

На правах рукописи



Абашкин Евгений Евгеньевич

**КОМБИНИРОВАННОЕ ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ В КАЧЕСТВЕ
СРЕДСТВА ПОЛУЧЕНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ
С ПОВЫШЕННЫМИ ПРОЧНОСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ**

01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре
2019

Работа выполнена в лабораториях Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМиМ ДВО РАН), г. Комсомольск-на-Амуре.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения и металлургии» ДВО РАН (ФГБУН ИМиМ ДВО РАН), г. Комсомольск-на-Амуре

Жилин Сергей Геннадьевич

Научный консультант: член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения и металлургии» ДВО РАН (ФГБУН ИМиМ ДВО РАН), г. Комсомольск-на-Амуре

Буренин Анатолий Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Транспортно-технологические комплексы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ДВГУПС), г. Хабаровск

Макиенко Виктор Михайлович

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией «Математических методов механики материалов» федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем машиноведения» РАН (ФГБУН ИПМаш РАН), г. Санкт-Петербург

Фрейдин Александр Борисович

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный технический университет" (ФГБОУ ВО ВГТУ), г. Воронеж

Защита состоится «22» мая 2019г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.07 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольском-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, факс (4217) 5361-50, diss@knastu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре государственный университет» и на сайте https://sovet.knastu.ru/diss_defense.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просим высылать в адрес диссертационного совета университета.

Автореферат разослан “ ___ ” _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



А.Л. Григорьева

Общая характеристика работы

Актуальность работы Предприятия, ориентированные на использование технологий с низкой ресурсоемкостью при получении неразъемных соединений и конструкций из них, обладают значительными конкурентными преимуществами. Важным критерием оценки качества такой продукции является эксплуатационная прочность. Достижение высоких прочностных характеристик неразъемных соединений металлоконструкций возможно в процессе локального оплавления и последующего охлаждения зоны стыка соединяемых элементов в результате сварки. Быстрое и качественное получение сварного соединения обеспечивается квалификацией исполнителя работ, высокопроизводительным оборудованием и свойствами применяемых материалов. Среди материалов, широко используемых для получения неразъемных соединений, значительное место занимают покрытые электроды для дуговой сварки, проволока сплошного сечения и порошковые проволоки, применяемые в автоматической дуговой сварке под слоем флюса (АДФ). АДФ имеет ряд преимуществ перед использованием сварки покрытыми электродами: высокая технологичность, независимость от квалификации исполнителя работ, защищенность сварочной ванны от взаимодействия с окружающей средой, потери на угар и разбрызгивания и др. Для получения неразъемного соединения при помощи АДФ используются непрерывные электроды в виде проволоки сплошного сечения или порошковых проволок. Последние изготавливаются в виде трубки, сердцевина которой заполнена порошковой композицией, состоящей из минералов, ферросплавов, специальных химических добавок и др. Гранулометрический и химический состав материала сердечника подбирается в зависимости от назначения и требуемых свойств неразъемного соединения при обеспечении необходимого качества шва. Добиться этого удастся не всегда, в том числе при сборке элементов из низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Часто для обеспечения химической однородности, конструктивной прочности и объема наплавленного металла приходится увеличивать энергоемкость и число проходов электродом зон стыка, что неизбежно приводит к потерям в качестве соединения. Поиск ресурсоэффективного способа получения неразъемного соединения элементов, выполненных из низкоуглеродистых и низколегированных сталей, с обеспечением требуемых прочностных и материаловедческих характеристик является актуальной задачей. Решение такой задачи видится в создании неразъемного соединения при осуществлении процесса АДФ с использованием порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем. Данный наполнитель состоит в основном из смеси фракций металлической окалины и алюминиевого сплава с добавлением лигатур. Абсолютное большинство компонентов смеси является промышленными отходами, требующими утилизации. Дополнительная тепловая энергия экзотермической реакции и образующийся металл предположительно будут способствовать равномерному наполнению сварочной ванны, а дополнительные теплоизоляционные свойства образовавшегося шлака приведут к более медленному и соответственно равномерному затвердеванию (кристаллизации) материала шва. Таким способом предполагается решить ряд первостепенных задач:

1. Получить характеристики металла в околошовной зоне близкие к параметрам основного металла сопрягаемых элементов;
2. Отказаться от подготовительных операций (обработки поверхности, прокалки сварочных материалов и др.);
3. Снизить уровень возникающих остаточных напряжений без значительных потерь в прочности металла зоны термического влияния.

Актуальность работы подтверждается тем, что исследования проводились в рамках планов НИР РАН, предусмотренных «Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук» на 2008 – 2012 и 2013 - 2020 годы; по гранту РФФИ № 17-01-00507 А «Модели и методы термоупругопластичности в условиях неустановившейся температуры»; по грантам Президиума ДВО РАН (2009 – 2015 г.г.) № 12-И-П26-02 «Экзотермические реакции в твердотельных смесях в качестве основных созидательных

технологий утилизации техногенных образований», № 10-III-B-03-043 «Исследование процесса формирования структур термитных сплавов», 14-III-B-03-046 «Необратимые деформации при сварке конструкций порошковой проволокой с алюмотермитным наполнителем».

Степень разработанности темы исследований.

Процесс алюмотермии, открытый в 1859 г. русским химиком Н.Н. Бекетовым, представляет собой восстановление окислов металлов алюминием, протекающее со значительным выделением тепла и образованием расплава металла при температуре превышающей 2700 °С. Применение металлотермии для получения жидкого металла из отходов машиностроительных предприятий соответствует основным принципам ресурсосбережения в производстве металлоизделий. На протяжении всего времени использования алюмотермии рядом известных отечественных ученых Жуковым В.В., Кулаковым Б.А., Новохацким В.А., Амосовым А.П., Швецовым В.И., Справником В.И., Выгоднером Л.Ф., Аловым В.А., Мержановым А.Г. внесен существенный вклад в формирование научных представлений о процессах, проходящих в алюмотермии. Значительный вклад в формирование знаний об экзотермических процессах внесли такие зарубежные ученые, как: Haseneyer J., Cisek A., Calistru C., Barbeli M., Dlouhi M., Йосимацу С. и др.

В настоящее время реализуются технологии, в которых алюмотермитные смеси являются основой самостоятельных процессов при спекании изделий, получении модификаторов, металлов и защиты их поверхностей, для запуска электрошлакового переплава, легирования и модифицирования расплавов, а также в процессах литья: для изготовления форм и стержней, питания и формирования отливок. В сварочном производстве алюмотермитные смеси применяются для резки металла, сварки и наплавки, а также для снятия напряжений в зоне термического влияния. В производственных условиях качественное неразъемное соединение, характеризующееся относительно равномерным распределением свойств по длине зоны термического влияния, удается получить применением протяженных электродов в виде порошковых проволок при АДФ. Использование такого метода и применяемого оборудования позволяет заметно повысить производительность, защитить ванну получаемого расплава от неблагоприятного взаимодействия с внешней средой, значительно сократить потери на угар и разбрызгивание, устранить необходимость подготовительных операций, связанных с сушкой при использовании электродов, по сравнению с другими способами получения неразъемной сборки стальных элементов конструкций. Однако идентичность структуры и свойств соединяемых металлических элементов и зоны термического влияния, как правило, не достигается, что приводит к искажению геометрических характеристик получаемой конструкции и определяет актуальность изучения тепловых процессов, происходящих в сварочной ванне, а также методов их регулирования, в том числе, посредством изменения параметров порошкового материала в проволочном электроде: химического и фракционного состава компонентов, плотности упаковки наполнителя и равномерности распределения компонентов в объеме смеси.

Заметная роль в формировании знаний о применении процессов сборки отводится отечественным разработчикам методов математического моделирования, позволивших выработать аргументированные предположения о развитии технологических процессов и прогноза их результатов. Математическим моделированием, направленным на оптимизацию управления процессами образования прочных неразъемных соединений, минимизацию дефектов с одновременным решением задачи повышения производительности операций в разное время занимались известные исследователи: Талыпов Г.Б., Башенко В.В., Ерофеев В.А., Березовский Б.М., Походня Н.К., Брунов О.Г., Демченко В.Ф., Судник В.А., Бучинский В.Н., Гладков Э.А., Патон Б.Е., Фролов В.В. и др. Термомеханику процессов, происходящих при сборке, рассматривали известные советские и российские ученые: Рыкалин Н.Н., Болдырев А.М., Алешин П.А.. Отмеченные выше авторы внесли значительный вклад в использовании математических методов для описания таких распространен-

ных способов получения сварных соединений, как: ручная дуговая сварка, механизированная и автоматизированная сварка (в т.ч. под слоем флюса).

