

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Крюкова Романа Евгеньевича

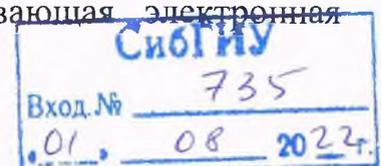
«Физическая природа и закономерности формирования структуры, свойств
стальных сварных соединений и электродуговых покрытий, получаемых
с применением углеродфторсодержащих материалов»,
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

1. Актуальность работы. Повышение эксплуатационных свойств конструкционных материалов и неразъемных соединений из них является актуальной проблемой современного физического материаловедения. Путь создания новых сварочных и наплавочных материалов (в частности, углеродсодержащих и углеродфторсодержащих флюсов, флюсовых добавок и порошковых проволок) для соединения, восстановления и упрочнения металлоизделий является перспективным направлением исследований. Использование новых углеродфторсодержащих материалов невозможно без понимания физической природы и установления закономерностей формирования макро-, микроструктуры, структурно-фазовых состояний и свойств стальных сварных соединений и наплавов, работающих в особо сложных, напряженных условиях и в агрессивных средах.

2. Научная новизна диссертации. Автором научно обоснованы механизмы и физическая природа влияния углеродфторсодержащих материалов на свойства металла сварных швов и наплавленных слоев покрытий, полученных электродуговым способом. Крюковым Р. Е. выполнено комплексное исследование структурно-фазовых состояний, дефектной субструктуры и поверхности разрушения наплавленных слоев и сварных соединений. Полученные результаты, несомненно, отличаются научной новизной и вносят вклад в развитие физики конденсированного состояния. К наиболее важному можно отнести то, что впервые с использованием методов сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии установлены закономерности формирования структуры, фазового состава, дислокационной субструктуры, а также исследована морфология поверхности разрушения сварных швов и наплавов из низкоуглеродистой стали, полученных с использованием углеродфторсодержащих материалов.

3. Степень обоснованности и достоверности результатов и сделанных на их основе выводов и заключений. Достоверность результатов исследования подтверждается представительным объемом экспериментальных данных, высокой степенью воспроизводимости результатов экспериментов, использованием современных экспериментальных и теоретических методов современной физики конденсированного состояния и физического материаловедения (сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия), статистических методов обработки экспериментальных данных, а также эффективностью предложенных технических решений, подтвержденной результатами лабораторных и промышленных испытаний.

4. Научная и практическая значимость. Проведены фундаментальные исследования с использованием высокоинформативных методов современного физического материаловедения (сканирующая и просвечивающая электронная



микроскопия) структурно фазовых состояний, дислокационной субструктуры и поверхности разрушения сварных швов и наплавов из низкоуглеродистой стали, полученных с применением углеродфторсодержащих материалов. Полученные результаты вносят вклад в развитие физики конденсированного состояния в области изучения физической природы, механизмов и закономерностей формирования макро- и микроструктуры, структурно-фазовых состояний и свойств стальных сварных соединений и электродуговых покрытий, работающих в особых условиях, получаемых с применением новых углеродфторсодержащих материалов.

Работа отличается существенной практической значимостью. Разработанные автором физические основы промышленных технологий электродуговой сварки и наплавки с применением УФСМ: технологии сварки резервуаров для нефтепродуктов в северном исполнении, углеродфторсодержащие флюсы для сварки и наплавки; порошковые проволоки для наплавки изделий, эксплуатируемых при высоких температурах и в условиях высокого абразивного износа; наплавочные проволоки на основе принципов прямого легирования; наплавочные проволоки для ремонта горношахтного оборудования, – защищены 20 патентами РФ.

Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе подготовки бакалавров, магистров и аспирантов в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет».

5. Анализ содержания работы. Диссертация включает в себя введение, 5 глав, заключение и приложение, изложена на 314 страницах машинописного текста, содержит 143 рисунка, 52 таблицы, список литературы состоит из 306 наименований.

Диссертация имеет внутреннее единство и свидетельствует о личном вкладе автора в науку и его высоком профессиональном уровне. Выводы обоснованы и аргументированы.

Автореферат отражает основное содержание диссертации, содержит в достаточном объеме иллюстративный материал и необходимые пояснения. Текст диссертации и автореферата написан с учетом требований последних ГОСТ и ВАК РФ.

