

На правах рукописи

Старцев Егор Андреевич

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ
НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ
ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОД СЛОЕМ ФЛЮСА, ПРИГОТОВЛЕННОГО ИЗ ШЛАКА
ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Специальность 2.6.17. Материаловедение (технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре - 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (ФГБОУ ВО «КНАГУ»).

Научный руководитель: **Бахматов Павел Вячеславович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология сварочного и металлургического производства имени В.И. Муравьева» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре.

Официальные оппоненты: **Крюков Роман Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Механика и машиностроение» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк;

Атеньев Александр Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортно-технологические комплексы» ФГБОУ ВО «Дальневосточного государственного университета путей сообщения», г. Хабаровск.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», г. Якутск.

Защита диссертации состоится 26 сентября 2025 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.316.01 при Комсомольском-на-Амуре государственном университете (ФГБОУ ВО «КНАГУ») по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, корп. 3, ауд. 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Комсомольского-на-Амуре государственного университета: https://sovet.knastu.ru/diss_defense/show/204

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета и по электронной почте diss.material@yandex.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н.

Проценко Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Основные составы флюсов для электродугового воздействия были разработаны с 1940-х по 1990-е годы. Сегодня продолжается поиск новых решений в данной отрасли из-за истощения и ухудшения качества минеральных ресурсов, повышения стоимости их переработки и высоких транспортных расходов. Также производство высококачественных сварочных материалов требует дорогих легирующих элементов и чистых оксидов и фторидов, что увеличивает их себестоимость. Это заставляет предприятия искать более дешевые источники сырья для производства сварочных материалов.

На территории стран СНГ в отвалах металлургических производств накоплено более 580 млн. т шлаков, что ухудшает экологическую обстановку в стране и требует переработки. Металлургические шлаки в своем составе имеют множество компонентов, благодаря которым они могут являться одним из источников сырья для получения новых сварочных материалов. Например, шлакоотвал ООО «Амурсталь» емкостью 7 млн. тонн электросталеплавильного шлака, содержащего до 40 % оксида железа, оксиды кремния, марганца, кальция. Переработка электросталеплавильного шлака как источника сырья для металлургии практически не освоена, а приоритетным направлением утилизации является производство щебня и песка для строительства дорог, в меньшем объеме (до 10 %) цемента.

Таким образом, актуальным становится проведение комплексного исследования по вопросу переработки техногенных отходов - шлаков металлургических электросталеплавильных предприятий, как источника сырья для флюсов с оптимизацией их состава для достижения требований отраслей машиностроения к структуре и свойствам неразъемных соединений в производстве металлоконструкций.

Степень разработанности темы: Работы ведущих ученых – материаловедов: Н.П. Лякишева, Ю.В. Цветкова, Г.В. Самсонова, А.Д. Верхотурова, Г.П. Швейкина, В.А. Резниченко, И.А. Подчерняевой, Э.Г. Бабенко, С.Н. Химухина, С.В. Николенко, Ри Хосена, В.И. Муравьева и др. и сварщиков: Е.О. Патона, Б.И. Медовара, Б.Д. Малышева, А.А. Ерохина, А.И. Акулова, Г.А. Николаева, Г.Л. Петрова, К.К. Хренова, И.В. Зуева, и др., позволили получить ряд обнадеживающих результатов в сфере комплексного использования минерального и техногенного сырья.

В настоящее время теме переработки минералогических и техногенных отходов с целью получения из них материалов для флюсов, порошковых проволок и других электродных материалов посвящено множество работ. Например, работы авторов В.М. Макиенко, Н.А. Козырева, Р.Е. Крюкова, П.В. Соколова, С.В. Наумова, А.И. Гусева, Ю.В. Чекановой, А.В. Атеняева. Однако представления о формировании материалов на основе комплексного использования минерального и техногенного сырья далеки от завершенности и требуют дальнейшего развития, в частности с позиции вопросов протекания физико-химических процессов при электродуговом воздействии с применением новых полученных флюсов, других электродных материалов и их влиянии на структуру и свойства наплавляемого металла, что подчеркивает актуальность и своевременность решаемых в диссертационной работе задач.

Целью работы является разработка флюса из шлака электросталеплавильного производства и установление закономерностей его влияния на структуру и свойства неразъемного соединения из низкоуглеродистой стали, полученного электродуговым воздействием под слоем флюса

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Аналитический обзор особенностей и технологий переработки техногенных от-

ходов электросталеплавильного производства.

2. Анализ состава шлака электросталеплавильного производства и получение из него флюса с заданными теплофизическими свойствами, позволяющими получить неразъемные соединения из низкоуглеродистой стали требуемого качества электродуговым воздействием

3. Выявить влияние состава и свойств флюса на структуру и физико-механические свойства металла шва и околошовной зоны неразъемного соединения, полученного при электродуговом воздействии под слоем экспериментального флюса, полученного при переработке отходов электросталеплавильного производства.

4. Установить закономерности формирования структуры и свойств неразъемных соединений из низкоуглеродистой стали, полученных под слоем флюса при электродуговом воздействии.

Объект исследования – флюс и неразъемное соединение из низкоуглеродистой стали, полученное путем электродугового воздействия с применением разработанного флюса.

Предмет исследования – состав и свойства разработанного флюса и его влияние на формирование структуры и свойств получаемого неразъемного соединения.

Методология и методы исследования.

Работа выполнена с применением современных методов исследований: спектрального химического анализа, электронного и оптического микроструктурного анализа, испытаний на статическое растяжение и ударный изгиб, рентгенографии, рентгеновской дифрактометрии, метода магнитной памяти металла, методов определения теплофизических свойств материалов, статистического моделирования.

Научная новизна работы.

1. Дано научное обоснование процесса получения флюса на основе термодинамического анализа окислительно-восстановительных реакций в электросталеплавильном шлаке, определены основность, химическая активность и теплофизические свойства флюса, обеспечивающие требуемые технологические характеристики и качество неразъемного соединения.

2. Установлена взаимосвязь структуры и свойств получаемых неразъемных соединений из низкоуглеродистой стали с составом и свойствами разработанного флюса.

3. Установлено влияние показателей теплофизических свойств флюса и шлаковой корки, формируемой в процессе электродугового воздействия на структуру и свойства неразъемных соединений из низкоуглеродистой стали ВСт3сп.

4. Выявлена зависимость однородности химического состава по кремнию и марганцу металла шва и основного металла низкоуглеродистой стали ВСт3сп от параметров режима электродугового воздействия, включая рациональный режим 1,5...2 кДж/мм.

5. Установлена связь между геометрическими параметрами неразъемного соединения, его физико-механическими свойствами, структурной организацией и параметрами электродугового воздействия. При достижении силы тока в диапазоне 380...550 А и напряжения 32...40 В достигаются рациональные значения этих параметров

Теоретическая значимость работы заключается в углублении знаний о процессах формирования структуры и свойств неразъемного соединения, полученного при электродуговом воздействии с использованием экспериментального флюса, приготовленного из шлака электросталеплавильного производства.

Практическая значимость работы.

1. Разработана технология переработки шлака (жидкофазного восстановления излишков железа из шлака путем переплава) на основе проведенных термодинамических расчетов.

2. Разработан состав и способ изготовления флюса из шлака сталеплавильного производства (Патент РФ № 2793303).

3. Выявлены и рекомендованы к применению рациональные режимы электродугового воздействия на процесс формирования неразъемного соединения из низкоуглеродистой стали ВСтЗсп (Патент РФ № 2834666).

4. Результаты опробования разработанного флюса в производственных условиях ООО «КЭМ» при изготовлении рулонизируемых стенок вертикальных резервуаров показали, что полученные соединения рулонизируемых стенок вертикальных резервуаров соответствуют требованиям нормативно-технической документации (Акт об использовании прилагается).

5. Результаты диссертационной работы внедрены на кафедре «Технология сварочного и металлургического производства имени В.И. Муравьева» в учебный процесс в дисциплинах «Современные сварочные материалы» при подготовке бакалавров по направлению 15.03.01 «Машиностроение» и «Сварка, родственные технологии и процессы» при подготовке магистров по направлению 15.04.01 «Машиностроение».

Положения, выносимые на защиту:

1. Технологические особенности и параметры переработки шлака электросталеплавильного предприятия и производства на его основе экспериментального флюса.

2. Установленные зависимости влияния теплофизических и технологических свойств флюсовой композиции при электродуговом воздействии на полученные неразъемные соединения.

3. Результаты влияния параметров электродугового воздействия под слоем экспериментального флюса на структуру и свойства металла неразъемного соединения.

4. Результаты промышленного опробования разработанного флюса при электродуговом воздействии в процессе получения неразъемного соединения металлоконструкции из низкоуглеродистой стали ВСтЗсп.

Степень достоверности обосновывается использованием современного оборудования, стандартизированных и проверенных методик исследования, воспроизводимостью и сходимостью полученных в работе данных с данными, представленными в отечественных и зарубежных открытых источниках.

