

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»

Актуальность работы. Одной из наиболее сложных проблем современного физического материаловедения является повышение эксплуатационных свойств конструкционных материалов и сварных соединений из них. В настоящее время широкое распространение получили различные способы, методы и технологии создания неразъемных соединений и покрытий металлов и сплавов посредством электрической дуги. Структурно-фазовое состояние металла, формирующееся в процессе сварки и определяющееся ее режимами и способами, влияет на физико-механические свойства изделия. Высокие темпы освоения территорий крайнего севера обострили проблему качества сварки металлоконструкций, эксплуатируемых при низких температурах. Важную роль в решении этих задач играют флюсы и флюсовые добавки, гарантирующие получение высоких физико-механических свойств сварных соединений. Аналогичные задачи стоят при создании наплавочных покрытий, эксплуатирующихся в экстремальных условиях по уровню механических нагрузок, циклических воздействий, изнашивания, коррозии. Одним из путей решения данной проблемы является использование порошковой проволоки, оптимально подобранный химический состав, который способен обеспечить наплавочные слои с высокими значениями твердости, абразивной и ударно-абразивной износостойкости и другими параметрами эксплуатации. Для обоснованного выбора материала флюсов и порошковых проволок при создании наплавки и сварных швов, соответствующих условиям их эксплуатации необходимо проведение тщательных исследований методами современного физического материаловедения структурно-фазовых состояний, дефектов субструктуры и поверхности разрушения наплавленного материала и сварных швов. Это и явилось целью настоящей работы, что определяет ее актуальность.

Научная новизна диссертации. В диссертации Р.Е. Крюкова впервые реализованы промышленные технологии электродуговой сварки и наплавки с применением углеродфторсодержащих материалов. Для этого им научно обоснованы механизмы и физическая природа влияния углеродфторсодержащих материалов на свойства металла сварных швов и наплавленных слоев покрытий, полученных электродуговым способом. Автором диссертационной работы выполнен большой объем экспериментальных исследований, что позволило ему получить новые универсальные обобщения, представляющие несомненный теоретический и практический интерес и отличающиеся научной новизной. Сильной



стороной работы являются квалифицированно выполненные всесторонние исследования структурно-фазовых состояний, дефектной субструктуры и поверхности разрушения наплавленных слоев и сварных соединений. К числу наиболее существенных научных результатов, обладающих новизной, необходимо отнести следующее:

1. Установлены и научно обоснованы закономерности влияния химического состава углеродфторсодержащих флюсовых материалов на макро- и микроструктуру, а также механические свойства при отрицательных температурах стальных сварных швов и наплавленных слоев, полученных электродуговым способом.

2. Методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии выявлены закономерности формирования структуры, фазового состава, дислокационной субструктуры и исследована морфология поверхности разрушения сварных швов и наплавок, полученных с использованием углеродфторсодержащих флюсовых материалов.

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 модифицированных наплавленных слоев и сварных швов. При выполнении работы автором широко использованы современные методы исследований: световая, растровая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ. Полученные в работе результаты не противоречат данным других авторов.

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

Значимость для науки и практики составляют результаты проведенных фундаментальных исследований, полученные с использованием методов современного физического материаловедения, а именно научно обоснованные механизмы и физическая природа влияния углеродфторсодержащих материалов на свойства металла сварных швов и наплавленных слоев покрытий, полученных электродуговым методом. Экспериментальные результаты работы и их анализ расширяют представления о механизмах формирования структуры и свойств наплавленных слоев металла и сварных швов с использованием углеродфторсодержащих материалов. Путем сравнительного анализа с использованием нескольких высокоинформативных и взаимодополняющих друг друга методов современного физического материаловедения установлено влияние химического состава углеродфторсодержащих флюсовых материалов на макро- и микроструктуру, временное сопротивление разрыву, предел текучести, относительное удлинение, ударную вязкость при отрицательных температурах и твердость стальных сварных швов и наплавленных слоев, полученных электродуговым методом.

Автором разработаны физические основы промышленных технологий электродуговой сварки и наплавки защищенные авторскими свидетельствами и патентами: 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.

