные в работе микроструктурные факторы, охрупчивающие металл при низких температурах и приводящие к разбросу показателей ударной вязкости, существуют и в ходе испытаний при повышенных ($0...-20^{\circ}\text{C}$) температурах. Поэтому возникает вопрос, почему, если они также являются концентраторами напряжений или «слабым звеном» структуры, при этом они никак не проявляются?

5. Автореферат содержит значительное количество аббревиатур, что затрудняет восприятие материала, в тексте диссертации содержатся отдельные опечатки и ошибки пунктуации.

Высказанные замечания не уменьшают значимости диссертационной работы, выполненной на высоком научно-техническом уровне, поскольку не затрагивают основных ее положений.

Рассматриваемая работа соответствует формуле и направлениям исследований 2, 4, 5, 6 специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Работа написана хорошим научно-техническим языком, хорошо иллюстрирована, представлены ссылки на большое количество современных и классических отечественных и зарубежных научных публикаций.

Диссертация и автореферат диссертации по структуре и оформлению соответствуют требованиям, предъявляемым ГОСТ Р 7.0.11-2011. Автореферат отражает содержание диссертации.