Основное содержание диссертации опубликовано в 171 печатной работе, в том числе в 48 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций, 32 статьях, индексируемых в изданиях Scopus и Web of Science, а также 2 монографиях.

Во введении отражена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, отмечен личный вклад автора, указаны структура и объем диссертации.

В первой главе «Механизмы и физическая природа влияния различных факторов на структурно-фазовое состояние и свойства металла сварных швов и наплавленных слоев, выполненных электродуговым способом» проведен анализ литературных данных по теме диссертационной работы. Приведены данные, отражающие основы и современные тенденции способов нанесения покрытий и получения неразъемных соединений с использованием различных материалов, в частности, флюсов и

порошковых проволок. Проанализировано практическое использование наплавки и сварных швов для повышения эксплуатационных свойств металлоизделий.

Во второй главе «Механизмы и физическая природа влияния углеродфторсодержащих материалов на макро-, микроструктуру и свойства металла стальных сварных швов и наплавленных слоев» автором теоретически обоснован механизм и физическая природа влияния углеродфторсодержащих материалов на свойства металла сварных швов, наплавленных слоев покрытий, полученных электродуговым способом, базирующиеся на рафинирующем и газозащитном эффекте соединений фтора и углерода. Установлено, что введенный углерод обладает повышенной активностью и способен раскислять металл и восстанавливать оксиды, находящиеся в металле и шлаке, с образованием газообразных CO, CO₂ и существенным образом влияя на макроструктуру металла шва посредством снижения общего содержания неметаллических включений. В целях удаления водорода, снижения количества дефектов макроструктуры металла при электродуговой наплавке и сварке под флюсом целесообразно использование в составе фторсодержащих флюсовых материалов соединения криолита (Na₃AlF₆).

Получены новые данные и зависимости влияния количества углеродфторсодержащей добавки на механические свойства сварных швов, выполненных с применением флюсов АН-348, АН-60 и АН-67. Использование углеродфторсодержащей добавки при сварке стали 09Г2С под флюсом АН-348 увеличивает показатели ударной вязкости KCU⁻⁴⁰ на 80 %, АН-60 KCV⁻²⁰ – на 40 %, АН-67 KCV⁻²⁰ – на 40 %. Повышение ударной вязкости достигается без роста концентрации углерода в сварном шве введением в состав флюсов до 6 % углеродфторсодержащей добавки.

Сопоставляя данные теоретических исследований, металлографического анализа, зависимостей свойств металла от количества добавок и содержания газов, можно констатировать, что углеродфторсодержащие добавки во флюсы, оказывая газозащитный и рафинирующий эффект, снижают содержание кислорода и водорода в металле сварного шва, обеспечивают уменьшение количества неметаллических и газовых включений. Установлено, что углеродфторсодержащие материалы (в частности, добавка ФД-УФС) универсальны и обеспечивают рафинирующий и газозащитный эффекты при различных базовых компонентах флюсов независимо от их происхождения (природное или техногенное). В результате экспериментальных исследований доказана возможность удаления водорода из металла сварного шва в виде соединения HF.

В третьей главе «Механизмы и закономерности повышения абразивной износостойкости электродуговых покрытий, наплавленных с применением углеродфторсодержащих порошковых проволок» подтвержден газозащитный и рафинирующий эффекты углеродфторсодержащих материалов, вводимых в состав порошковых проволок – так же, как и во флюсы. Использование углеродфторсодержащего материала взамен аморфного графита в новых составах порошковой проволоки типа Нп-25Х5ФМС и 35В9Х3СФ приводит к снижению содержания водорода и пористости металла наплавленных слоев, способствует повышению износостойкости и уменьшает количество содержащихся в нем

неметаллических включений, в том числе строчечных оксидных включений и недеформируемых силикатов.

Сопоставляя результаты исследований микроструктуры и химического состава металла наплавленных слоев, выполненных с применением порошковой проволоки систем Fe-C-Si-Mn-Cr-V-Mo и Fe-C-Si-Mn-Cr-W-V, установлено, что повышение твердости и износостойкости металла реализовано посредством твердорастворного упрочнения и упрочнения частицами второй фазы.