Результаты диссертационного исследования используются в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» в учебном процессе подготовки бакалавров, магистров, обучающихся по направлению 22.03.01 – «Материаловедение и технологии материалов» профиль «Наноматериалы и нанотехнологии», 22.03.02 – «Металлургия», профиль «Металлургия сварочного производства», 22.04.02 – «Металлургия», а также аспирантов по специальности 03.06.01 – Физика и астрономия, направление (профиль) «Физика конденсированного состояния», 15.06.01 Машиностроение, направление (профиль) «Сварка, родственные процессы и технологии».

Анализ содержания работы. Диссертация включает в себя введение, 5 глав, заключение и приложение, 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 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 1 монографии. Новизна предложенных технических решений защищена 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 главе 1 «Механизмы и физическая природа влияния различных факторов на структурно-фазовое состояние и свойства металла сварных швов и наплавленных слоев, выполненных электродуговым способом» выполнен анализ литературных источников по проблематике диссертационной работы. Проанализированы работы, отражающие современное состояние проблемы наплавки и сварки различными способами с использованием флюсов, приведен

анализ практического использования наплавов для упрочнения и восстановления изделий и повышения надежности сварных конструкций.

В главе 2 «Механизмы и физическая природа влияния углеродфторсодержащих материалов на макро-, микроструктуру и свойства металла стальных сварных швов и наплавленных слоев» на основе теоретического исследования показано, что механизм и физическая природа влияния углеродфторсодержащих материалов на свойства металла сварных швов, наплавленных слоев покрытий, полученных электродуговым способом, основаны на рафинирующем и газозащитном эффекте соединений фтора и углерода.

Для снижения количества дефектов макроструктуры металла и удаления водорода при электродуговой наплавке и сварке под флюсом использование в составе фторсодержащих флюсовых материалов соединения криолита (Na_3AlF_6) более целесообразно в сравнении с флюоритом (CaF_2), поскольку его прямое взаимодействие с водородом и кислородом металла более вероятно в стандартных условиях.

Исследовано влияние углеродфторсодержащих флюсовых материалов на макро-, микроструктуру, содержание кислорода, водорода и физико-механические свойства металла сварных швов и наплавленных слоев.

В качестве углеродфторсодержащего материала в диссертации использована мелкодисперсная пыль электрофильтров алюминиевого производства, которую в количестве от 1 до 10 % добавляли во флюсы АН-348, АН-60, АН-67. Это привело к повышению временного сопротивления разрыву металла сварного шва, твердости и предела текучести металла сварного шва.

На относительное удлинение введение во флюсы добавок из углеродфторсодержащих материалов не оказывает существенного влияния. Наблюдается некоторая тенденция (в среднем 3 – 5 %) к снижению этого показателя при росте содержания добавки во флюсах. Наиболее сильный эффект введение во флюсы углеродфторсодержащих материалов оказывает на ударную вязкость металла сварного шва при отрицательных температурах.

В результате проведенных исследований на основе мелкодисперсной пыли электрофильтров алюминиевого производства (представлен в разделе 2.2) в диссертации разработаны углеродфторсодержащие керамическая флюс-добавка и флюс-добавка ФД-УФС, защищенные патентами РФ.

В главе 3 «Механизмы и закономерности повышения абразивной износостойкости электродуговых покрытий, наплавленных с применением углеродфторсодержащих порошковых проволок» исследовано влияние УФСМ на макро-, микроструктуру, твердость и абразивную износостойкость наплавов порошковой проволоки системы Fe-C-Si-Mn-Cr-V-Mo (Нп-25Х5ФМС) и для сравнения выбран состав, в котором вместо углеродфторсодержащей добавки используется аморфный углерод. В результате проведенных исследований установлено, что увеличение содержания в порошковой проволоке углеродфторсодержащих материалов сопровождается снижением содержания водорода 2,5 до 1,65 см³/100 г. Удаление водорода из наплавленного слоя проходит как за счет соединений водорода с фтором, так и за счет экстрагирования его пузырьками оксида углерода.

Показано, что использование углеродфторсодержащих флюсовых материалов вместо аморфного углерода при наплавке порошковой проволокой 35B9X3CB способствует снижению пористости, существенных изменений в макроструктуре и уровне загрязненности металла неметаллическими включениями не наблюдается.

