

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и инновационной деятельности Национального исследовательского Томского государственного университета,
доктор физико-математических наук, профессор



Ворожцов Александр Борисович

« 15 » июля 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ
федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»
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 доктора технических наук
по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

1. Актуальность темы диссертационного исследования. Одной из наиболее важных и сложных проблем в современном физическом материаловедении является повышение эксплуатационных свойств конструкционных материалов и изделий. В последние годы бурное развитие получили новые методы и технологии создания неразъемных соединений и покрытий с помощью электрической дуги. Это связано со сложными условиями работы конструкций, обусловленными повышенным уровнем напряжения, расширения температурных интервалов эксплуатации, наличием агрессивных сред и т.д. Одним из путей повышения износостойкости поверхности изделий является применение различных энергосберегающих и безотходных методов упрочнения поверхности, обеспечивающих формирования наноразмерной и дисперсно-упрочненной микроструктуры. К ним относятся электродуговая наплавка порошковыми проволоками. Процессы сварки и наплавки – родственные с точки зрения сложного характера взаимодействия многих металлургических, материаловедческих и физико-механических факторов. Одним из путей решения проблемы повышения надежности и долговечности деталей машин и механизмов является возможность активного вмешательства в физико-химические процессы, протекающие в зоне сварки и наплавки с целью регулирования структуры и свойств конечного продукта. Этому направлению соответствует способы дуговой наплавки и сварки с применением порошковых проволок под флюсом или легирующих флюсов (в частности, углеродфторсодержащих флюсов и добавок в порошковую проволоку). В этой связи диссертационная работа Крюкова Р. Е.,



посвященная выявлению физической природы и установлению закономерностей формирования макро- микроструктуры, структурно-фазовых состояний и свойств стальных сварных соединений и электродуговых покрытий, работающих в особых условиях, получаемых с применением углеродфторсодержащих материалов, является актуальной и имеет научную новизну и прикладную значимость.

2. Новизна исследований и полученных результатов. Автором диссертационной работы выполнен большой объем исследований, что позволило ему получить универсальные обобщения, представляющие значительный теоретический и практический интерес. Сильной стороной диссертации являются квалифицированно выполненные всесторонние исследования структурно-фазовых состояний, дефектной субструктуры и поверхности разрушения сварных швов и наплавов, полученных с использованием углеродфторсодержащих материалов. К числу наиболее существенных результатов, обладающих новизной, необходимо отнести следующие:

1. Научные обоснования физической природы влияния углеродфторсодержащих флюсовых материалов на механические свойства и структуру сварных швов и наплавленных слоев, полученных электродуговым методом.

2. Установленные методами просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии закономерности формирования структуры, фазового состава, дислокационной субструктуры и морфология поверхности разрушения сварных швов и наплавов из низкоуглеродистой стали, полученных с использованием углеродфторсодержащих материалов.

3. Разработка физико-технических основ промышленных технологий электродуговой сварки и наплавки с применением углеродфторсодержащих материалов.

3. Степень обоснованности и достоверности результатов, полученных положений, выводов и заключений. Достоверность результатов исследования обусловлена логичностью постановки его задач, использованием современных методов исследований и оборудования для анализа структуры и свойств швов и наплавов. При выполнении работы автором широко использованы современные методы исследований: световая, электронная сканирующая микроскопия (СЭМ), просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), рентгеноструктурный анализ. Полученные в работе различными методами результаты дополняют друг друга и не противоречат данным других авторов.

Обоснованность выдвигаемых в работе научных положений и выводов подтверждается корректной сопоставимостью результатов теоретических разработок, экспериментальных исследований и практической реализации. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с применением современных статистических методов.

4. Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций.

Новые знания о строении, структурно-фазовых состояниях и свойствах сварных швов и наплавов из низкоуглеродистой стали, полученных с применением углеродфторсодержащих материалов, углубляют представления о механизмах влияния углеродфторсодержащих флюсовых материалов, физических процессах,

особенностях и возможностях регулирования эксплуатационных свойств конечных изделий.

Путем сравнительного анализа с использованием нескольких высокоинформативных и взаимодополняющих друг друга методов современного физического материаловедения установлено влияние электродуговых покрытий различных систем на их твердость и абразивную стойкость.

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.

Важно, что новизна технических решений защищена 20 патентами Российской Федерации.

5. Анализ содержания диссертации

Диссертация включает в себя введение, 5 глав, заключение, список литературы и 8 приложений, изложена на 314 страницах машинописного текста, содержит 143 рисунок, 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 и рекомендации, сформулированные по каждой главе и в диссертации в целом, обоснованы и аргументированы.

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

Основное содержание диссертации опубликовано в 171 печатной работе, в том числе в 48 статьях в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для публикации материалов диссертаций, 32 статьях, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science, а также 1 монографии. Технические решения защищены 20 патентами Российской Федерации.

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

В *первой главе* диссертационной работы на основе анализа литературных данных рассмотрена физическая природа и основные механизмы влияния различных факторов на структуру, фазовый состав и свойства металла швов и наплавов, выполненных электродуговым способом. Отмечено, что электродуговая наплавка используется для повышения долговечности и срока службы стальных изделий в условиях абразивного износа, коррозии. Дуговая сварка под флюсом с применением порошковых проволок является одним из самых экономичных процессов обеспечивающих высокое качество неразъемных соединений. Физико-механические свойства изделий после электродуговой

наплавки и сварки определяется структурно-фазовым состоянием, химическим составом металла и флюсов. Показано, что разработка новых рациональных составов сварочной проволоки и флюсов, обеспечивающих газовую защиту, рафинирование, легирование, является одним из перспективных направлений исследований в России и за рубежом.