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследований, проведении лабораторных и промышленных экспериментов по разработке состава и способа получения нового материала - флюса, исследованию его влияния на физико-механические свойства полученных неразъемных соединений, а также в обработке и обобщении результатов исследований, формулировании выводов и положений, выносимых на защиту, подготовки публикаций по теме диссертации.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических мероприятиях: VI-VII научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Исследования и перспективные разработки в машиностроении». Филиал ПАО «ОАК» - «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина» «Исследования и перспективные разработки в машиностроении»: секция «Технология материалов» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2021 - 2022 г.); 6-я Дальневосточная конференция с международным участием «Фундаментальные и прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в металлургии и машиностроении» (г. Ком-

сомольск-на-Амуре, октябрь 2022); конференция «Механика деформируемого твердого тела в проектировании конструкций» (Пермь, ИМСС УрО РАН, октябрь 2022 г.); II Международная научно-практическая конференция молодых учёных «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению» (г. Комсомольск-на-Амуре, ноябрь 2022 г.); VI Всероссийская национальная научная конференция молодых учёных «Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» (г. Комсомольск-на-Амуре, апрель 2023 г.); Всероссийский инженерный конкурс (г. Москва, 2019 г.); XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт - Петербург, СПГУ, май 2023 г.); XXIII-XXVII Краевой конкурс молодых ученых, секция «Технические и химические науки» (г. Хабаровск 2020-2025 г.); Лауреат премии губернатора Хабаровского края в области науки и инновации для молодых ученых за разработку образцов новой техники и прогрессивных технологий, обеспечивающих инновационное развитие экономики и социальной сферы, реализованных на территории края.

Публикации по теме диссертации. По материалам диссертационной работы опубликовано 16 печатных работ, в том числе 5 в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата наук, 8 в сборниках научных трудов международных и всероссийских научно-технических конференций и прочих изданиях, 1 монография (в соавторстве), 2 патента на изобретения РФ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 6 приложений. Работа изложена на 216 страницах машинописного текста (включая приложения), содержит 58 таблиц, 82 рисунка, список литературы из 163 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность научных исследований, сформулирована цель и определены задачи работы, показана научная новизна, практическая и теоретическая значимость и апробация полученных результатов.

В **первой главе** проведен анализ техногенных отходов электросталеплавильного производства и технологий их переработки.

Производство металлургическими предприятиями черных металлов сопровождается образованием значительного количества техногенных отходов – металлургических шлаков. Электросталеплавильный шлак представляет собой расплав оксидов, побочный продукт процесса выплавки стали, образующийся при взаимодействии с кислородом примесей, содержащихся в шихте (чугун, металлургический лом, компоненты ферросплавов), вносимой в сталеплавильную ванну для корректировки состава, а так же миксерного и доменного шлака, поступающих с чугуном или от футеровки плавильных агрегатов. Основу электросталеплавильных шлаков составляют оксиды CaO, SiO₂, MgO и FeO.

Основными видами продукции из шлаков, как в России, так и за рубежом являются гранулированный шлак, щебень и песок, оборотный продукт для металлургии, пемза, известковые и фосфорные удобрения. Менее массовым является производство шлаковой ваты, литых изделий, высокоглиноземистого клинкера. Вторичным продуктом, производимым из гранулированных шлаков, являются шлакоситаллы.

Проведен анализ перспектив создания материалов из вторичного сырья. Отмечено, что в настоящее время ведутся активные исследования в области создания материалов для флюсов, порошковых проволок и других электродных материалов из вторичного

сырья, как минералогического, так и техногенного. Это обусловлено нехваткой материалов, исчерпанием ряда богатых месторождений, ухудшением качества продукции, высокими ценами, необходимостью перевозки сырья на электродные заводы, включая импорт сырья из дальнего и ближнего зарубежья.

Установлено, что использование техногенных отходов электросталеплавильного производства в качестве основного сырья позволит значительно уменьшить стоимость, а также создавать новые материалы, обеспечивающие необходимые свойства и качество неразъемных соединений. Кроме того, применение данного сырья обеспечит импортозамещение материалов.

Во второй главе показаны используемые в работе материалы и методы исследования. Исследования проводили на плоских образцах из низкоуглеродистой конструкционной стали ВСтЗсп (Е 235-С (Fe 380-С) по ИСО 830:1995) размером 195x440x5 мм, имеющих тип соединения С4 по ГОСТ 8713-79 – стыковое одностороннее однопроходное соединение без разделки кромок на плоских керамических подкладках, приклеиваемых к обратной стороне стыка через металлизированный скотч. Заготовки собирались без зазора. Электродуговое воздействие производилось на автомате АДФ-1250 с источником питания ВДУ-1250, проволокой Св-08А по ГОСТ 2246-70, диаметром 3,0 мм. Использовался разработанный экспериментальный флюс, грануляцией 1,0...4,0 мм и стандартный флюс АН-42.

Для предотвращения интенсивного порообразования, вызванного газообразованием по реакции раскисления при плавлении флюса и повышением давления в пространстве между поверхностями керамической подкладки и образца в фольгенизированном скотче сделаны отверстия, длиной 10,0 мм и шагом 15,0 мм, вдоль линии перехода от керамической подкладки к поверхности детали.

При статистическом моделировании входными параметрами (X_1 , X_2), являются режимы электродугового воздействия, а именно ток и напряжение на дуге, а выходными (Y_1 , $Y_2...Y_i$) – геометрические параметры неразъемного соединения, физико-механические свойства и структурная организация.

Визуальный и измерительный контроль неразъемных соединений проводили по СТО 9701105632-003-2021 с применением увеличительной лупы ЛИ-10, штангенциркуля, универсального шаблона сварщика УШС-3.

Рентгенографический контроль неразъемных соединений осуществлялся по ГОСТ ISO 17636-1-2017 (схема просвечивания 1) рентгеновским аппаратом «ПИОН-2М», рентгеновской пленки AQFA D4, фокусное расстояние 350,0 мм, время экспозиции 10 с.

Для проведения механических испытаний из неразъемных соединений вырезаны образцы, отвечающие требованиям ГОСТ 6996-66. Образцы испытаны на статическое растяжение (тип XII) и статический изгиб (тип XXVIIa) на машине испытательной INSTRON 3382 при комнатной температуре. Испытания проводили со скоростью 10 мм/мин. Испытания на ударный изгиб (тип VI с надрезом KCU по центру шва) проводились при температуре 20 °С на маятниковом копре JB-W30 при максимальной энергии удара маятника 300 Дж.

Микроструктурные исследования проводили на микроскопе Nikon MA200. Пробоподготовку для микроструктурного анализа проводили с помощью шлифовально-полировального станка Buehler AutoMet 250 с последующим травлением в 5 % спиртовом растворе азотной кислоты 10-20 секунд до проявления микроструктуры.

Микротвердость образцов измеряли с помощью микротвердомера Shimadzu HNMV-2. Сила нагрузки составляла 0,49 Н, время приложения нагрузки 10 секунд. Шаг измерения 0,5 мм.

Измерения концентрации напряжений методом магнитной памяти по ГОСТ Р ИСО 24497- 3- 2009 осуществляли с помощью прибора ИКН-3М-12 и сканирующего устройства №2 2М-190. Расстояние между центрами датчиков 8,0 мм. Схема и методика сканирования неразъемных соединений методом магнитной памяти металлов с определением зон концентрации напряжений изложены в главе 2 диссертационной работы.

Оценку локальных остаточных напряжений на поверхности материала неразъемных соединений проводили рентгеновской дифрактометрией на установке RIGAKU MSF-3М. Области измерения напряжений в каждом образце неразъемного соединения являлись металл шва и зона термического влияния.

Определение степени деформирования неразъемных соединений проводили по их цифровым двойникам, получаемым путем лазерного сканирования MCAx и обработкой 3D моделей в программе Focus 10 Inspection.

Измерение и регистрация изменения температуры при электродуговом воздействии проводились посредством программного ПИД регулятора ТРМ251, подключенного через блок связи RS485 к ПК, снабженному «Программой Технолога». Запись данных температурных параметров осуществлялась после достижения дугой места крепления термопары типа ХА с частотой 1 раз в секунду.

Измерение теплопроводности и теплоемкости проводились на лабораторных установках ИТ-λ-400 и ИТ-С-400 по стандартным методикам.

Измерение фазовых переходов в шлаке и флюсе проводилось на синхронном термоанализаторе STA 409 PC Luxx (NETZCH, Германия) на порошковых образцах, в керамических тиглях. Максимальная температура 1400°C, скорость нагрева и охлаждения 10 °C/мин.

Объем ванны неразъемных соединений определяли по 3D-модели, построенной по реальным размерам кратеров швов в программе T-Flex, приняв форму ванны каплеобразной.

Третья глава посвящена разработке технологии переработки шлака электросталеплавильного производства, извлечению из его состава оксидов железа и получению флюсовой композиции. Определены теплофизические свойства шлака сталеплавильного производства, флюсовой композиции и шлаковых корок, полученных с применением флюсовой композиции при электродуговом воздействии.

Основным материалом исследований являются техногенные отходы электрометаллургического завода «Амурсталь», в частности электросталеплавильный шлак, хранящийся на шлакоотвале в г. Комсомольске-на-Амуре. Пробоотбор проведен центральной заводской лабораторией завода «Амурсталь». Средний химический состав шлака представлен в таблице 1.

Таблица 1. Средний химический состав шлака (из 10 проб)

В процентах					
CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe/FeO	MnO
15,40-21,03	2,33-3,81	8,70-14,94	4,87	48,24-66,05	5,56-5,98

Основным процессом при переработке шлака электросталеплавильного производства является переплав используемой шихты. Данный процесс позволит снизить общее содержание железа будущего флюса и сбалансировать его химический состав. Возможность жидкофазного восстановления железа и других элементов из оксидов, составляющих шлак ООО «Амурсталь», определена термодинамическим расчетом изменения энергии Гиббса и энтальпии реакции (см. табл. 2). Расчет произведен в интервале температур 1473 ... 1773 К.

Установлено, что реакция восстановления в данном интервале температур возможна, проходит с выделением тепла. При этом установлена следующая закономерность: чем выше температура, тем больше сродство элементов участвующих в процессе восстановления.