Замена аморфного углерода на углеродфторсодержащий материал в составе порошковой проволоки марки ПП-Нп-35B9X3CF системы Fe-C-Si-Mn-Cr-W-V приводит к уменьшению пористости металла наплавленных слоев, связанному со снижением содержания водорода в металле, повышению твердости и износостойкости последнего.

В главе проведены исследования макро-, микроструктуры, твердости и абразивной износостойкости наплавов, выполненных с применением проволоки, содержащей вольфрамовые руды, пыли газоочистки производства феррохрома марганецсодержащие отходы ферросплавного производства. На основе проведенных исследований разработаны и защищены патентами РФ составы шихт для порошковых проволок.

Исследовано влияние углеродфторсодержащих флюсовых материалов на микроструктуру и свойства слоев металла, наплавленных с помощью порошковой проволоки системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo. Установлено, что степень влияния различных химических элементов на твердость наплавленного слоя и износ образцов различная. В исследуемых пределах, углерод, кремний, марганец, хром и молибден одновременно повышают твердость наплавленного слоя и уменьшают износ образцов, ванадий имеет такую же тенденцию для каждой из серий. Никель повышает твердость и износ.

По результатам многофакторного анализа данных получены зависимости твердости и износа металла наплавленного слоя от содержания легирующих элементов.

Глава 4 «Анализ структурно-фазового состояния, дефектной субструктуры и морфологии поверхности разрушения металла наплавов и сварных швов, выполненных с применением углеродфторсодержащих материалов». В этой главе высокоинформативными методами современного физического материаловедения (растровая и просвечивающая электронная микроскопия) проведены исследования структурно-фазового состояния, дислокационной субструктуры и морфологии поверхности разрушения сварных швов и наплавов из низкоуглеродистой стали, полученных с применением углеродфторсодержащих материалов. Данная глава с точки зрения современной физики конденсированного состояния является наиболее информативной. Установлено, что количество выявленных частиц второй фазы (карбиды, сульфиды, оксиды и т.д.) размером 0,25-2,5 мкм, почти в 2 раза ниже, чем для обычной (без использования углеродфторсодержащих материалов) наплавки; скалярная и избыточная плотность дислокаций в обычной наплавке выше, что обеспечивает более высокое значение вкладов в упрочнение металла; излом содержит микропоры, размеры которых в 1,8 раза меньше по сравнению с металлом сварных швов, выполненных без использования углеродфторсодержащих материалов; в них значительно меньше неметаллических включений и они менее хрупкие; вклады в упрочнение металла, обусловленные торможением подвижных дислокаций

дислокациями «леса» и внутренними полями напряжений, для металла швов, полученных с применением углеродфторсодержащих добавок, ниже; количество (на единицу площади поверхности излома) несплошностей, микро- и макропор значительно меньше, чем в изломах металла обычной наплавки; сравнительный анализ относительного содержания зерен перлита и феррита, величины скалярной и избыточной плотности дислокаций, амплитуды кривизны кручения кристаллической решетки стальных наплавов, подтверждает положительное влияние углеродфторсодержащих материалов на комплекс физико-механических свойств металла.

Хотелось бы отметить, что для наплавки с углеродфторсодержащими флюсовыми материалами скорость изнашивания в 3 раза ниже по сравнению с наплавкой без. Это – не тривиальный результат свидетельствующий об основном положительном влиянии углеродфторсодержащих флюсовых материалов. Анализ тонкой структуры (скалярная и избыточная плотность дислокаций, дальнотействующие поля напряжений) выполненный на основании последних достижений физики конденсированного состояния свидетельствует о положительной роли углеродфторсодержащих флюсовых материалов в формировании физико-механических свойств электродуговой наплавки.

Для сварных швов анализ структуры поверхности разрушения свидетельствует о том, что в шве без углеродфторсодержащих флюсовых материалов содержится большее количество концентраторов напряжений, приводящих к охрупчиванию материала. Это же подтверждается тем, что в образце без углеродфторсодержащих флюсовых материалов количество (на единицу площади поверхности излома) несплошностей, микро- и макропор металла наплавки больше, чем в образце с углеродфторсодержащими флюсовыми материалами.