С тех пор, полученные ими результаты неоднократно уточнялись. Уже с первых работ, посвященных отмеченным выше проблемам, стало необходимым считать материал сборки упругопластическим, так как только в этом случае имелась возможность оценить количественно и качественно опытно наблюдаемое явление формирования полей остаточных напряжений в околошовной зоне. Влияние таких напряжений на качество неразъемного соединения преимущественно отрицательное. Они настолько сокращают ресурс неразъемного соединения, что приходится назначать специальные операции по снижению их уровня. Например, отпуск и отжиг, в свою очередь, связаны с тепловым воздействием на металл. Однако вызвать релаксацию остаточных напряжений возможно только воздействием на вязкие свойства металла зоны термического влияния (ЗТВ). Следовательно, дополнительное тепловое воздействие, определяемое комбинацией тепла, поступающего за счет электродугового и алюмотермитного процессов, пробуждает вязкие свойства. Если область шва, теплоизолированного традиционным сварочным шлаком и дополнительно шлаком, образующимся в результате алюмотермитной реакции, имеет повышенные теплоемкостные и теплоизолирующие свойства, то вязкие свойства металла, как и при отпуске, также могут проявляться. Таким образом, наряду с упругими и пластическими свойствами металла, математическая модель обязана учитывать и вязкие его свойства.

Развитие техники определило возможность высокоточной регистрации не только прочностных характеристик материала сборки, но и остаточных напряжений зоны сварного шва для последующего сравнения этих значений с расчетными, полученными в результате численного эксперимента, базирующегося на том, что стыкуемый материал ведет себя как упругопластическое тело. Поскольку при сравнении реальных значений остаточных напряжений с результатами численных экспериментов обнаруживаются значительные расхождения, то для усовершенствования математической модели в критерий пластического течения требуется добавление учета свойств вязкости и деформационного упрочнения материала.

Упругие и пластические свойства зависят от температуры, исходя из этого основная трудность заключается в итерационном отслеживании зарождения и исчезновения зон пластического течения. В результате пластического течения образуются необратимые деформации, которые в последствии при разгрузке и остывании формируют остаточные напряжения. Поскольку все коэффициенты зависят от температуры, то решение аналитически найти не представляется возможным. С помощью разностного метода на каждом временном шаге следует рассчитать напряжения деформации и перемещений, а так же положение упругопластических границ. Несмотря на значительное число теоретических и экспериментальных исследований, посвященных решению прогнозирования конечных свойств получаемого неразъемного соединения, в настоящее время, малоизученными представляются процессы комбинированного теплового воздействия на сборку, обуславливающие поведения материала в этих условиях.

Цель диссертационной работы:

Посредством комплекса механических испытаний, включая средства математического моделирования, установить возможность и указать технологические режимы производства прочных неразъемных соединений элементов, изготовленных из углеродистых сталей, в операциях АДФ, с применением порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

- разработать состав алюмотермитного наполнителя непрерывного электрода, изучить влияние его гранулометрической подготовки на процесс упаковки в электрод, оценить влияние предварительной подготовки основных компонентов смеси для обеспечения

наиболее полного их участия в экзотермической реакции, указать иные, в том числе легирующие, добавки в состав стержня порошковой проволоки;

- провести серию направленных опытов по неразъемной сборке элементов, изготовленных из углеродистых сталей, с целью апробации возможности производства неразъемных соединений и образцов из них для последующих механических и металлографических исследований;

- поставить задачу теории температурных напряжений, моделирующую процесс сборки с помощью предложенного способа соединения, и рассчитать, в зависимости от комбинированного теплового воздействия, уровень и распределение остаточных напряжений по металлу зоны термического влияния с учетом его пластического течения, структурных и твердотельных фазовых превращений в нем;

- серией направленных экспериментов установить оптимальные режимы комбинированного теплового воздействия на формирование допустимых прочностных свойств, химического состава и металлографической структуры неразъемного соединения элементов, изготовленных из углеродистой стали обыкновенного качества;

- серией направленных экспериментов установить оптимальные режимы комбинированного теплового воздействия на формирование допустимых прочностных свойств, химического состава и металлографической структуры неразъемного соединения элементов, изготовленных из качественной трудносвариваемой углеродистой стали.

Все задачи решаются с учетом того, что объем наплавляемого металла, химический состав и структура, определяющие его физико-механические свойства являются результатом комбинированного теплового воздействия, состоящего из тепла одновременно поставляемого за счет электродугового и алюмотермитного процессов. Ввиду того, что результат такого комплексного воздействия на зону стыка стальных элементов трудно рассчитать и спрогнозировать теоретически, эмпирическая компонента в представленных в диссертационной работе исследованиях и выводах по ним является доминирующей.

Методы исследований.

При проведении исследований использовались как известные методики, так и новые, а также специально изготовленное оборудование, оснастка и материалы. К числу известных методик относятся методы определения структурных, химических, физико-механических, технологических и эксплуатационных свойств термитных смесей, форм, получаемого металла зоны термического влияния неразъемного соединения. Механические испытания подготовленных образцов проводились на разрывной машине AG-X plus SHIMADZU, а инструментальное измерение остаточных напряжений на аппарате RIGAKU марки MSF-3M. Впервые для расчетов остаточных напряжений в материале, формируемых в результате комбинированного теплового воздействия на стык протяженных стальных элементов применялась усовершенствованная математическая модель, содержащая параметры вязкости и деформационного упрочнения в критерии пластического течения. Модель основана на методе численного исследования процесса наплавки, заключающемся в решении задачи теплопроводности и механической задачи, предполагающий, что материал пластины сплошной и деформируется упругопластически. К новым методикам относятся: способ получения порошковой проволоки с термитным наполнителем, предварительная обработка компонентов термитного наполнителя. Экспериментальные данные обрабатывались методами математической статистики с помощью пакетов прикладных программ «Microsoft Excel», «Mathcad», «Fortran», «Statistica». Все использованные в работе физические величины, приведены к единицам Международной системы СИ или единицам, применяемым наравне с единицами СИ. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.11 -2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления».

Научная новизна работы.

- определено влияние параметров предварительной подготовки компонентов алюмотермитной смеси на ее упаковку в непрерывный электрод в форме порошковой

проволоки и результаты переплава (интенсивность реакции, массовый выход восстановленного металла и др.);

- опытным путем установлены размеры зоны термического влияния, структура и механические свойства (предел прочности, предел текучести и др.) металла в зоне, металлографический и химический его состав, измерены уровень и распределение остаточных напряжений в зависимости от режима комбинированного теплового воздействия;

- на основании теории температурных напряжений предложена математическая модель эволюции температурных напряжений в околошовной зоне и рассчитаны термомеханические параметры процесса с учетом зависимостей предела текучести, упругих моделей и коэффициента вязкости пластического течения от температуры, включая их итоговые значения и остаточное распределение напряжений;

- теоретически предсказаны и экспериментально установлены режимы комбинированного теплового воздействия, формирующие минимальный уровень остаточных напряжений при повышении прочностных параметров металла шва и околошовной зоны в условиях предлагаемого способа сборки элементов, выполненных из углеродистой стали обыкновенного качества СтЗсп и трудносвариваемой качественной стали 45.

Изобретательская новизна по теме работы подтверждается патентом РФ на изобретение №2675876 «Порошковая проволока», опубл. 25.12.2018.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся результаты натурных испытаний, теоретические и экспериментальные результаты, позволившие предложить технологию создания неразъемного соединения элементов, выполненных из сталей СтЗсп и стали 45, в том числе:

- процентный химический и гранулометрический составы наполнителя алюмотермитной порошковой проволоки, особенности его упаковки в непрерывный электрод;

- режимы комбинированного теплового воздействия, приводящие к полному и равномерному заполнению сварочной ванны и обеспечивающие показатели формируемого шва;

- результаты механических, структурных и химических испытаний металла зоны термического влияния, включая уровень и распределение остаточных напряжений;

- результаты расчетов по специально созданной математической модели прочностных и деформационных параметров металла, сравнение прогнозных теоретических и опытно измеренных прочностных параметров металла шва и околошовной зоны, позволившие сделать выводы о качестве проведенной сборки.

Практическая значимость работы

Практическая значимость диссертации обусловлена обоснованной возможностью использования технологической операции АДФ с непрерывным электродом в форме порошковой проволоки с алюмотермитным сердечником и рекомендациями по применяемым режимам данной операции. Установлена эффективность разработанного метода получения неразъемного соединения в ходе промышленного опробования в Испытательном центре «ДВГУПС-Материал».

