

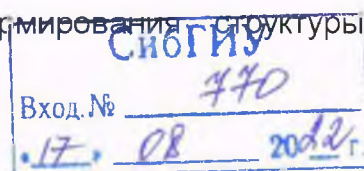
## ОТЗЫВ

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

В связи с освоением новых территорий, комплексов, в том числе, нефтегазовый и горно-металлургический промышленности, требующих использования надежных строительных и технологических металлических конструкций, применение углерод-фторсодержащих материалов во флюсах и порошковых проволоках открывает широкие возможности повышения качества макроструктуры стальных сварных соединений, электродуговых покрытий и наплавов по содержанию неметаллических включений и газовых пор. Однако отсутствие сведений о физической природе и механизмах формирования требуемых показателей свойств (прочности, твердости, абразивной, ударно-абразивной износостойкости и др.), соответствующих заданным условиям эксплуатации, структурно-фазовых состояниях, дислокационной субструктуре и морфологии поверхностей разрушения наплавов и сварных швов, полученных с использованием углеродфторсодержащих сварочных материалов, сдерживает прогресс в этом перспективном направлении. Тем самым применение автором методов современного физического материаловедения, исследование структурно-фазового состояния металла соединений и покрытий методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии расширяет возможности раскрытия физической природы и механизмов формирования физико-механических свойств сварных швов и наплавов из сталей различного химического состава, что делает рассматриваемую диссертационную работу безусловно актуальной.

**Научной новизна диссертации.** Автором получен ряд результатов, обладающих научной новизной. Наиболее важные, на мой взгляд, являются следующие:

- обоснованы механизм и физическая природа влияния углеродфторсодержащих материалов на свойства металла сварных швов и наплавленных слоев покрытий, полученных электродуговым способом;
- впервые с использованием методов сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии установлены закономерности формирования структуры,



фазового состава, дислокационной субструктуры и исследована морфология поверхности разрушения сварных швов и наплавов из низкоуглеродистой стали, полученных с использованием углеродфторсодержащих материалов;

- установлены механизмы упрочнения (формированием мартенситной структуры при самозакалке, твердорастворное, зернограничное, частицами вторых фаз) электродуговых покрытий систем Fe-C-Si-Mn-Cr-V-Mo, Fe-C-Si-Mn-Cr-W-V, Fe-C-Si-Mn-Cr-Mo-V, Fe-C-Si-Mn-Ni-Mo-W-V и Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-V, обеспечивающие повышение их износостойкости.

**Степень обоснованности и достоверности результатов, полученных положений, выводов и заключений.** Достоверность полученных в работе результатов не вызывает сомнений и обеспечивается большим 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.

**Научная ценность.** Полученные результаты и выводы позволяют внести вклад в развитие физики конденсированного состояния, в области глубокого изучения физической природы, механизмов и закономерностей формирования макро-, микроструктуры, структурно-фазовых состояний и свойств металла сварных соединений и электродуговых покрытий, работающих в особых условиях, получаемых с применением углеродфторсодержащих материалов.

**Практическая значимость.** В диссертации разработаны физические основы, положившие начало для практических рекомендаций к применению новых углеродфторсодержащих материалов (флюсов и порошковых проволок) в технологиях:

- сварки резервуаров для нефтепродуктов в северном исполнении,
- наплавки изделий, эксплуатируемых при высоких температурах и в условиях высокого абразивного износа,
- для ремонта горно-шахтного оборудования,

Технические решения защищены 20 патентами РФ и используются в учебных материалах для подготовки бакалавров, магистров и аспирантов в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет».

**Анализ содержания работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и приложений, имеет общий объем 314 страниц, содержит 143 рисунка,

52 таблицы, список литературы из 306 источников.

Диссертация написана и оформлена на достаточно высоком уровне. Отмечается и довольно высокая степень апробации результатов работы. Всего опубликовано 171 печатная работа, в том числе 48 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций, 32 статьи в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, а также 2 монографии. Получено 20 патентов Российской Федерации.

Во **введении** приведено обоснование актуальности темы диссертационной работы, описана степень проработанности, сформулированы цель работы, решаемые задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимости, основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности. Приведены данные об апробации результатов, Отмечен личный вклад автора, указаны структура и объем диссертации.

**Первая глава** имеет обзорный характер. Проведен обзор существующих механизмов влияния флюсов и порошковых проволок на свойства металла сварных швов и электродуговых наплавов на основе литературных источников за 1950-2019 гг.