В главе 5 «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» на основе результатов изучения влияния углеродфторсодержащих материалов на макро-, микроструктуру и физико-механические свойства металла сварных швов, разработана и внедрена в производство в условиях АО «Новокузнецкий завод резервуарных металлоконструкций» технология изготовления флюс-добавки ФД-УФСНа, защищенная патентами.

Для ряда предприятий юга Кемеровской обл. – Кузбасса (ООО «Вест2002», АО «ЕВРАЗ – Западно-сибирский металлургический комбинат» и др.) внедрены углеродфторсодержащие флюсовые материалы при восстановительной электродуговой наплавке рабочих поверхностей дробилок и шнеков и прокатных валков. Совокупный экономический эффект от внедрения изобретения и патентов составил 8,64 млн. руб. в год.

В заключении систематизированы результаты выполненных исследований.

В приложениях представлены акты и справки о практическом использовании результатов работы. Величина экономического эффекта свидетельствует о реальном вкладе результатов диссертационной работы в экономику юга Кемеровской обл. – Кузбасса.

Характеризуя выполненные исследования в целом, следует отметить их значительный объем, всесторонний характер и высокую наглядность представления. Работа носит законченный характер. Ее результаты свидетельствуют об установленной физической природе и выявлении закономерностей формирования макро-, микроструктуры, структурно-фазовых состояний и свойств стальных сварных соединений и электродуговых покрытий, работающих в особых условиях, получаемых с применением углеродфторсодержащих материалов.

Оформление диссертации соответствует последним требованиям ВАК и ГОСТ. Изложение материалов носит последовательный характер; работа написана ясным языком, её структура логически обоснована. Автореферат полно и точно отражает содержание материалов, изложенных в тексте диссертации.

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»).

Замечания. По работе имеется ряд замечаний:

1. Электродуговая наплавка и сварка являются одними из наиболее перспективных способов повышения эксплуатационных свойств металлов и конструкций. Известны и другие виды наплавки и сварки. В работе слабо отмечены особенности и преимущества электродуговой наплавки и сварки по сравнению с другими видами.

2. В главе 4, посвященной анализу структурно-фазового состояния, дефектной субструктуры и морфологии поверхности разрушения металла наплавки и сварных швов, с углеродфторсодержащими материалами не обоснована величина добавки 6 %.

3. Что бы сделать однозначный вывод о физической природе роли углеродфторсодержащей добавки необходимо сравнение с исходным состоянием швов и наплавки и другим ее содержанием (кроме 6 %).

4. В работе большое внимание уделено исследованиям структуры и фазового состава нанесённых покрытий и сварных швов, однако не проведена оценка механических свойств сформированных фаз и слоев на различных масштабных уровнях; не проведена оценка адгезионной прочности покрытия и совместного деформационного поведения композиции "покрытие+основа" при эксплуатации. Наличие этих данных либо их обсуждение позволили бы автору представить системную картину взаимосвязи строения покрытий и сварных швов в неразрывной связи с ключевыми механическими характеристиками покрытий и сварных швов.

5. К сожалению, в работе для более детального исследования не хватает и других данных о свойствах наплавки, например, жаро- и коррозионной стойкости.

Используемые в работе характеристики микротвердости и износостойкости, только в отдельных случаях можно рассматривать как функциональные свойства.

Высказанные замечания носят частный характер и могут расцениваться как пожелания автору. В целом работа выполнена на высоком научном и профессиональном уровне.

Заключение. По актуальности избранной темы, уровню решаемых задач, объему проведенных экспериментальных исследований, степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверности и новизне, а также значимости для науки и практики диссертация Р.Е. Крюкова 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. Она является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором системных 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 особых условиях, получаемых с применением углеродфторсодержащих материалов. Автор диссертации Крюков Роман Евгеньевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

На обработку персональных данных согласен.

Официальный оппонент
доктор технических наук, профессор



Е.А. Колубаев

Колубаев Евгений Александрович

Ученая степень: доктор технических наук

Специальность: 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Должность: директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), адрес: 634055, г. Томск, пр. Академический д. 2/4 телефон: +7(3822) 49-18-81

Email: eak@ispms.ru

Подпись Колубаева Е.А. заверяю
Заместитель директора по НР ИФПМ СО РАН
Доктор технических наук

С.П. Буякова

Дата подписания отзыва

4 августа 2022 года