Степень достоверности. Степень достоверности и обоснованности результатов научных экспериментов, представленных в работе, обеспечиваются использованием комплекса известных методик, аттестованного измерительного оборудования, современных методов обработки значительных объемов полученных данных, а также сопоставимостью с результатами исследований других авторов. Выводы и рекомендации, представленные автором в диссертации, не противоречат современным научным представлениям, в их основе лежат передовые достижения производственной сферы, а также классические постулаты химии, физики, механики, теплотехники, термодинамики, металлургии и материаловедения.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на расширенных заседаниях ученого совета Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук,

г.Комсомольск-на-Амуре, 2008-2018 гг., всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», г. Москва, 2009 г.; Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы образования и науки», г.Тамбов, 2014 г.; I-ой, II-ой и III- ей Дальневосточной школе-семинаре «Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций», г.Комсомольск-на-Амуре, 2017-2018 гг.; X Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», г.Екатеринбург, 2016 г.; Третьем междисциплинарном молодежном научном форуме с международным участием «Новые материалы», г.Москва, 2017 г.; XV Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физикохимия и технология неорганических материалов», г.Москва, 2018 г.; Научных чтениях им. чл.-корр. РАН И.А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов», г.Москва, 2018 г.

Личный вклад автора. Автор, совместно с руководителем, непосредственно осуществил постановку проблемы, определил цели и задачи экспериментальных и теоретических исследований, разработал общую концепцию диссертационной работы. При опубликовании результатов исследований автор лично проводил аналитическую работу, описание экспериментов, корректировку текста. В ходе апробации результатов исследований автор вносил значительный вклад в оформление и подготовку докладов на форумы и конференции различного уровня. Представленные результаты исследований с последующим их обобщением, анализом, обработкой и интерпретацией выполнены автором самостоятельно, а также в соавторстве с сотрудниками ИМиМ ДВО РАН.

Автор выражает глубокую признательность сотрудникам ИМиМ ДВО РАН к.т.н., доценту О.Н. Комарову, к.ф.-м.н. А.В. Ткачевой, к.т.н. В.В. Предеину, к.т.н. А.А. Соснину, А.В. Попову, С.В. Фирсову, отдельным сотрудникам Испытательного центра «ДВГУПС-Материал», сотрудникам ФГБОУ ВО «КнАГУ» к.т.н., доценту П.В. Бахматову, к.т.н., доценту О.Н. Клешиной за помощь, консультации и поддержку, оказанную при выполнении исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы. Отдельную искреннюю благодарность автор выражает д.т.н., профессору А.И. Евстигнееву за интерес и внимание, проявленные к данной диссертационной работе.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 18 печатных работ, в том числе 6 входящих в перечень изданий рекомендованных ВАК РФ, получен патент РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов по работе, списка использованной литературы, приложений. Диссертация изложена на 164 страницах машинописного текста, содержит 61 рисунок, 6 таблиц, список использованной литературы из 139 наименований, 4 приложения.

Основное содержание работы

Во введении рассмотрены проблемы формирования неразъемной сборки деталей стальных металлоконструкций и обоснованы возможности применения метода получения прочного соединения при помощи порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем на специализированном АДФ оборудовании, обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, представлены научная новизна, основные положения, выносимые на защиту и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены основные задачи повышения качества технологии получения неразъемных соединений и металлоконструкций, представлены средства математического моделирования в прогнозировании прочностных и деформационных свойств неразъемных соединений.

Приведен анализ практики применения восстановленных металлов в результате алюмотермитных процессов показывающий, что основными направлениями их использования являются: сварка и резка металлоконструкций, восстановление металла из отходов металлургических и машиностроительных предприятий, обеспечение благоприятных

условий формирования химического состава и структуры изделия. Однако сложности прогнозирования выходных параметров получаемых изделий, в том числе ввиду высоких температур, сопровождающих процесс, ограничивают применение технологий алюмотермитного процесса в условиях производства.

Эффективность способов алюмотермитного восстановления металлов в аспекте снижения себестоимости готового продукта при внедрении алюмотермитных материалов в производственные процессы очевидна. Такие технологические процессы представляют перспективу комплексной переработки металлоотходов, позволяющие получать готовые изделия, обладающие высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Однако в ходе анализа литературы установлено, что вопросы, связанные с систематизацией данных о совместном электродуговом и алюмотермитном воздействии на структуру и свойства зоны термического влияния при формировании неразъемных соединений электродом в виде порошковой проволоки, являются малоизученными.

Представлен анализ литературных источников, в ходе которого определены варианты моделирования напряженно-деформированного состояния тела в условиях поступления тепла в зону стыка тонких стальных пластин при сварочном процессе одновременным решением температурных и деформационных задач на основе математической модели упругопластического деформирования и построения численных алгоритмов расчета кинетики напряжений и деформаций, возникающих при электродуговой сварке с получением картины развития упругопластических деформаций и напряжений при сварке встык. Однако такие модели не применялись к процессам формирования неразъемного соединения, получаемого в результате комбинированного теплового воздействия посредством совмещения электродугового и алюмотермитного процессов и поступления восстановленного в ходе такого процесса металла в зону стыка соединяемых стальных элементов.

Установлено, что практика использования методов численного моделирования представляется одним из эффективных способов получения информации, направленной на изучение процессов в объеме материала, позволяющим изучить связь прочностных характеристик неразъемных соединений с произошедшим необратимым деформированием в условиях повышенных температур, твердотельными фазовыми изменениями в металле. Широкое применение методов математического моделирования для аргументированных предположений о развитии технологических процессов и прогноза их результатов представляется актуальным и востребованным.

Во второй главе приведено описание основных методик исследований, определяемых поставленными задачами и применяемыми материалами. Рассмотрена последовательность экспериментов и обозначены объекты исследований, определяющие выбор методик, приведены этапы достижения поставленной цели и задач. Представлены методы подготовки исходных материалов и получения порошковой проволоки с термитным наполнителем (химический состав и его подготовка, внешний вид, фракция, устранение сепарации перетирированием, упаковка), обусловлены методы получения неразъемных соединений стальных элементов конструкций, рассмотрены применяемые теоретические и экспериментальные методы определения остаточных напряжений зоны термического влияния. Также представлен метод регистрации геометрии неразъемного соединения, приведены методы определения физико-механических свойств, химического состава и структуры неразъемного соединения. Исследования проводились на экспериментальной базе в лабораториях ИМиМ ДВО РАН и КНАГУ (г.Комсомольск-на-Амуре), испытательном центре «ДВГУПС-Материал» (г.Хабаровск).

Достижение цели и реализация задач исследований осуществляется на следующих этапах экспериментов:

- получение фракционного и химического составов алюмотермитной смеси, применяемой в качестве наполнителя электрода, выполненного в виде порошковой проволоки;

- теоретическое и экспериментальное исследование влияния комбинированного теплового воздействия на формирование остаточных напряжений и деформаций в элементах неразъемного соединения, выполняемых из углеродистых сталей;

- экспериментальное определение режима совместного алюмотермического и электродугового теплового воздействий на формирование физико-механических свойств, химического состава и структуры зоны термического влияния неразъемного соединения элементов, выполненных из СтЗсп и стали 45;

Указывается, что в качестве сердечника проволоки, применяемой для соединения элементов из углеродистых сталей обыкновенного качества (на примере СтЗсп) и трудно-свариваемых углеродистых качественных сталей (на примере стали 45) при автоматическом процессе под слоем флюса, использованы порошковые компоненты фракций 0,1-0,315 мм термитной композиции, имеющей, согласно патента РФ на изобретение № 2675876, следующий состав, масс. %: железной окалины (Fe_2O_3) 71,9 %; 23,86 % алюминия марки ПА-2; ферромарганца ФМн-78(А) 2,14 %; ферросилиция ФС-50 1,77 %; графитированного электрода ЭГ-15 - 0,33 %. Оболочка проволоки выполнена из неполированной, особо мягкой ленты из низкоуглеродистой стали холодной прокатки марки 08кп-ОМ-2- 1x100 по ГОСТ 503-81. С целью равномерного распределения компонентов в электроде с $\varnothing = 2,8$ мм, выполненным в виде порошковой проволоки, материал сердечника подвергался обработке в шаровой мельнице периодического действия типа МШП-700. Упаковка электрода с коэффициентом заполнения $K_3 = 0,37$ производилась на агрегате типа МТР1201УХЛ4.

Соединение деталей, выполненных из стали СтЗсп получали при однократном (за один проход электрода) тепловом воздействии на зону контакта, а для деталей из стали 45 за два прохода с одинаковыми значениями силы тока (I , А), напряжения (U , В) и скорости перемещения электрода (V , м/ч). Характеристики режимов формирования металла наплаваемого от электрода на кромки соединяемых стальных пластин представлены в таблице 1 (i – номер режима, q_i - тепловая мощность, ккал/с). На режимах 0.1 и 0.2 получены соединения проволокой сплошного сечения, применяемой на производстве.