Во *второй главе* теоретически обоснован механизм влияния углеродфторсодержащих материалов на свойства сварных швов и наплавленных покрытий. Получены новые результаты и закономерности влияния количества углеродфторсодержащей добавки на механические свойства сварных швов, полученных с применением флюсов АН-60, АН-67, АН-348 при низких температурах. Использование углеродфторсодержащей добавки во флюсе приводит к снижению массовых долей кислорода и водорода в металле сварного шва. Добавка во флюс углеродфторсодержащих материалов на содержание азота в металле сварного шва не влияет. Сравнивая данные теоретических исследований, металлографического анализа и закономерности свойств сварных швов, делается вывод, что положительное влияние углеродфторсодержащей добавки связано с рафинирующим и газозащитным эффектами.

В *третьей главе* представлены результаты исследования природы и закономерности влияния углеродфторсодержащих материалов в составе порошковых проволок на структуру и свойства износостойких наплавов. Установлено, что использование углеродфторсодержащего материала вместо аморфного графита в составе порошковых проволок приводит к снижению содержания водорода и пористости наплавов, повышает износостойкость и уменьшает содержание неметаллических включений. Показано, что углеродфторсодержащие материалы позволяют обеспечивать прямое легирование наплавов и расширяют возможность использования в составе порошковых проволок различных руд и оксидов легирующих элементов. Использование вольфрамового концентрата вместо порошка вольфрама в шихте проволоки значительно повышает твердость наплавленного слоя и его износостойкость. Новые составы порошковых проволок защищены патентами Российской Федерации.

В *четвертой главе* представлены результаты исследования методами современного физического материаловедения структурно-фазовых состояний, дефектной субструктуры и морфологии поверхности разрушения электродуговых наплавов и сварных швов с применением углеродфторсодержащих флюсовых материалов. Для наплавов количество частиц второй фазы (карбиды, сульфиды и т.д.) размером 0,25–2,5 мкм почти в два раза ниже, чем для обычной наплавки. Металл сварных швов в изломе содержит микропоры, размеры которых в 1,8 раза меньше по сравнению с металлом обычных швов. Произведена оценка вкладов в упрочнение металлов. На основе сравнения содержания зерен перлита и феррита, величин скалярной и избыточной плотности дислокаций, амплитуды кривизны кручения кристаллической решетки в металле наплавов, полученных с углеродфторсодержащей добавкой во флюс и без нее, сделан вывод о положительном влиянии добавки на физико-механические свойства.

В пятой главе приведены результаты разработки и практического использования технологий электродуговой сварки и наплавки с применением порошковых углеродфторсодержащих порошковых проволок и флюсов, обеспечивающих получение стальных сварных швов и покрытий с высокими эксплуатационными свойствами.

В заключении изложены итоги выполненного исследования.

В приложении приведены справки и акты практического использования результатов работы.

6. Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа по своим цели, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния по областям исследования «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. 1 паспорта специальности) и «Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами» (п. 6 паспорта специальности).

7. Замечания

Оценивая диссертационную работу в целом положительно, вместе с тем необходимо высказать несколько замечаний.

1. Экспериментальные исследования электродуговой наплавки порошковой проволокой с углеродфторсодержащей добавкой выполнены для состояния после наплавки. Это состояние характеризуется метастабильностью структуры. Как ведут себя структура и свойства наплавленных слоев в процессе эксплуатации?

2. Представленные многочисленные результаты относятся к различным структурно-масштабным уровням от нано до макро. В работе не произведена связь этих уровней и последовательность их проявления при сварке и наплавке с использованием углеродфторсодержащей добавки.

3. При обсуждении результатов диссертации необходимо было провести сравнение с данными, полученными с использованием других флюсов и порошковых проволок.

4. Автор достаточно вольно обращается с оценкой вкладов в упрочнение металлов сварных швов и наплавленных покрытий, не проводя их количественных оценок.

5. Число патентов, акты и справки о практическом использовании результатов работы выглядят вполне убедительно. Но как ведут себя структура и свойства наплавленных покрытий и сварных швов в процессе эксплуатации? Такие данные усилили бы работу.

Отметим, что вышеуказанные замечания не снижают важности выполненных исследований и полученных результатов.

8. Заключение

Диссертация Р. Е. Крюкова является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена

научная проблема, имеющая важное значение для физики конденсированного состояния и заключающаяся в выявлении физической природы и установлении закономерностей формирования макро-, микроструктуры, структурно-фазовых состояний и свойств стальных сварных соединений и электродуговых покрытий, получаемых с применением углеродфторсодержащих материалов, эксплуатирующихся в особых условиях. Работа соответствует требованиям п. 9–11, 13, 14 действующего Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор, Крюков Роман Евгеньевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа заслушана и обсуждена на заседании научно-технического совета химического факультета с участием кафедры неорганической химии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», протокол № 8 от 08 июля 2022 г.

Председатель
заведующий лабораторией
«инновационно-технологический центр»
Сибирского физико-технического института
имени академика В.Д. Кузнецова,
доктор химических наук,
доцент

Сачков Виктор Иванович

Секретарь
доцент кафедры неорганической химии,
кандидат технических наук

Лютова Екатерина Сергеевна

15.07.2022



Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; (3822) 52-98-52; rector@tsu.ru; www.tsu.ru