Таблица 2. Результаты расчета изменения энергии Гиббса и энтальпии процесса восстановления оксидов

Параметр	Элемент				
	2(FeO)+C	2(MnO)+C	(P ₂ O ₅)+2,5·C	2(MgO)+C	(Cr ₂ O ₃)+1,5·C
грамм	71,55	6,57	0,14	2,67	1,79
моль	156	132	200	92	168
ΔG°_{T1} , Дж/моль	-3,6·10 ⁵	- 6,2·10 ⁵	- 6,5·10 ⁵	- 11,6·10 ⁵	-9,8·10 ⁵
ΔG°_{T2} , Дж/моль	-3,9·10 ⁵	-6,6·10 ⁵	-8,4·10 ⁵	-12,3·10 ⁵	-10,7·10 ⁵
$\Delta H^{\circ}_{Tп}$, Дж/моль	-1,6·10 ⁵	-3,9·10 ⁵	1,8·10 ⁵	-8,3·10 ⁵	-5,8·10 ⁵

Экспериментальное исследование жидкофазного восстановления железа из шлака проведено путем переплава в индукционной плавильной установке ИТП 4-10 в графитовом тигле. Температура расплава 1100-1150°C. В качестве восстановителя использовался графит. После переплава, полученный расплав сливался в изложницу и остывал на открытом воздухе в течение 12 часов.

В результате переплава шлака электросталеплавильного производства получен металлический слиток и флюсовая композиция, химический состав которых приведен в табл. 3 и 4. После переплава шлака восстановлено более 30 % железа от общей массы переработанного продукта. По химическому составу и структуре слиток представляет собой белый заэвтектический чугун, в структуре которого выявлен ледебурит и первичный цементит. Далее для получения экспериментального флюса, вторичный шлак раздроблен и смешан с натриевым жидким стеклом в соотношении 70 к 30 %. Введение натриевого жидкого стекла обусловлено, с одной стороны, использованием его в качестве связующего флюса, а с другой стороны, как материала, повышающего, за счет содержащегося натрия, устойчивость горения дуги. Полученная смесь выдерживалась в муфельной печи при температуре 500 °С в течение 3 часов.

Таблица 3. Химический состав полученной флюсовой композиции

						В процентах
MnO	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Остальное
4,63	53,80	24,50	12,00	4,56	0,46	0,05

Таблица 4. Химический состав восстановленного металла

							В процентах
C	S	Si	Mn	Cr	P	Ni	Fe
5,57	0,05	0,06	5,71	1,20	0,19	0,01	87,21

По расчетным формулам коэффициент основности $B = 0,58$, то есть флюс относится к «кислым», температурный интервал плавления 1100...1300 °С. По классификации IIW (МИС) по химическому составу флюс можно отнести к кальциево - силикатному (CS). Согласно ГОСТ Р ИСО 14174-2010 имеет классификационное обозначение: SM CS 1 DC.

Полученная флюсовая композиция в дальнейшем использовалась в качестве материала для защиты от атмосферного воздуха при электродуговом воздействии, обеспечения устойчивости горения дуги и формирования поверхности неразъемного соединения. Дальнейшие исследования проводились в целях установления теплофизических свойств шлака электросталеплавильного производства, полученной флюсовой композиции, флюса АН-42, а также шлаковых корок полученных в процессе электродугового воздействия.

На рис. 1 представлена диаграмма распределения элементов в шлаковых корках в зависимости от вводимой энергии дуги. После электродугового воздействия с использованием экспериментального флюса при вводимой погонной энергии 1,35 кДж/мм и 1,64 кДж/мм основным легирующим элементом является кремний, так как содержание SiO_2 в шлаковых корках снизилось на 7,6 % и 6,0 % соответственно. При вводимой погонной энергии 1,50 кДж/мм, 1,85 кДж/мм, 2,05 кДж/мм и 2,46 кДж/мм происходит восстановление кальция в металл шва, так как содержание CaO в шлаковых корках снизилось на 2,6 %, 6,0 %, 7,2 % и 4,8 % соответственно. Объясняется это тем, что при высоких значениях погонной энергии и высокого содержания CaO в экспериментальном флюсе, в процессе электродугового воздействия происходит его диссоциация, что повышает его содержание в металле шва. При вводимой погонной энергии 2,05 кДж/мм происходит восстановление железа, так как содержание Fe_2O_3 в шлаковой корке снизилось на 2,0 %.

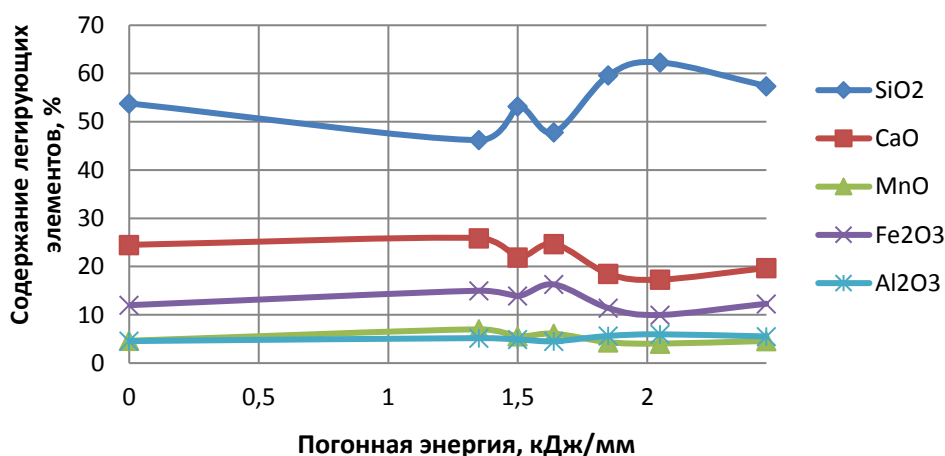


Рисунок 1 – Диаграмма распределения элементов в шлаковых корках в зависимости от вводимой энергии при электродуговом воздействии с разработанным экспериментальным флюсом

Изменение теплопроводности материалов приведено на рис. 2 и в табл. 5. Наименьшей теплопроводностью 2,4 Вт/(К*м) обладает корка экспериментального флюса (6), полученного при электродуговом воздействии с вводимой погонной энергией 1,64 кДж/мм. Максимальная теплопроводность 2,9 Вт/(К*м) наблюдается в образцах цельного шлака электросталеплавильного производства (3) и флюсовой корки (4) и (8) с вводимой погонной энергией 1,5 кДж/мм и 2,46 кДж/мм. Наиболее стабильные показатели теплопроводности во всем диапазоне температур измерения обнаружены в образцах корки флюса (5) (7), с вводимой погонной энергией 1,85 кДж/мм и 2,05 кДж/мм. Средняя теплопроводность по всем 10 образцам составила 2,7 Вт/(К*м), что соответствует общим справочным данным (2,3...3,5 Вт/(К*м)).

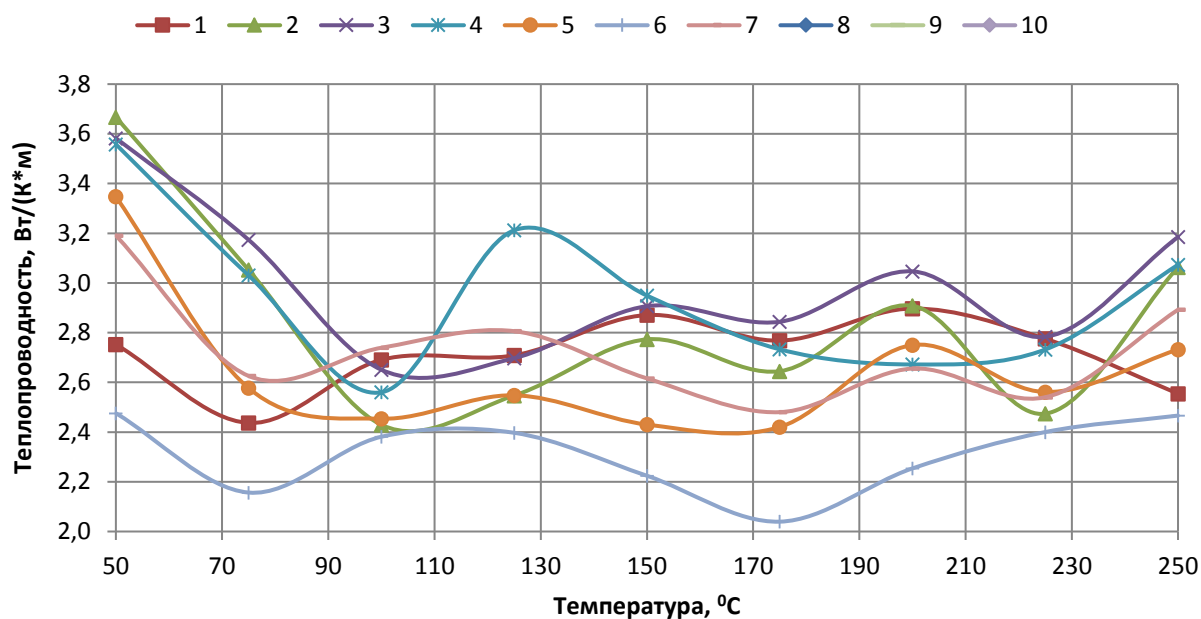


Рисунок 2 – Изменение теплопроводности шлака, флюса и флюсовой корки в зависимости от температуры нагрева (расшифровка легенды см. в табл. 5)

Таблица 5. Характеристика образцов при измерении теплопроводности и теплоемкости

Номер образца при измерении теплопроводности и теплоемкости									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Флюс исходный АН-42	Флюс исходный экс- периментальный	Шлак исходный	Номер образца неразъемного соединения при измерении температуры						
			1-2	3	4	5	6	7	8
			Корка флюса, полученная на режимах электродугового воздействия (ток, А/ напряжение, В)						
			600/37	500/37	400/37	450/37	500/27	450/27	500/27
			Экспериментальный флюс						Флюс АН-42
Средняя теплопроводность, Вт/(м*К)									
2,7	2,8	2,9	2,9	2,6	2,3	2,7	2,8	2,6	2,4
Средняя теплоемкость, Дж/(кг*°C)									
995,3	937,7	971,8	840,9	909,2	953,7	1096,6	985,0	985,4	908,9

Для образцов корки экспериментального флюса характерно снижение теплопроводности при применении минимальных значений силы тока и возрастание с применением больших (рис. 2), так, при силе тока 400 А (образец 6) теплопроводность составила 2,3 Вт/(К*м), при 450 А (образцы 7 и 9) и 500 А (образцы 5 и 8) - 2,7 Вт/(К*м), а при 600 А (образец 4) - 2,9 Вт/(К*м). В исходном состоянии экспериментальный флюс имеет теплопроводность 2,8 Вт/(К*м).