Таблица 1

Характеристики режимов формирования металла

Материал пластин	Режим	I_i , А	U_i , В	V_i , м/ч	q_i , ккал/с
СтЗсп	0.1	250	35	20	2,08
	1	200	35	10	1,52
	2	200	35	20	1,52
	3	250	35	10	1,89
	4	250	35	20	1,89
	5	300	35	10	2,27
	6	300	35	20	2,27
	7	250	40	20	2,16
	8	250	30	20	1,62
Сталь 45	9	250	35	30	1,89
	0.2	300	35	20	2,49
	1	250	35	20	1,89
	2	300	35	20	2,27
	3	350	35	20	2,65

Отмечается, что при выборе метода численного исследования сварочного процесса решается как задача теплопроводности, так и механическая задача. Предполагается, что материал пластины сплошной и деформируется упругопластически. Упругие и пластические свойства зависят от температуры, поэтому основная трудность видится в последовательном отслеживании зарождения и исчезновения зон пластического течения. В результате пластического течения образуются необратимые деформации, которые формируют остаточные напряжения. В качестве критерия пластического течения принимается кусочно-линейное условие Ишлинского – Ивлева. Поскольку все коэффициенты зависят от

температуры, то найти решение аналитически не представляется возможным. С помощью разностного метода на каждом временном шаге находятся напряжения деформации и перемещений, а также положение упругопластических границ.

Для фактической регистрации остаточных напряжений использовали рентгеноструктурный анализатор RIGAKU марки MSF-3M, отвечающий требованиям действующего в РФ ГОСТ 16865-79. Регистрация значений осуществлялась с элемента неразъемного соединения согласно схемы определения остаточных напряжений, представленной на рисунке 1. Регистрацию деформационных отклонений в этой же зоне осуществляли при помощи стрелочного индикатора КИ и устройства, представленного на рисунке 2. По результатам измерений деформационных отклонений получали трехмерные поверхности.

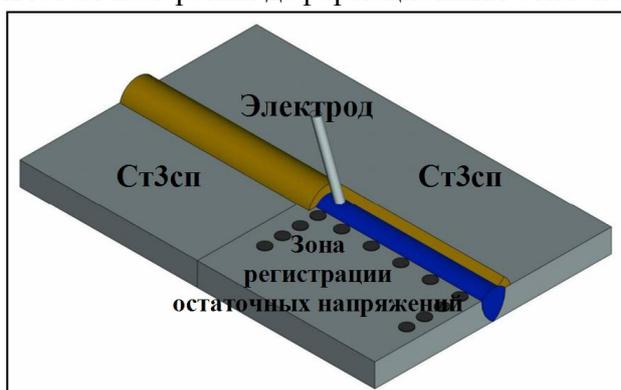


Рисунок 1 – Схема определения остаточных напряжений



Рисунок 2 – Устройство со стрелочным индикатором КИ

Образцы для определения физико-механических свойств изготавливали с учетом требований ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 14019-2003. Предел прочности, предел текучести и относительное удлинение при растяжении, способность материалов получаемых экспериментальных соединений выдерживать пластическую деформацию при изгибе образцов

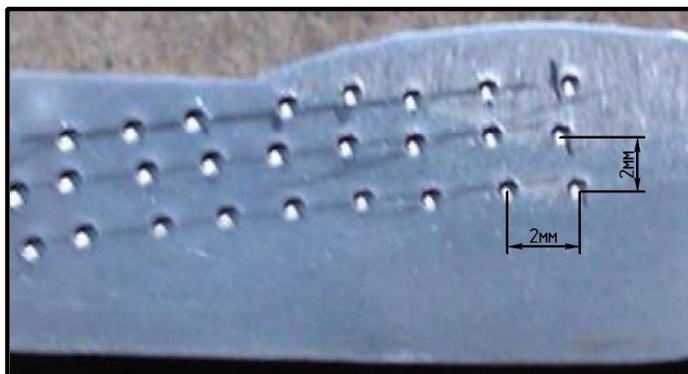


Рисунок 3 – Общий вид образца

определяли на универсальной испытательной машине AG-X plus SHIMADZU при постоянной скорости перемещения захватов 0,05 мм/с. Достоверность результатов эксперимента обеспечивали технические возможности тестовой машины, соответствующей требованиям ГОСТ 28840-90. Твердость образцов измеряли согласно методу Роквелла, по шкале HRA стационарным твердомером ТК-2М. Измерения производили по 10 точкам в направлении от центра шва к периферии (расстояние между точками 2мм) и на 3-х уровнях высоты каждого образца, как показано на рисунке 3.

Химический состав, структуру и величину зерна металла зоны термического влияния получаемых неразъемных соединений определяли согласно требованиям, регламентированным соответствующими ГОСТами.

В третьем главе рассмотрено формирование напряженно-деформированного состояния неразъемного стального соединения, а именно определение влияния состава исходных компонентов порошкового алюмотермитного наполнителя на возможность получения неразъемного соединения, а также влияние упаковки компонентов термитного наполнителя порошковой проволоки на процессы электродугового переплава (интенсивность горения и массовый выход металла восстанавливаемого в зоне сплавления). Также представлены результаты моделирования процессов деформирования в зоне термического влияния и результаты экспериментальных исследований остаточных напряжений, возникающих в неразъемном соединении пластин, выполненных из материалов Ст3сп и стали 45.

Серией предварительных экспериментов установлено, что массовый выход восстановленного металла - одного из продуктов алюмотермитной реакции составляет около 50 % от массы веществ, вступающих во взаимодействие. Экспериментально оценена возможность формирования элемента из восстановленного железа и получения его соединения с материалом стальной пластины. Визуализация взаимного расположения зерен в структуре соединения, полученная при увеличении $\times 400$, представлена на рисунке 4,а, из которого видно, что величина угла при взаимном расположении контактирующих зерен составляет около 120° и, следовательно, такую структуру можно считать незначительно напряженной. Для зоны соединения металла, полученного в результате алюмотермитной реакции с металлом пластины из углеродистой стали характерна четкая граница, представленная на рисунке 4,б (1 – термитный металл; 2 – зона соединения; 3 – Ст3сп). Особенностью структуры такого соединения является наличие включений на границе контакта пластины Ст3сп с наплавляемым материалом (рисунок 4,в), образующихся вследствие высокой температуры алюмотермитной реакции.

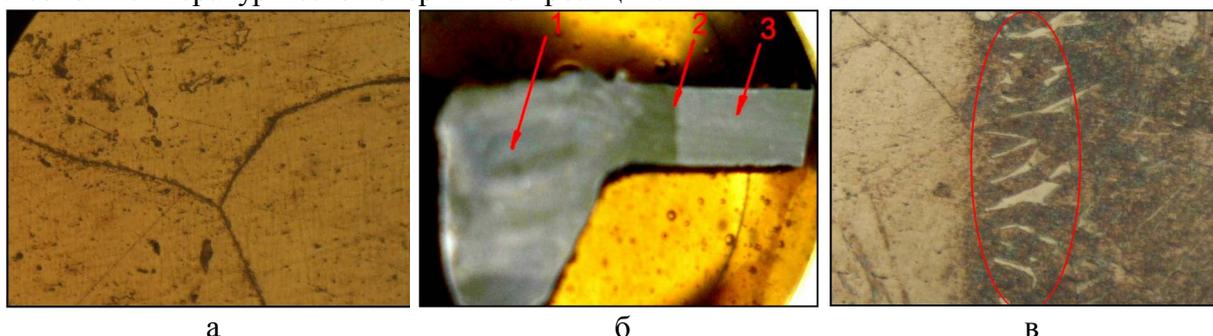


Рисунок 4 – Структура термитного металла

Для снижения фракционного расхождения компонентов и повышения значений насыпной плотности смесь обрабатывалась в шаровой мельнице типа МШП-700, визуальный результат которой получен при помощи сканирующего электронного растрового микроскопа ZEISS EVO LS10 (рисунок 5). Установлено, что линейные размеры частиц окалины сокращаются после обработки до 2-х раз, а частицы восстановителя приобретают глобулярную форму, происходит частичное разрушение поверхностных окислов компонентов алюмотермитного наполнителя, что обеспечивает увеличение площади контакта компонентов смеси. Последнее приводит к увеличению насыпной плотности смеси и более полному прохождению экзотермической реакции, оказывая влияние на массу выхода восстановленного металла.