Также в главе показано, что применение углеродфторсодержащих материалов позволяет реализовать концепцию прямого легирования металла наплавленных слоев и расширяет возможность применения в составе порошковых проволок различных рудных материалов и оксидов легирующих элементов, в частности – вольфрамовых руд, оксидов хрома и марганца. Так, использование вольфрамового концентрата взамен порошка вольфрама обеспечивает значительное уменьшение величины бывшего зерна аустенита в структуре наплавленного слоя вольфрамсодержащей проволокой типа Н. Введение вольфрамового концентрата в шихту порошковой проволоки типа Е способствует незначительному измельчению игл мартенсита, уменьшению величины первичного зерна аустенита и повышению микротвердости мартенсита в структуре наплавленного слоя. Проведенные исследования износостойкости наплавленного слоя показали, что введение вольфрамового концентрата взамен порошка вольфрама в состав шихты проволоки класса Н способствует значительному повышению твердости наплавленного слоя и уменьшению скорости его истирания. На основе статистической обработки данных лабораторных экспериментов с применением методов многофакторного анализа получены зависимости, позволяющие осуществлять прогнозные расчеты твердости и скорости износа металла наплавленных слоев в зависимости от химического состава последнего. Для порошковых проволок систем Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo, Fe-C-Si-Mn-Cr-V-Mo и Fe-C-Si-Mn-Cr-W-V исследованы структурно-фазовые состояния наплавов и установлены закономерности влияния химического состава на твердость и износостойкость металла наплавленных слоев.

Четвертая глава «Анализ структурно-фазового состояния, дефектной субструктуры и морфологии поверхности разрушения металла наплавов и сварных швов, выполненных с применением углеродфторсодержащих материалов» дополняет и объясняет физическую природу и механизмы формирования эксплуатационных свойств металла сварных швов и покрытий, приведенных во *второй и третьей главе* диссертации. Важной с точки зрения физики конденсированного состояния являются исследования структурно-фазового состояния, дефектной субструктуры и поверхности разрушения металла наплавов и сварных швов из низкоуглеродистой стали с углеродфторсодержащими добавками в порошковой проволоке (первый раздел главы) и во флюсе (второй и третий раздел главы) посредством просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии.

Анализ количественных параметров свидетельствует о положительном влиянии углеродфторсодержащих добавок на качество и свойства сварного шва и наплавленного металла.

Для металла наплавки, полученной с применением углеродфторсодержащей добавки, количество выявленных частиц (карбиды, сульфиды, оксиды и т. д.) размером

0,25 – 2,5 мкм почти в 2 раза ниже, чем для обычной наплавки. Скалярная и избыточная плотность дислокаций в обычной наплавке выше, что обеспечивает более высокое значение вкладов в упрочнение металла.

Для металла сварных швов, изготовленных с использованием углеродфторсодержащей добавки, излом содержит микропоры, размеры которых в 1,8 раза меньше в сравнении с металлом обычных швов, в них значительно меньше неметаллических включений и они менее хрупкие. Показано, что вклады в упрочнение металла, обусловленные торможением подвижных дислокаций дислокациями «леса» и внутренними полями напряжений, для швов, полученных с применением углеродсодержащих добавок, ниже.

Выявлены закономерности влияния углеродфторсодержащей добавки во флюс из шлака силикомарганца на формирование структурно-фазового состояния, дислокационной субструктуры и поверхности разрушения электродуговых наплавов из низкоуглеродистой стали.

Анализ структуры изломов металла наплавов показал, что количество (на единицу площади поверхности излома) несплошностей, микро- и макропор в металле наплавки без углеродфторсодержащей добавки больше, чем в металле наплавки, содержащей такую добавку во флюс.

Проведено сравнение относительного содержания зерен перлита и феррита, величины скалярной и избыточной плотности дислокаций, амплитуды кривизны кручения кристаллической решетки в металле наплавов, полученных с углеродфторсодержащей добавкой во флюс и без нее, подтвердившее положительный эффект добавки на физико-механические свойства металла наплавов.

В пятой главе «Физические основы промышленных технологий электродуговой сварки и наплавки, с применением углеродфторсодержащих флюсов и порошковых проволок, обеспечивающих получение стальных сварных швов и покрытий с особыми эксплуатационными свойствами» показано практическое апробирование разработанных физических основ технологий и новых флюсовых материалов в условиях ряда промышленных предприятий. На АО «Новокузнецкий завод резервуарных металлоконструкций» освоена технология производства нового материала – углеродфторсодержащей флюс-добавки ФД-УФС по техническим условиям ТУ 5929-007-01395874-2015. На ООО «Регионстрой» освоено производство новых флюсов для наплавки марки НФП в соответствии с разработанными техническими условиями ТУ 20.59.56.120-001-14796818-2020. Совокупный экономический эффект от внедрения результатов исследований составил 8,64 млн рублей в год.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационной работы, направленные на решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение.