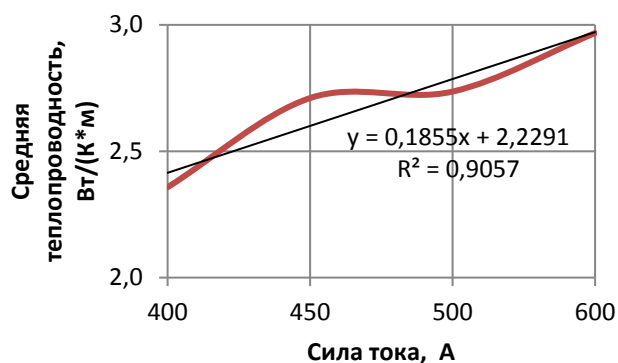


Рисунок 3 – Изменение теплопроводности флюсовых корок разработанного флюса в зависимости от силы тока при электродуговом воздействии

Следует отметить, что при применении стандартного флюса АН – 42, теплопроводность снижается от исходной 2,7 до 2,4 Вт/(К*м) в корке, полученной на режимах 500/27.

Увеличение теплопроводности экспериментального флюса с возрастанием энергии дуги (рис. 3) можно объяснить интенсификацией окислительных реакций, происходящих во флюсе, с газообразованием и переносом тепла газовой фазой.

Для всех видов исследуемого материала характерно стабильное значение теплоемкости до температуры нагрева 25...125 °С и последующее снижение этого параметра при дальнейшем росте температуры нагрева образца, в дальнейшем наблюдается снижение теплоемкости, связанной с расходом энергии на начальную стадию плавления флюса, сочетающуюся с прохождением восстановительно-окислительных реакций. Снижение теплоемкости флюса на начальном этапе нагрева – показатель повышенной теплоемкости в процессе охлаждения (кристаллизации) флюса.

Результаты дифференциально-сканирующей калориметрии приведены в табл. 6.

Таблица 6. Температурно-весовые показатели шлака и флюсов

Образец	Температура плавления, °С	Температура начала изменения массы, °С	Температура фазового перехода, °С		Изменение массы, %
			1	2	
№1 (Флюс АН-42)	888	200	1196	1325	-3,58
№2 (Экспериментальный флюс)	1001	550	1080	1218	3,30
№3 (Шлак)	993	200	1300	1365	6,59
№4 (Шлаковая корка от экспериментального флюса (образец №1))	890	550	1159	1374	1,89
№10 (Шлаковая корка от флюса АН-42 (образец №8))	892	600	1171	1351	-3,72

Начало температуры плавления найдено по максимуму на кривой DSC и составляет для образцов № 1, 4, 10 порядка 890 °С, а для образцов № 2 и 3 порядка 1000 °С. На кривых ТГ наблюдается изменение массы во всех образцах от температур, указанных в таблице 6 и до максимальной температуры нагрева 1400 °С, причем в образце стандартного флюса уменьшение, а в шлаке и разработанном флюсе прирост, в температурном диапазоне начала процесса. Наибольший прирост массы обнаруживается в шлаке (6,59 %) и связан с большим содержанием оксида железа, образующимся при нагреве в воздушной среде. Тот же процесс, происходит и в разработанном флюсе, причем в его корке прирост массы на 36 % меньше, что обусловлено восстановлением железа в процессе электродугового воздействия.

В четвертой главе приведены результаты исследований структуры и механических свойств полученных неразъемных соединений при электродуговом воздействии с применением разработанного флюса.

При визуальном и измерительном контроле установлено: с лицевой стороны все образцы имеют качественно сформированную поверхность соединения без дефектов. С обратной стороны у образца при $W = 2,46$ кДж/мм выявлены крупные наружные поры (ширина 1,5–2,0 мм, глубина 1,0–1,5 мм, протяжённость до 10 мм), преимущественно в начале и центре шва. У аналогичного образца также зафиксированы несплошности в начале шва (глубина 0,2–0,5 мм, ширина 1,5–2,0 мм, протяжённость 5,0 мм). При $W = 2,05$ кДж/мм дефекты корневого валика отсутствуют. Энергия 1,64 кДж/мм оказалась недостаточной для стабильного формирования геометрии валика в начале шва; в центральной части шва проплав стабилизировался, но валик формировался без контакта с подкладкой. При $W = 1,85$ и 2,05 кДж/мм наблюдается схожая структура поверхности. При $W = 1,35$ –1,50 кДж/мм валики полностью сформированы, с чёткими отпечатками гладкой поверхности керамической подкладки, соответствующей её профилю.

Неудовлетворяющими требованиями к геометрическим параметрам неразъемного соединения С4 по ГОСТ 8713-79 являются образцы с вводимой погонной энергией $W = 2,46$ –1,64 кДж/мм. Остальные образцы этим требованиям соответствуют.

Во всех соединениях с экспериментальным флюсом, вне зависимости от режима, наблюдается вытянутая форма кратера (длина 100–110 мм, глубина 1,0–1,5 мм), что вдвое превышает параметры кратера при стандартном флюсе. Это обусловлено повышенной теплоёмкостью и плотностью экспериментального флюса, затрудняющей выход перегретых газов и паров металла. Увеличение объёма ванны расплава указывает на её более длительное существование, способствующее завершённости химических реакций, дополнительному легированию металла, дегазации, снижению порообразования и закалочных структур. Объём ванны при $W = 1,35$ кДж/мм возрастает на 70 %, при 1,50 кДж/мм — на 60 % по сравнению с флюсом АН-42; при дальнейшем росте энергии до 2,00–2,50 кДж/мм объём увеличивается вдвое. Режим 400А/37В недостаточен для формирования корневого валика, 500–600А/37В избыточен — вызывает расплавление подкладки, активное взаимодействие с расплавом и появление дефектов. Рентгенография подтвердила выявленные дефекты при $W = 2,46$, 1,85 и 1,64 кДж/мм; в остальных случаях швы плотные, без внутренних пор и трещин. По результатам 3D-моделирования, для образцов с $W = 2,46$ –1,35 кДж/мм характерны продольные деформации, максимальные в центре шва; при $W = 2,46$ и 1,85 кДж/мм дополнительно выявлен прогиб в сторону обратной поверхности. Пропеллерность зафиксирована при $W = 2,05$ и 1,35 кДж/мм. Минимальные деформации — при $W = 1,35$ –1,64 кДж/мм, с наилучшим результатом у образца $W = 1,35$ кДж/мм. Наиболее рациональный режим: 450А/27В (1,35 кДж/мм), обеспечивающий качественное формирование валика с обеих сторон и минимальные остаточные деформации, соответствующие ГОСТ 8713-79-С4.

Из графиков-поверхность $|\text{grad } H_p|$ видно, что все неразъемные соединения имеют превышение градиента напряжений по одной из продольных граней пластин. Причиной такого явления может служить перераспределение напряжений при их релаксации с компенсацией пластической деформацией.

Образец (2,46 кДж/мм) имеет наибольшее расхождение по значениям напряжённости магнитного поля нормальной и тангенциальной составляющим. Характерным для образца распределением градиента напряжений является его повышенное значение по всей длине шва и околошовной зоны. Аналогичный образец (2,46 кДж/мм) обладает равным значением градиента напряжений, причем в шве он составляет 2,0...3,0

(А/м)/мм на ширину 60,0 мм. Линии напряженности магнитного поля H_r не превышают 40,0 А/м (соответствуют напряженности магнитного поля Земли). В целом для образца (2,46 кДж/мм) характерно равномерное распределение напряжений по всему объему образца 2,0...5,0 (А/м)/мм. Образец (2,05 кДж/мм) также имеет низкие значения градиента напряжений равномерно вдоль линии шва и прилегающей к нему зоне термического влияния. В образце (1,64 кДж/мм) наблюдается подобная картина распределения градиента напряжений, за исключением максимума градиента по всей длине левой кромки. Образец (1,85 кДж/мм) имеет повышенный уровень градиента напряжений 8,0..12,0 (А/м)/мм), наблюдается снижение его уровня в зоне термического влияния до 2,0-3,0 (А/м)/мм) и волнообразное распределение по правой кромке пластины. Для образца (1,50 кДж/мм) характерно равномерное распределение градиента напряжений по всей правой стороне образца и началу левой.