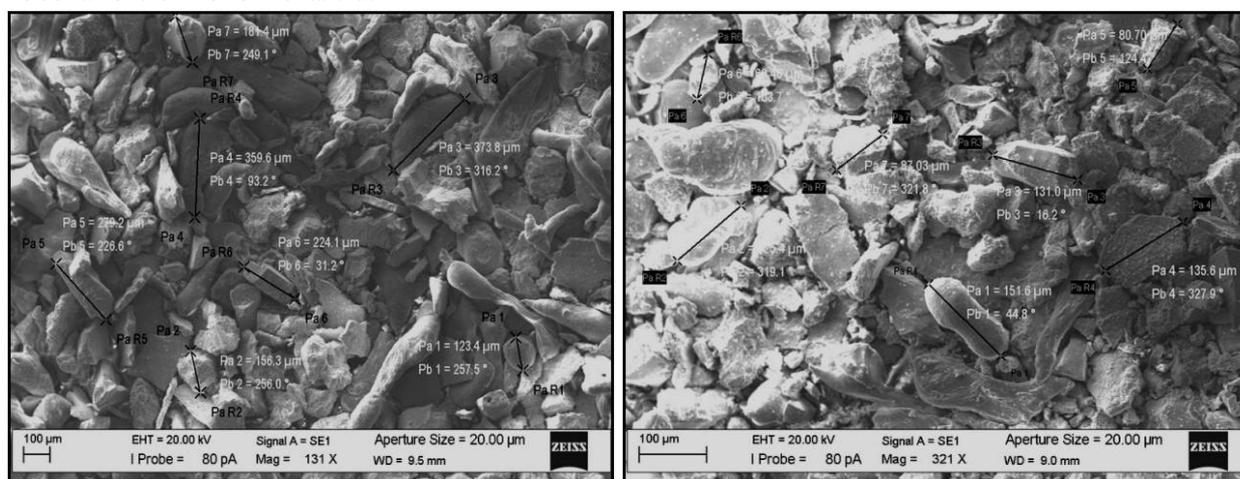


Рисунок 5 – Фракционный состав компонентов алюмотермитного наполнителя до обработки в шаровой мельнице (слева) и после обработки (справа)

Установлено, что при обработке смеси более 30 – 40 минут значение ее насыпной плотности перестает повышаться после $2,5-2,52 \text{ г/см}^3$, а интенсивность горения алюмотермитного наполнителя (рисунок 6) определяемая временем, затраченным на прохожде-

ние экзотермической реакции с момента ее начала до полного завершения в этом диапазоне времени, составляет 21 г/сек. Полагается, что при упаковке в электрод плотность алюмотермитной смеси увеличивается, что влияет на выход образующейся массы металла. Наибольший массовый выход металла (до 53 % от смеси) достигается при использовании наполнителя после его обработки в шаровой мельнице с последующим уплотнением до значения $3,25 \text{ г/см}^3$ (рисунок 7), что соответствует порошковой проволоке с плотностью упаковки 37%.

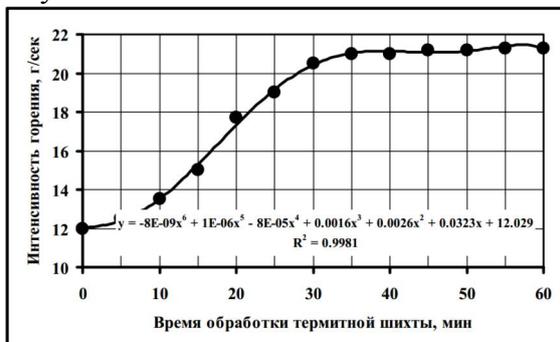


Рисунок 6 – Зависимость интенсивности горения смеси от времени ее обработки



Рисунок 7 – Зависимости массового выхода восстановленного металла от плотности упаковки смесей, уплотненных:
1 - до обработки; 2 - после обработки

Постановка тепловой задачи при моделировании процесса деформирования в зоне термического влияния рассматривается в одномерном случае, то есть с пренебрежением краевыми эффектами на концах длинных пластин. В математической формулировке задачи считали длину сопрягаемых пластин бесконечно большой, а ширину одинаковой и равной S . Введя систему прямоугольных декартовых координат (x, y) , получаем расчётную область в виде: $-S \leq x \leq S$, $-\infty \geq y \geq \infty$. Граничные условия одномерной задачи о распределении температуры по пластине примем в виде:

$$T(x, t)|_{x=0} = bt \quad T, x|_{x=S} = 0$$

Функция $\omega(x, t)$ задает отток тепла с поверхности пластины в окружающую среду. Наличие флюсового шлака, а также шлака экзотермической реакции приводит к повышенным теплоизоляционным свойствам в окрестности сварного шва. С целью учета данного обстоятельства и стремления приблизить теплоизоляционные свойства к опытно наблюдаемым принимаем для $\omega(x, t)$ зависимость:

$$\omega(x, t) = \psi \left(1 - \frac{\psi^*}{\psi} \exp(-\gamma x^2) \right) (T_0 - T)$$

где ψ^* , ψ , γ - эмпирические постоянные, с помощью которых задаем интенсивность потери тепла в каждой точке пластины с координатой x . Зависимость ω от t связана только с тем, что от t зависит температура $T(x, t)$. График функции в некоторый момент времени представлен на рисунке 8. На рисунке 9 представлено распределение температуры в разные моменты времени при остывании.

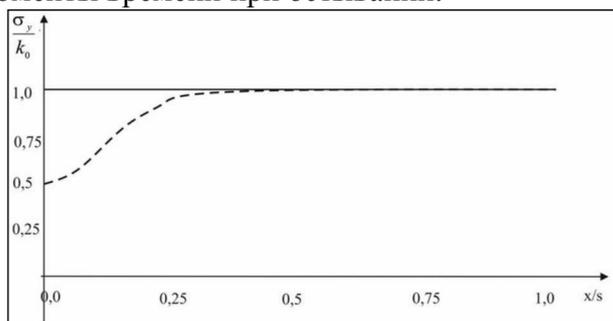


Рисунок 8 – Теплоотдача от пластины в окружающую среду.

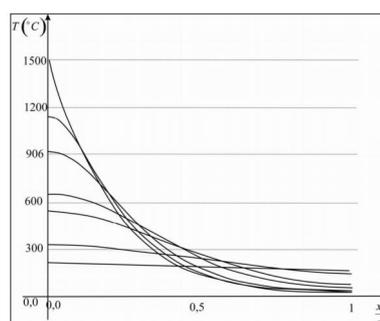


Рисунок 9 – Распределение температуры при остывании.

В расчетах в качестве поверхности нагружения использовали следующие обобщенные условия пластичности максимальных приведённых напряжений:

$$f(\sigma_{ij}) = \max|\sigma_i - \eta \varepsilon_i^p - c e_i^p - \sigma| - \frac{4}{3}k = 0; \quad \sigma = \frac{1}{3}\sigma_{ij} \quad (1)$$

Здесь $\sigma_i, \varepsilon_i^p, e_i^p$ - главные значения тензоров, k – предел текучести, определяемый из опытов на одноосное растяжение, η – коэффициент вязкого сопротивления пластическому течению, c – параметр упрочнения, задающий уровень эффекта Баушингера. Выбор условия пластичности (1) (условие Ишлинского-Ивлева) продиктован тем, что имеется численно-аналитическое решение рассматриваемой задачи упругопластичности при пределе текучести зависимым от температуры, что выступает надежным средством тестирования численных расчетов. При таком выборе условия пластического течения следуют завышенные результаты расчетов текущих и остаточных напряжений по сравнению с условиями максимальных касательных напряжений (условием Треска–Сен-Венана) и с условием максимальных октаэдрических напряжений (условием Мизеса).

В ходе расчета изменяющихся температурных напряжений, включая итоговое их распределение, установлено, что деформирование за счет интенсивного теплового воздействия на металл соединяемых пластин происходит согласно схеме (рисунок 10).