Во **второй главе** приведено обоснование механизма и физическая природа влияния углеродфторсодержащих материалов на свойства металла сварных швов, наплавленных слоев покрытий, полученных электродуговым способом. Соискателем установлено, что введенный углерод обладает повышенной активностью и способен раскислять металл и восстанавливать оксиды, находящиеся в металле и шлаке с образованием газообразных CO, CO<sub>2</sub> и существенным образом влиять на макроструктуру металла шва посредством снижения общего содержания неметаллических включений. При электродуговой наплавке и сварке под флюсом целесообразно использование в составе фторсодержащих флюсовых материалов криолит Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> для удаления водорода и снижения количества дефектов макроструктуры металла. Установлено, что массовая доля кислорода в металле сварного шва с повышением содержания углеродфторсодержащих добавок во флюсе уменьшается в 1,5-1,7 раза. Содержание водорода в металле сварного шва уменьшается в 2 - 5 раз. Так же установлено, что углеродфторсодержащие материалы, в частности добавка ФД-УФС универсальны и обеспечивают рафинирующий и газозащитный эффекты при различных базовых компонентах флюсов не зависимо от их происхождения (природное или техногенное), Использование углеродфторсодержащей добавки при сварке стали 09Г2С увеличивает показатели ударной вязкости на 40-80%, о чем свидетельствуют полученные в работе новые данные и зависимости.

В **третьей главе** автором подтвержден газозащитный и рафинирующий эффекты

углеродфторсодержащих материалов (описанный во второй главе) и при введении их в состав порошковых проволок. Применение 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. 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 показали, что повышение твердости и износостойкости металла реализовано посредством твердорастворного упрочнения и упрочнения частицами второй фазы. Так же 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** является основной частью работы и расширяет понимание физической природы и механизмов формирования эксплуатационных свойств металла сварных швов и покрытий, представленных в предыдущих главах. Приведены результаты исследования с использованием методов просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии структурно-фазового состояния, дефектной субструктуры и поверхности разрушения металла наплавов и сварных швов с углеродфторсодержащими материалами в порошковой проволоке и во флюсе, свидетельствующие о положительном влиянии таких добавок на качество и свойства сварного шва и наплавленного металла. В частности, для металла наплавки, полученной с применением добавки, количество выявленных выделений избыточных фаз (карбиды, сульфиды, оксиды и т.д.) размером 0,25 – 2,5 мкм, почти в 2 раза ниже, чем для обычной наплавки. Так же скалярная и избыточная плотность дислокаций в обычной наплавке выше, что обеспечивает более высокое значение вкладов в упрочнение металла. Поверхность излома сварных швов, изготовленных с использованием углеродфторсодержащей добавки, содержит микропоры, размеры которых в 1,8 раза меньше по сравнению с образцом без добавки, в них значительно меньше неметаллических включений и они менее хрупкие. 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.

**В пятой главе** представлены результаты разработки и практического

апробирования физических основ промышленных технологий электродуговой сварки и наплавки, с применением углеродфторсодержащих порошковых проволок и флюсов, обеспечивающих получение стальных сварных швов и покрытий с особыми свойствами (повышенной ударной вязкости при низких температурах, твердости, износостойкости), на примере технологий сварки стальных резервуаров для нефтепродуктов в северном исполнении, наплавки деталей и изделий, металлургического и горно-шахтного оборудования, эксплуатируемых при высоких температурах и в условиях высокого абразивного износа.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В **приложениях** представлены акты внедрения и использования научно-технических результатов работы.

Диссертационная работа **по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорту специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния**, пунктам 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»; 6. Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами.

**Автореферат** правильно отражает ее содержание, основные результаты, положения и выводы.

В качестве **замечаний** по диссертации можно отметить:

1. Неясен выбор способа сварки и наплавки – электродуговая. Какие у нее преимущества перед другими видами?

2. Структурно-фазовые состояния и свойства готового изделия (шов и наплавка) во многом зависят от материала основы. Влияние основного металла и обоснование его выбора в работе не отражено.

3. Желательно было выделить концентрационные зависимости влияния УФС добавок и объяснение выбора 6% содержания добавки.

4. При оценке вкладов в упрочнение металла швов и наплавки автор не указывает какая из составляющих внутренних полей напряжений (упругая или пластическая) вносит основной вклад. Можно ли их аддитивно суммировать?

Данные замечания не являются принципиальными, не опровергают основные результаты работы и не снижают в целом положительную оценку работы.

Считаю, что 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, выполненную на высоком научном уровне, совокупность результатов которой можно квалифицировать как **решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение**.

В целом по уровню решаемых задач, актуальности, научной новизне, объему выполненным исследованиям, теоретической и практической значимости полученных результатов работа удовлетворяет требованиям предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а также п. II.9 «Положения о присуждении ученых степеней ВАК Минобрнауки РФ», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор **Крюков Роман Евгеньевич** заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

На обработку персональных данных согласен.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук, профессор

А.И. Зайцев

Зайцев Александр Иванович

Ученая степень: доктор физико-математических наук

Специальности: 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, 02.00.04. – Физическая химия.

Должность: директор Научного центра физико-химических основ и технологий металлургии Государственного Научного Центра, Федерального Государственного Унитарного Предприятия «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина».

Адрес: 105005, Москва, ул. Радио 23/9, стр. 2

Телефон: (495)777 93 48

E-mail: aizaitsev1@yandex.ru

Подпись Зайцева А.И. заверяю:

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



Т.П. Москвина

Дата подписания отзыва: 27 июля 2022 года