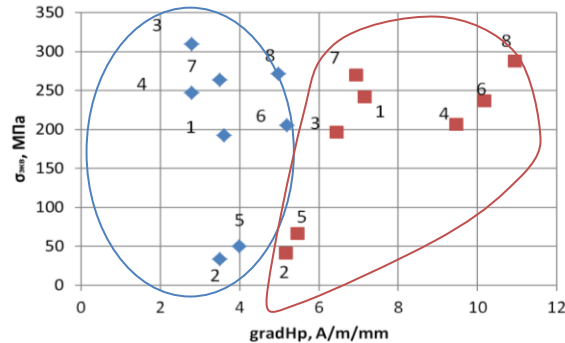
На графиках распределения поля H_r и интенсивности его изменения dH/dx четко просматриваются зоны концентраций напряжений, проявившиеся в неразъемных соединениях. Таким образом, наиболее равномерный уровень градиента напряжений выявлен в образце с вводимой погонной энергией $W = 2,46$ кДж/мм.

Совместный анализ картины деформации, графиков поверхности и топограмм распределения градиента напряжений неразъемных соединений показывает взаимосвязь направления коробления и распределения областей максимума напряжений, превышающих критический уровень K . Это отчетливо проявляется для образцов (2,46, 2,05, 1,35 кДж/мм) имеющих сочетание продольных и поперечных деформаций (пропеллерность), а также наблюдается изменение вектора напряжений относительно продольной оси шва. При этом при обратной вогнутости это вектор максимальных напряжений, а при прямой - минимальных. Также максимумы напряжений характерны областям резкого перехода от максимальной деформации к минимальной, преимущественно по удаленным от оси шва краям образцов.

Результаты измерения остаточных напряжений в локальных зонах неразъемных соединений в металле шва и зоне термического влияния посредством рентгеновской дифрактометрии показывают, что для основного металла остаточные напряжения в поперечном и продольном направлении являются сжимающими. Причем в поперечном направлении величина остаточных напряжений в 1,9 раз выше величины остаточных напряжений в продольном направлении и соответственно составляет 53,4 МПа и 29,9 МПа. Для всех образцов, как в шве, так и в околошовной зоне, в продольном направлении напряжения являются растягивающими. В поперечном направлении, в целом выявлены сжимающие остаточные напряжения, исключение составили образец (2,46 кДж/мм) (металл шва и зона термического влияния) и металл шва образца (1,85 кДж/мм), где напряжения оказались растягивающими. Образец (2,46 кДж/мм) имеет минимальные значения остаточных напряжений в металле шва и зоне термического влияния, не превышающие 40,0 МПа, по значению сопоставимым с основным металлом, но с противоположным знаком, то есть растягивающие. Образец (1,85 кДж/мм) имеет значения величины остаточных напряжений соответствующие значениям основного металла в продольном и поперечном направлении.

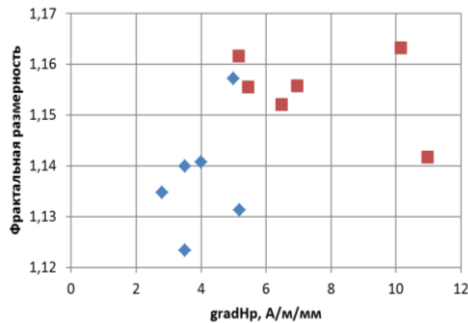
Сравнение результатов измерения величин остаточных напряжений методом магнитной памяти и рентгеновской дифрактометрии, в конкретных областях измерений, удовлетворительно сходятся по характеру изменения. График изменения значений эквивалентного остаточного напряжения и градиентов напряженности магнитного поля, определенным дифрактометрией и методом магнитной памяти в металле шва и зоне термического влияния неразъемных соединений представлен на рис. 4.

Общее значение эквивалентного напряжения лежит в диапазоне значений 200,0...300,0 МПа, а градиент напряженности магнитного поля разделен на две группы: для металла шва он составляет диапазон 2,5...5,0 А/м/мм, а для зоны термического влияния 2,5...11,0 А/м/мм. Исключением оказались образцы 2,46 кДж/мм и 1,85 кДж/мм, в которых определен низкий уровень остаточных напряжений 30,0...70,0 МПа и градиента напряженности 3,0...5,7 А/м/мм, характерные уровню основного металла.

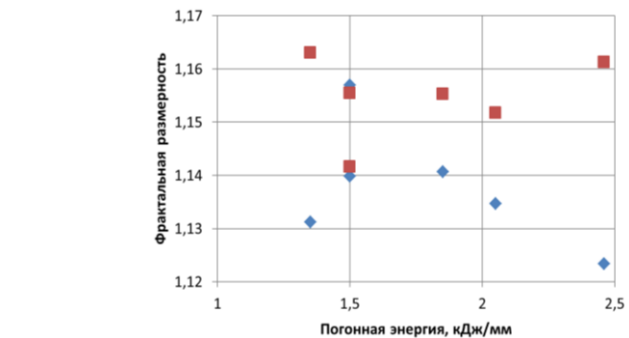


1-8 - номер режима электродугового воздействия

Рисунок 4 - Взаимосвязь эквивалентного остаточного напряжения и градиента напряженности магнитного поля



◆ - металл шва;



■ - зона термического влияния

Рисунок 5 - Взаимосвязь фрактальной размерности и градиента напряженности

Рисунок 6 - Изменение фрактальной размерности от погонной энергии дуги

Известно, что уровень значений, как остаточных напряжений, так и градиента напряженности магнитного поля во многом определяется структурными составляющими, поэтому построен график взаимосвязи фрактальной размерности и градиента напряженности магнитного поля (рис. 5). Фрактальная размерность предстает как количественный параметр, характеризующий структурную организацию материала. Большая фрактальная размерность указывает на более упорядоченную структурную организацию. Среднее значение фрактальной размерности образцов от начала шва и до его конца составляет $D = 1,15$, при этом самая большая фрактальная размерность наблюдается в образце (2,46 кДж/мм) в конце шва в зоне крупного зерна (околошовный участок зоны термического влияния). Из рис. 5 видно, что металлу шва характерны низкие значения фрактальной размерности (1,12...1,14) и градиента напряженности, а зоне термического влияния большие значения (1,15...1,16). Интерес представляет и изменение фрактальной размерности от погонной энергии, вводимой дугой (рис. 6), так при повышении энергии с 1,35 до 1,50 кДж/мм в шве фрактальная размерность прямо пропорционально увеличивается, а в зоне термического влияния уменьшается и, наоборот, при дальнейшем увеличении энергии с 1,80 до 2,50 кДж/мм фрактальная размерность в металле шва снижается до минимума, а в зоне термического влияния возрастает до максимума. Диапазон вводимой энергии 1,50...1,80 кДж/мм характерен стабильностью значений фрактальной размерности.

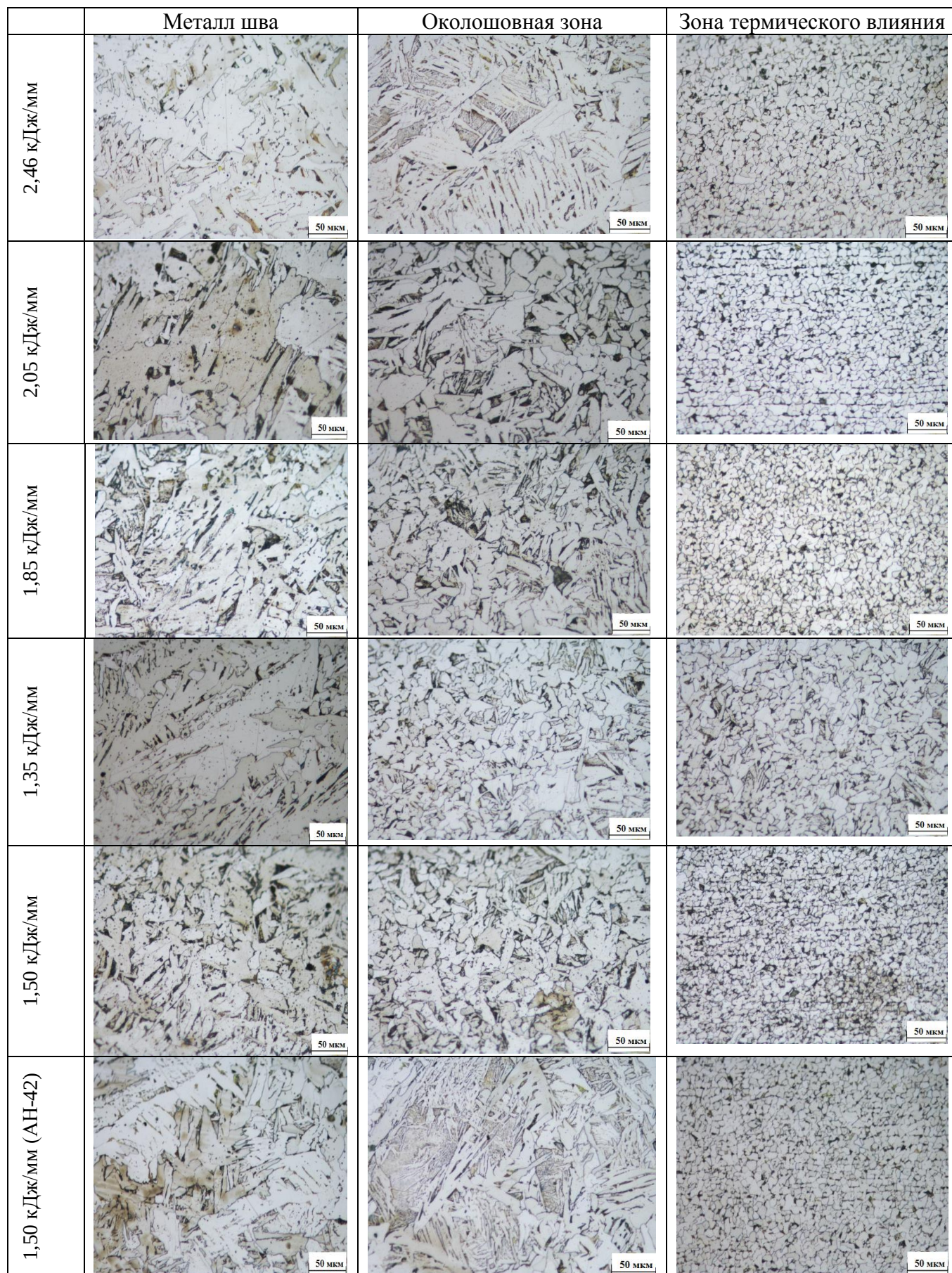


Рисунок 7 - Микроструктура металла шва, околошовной зоны и зоны термического влияния в местах определения внутренних напряжений и градиента напряженности магнитного поля (X400)

На рис. 7 представлена микроструктура металла шва, околошовной зоны и зоны термического влияния, в том числе в местах определения внутренних напряжений и градиента напряженности магнитного поля, которыми являются центр шва и зона термического влияния в непосредственной близости от шва.