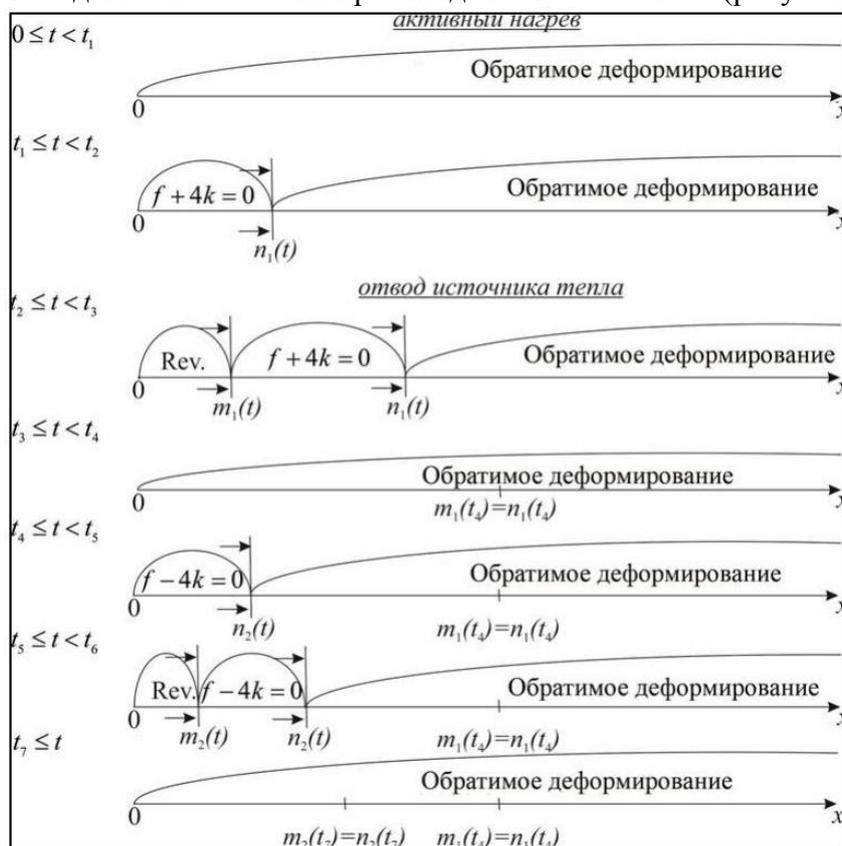


Рисунок 10 – Схема появления и исчезновения расчетных областей в околошовной зоне

Расчеты последовательными шагами по времени убедительно показали, что во всех случаях возникает повторное (обратное) пластическое течение, в процессе которого формируются растягивающие остаточные напряжения и повышается предел текучести металла околошовной зоны, что и регистрируется последующими инструментальными измерениями на опытных образцах.

Повышение итогового предела текучести определяется учётом упрочнения металла при его деформировании в условиях значительного теплового воздействия, в то время как вязкое сопротивление пластическому течению (особенно повторному) существенно снижает уровень остаточных напряжений. Оба эффекта непосредственно связаны с теплоизоляционными свойствами традиционного сварочного шлака и образующегося шлака при экзотермической реакции. Несмотря на то, что ширина зоны термического влияния при

использовании порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем увеличивается, остаточные напряжения в этой зоне значительно уменьшаются в сравнении с результатами, полученными по традиционному способу соединения (рисунки 11 и 12).

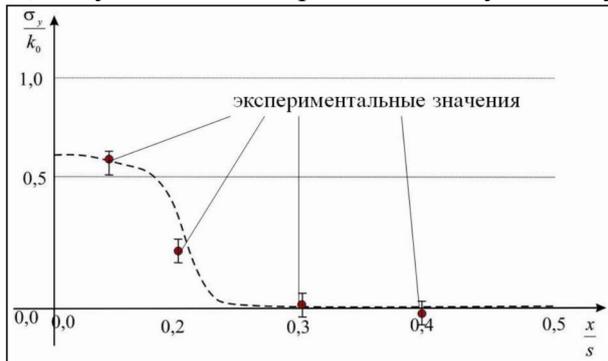


Рисунок 11 – Сравнение уровня теоретических и экспериментальных остаточных напряжений при использовании порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем

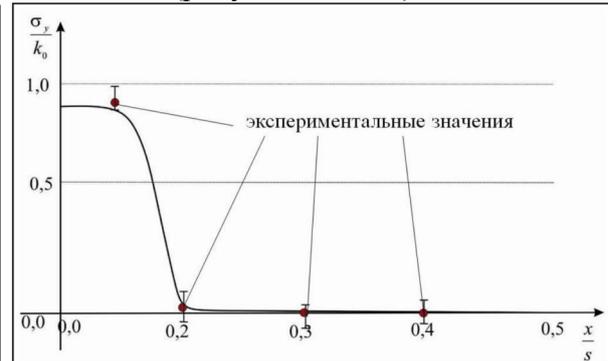


Рисунок 12 – Сравнение уровня теоретических и экспериментальных остаточных напряжений при использовании проволоки сплошного сечения

Значения остаточных напряжений в пластинах образцов, полученных в результате комбинированного теплового воздействия, на 30-35 % меньше, чем у значений образцов, полученных в традиционном процессе на АДФ проволокой сплошного сечения. Сопоставимость экспериментальных значений с теоретическими пределами отклонений подтверждает работоспособность расчетной математической модели. Невозможным представляется упрощение данной модели в предположении, что пластическое течение идеально или отток тепла от пластины по ее ширине постоянный. Теплоизоляция околошовной зоны, учет вязких свойств металла и его упрочнения в процессе необратимого деформирования задают итоговые механические свойства металла ЗТВ и уровень остаточных напряжений в нем, что находится в соответствии с экспериментальными данными.

Четвертая глава посвящена особенностям формирования физико-механических свойств и структуры неразъемных соединений. Определена роль режимов комбинированного теплового воздействия на формирование характеристик зоны термического влияния неразъемного соединения элементов из углеродистой стали обыкновенного качества и трудносвариваемой качественной углеродистой стали.

Анализ экспериментальных данных по определению предела прочности на разрыв σ_B , предела текучести σ_T , относительного удлинения δ , уд арной вязкости КСЧ и твердости НРА показал, что прочностные характеристики образцов, полученных при режимах 2, 3, 7, 8 и 9 заметно ниже требований, предъявляемых ГОСТ 380-2005 к материалу соединяемых пластин из СтЗсп толщиной 10 мм. На рисунках 13 и 14 представлены экспериментальные зависимости, в ходе анализа которых установлено, что достижение прочностных характеристик материала, наплавляемого электродом в виде проволоки с порошковым алюмотермитным наполнителем, сопоставимых по значениям с материалом соединяемых пластин из СтЗсп, достигается при использовании диапазона значений тепловой мощности дуги $q = 1,8 \div 2,1$ ккал/с и скорости перемещения электрода $V = 16 \div 22$ м/ч (режим 4 для соединения из СтЗсп), что позволило получить значения предела прочности на разрыв, соответствующего диапазону $\sigma_B = 360 \div 470$ МПа, предела текучести – диапазону значений $\sigma_T = 250 \div 350$ МПа. Таким образом, дальнейшее рассмотрение влияния тепловых режимов на изменение геометрии неразъемного соединения рационально проводить для случаев, связанных с режимами 0.1; 1, 4, 5 и 6.

По завершении процесса и после охлаждения металла наплавки регистрировали изменение размеров и геометрии стальной пластины для определения деформационных отклонений от базовой поверхности. Установлено, что при режиме комбинированного теплового воздействия №4 (рисунок 15) значение амплитуды максимальных отклонений

геометрии неразъемного соединения из СтЗсп в 1,47 раза меньше, чем у образцов, полученных традиционным способом при использовании проволоки сплошного сечения в указанных диапазонах значений тепловой мощности и скорости перемещения электрода.

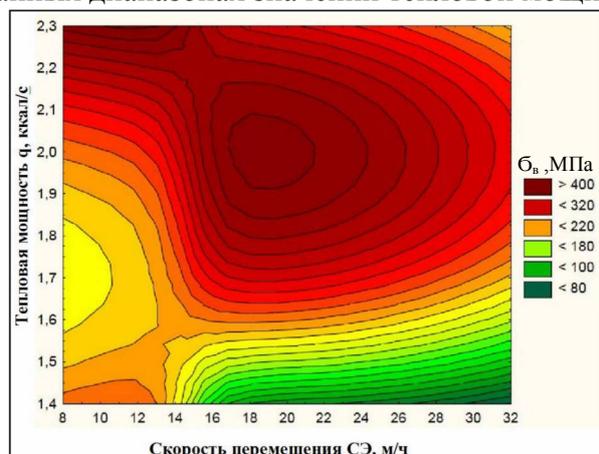


Рисунок 13 – Зависимость предела прочности при растяжении от тепловой мощности дуги и скорости перемещения электрода с порошковым термитным наполнителем

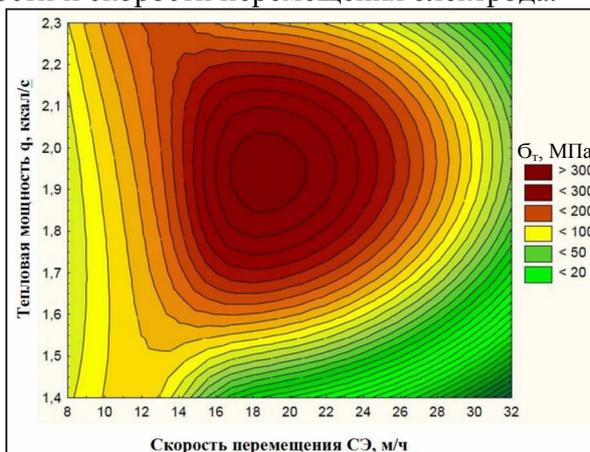


Рисунок 14 – Зависимость предела текучести от тепловой мощности дуги и скорости перемещения электрода с порошковым термитным наполнителем

Установлено, что твердость металла ЗТВ для образцов из СтЗсп, полученных при режиме комбинированного теплового воздействия №4, по мере удаления от центра шва к периферии, снижается с HRA = 56 ед до HRA = 45,6 ед на протяжении длины ЗТВ, составляющей 12 мм. Размер зерна металла в зоне наплавления, полученный проволокой с порошковым наполнителем на 20 % меньше, чем при традиционном процессе. Размеры зерен зон перегрева и основного металла сопоставимы, а зерно образца, полученного в зоне перекристаллизации при режиме 4 на 15 % меньше, чем у образца, полученного при режиме 0.1. Также установлено, что характер разрушения этих образцов – вязкий; химический состав металла ЗТВ соответствует СтЗсп, а структура характеризуется преимущественно как феррито-перлитная, с размером зерна меньшим на 4 – 20 %, чем у образцов, полученных с применением АДФ с электродом в виде проволоки сплошного сечения.