В приложениях представлены акты о практическом использовании результатов работы. Экономический эффект, полученный от внедрения результатов диссертационной работы, несомненно, внесет вклад в развитие промышленности Российской Федерации.

6. Оформление диссертации. Оформление диссертации соответствует требованиям ВАК и ГОСТ. Материал представлен последовательно, имеет четкую

логическую структуру. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию, отражает актуальность работы, ее цель и задачи, научную новизну, практическую значимость, обоснованность и достоверность научных положений, результатов и выводов.

7. Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния», п. 1 и 6 (п. 1 «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления», п. 6 «Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами»).

8. Замечания. По работе имеются следующие замечания:

1. Непонятно, насколько можно прогнозировать положительную роль углеродфторсодержащей добавки для формирования высокого комплекса свойств шва и наплавки из других металлов;

2. Нет ясности, чем обусловлена вариация состава углеродфторсодержащего материала при сварке и наплавке.

3. Автор заявляет о работе покрытий и сварных швов в особых условиях, при этом испытания, проведенные в рамках исследования (в частности – для определения ударной вязкости), проводились в температурном диапазоне от минус 20° С до минус 40°С. Однако температура в северных районах может достигать и минус 50–60° С. Считаю, что наличие данных об испытаниях при более низких температурах усилило бы положительный эффект работы.

4. При использовании разработанных порошковых проволок происходит повышение твердости наплавленного слоя в некоторых случаях до значений 70–80 HRC (таблица 3.11). Такая твердость обычно вызывает некоторые сложности при последующей обработке металлоизделий. В промышленных условиях как-то обрабатывается наплавленная поверхность? Каким способом?

5. Ударная вязкость сварных соединений и наплавов в значительной степени зависит от места вырезки образцов и зоны изготовления канавки. В диссертации такая информация отсутствует.

6. В диссертации отсутствуют результаты измерения микротвердости сварных соединений. Такие исследования в различных сечениях сварного соединения (наплавки) позволяют выявлять различные неоднородности и прослойки (в том числе хрупкие), особенно в зоне линии сплавления и дают возможность оценить твердость отдельных структурных составляющих.

Сделанные замечания не ставят под сомнение общую положительную оценку работы и не опровергают ее основные результаты.

9. Заключение. Диссертация *Крюкова Романа Евгеньевича* «Физическая природа и закономерности формирования структуры, свойств стальных сварных соединений и электродуговых покрытий, получаемых с применением углеродфторсодержащих материалов» представляет собой законченную научно-

квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение и заключающаяся в выявлении физической природы и установлении закономерностей формирования макро-, микроструктуры, структурно-фазовых состояний и свойств стальных сварных соединений и электродуговых покрытий, работающих в условиях высокого абразивного износа, низких и высоких температур, получаемых с применением новых углеродфторсодержащих материалов, что соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а также П. 9 «Положения о присуждении ученых степеней ВАК Минобрнауки РФ», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842.

По своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне диссертационная работа соответствует паспорту специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» (п. 1 «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления» и п. 6 «Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами»), а также всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к докторским диссертациям, а ее автор **Крюков Роман Евгеньевич** заслуживает присуждения степени доктора технических наук.

Согласен на обработку моих персональных данных:

официальный оппонент Смирнов Александр Николаевич

Доктор технических наук, профессор

05.16.01– «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

05.02.11– «Методы контроля и диагностика в машиностроении»

тел.: +7 903-946-47-13, e-mail: office@kcsk.group

650000, гор. Кемерово, ул. Красная, дом 25, кв. 54

Профессор кафедры «Технология машиностроения»

ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный

технический университет имени Т. Ф. Горбачева»,

д.т.н., проф.

А. Н. Смирнов

Дата подписания отзыва: 18 июля 2022 года

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева».

Адрес: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Подпись Смирнова АН
ЗАВЕРЯЮ
начальник отдела управления делами
Карнадуд О.С. Карнадуд
"21" 07 2022 г.