Микроструктурный анализ неразъемных соединений, выполненных с использованием экспериментального флюса, продемонстрировал формирование однородной ферритно-перлитной структуры с четко выраженными границами зерен. Наиболее выраженная мелкозернистость и равномерность фазового распределения наблюдались в корневой части шва и зоне термического влияния, что связано с интенсивным теплоотводом и контролируемыми параметрами электродугового воздействия.

Равновесная, разноориентированная структура металла шва и зоны термического влияния в образцах 2,46 кДж/мм и 1,85 кДж/мм, по-видимому, отражается на значительном снижении внутренних напряжений и градиента напряженности магнитного поля. Возрастание погонной энергии приводит к увеличению аустенитного зерна в металле шва, образованию пластинчатого перлита и рост феррито-перлитных зерен в зоне термического влияния, отражается на изменении фрактальной размерности в зоне термического влияния и металле шва.

По сравнению с образцом, выполненным с использованием стандартного флюса АН-42, в опытных образцах была отмечена меньшая выраженность перегрева, отсутствие интенсивного развития видманштеттовой структуры, а также повышенная стабильность морфологии зерен по всем зонам неразъемного соединения. Особенно это характерно для образцов 2,46 кДж/мм и 1,85 кДж/мм, где микроструктура отличается наибольшей однородностью и отсутствием локальных участков с признаками фазовой нестабильности.

Центральные зоны швов опытных образцов характеризуются умеренным укрупнением зерен, при этом сохраняется четкость межфазных границ. В околошовной зоне образцов, полученных с экспериментальным флюсом, структурные изменения выражены слабее, чем при использовании флюса АН-42, что указывает на снижение термического воздействия. Применение экспериментального флюса обеспечило равномерное охлаждение ванны и стабилизацию термических процессов, что подтверждается микроструктурной однородностью и отсутствием зон с выраженным перегревом.

На рис. 8 приведены результаты проведения механических испытаний образцов неразъемных соединений на статический изгиб, статическое растяжение и ударный изгиб. Все испытанные образцы обеспечивают механические свойства основного металла (ВСтЗсп), в отношении предела прочности и относительного удлинения. При этом разрушение образцов произошло как по линии сплавления, так и в основном металле в рабочей части образца. Анализируя диаграммы растяжения, следует отметить образец (1,35 кДж/мм), где сложно определима площадка текучести. Как видно из рис. 8, наихудшие усредненные по испытываемым образцам показатели пластических и прочностных свойств обнаруживаются у образца (2,46 кДж/мм) ($\sigma_b = 388,0$ МПа, $\delta = 24$ %), не обеспечивая минимальные требования ГОСТ 14637-89 к основному металлу по относительному удлинению. Наилучшие показатели обеспечиваются в образцах: 1,35 кДж/мм ($\sigma_b = 420,0$ МПа, $\delta = 32$ %), 1,5 кДж/мм ($\sigma_b = 414,0$ МПа, $\delta = 33,5$ %), и 1,5 кДж/мм (АН-42) ($\sigma_b = 414,0$ МПа, $\delta = 35$ %).

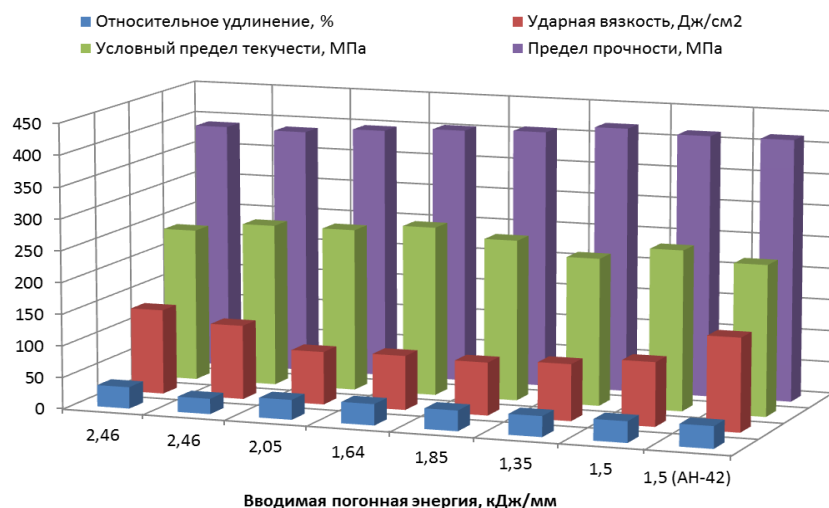


Рисунок 8 - Усредненные значения показателей механических свойств образцов неразъемных соединений

В ходе испытаний на статический изгиб все образцы загнуты до максимально возможного угла в 135 градусов (без образования параллельных граней) без появления трещин, расслоений и других дефектов.

По усредненным значениям ударной вязкости (рис. 8) лучшие показатели в образцах 1,50 кДж/мм (АН-42) и 2,46 кДж/мм (соответственно 144, 133 Дж/см²), остальные имеют 83-100 Дж/см².

На рисунке 9 представлена гистограмма изменения легирующих элементов в полученных образцах (а) и график изменения кремния и марганца (б) в зависимости от вводимой погонной энергии.

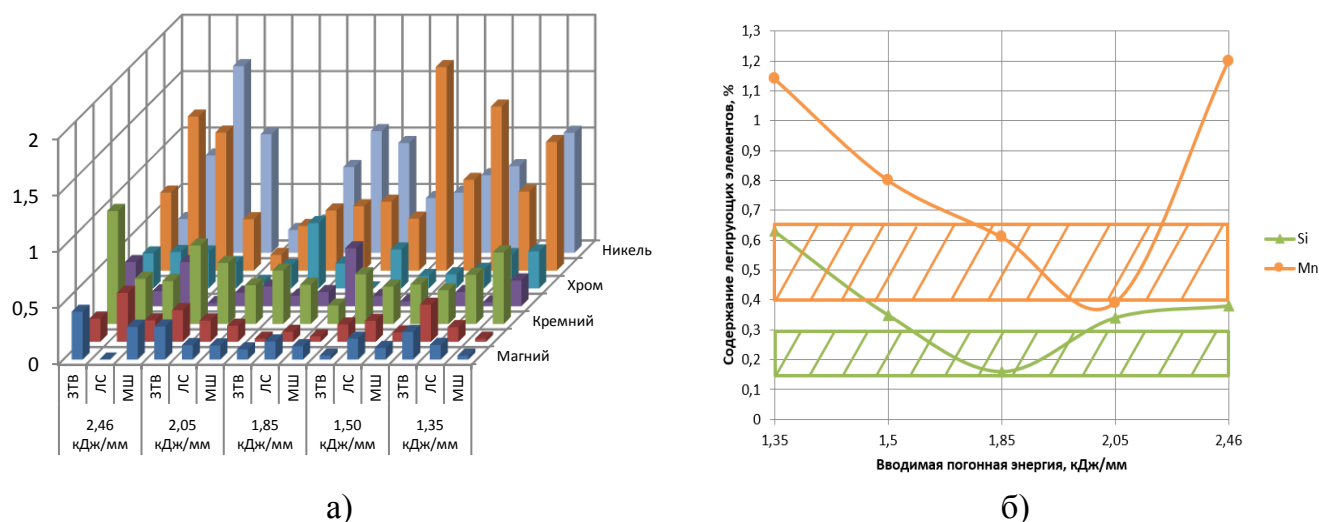


Рисунок 9 – Гистограмма изменения легирующих элементов в полученных образцах (а) и график изменения кремния и марганца (б) в зависимости от вводимой погонной энергии.

Исследованиями распределения легирующих элементов в полученных образцах неразъемных соединений в зависимости от вводимой погонной энергии выявлено, что, самым оптимальным является образец с вводимой погонной энергией 1,85 кДж/мм, так как содержание основных легирующих элементов, таких как марганец и кремний соответствуют содержанию этих элементов в основном металле. Увеличение содержания в металле шва таких элементов как никель, хром, и медь происходит за счет применения проволоки.

На рис. 10 представлены фрактограммы изломов после испытания на ударную вязкость.