Предварительными исследованиями определено, что при сварке «в один проход» деталей из стали 45 без подготовки сварочных материалов и последующей термообработки, полученные соединения традиционным способом на АДФ проволокой сплошного сечения не отвечают предъявленным требованиям ($\sigma_b = 490$ МПа). При аналогичных условиях соединения, имеют значения $\sigma_b = 621$ МПа. В этой связи применили второй проход электродом с параметрами теплового воздействия, соответствующими режиму, выбранному для формирования сборки из стали 45. Повторное тепловое воздействие производит подобие термообработки, что позволяет улучшить физико-механические свойства при сварке. В ходе серии экспериментов установлено, что достижение прочностных характеристик материала, наплаваемого электродом в виде проволоки с порошковым термитным наполнителем, сопоставимых по значениям с материалом соединяемых пластин из стали 45, достигается при использовании диапазона значений тепловой мощности дуги $q = 2,27$ ккал/с и скорости перемещения электрода $V = 20$ м/ч (режим 2 для стали 45). Это позволило получить значения предела прочности на разрыв $\sigma_b = 598$ МПа, предела текучести – значению $\sigma_t = 417$ МПа. Экспериментально определено, что при режиме №2 (для соединений из стали 45) значение амплитуды максимальных отклонений геометрии неразъемного соединения из стали 45 на 6 % меньше, чем у традиционных образцов, полученных при использовании проволоки сплошного сечения в указанных диапазонах значений тепловой мощности и скорости перемещения электрода (рисунок 16).

Для определения роли режимов комбинированного теплового воздействия при формировании размера ЗТВ рассматривались структуры торцевых частей сборки. Визу-

альным сравнением размеров ЗТВ режимов 0,2, 1, 2 и 3, определено, что с увеличением мощности теплового воздействия на сборку из стали 45 приводит к увеличению ЗТВ до 22 мм при режиме 3. Большее время пребывания в жидком состоянии наплавляемого металла при перегреве основного металла пластины приводит к увеличению размеров зон сплавления и перегрева, а также участка перекристаллизации. Сравнение традиционного режима получения наплавляемого металла (полученного при режиме 0,2) с режимом 2 показало, что ЗТВ больше на 2 мм. Размер зерна металла в зоне наплавления, полученный при режиме 2 на 18% меньше, чем при традиционной сварке АДФ сплошным электродом. Размеры зерен зон перекристаллизации и основного металла сопоставимы.

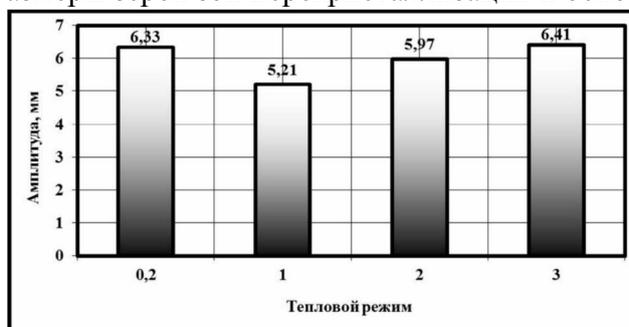


Рисунок 15 – Зависимость максимальных значений амплитуд деформационных отклонений (мм) от режима комбинированного теплового воздействия

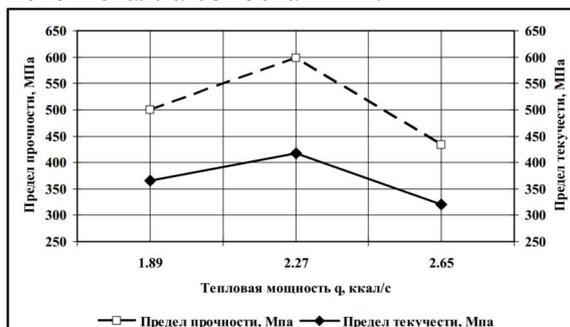


Рисунок 16 – Зависимость предела прочности при растяжении и предела текучести от режима комбинированного теплового воздействия.

Установлено, что твердость металла ЗТВ для образцов неразъемных соединений из стали 45, по мере удаления от центра шва к периферии, увеличивается с HRA = 47 до HRA = 56 ед на протяжении длины ЗТВ, составляющей 19 мм. Характер разрушения образцов, полученных при режиме 2 – вязкий, химический состав металла ЗТВ соответствует стали 45, структура феррито-перлитная, с размером зерна меньшим на 4 – 18 %, чем у образцов, полученных в результате сварки АДФ электродом в виде проволоки сплошного сечения.

Основные выводы

1. Разработан состав алюмотермитного наполнителя непрерывного электрода с коэффициентом заполнения 37 %, содержащий компоненты в следующем соотношении, мас. %: железная окалина 54-73,9, алюминиевый порошок 18,9-25,9, графит 0,1-4, ферросилиций 0,01-10, ферромарганец 0,01-10, никель 0,01-3; экспериментально определено, что для обеспечения наиболее полного участия компонентов алюмотермитной смеси в экзотермической реакции необходимое время их обработки в шаровой мельнице составляет 30-40 минут, что обеспечивает достижение значений плотности смеси 2,5-2,52 г/см³, интенсивности ее горения 21 г/сек, выхода восстановленного металла 50 % от массы веществ, вступающих в экзотермическую реакцию.

2. В ходе серии направленных опытов по неразъемной сборке элементов, изготовленных из углеродистой стали обыкновенного качества на примере СтЗсп и углеродистой трудносвариваемой качественной стали на примере стали 45 выявлены перспективные режимы теплового воздействия при получении неразъемных соединений в АДФ процессе порошковой проволокой с алюмотермитным наполнителем.

3. Расчеты по предлагаемой математической модели процесса эволюции температурных напряжений показали: возможность прогнозирования средствами численных расчетов по соотношениям модели итоговых механических свойств металла зоны термического влияния, уровня и распределения остаточных напряжений в нем; существенное влияние на итоговые значения упругих модулей, предела текучести, уровня остаточных напряжений, учета в расчетах теплоизоляционных свойств флюса и шлака экзотермической реакции; снижение уровня остаточных напряжений за счет учета вязкопластических свойств металла при его пластическом течении, особенно в областях повторного пласти-

ческого течения; заметное влияние упрочнения металла при его пластическом течении (эффект Баушингера) на возрастание итогового значения предела текучести. Значения остаточных напряжений в пластинах образцов, полученных в результате комбинированного теплового воздействия при использовании порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем, на 30-35 % меньше, чем у значений образцов, полученных в традиционном АДФ процессе проволокой сплошного сечения. Важно, что сопоставимость экспериментальных значений с теоретическими пределами отклонений подтверждает работоспособность расчетной математической модели. Невозможным представляется упрощение данной модели в предположении, что пластическое течение идеально или отток тепла от пластины по ее ширине постоянный. Теплоизоляция околошовной зоны, учет вязких свойств металла и его упрочнения в процессе необратимого деформирования задают итоговые механические свойства металла околошовной зоны и уровень остаточных напряжений в нем, что находится в соответствии с экспериментальными данными.