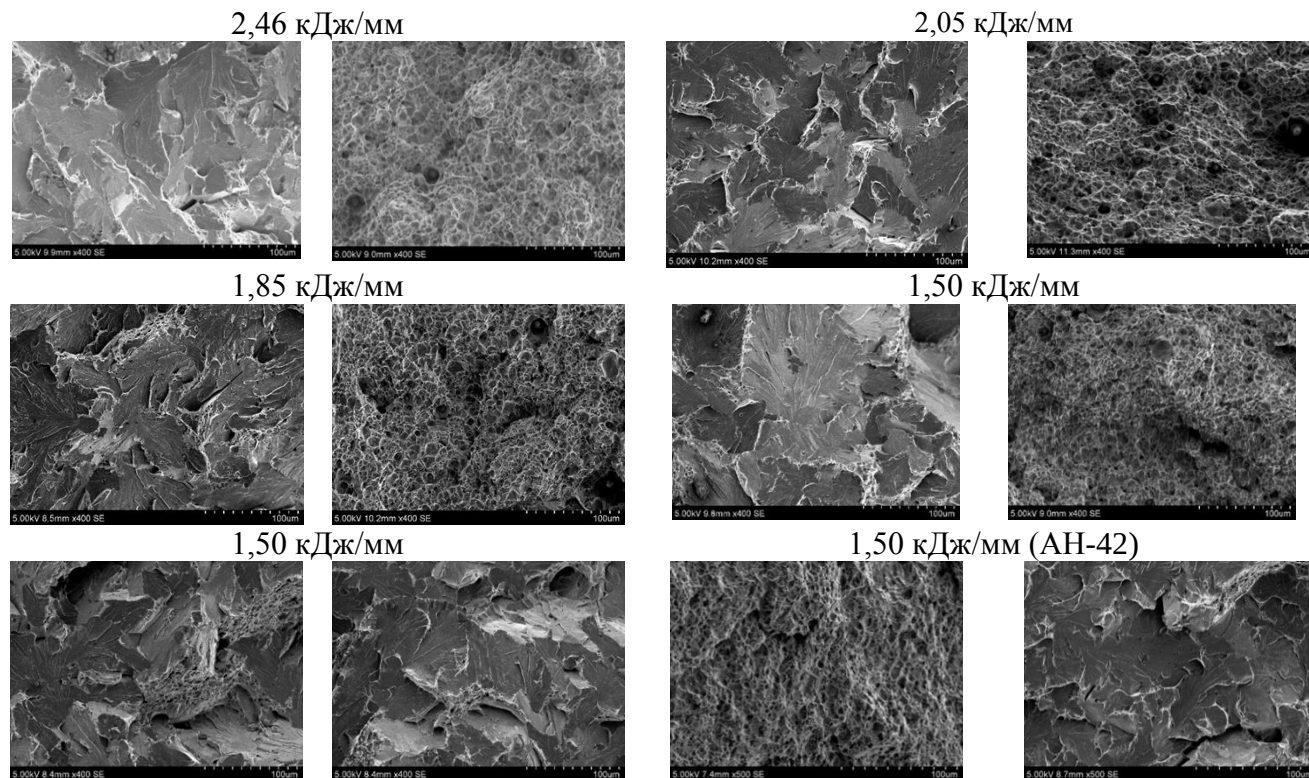


Рисунок 10 - Фрактограммы изломов после испытания на ударную вязкость

Основным типом структуры изломов полученных образцов является общий смешанный характер разрушения, исключение составил один из образцов, полученный с применением флюса АН-42, где наблюдается темная мелкодисперсная зеренная структура, соответствующая вязкому разрушению. Зоны зарождения трещины по размерам близки у всех образцов, что задано наличием U-образного концентратора. На поверхности изломов всех образцов характерно наличие трех зон, имеются утяжки. В зонах зарождения трещины присутствует ямочная структура (равноосные ямки) - вязкое разрушение, в зонах распространения трещины присутствуют фасетки скола - хрупкое разрушение. Средняя доля хрупкой составляющей в изломах по всем образцам составляет 35%. Наибольшее значение доли хрупкой составляющей присутствует в одном из образцов полученных с вводимой погонной энергией 2,46 кДж/мм и составляет 56%. Наименьшее значение доли хрупкой составляющей присутствует в одном из образцов полученных с вводимой погонной энергией 1,35 кДж/мм составляет 19%.

Результаты измерения микротвердости образцов представлена на рис. 11. Наибольшее значение микротвердости в металле шва и зоне термического влияния наблюдается у образца (1,35 кДж/мм) и составляет 266 единиц HV в металле шва, 231 единицы HV в зоне термического влияния. Наименьшее значение микротвердости в металле шва наблюдается в образце (2,46 кДж/мм) и составляет 173 единицы HV. Наименьшую микротвердость в зоне термического влияния показал образец (1,50 кДж/мм флюс АН-42), значение составило 174 единицы HV.

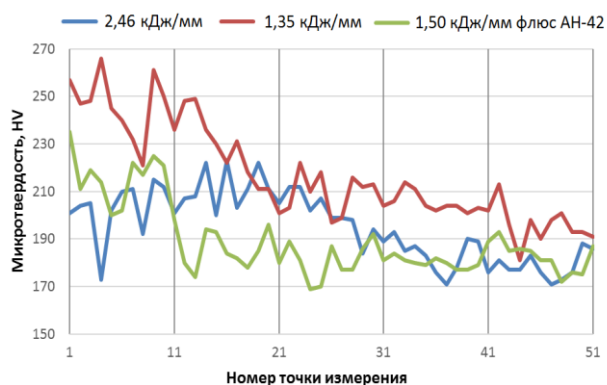


Рисунок 11 – Микротвердость образцов

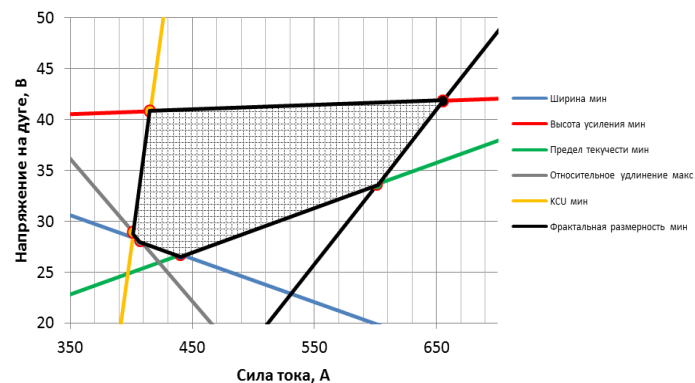


Рисунок 12 - Результат двухфакторного эксперимента

Решением системы из семи уравнений регрессии найден рациональный диапазон режимов электродугового воздействия (рис. 12), позволяющий получить оптимальные значения геометрических параметров, физико-механических свойств и структурной организации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена научно-практическая задача по разработке нового флюса и установлению закономерностей формирования структуры и свойств неразъемного соединения листовой низкоуглеродистой стали при его применении в условиях электродугового воздействия.

Основные выводы по результатам работы:

1. Теоретически обоснована и технологически возможна переработка отходов электросталеплавильного шлака, путем его переплава в индукционной плавильной печи в температурном интервале реакции $950...1050^{\circ}\text{C}$ с извлечением железа и применения оставшейся флюсовой композиции в качестве сырья для флюса при электродуговом воздействии.

2. Термодинамическим расчетом изменения энергии Гиббса и энтальпии реакции определена возможность жидкофазного восстановления железа и других элементов из оксидов, содержащихся в шлаке. Реакция восстановления в интервале температур $1473...1773\text{ K}$ протекает с выделением тепла, причем чем выше температура, тем выше способность вступать в восстановительные реакции элементов участвующих в процессе восстановления.

3. Показано, что теплопроводность шлаковой корки экспериментального флюса, образующаяся при его плавлении в ходе электродугового воздействия, зависит от погонной энергии дуги, а именно пропорционально возрастает с увеличением силы тока. Наиболее стабильные показатели теплопроводности ($2,6...2,7\text{ Вт/(K}\cdot\text{м)}$) во всем диапазоне температур измерения показали образцы корок флюса, полученные при работе на токах $450...500\text{ A}$.

4. В результате исследований неразъемных соединений полученных при электродуговом воздействии под слоем экспериментального флюса и их испытаний, установлено:

– применение экспериментального флюса при выполнении неразъемных соединений способствует формированию однородной ферритно-перлитной структуры с четко выраженными границами зерен, особенно в корневой части шва и зоне термического влияния. Наиболее благоприятные структурные характеристики наблюдаются при по-

гонной энергии 2,46 кДж/мм и 1,85 кДж/мм, где фиксируются минимальные внутренние напряжения и низкий градиент напряжённости магнитного поля, характеризующиеся высоким значением фрактальной размерности. По сравнению с образцами, выполненными с использованием стандартного флюса АН-42, экспериментальные соединения демонстрируют меньшую выраженность видманштеттовой структуры и более стабильную морфологию зерен. Полученные результаты указывают на эффективное тепловое управление за счёт применения экспериментального флюса, что обеспечивает улучшенные микроструктурные характеристики неразъемных соединений.

- основным типом структуры изломов полученных соединенных образцов является общий смешанный характер разрушения. В зонах зарождения трещины присутствует ямочная структура (равноосные ямки) - вязкое разрушение, в зонах распространения трещины присутствуют фасетки скола - хрупкое разрушение. Средняя доля хрупкой составляющей в изломах по всем образцам составляет 35 %. Наибольшее значение доли хрупкой составляющей присутствует в образцах, полученных с максимальной погонной энергией дуги и составляет 56 %. Наименьшее значение доли хрупкой составляющей присутствует в образце с $W = 1,85$ кДж/мм и составляет 19 %;

- при повышении вводимой погонной энергии, а именно больше чем 1,64 кДж/мм идет увеличение содержания в шлаковых корках SiO_2 и снижение CaO и Fe_2O_3 , а в металле шва уменьшение содержания кремния и увеличения кальция и железа. Исследованиями распределения легирующих элементов в полученных образцах в зависимости от вводимой погонной энергии выявлено, что, самым оптимальным является образец с $W = 1,85$ кДж/мм, так как содержание основных легирующих элементов, таких как марганец и кремний, соответствуют содержанию этих элементов в основном металле.

- сравнительными испытаниями пластических и прочностных свойств полученных соединений и основного металла, установлено, что свойства экспериментальных соединений не уступают требованиям к основному металлу ВСт3сп (ГОСТ 14637-89). Наилучшие показатели обеспечиваются в образцах с погонной энергией: 1,35 кДж/мм ($\sigma_b = 420,0$ МПа, $\delta = 32\%$), 1,50 кДж/мм ($\sigma_b = 414,0$ МПа, $\delta = 33,5\%$);

5. Комплексный анализ изменения структурной фрактальной размерности, внутренних напряжений и градиента напряженности магнитного поля в металле шва и зоне термического влияния неразъемного соединения, полученных электродуговым воздействием под слоем экспериментального флюса показал кластерность полученных результатов. Первый кластер – металл шва, характеризующийся невысокими значениями градиента напряженности магнитного поля и фрактальной размерности. Второй кластер – зона термического влияния, имеющая повышенные значения вышеприведенных параметров. При этом эквивалентное остаточное напряжение для большинства образцов находится в диапазоне значений 200,0...300,0 МПа.

6. Показано, что в случаях максимального и минимального расхождения в величине фрактальных размерностей в металле шва и зоне термического влияния (образцы 2,46 кДж/мм и 1,85 кДж/мм), приводящих к компенсации внутренних напряжений, возможны варианты сочетания низких значений параметров эквивалентного остаточного напряжения и градиента напряженности магнитного поля на уровне основного металла.

7. Установлено влияние величины вводимой погонной энергии при электродуговом воздействии под слоем экспериментального флюса на изменение фрактальной размерности: при повышении энергии с 1,35 до 1,50 кДж/мм в шве

фрактальная размерность прямо пропорционально увеличивается, а в зоне термического влияния уменьшается. В диапазоне вводимой энергии 1,50...1,80 кДж/мм значения фрактальной размерности стабильны, при дальнейшем увеличении энергии до 2,50 кДж/мм фрактальная размерность в металле шва снижается до минимума, а в зоне термического влияния возрастает до максимума.

8. Статистическим моделированием установлено, что требуемые значения геометрических параметров, физико-механических свойств и структурной организации при использовании разработанного флюса в тонколистовых односторонних соединениях низкоуглеродистой стали ВСт3сп достигается в диапазоне параметров электродугового воздействия 380...550 А и 32...40 В.

9. Результаты промышленной апробации показали, что полученные при применении разработанного флюса и диапазона параметров электродугового воздействия стыковые соединения образцов рулонизируемых стенок вертикальных резервуаров из стали ВСт3сп (ГОСТ 380-71) толщиной 5 мм соответствуют требованиям ГОСТ 8713-79, СТО СА 03-002-2009, ГОСТ 31385-2016, ПБ 03-584-03.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата наук

1. Старцев, Е. А. Структура и свойства сварного соединения при дуговой сварке низкоуглеродистой стали под слоем флюса, полученного из металлургического шлака электросталеплавильного производства / Е. А. Старцев, В. В. Григорьев, П. В. Бахматов // Вопросы материаловедения. – 2024. – № 2(118). – С. 104-121. – DOI 10.22349/1994-6716-2024-118-2-104-121.

2. Старцев, Е. А. Влияние режимов дуговой автоматической сварки на геометрические параметры шва стыковых соединений из низкоуглеродистой стали, выполненных с применением экспериментального флюса / Е. А. Старцев, П. В. Бахматов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 61-73. – DOI 10.17212/1994-6309-2023-25.4-61-73.

Startsev, E. A. Effect of Automatic Arc Welding Conditions on the Geometric Parameters of Low-Carbon Steel Welded Butt Joints Made Using an Experimental Flux / E. A. Startsev, P. V. Bakhmatov // Russian Metallurgy (Metally). – 2024. – Vol. 2024, No. 11. – P. 1925-1933. – DOI 10.1134/S0036029525700521.

3. Влияние быстропротекающих процессов при фазовом превращении на структурные изменения и свойства сталей и сплавов / В. И. Муравьев, А. В. Фролов, П. В. Бахматов [и др.] // Металлург. – 2022. – № 9. – С. 91-99. – DOI 10.52351/00260827_2022_09_91.

Effect of Rapid Processes During Phase Transformation on Steel and Alloy Structural Changes and Properties / V. I. Murav'ev, A. V. Frolov, P. V. Bakhmatov [et al.] // Metallurgist. – 2023. – Vol. 66, No. 9-10. – P. 1127-1139. – DOI 10.1007/s11015-023-01425-3.

4. Проблема дефицита лома на металлургическом заводе "Амурсталь" и поиск альтернатив его замещения / П. В. Бахматов, Е. А. Старцев, В. В. Григорьев, А. А. Брянский // Металлург. – 2022. – № 4. – С. 25-30. – DOI 10.52351/00260827_2022_04_25.

Scrap Deficit Problem at the Amurstal Metallurgical Plant and Search for Alternatives to Substitute It / P. V. Bakhmatov, E. A. Startsev, V. V. Grigoriev, A. A. Bryanskii //

Metallurgist. – 2022. – Vol. 66, No. 3-4. – P. 376-382. – DOI 10.1007/s11015-022-01339-6.

5. Bakhmatov, P. V. Impact and effect study of submerged-arc welding conditions on structural changes in weld metal / P. V. Bakhmatov, E. A. Startsev, B. M. Sobolev // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 200. – P. 65-76. – DOI 10.1007/978-3-030-69421-0_8.

Монография

6. Автоматическая дуговая сварка под флюсом. Вопросы изготовления флюса на основе металлургического шлака и получения бездеформационных соединений : моногр. / П. В. Бахматов, Б. М. Соболев, Е. А. Старцев [и др.] ; под общ. ред. П. В. Бахматова. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2025. – 260 с. ISBN 978-5-7765-1598-9

Патенты на изобретение

7. Патент № 2793303 С1 Российская Федерация, МПК В23К 35/362, В23К 35/40, С21С 5/54. Способ изготовления сварочного флюса из техногенных отходов сталеплавильного производства : № 2022128798 : заявл. 07.11.2022 : опубл. 31.03.2023 / П.В. Бахматов, Е.А. Старцев, Р.Е. Гладовский, Б.М. Соболев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Комсомольский-на-Амуре государственный университет" (ФГБОУ ВО "КнАГУ").

8. Патент № 2834666 С1 Российская Федерация, МПК В23К 9/18, В23К 35/362. Способ сварки тонкостенных листовых деталей под флюсом : № 2024111612 : заявл. 25.04.2024 : опубл. 12.02.2025 / Е.А. Старцев, Р.Е. Гладовский, П.В. Бахматов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Комсомольский-на-Амуре государственный университет" (ФГБОУ ВО "КнАГУ").

Статьи, опубликованные в прочих изданиях:

9. Бахматов, П. В. Влияние режимов дуговой сварки под слоем экспериментального флюса на распределение внутренних напряжений в сварных образцах, выявленных методом магнитной памяти металлов / П. В. Бахматов, Е. А. Старцев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2023. – № 5(69). – С. 83-96. – DOI 10.17084/20764359-2023-69-83.

10. Старцев, Е. А. Анализ фазовых переходов и изменения массы сварочных флюсов и шлаков при высоких температурах / Е. А. Старцев, П. В. Бахматов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2025. – № 1(81). – С. 85-92.

11. Старцев, Е. А. Переработка отходов металлургического предприятия в сварочные материалы / Е. А. Старцев, Б. М. Соболев, П. В. Бахматов // Дальневосточная весна - 2019 : материалы 17-й Международной научно-практической конференции по проблемам экологии и безопасности, Комсомольск-на-Амуре, 05 июня 2019 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2019. – С. 117-119.

12. Старцев, Е. А. Исследование по применению металлургического шлака в качестве сварочного флюса / Е. А. Старцев, Б. М. Соболев, П. В. Бахматов // Металлургия: технологии, инновации, качество : Труды XXI Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Новокузнецк, 23–24 октября 2019 года / Под редакцией Е.В. Протопопова. Том Часть 2. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2019. – С. 347-351.

13. Лапашинов, А. А. Влияние экспериментального сварочного флюса на поверхность сварного соединения / А. А. Лапашинов, П. В. Бахматов, Е. А. Старцев // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 4-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 12–16 апреля 2021 года. Том Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. – С. 95-97.

14. Старцев, Е. А. Переработка техногенных отходов металлургического производства в сварочные материалы / Е. А. Старцев // Актуальные проблемы недропользования : тезисы докладов участников XIX Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 21–27 мая 2023 года / Санкт-Петербургский горный университет. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2023. – С. 78-81.

15. Старцев, Е. А. Свойства сварных образцов после автоматической дуговой сварки с применением экспериментального флюса / Е. А. Старцев, П. В. Бахматов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 16–17 ноября 2023 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. – С. 77-80.

16. Старцев, Е. А. О корреляции значений концентрации напряжений, выявленных методом магнитной памяти с величиной напряжений при дифрактографии / Е. А. Старцев, П. В. Бахматов // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации) : Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции, Иркутск, 13–14 мая 2024 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2024. – С. 196-202.