4. Установлено, что достижение прочностных характеристик материала, наплавляемого электродом в виде проволоки с порошковым термитным наполнителем, сопоставимых по значениям с материалом соединяемых пластин из СтЗсп, достигается при использовании диапазона значений тепловой мощности дуги $q = 1,8 \div 2,1$ ккал/с и скорости перемещения электрода $V = 16 \div 22$ м/ч, что позволило получить значения предела прочности на разрыв, соответствующего диапазону $\sigma_b = 360 \div 470$ МПа, предела текучести – диапазону значений $\sigma_t = 250 \div 350$ МПа. Установлено, что при этом режиме комбинированного теплового воздействия значение амплитуды максимальных отклонений геометрии неразъемного соединения из СтЗсп в 1,47 раза меньше, чем у традиционных образцов, полученных при использовании проволоки сплошного сечения в указанных диапазонах значений тепловой мощности и скорости перемещения электрода. Установлено, что твердость зоны термического влияния для таких образцов неразъемных соединений из СтЗсп, по мере удаления от центра шва к периферии, снижается с HRA = 56 ед до HRA = 45,6 ед на протяжении длины зоны термического влияния, составляющей 12 мм. Характер разрушения образцов – вязкий. Химический состав ЗТВ соответствует СтЗсп. Образуется феррито-перлитная структура, с размером зерна меньшим на 4 – 20 %, чем в традиционном случае.

5. Установлено, что достижение прочностных характеристик материала, наплавляемого электродом в виде проволоки с порошковым термитным наполнителем, сопоставимых по значениям с материалом соединяемых пластин из стали 45, достигается при использовании диапазона значений тепловой мощности дуги $q = 2,27$ ккал/с и скорости перемещения электрода $V = 20$ м/ч, что позволило получить значения предела прочности на разрыв, соответствующего значению $\sigma_b = 598$ МПа, предела текучести – значению $\sigma_t = 417$ МПа. Установлено, что при этом режиме комбинированного теплового воздействия значение амплитуды максимальных отклонений геометрии неразъемного соединения из стали 45 на 6% меньше, чем у традиционных образцов, полученных при использовании проволоки сплошного сечения в указанных диапазонах значений тепловой мощности и скорости перемещения электрода. Установлено, что твердость зоны термического влияния для таких образцов неразъемных соединений из стали 45, по мере удаления от центра шва к периферии, увеличивать с HRA = 47 до HRA = 56 ед на протяжении длины зоны термического влияния, составляющей 20 мм. Характер разрушения образцов – вязкий. Химический состав ЗТВ соответствует стали 45. Образуется феррито-перлитная структура, с размером зерна меньшим на 4 – 18 %, чем в традиционном случае.

Основное содержание диссертации изложено в следующих печатных работах:

Журналы, рекомендованные ВАК РФ и WoS:

1. Abashkin, E.E. The Influence of Structure on Strength Properties of Casting Steel Obtained with the Use of Thermite Materials / O.N. Komarov, S.G. Zhilin, D.A. Potianikhin, V.V.

Predein, E.E. Abashkin, A.A. Sosnin and A.V. Popov // AIP Conference Proceedings. – 1785, pp. 040027-1-040027-5 (2016).

2. Абашкин, Е.Е. Температурные напряжения пластины / Е. Е. Абашкин, М. Каинг, А. В. Ткачева // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева Серия: Механика предельного состояния, 2016. – № 4 (30). – С. 24 – 32.

3. Абашкин, Е.Е. Влияние упаковки компонентов термитного наполнителя порошковой проволоки на процессы электродугового переплава / Е. Е. Абашкин, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2018. – Т. 1. – № 1 (33). – С. 96 – 104.

4. Абашкин, Е.Е. Условие пластичности максимальных приведенных касательных напряжений в качестве средства расчетов эволюции плоских напряженных состояний / Е.Е. Абашкин, А.В. Ткачева, Г.А. Щербатюк // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2018. – Т. 1. – № 2 (34) (33). – С. 51 – 62.

5. Абашкин, Е.Е. Влияние теплового режима совместного электродугового и алюмотермического воздействия на формирование структуры и свойств наплавляемого металла / Е. Е. Абашкин, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров, А. В. Ткачева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20. – № 2. – С. 62-74.

6. Абашкин, Е.Е. Влияние теплового режима на напряженно-деформированное состояние элементов неразъемной металлоконструкции, полученной при электродуговом и алюмотермитном воздействиях / Е.Е. Абашкин, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, Н.А.Богданова // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2018. – № 3 (37). – С. 58 – 68.

Патент РФ:

- Пат. № 2675876 РФ, МПК В23К35/368 Порошковая проволока / Абашкин Е.Е., Комаров О.Н., Жилин С.Г., Предеин В.В., Ткачёва А.В., Панченко Г.Л. ; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук. – заявл. 29.12.2017; опубл. 25.12.2018, Бюл. 36.

Материалы работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах:

- Абашкин, Е.Е. Получение стальной металлопродукции с применением экзотермического восстановительного процесса / Е. Е. Абашкин, О.Н. Комаров, С.Г. Жилин, В.В. Предеин // Будущее машиностроения России: сб. тр. Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов. (Москва, 21-25 декабря 2009 г.); Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – С.52.

- Абашкин, Е.Е. Особенности учета деформации при получении сварных конструкций порошковой проволокой с алюмотермитным наполнителем / Е.Е. Абашкин // Актуальные вопросы образования и науки: сб. научных трудов Международной научно-практической конференции в 14 частях. (30 декабря 2013 г.). – Часть 8, 2014. – С. 8 – 9

- Абашкин, Е.Е. Влияние структуры на прочностные свойства литейной стали, полученной с использованием термитных материалов / Е. Е. Абашкин, О. Н. Комаров, С. Г. Жилин, Д. А. Потянихин, В. В. Предеин, А. А.Соснин, А. В. Попов // сб. материалов X Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций». (Екатеринбург, 16-20 мая 2016 г.). – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2016. – С.49.

- Абашкин, Е.Е., Формирование механических свойств элементов металлоконструкций, соединяемых алюмотермитным нагревом / Е. Е. Абашкин, А. В. Ткачева, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров // Сборник материалов Третьего междисциплинарного молодежного

научного форума с международным участием «Новые материалы». (Москва. 21-24 ноября 2017 г.). – М. :ООО «Буки-Веди», 2017. – С.237 – 239

- Абашкин, Е.Е. Влияние химического состава исходных компонентов экзотермических смесей и их соотношения на свойства получаемых термитных сплавов / Е. Е. Абашкин, В. В. Предеин, О. Н. Комаров, С. Г. Жилин // Сборник материалов Третьего междисциплинарного молодежного научного форума с международным участием «Новые материалы». (Москва. 21– 24 ноября 2017 г.). – М.:ООО «Буки-Веди», 2017 г. –С. 327 – 330

- Абашкин, Е.Е. Влияние гранулометрического состава компонентов смеси на заполняемость сварочной порошковой проволоки / Е. Е. Абашкин // Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций: материалы II Дальневосточная школы-семинара. (Комсомольск-на-Амуре, 11 – 15 сентября 2017 г.). – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2017. – С.7 – 8

- Абашкин, Е.Е. Температурные напряжения в пластине при электродуговом переплаве стали Ст3 порошковой проволокой с алюмотермитным наполнителем / Е.Е. Абашкин, А.В. Ткачева // Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций: материалы II Дальневосточная школы-семинара. (Комсомольск-на-Амуре, 11–15 сентября 2017 г.). – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2017. – С.9 – 11

- Абашкин, Е.Е. Влияние упаковки компонентов порошковой проволоки с термитным наполнителем на свойства наплавочного слоя металла. / Е. Е. Абашкин // Сборник трудов XV Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физикохимия и технология неорганических материалов». (Москва. 16 – 19 октября 2018 г.). – М. :ИМЕТ РАН, 2018. – С. 446 – 447

- Абашкин, Е.Е. Физико-механические свойства наплавочного слоя полученного порошковой проволокой на основе термитного наполнителя / Е. Е. Абашкин // Сборник материалов: Научные чтения им. Чл.-корр. РАН И.А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов». (Москва. 6 – 7 сентября 2018 г.). – М. : ИМЕТ РАН, 2018. – С. 23

- Абашкин, Е.Е. Влияние коэффициента заполнения порошковой проволоки на эффективность тепловой дуги / Е. Е. Абашкин, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров // В сборнике: Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций Материалы докладов III дальневосточной школы-семинара. 2018. – С. 82 – 83.

- Абашкин, Е.Е. Формирование структуры неразъемного соединения полученного при АДФ порошковой проволокой с алюмотермитным наполнителем / Е.Е. Абашки, С. Г. Жилин // В сборнике: Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций Материалы докладов III дальневосточной школы-семинара. 2018. – С. 84 – 86.

Подписано в печать 20.03.2019.

Формат 60x84 1/16. Бумага писчая. Ризограф RISO EZ 570E.

Усл. печ. 1,16 л. Уч. изд. 1,10 л. Тираж 100 экз. Заказ 29586.

Полиграфическая лаборатория Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Комсомольского-на-Амуре государственного университета
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.