

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.791.763.2

БЕНДИК
Татьяна Ивановна

**РЕЛЬЕФНАЯ СВАРКА Т-ОБРАЗНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
С НАПРАВЛЕННОЙ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ
МЕТАЛЛА**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.03.06

«Технологии и машины сварочного производства»

Могилёв, 2009

Работа выполнена в ГУВПО «Белорусско-Российский университет»

Научный руководитель : **Березиенко Валерий Петрович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ГУВПО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев.

Официальные оппоненты: **Денисов Леонид Сергеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Порошковая металлургия, сварка и технология металлов» Белорусского национального технического университета, г. Минск.

Кузменко Игорь Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Сопротивление материалов» ГУВПО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев.

Оппонирующая организация: ГНУ «Институт порошковой металлургии» НАН Беларуси, г. Минск

Защита диссертации состоится « 5 » июня 2009 г. в 14⁰⁰ на заседании совета на защите диссертаций К 02.18.01 при ГУВПО «Белорусско-Российский университет» по адресу: 212000, г. Могилев, пр-т Мира, 43, корп.1, ауд. 323, тел. (8-0222) 22-52-12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГУВПО «Белорусско-Российский университет».

Автореферат разослан « 17 » апреля 2009 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
доктор физ.-мат. наук, профессор



Борисов В.И.

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей развития машиностроения в Республике Беларусь является внедрение прогрессивных энерго- и материалосберегающих технологий, обеспечивающих высокий уровень качества выпускаемой продукции и повышение ее конкурентоспособности на рынке. С точки зрения снижения себестоимости изготовления изделий, конструктивные особенности которых предполагают наличие Т-образных соединений, контактная рельефная сварка является наиболее эффективным технологическим процессом. Она обеспечивает высокие показатели производительности, уровня автоматизации и механизации сборочно-сварочных работ, малую энергоемкость, отсутствие необходимости применения специальных технологических материалов (сварочная проволока, защитный газ и т.д.), высокую культуру производства, гигиеничность и благоприятные условия труда.

Однако отсутствие теоретических основ процесса образования Т-образных соединений при рельефной сварке, а также нормативной базы вызывает сложности при определении параметров режима и требует проведения дополнительных экспериментальных исследований для разработки технологии сварки. Подобные экспериментальные уточнения параметров режима в производственной практике всегда связаны с дополнительными временными, материальными затратами и не всегда дают положительные результаты в плане обеспечения требуемых прочностных показателей, точности геометрических размеров сварных соединений и их внешнего вида.

Для решения поставленной задачи необходимо создание математической модели процесса рельефной сварки, позволяющей численно реализовать совмещенный электротермодеформационный расчет с учетом значительных пластических деформаций, которым подвергается зона сварного соединения в процессе осадки рельефа. С помощью этой модели и экспериментальных исследований требуется разработать способы управления электрическими и тепловыми полями, процессом направленного упругопластического деформирования металла зоны сварки, которые позволят получить высокие эксплуатационные характеристики соединений.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами. Тема диссертации соответствует следующим приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006-2010 годы (Перечень утвержден постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 17.05.2005 г. № 512):

2. Механика машин, обеспечение надежности и безопасности технических систем, повышение конкурентоспособности продукции машиностроения;
6. Математическое и физическое моделирование систем, структур и процессов в природе и обществе, информационные технологии, создание современной информационной инфраструктуры.

Научные исследования по теме диссертации проводились в соответствии с планом НИР Белорусско-Российского университета ГБ - 0621 «Улучшение качества сварных соединений нефтехимического оборудования и технологических

трубопроводов» (с 2005 по 2009 г.), в выполнении которого принимала участие аспирантка.

Цель и задачи исследования. *Целью исследований* является обеспечение требуемых прочностных показателей и точности геометрических параметров Т-образных соединений на основе создания направленной упругопластической деформации металла.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

- разработана математическая модель упругопластического деформирования металла при рельефной сварке, позволяющая проводить оценку геометрических и прочностных показателей Т-образных соединений в зависимости от созданных термомодеформационных условий процесса;

- при помощи математической модели и экспериментальных исследований установлены пути управления электрическими и тепловыми полями, создания направленной упругопластической деформации металла, на основе которых предложены практические рекомендации по выбору параметров режима сварки, обеспечивающие высокие прочностные показатели и заданную точность геометрических размеров соединений;

- установлены наиболее информативные параметры, по которым возможно прогнозирование направления упругопластической деформации металла, а также корреляционные связи между данными параметрами и кинетикой формирования Т-образных сварных соединений;

- разработана и внедрена в производство технология рельефной сварки, обеспечивающая получение Т-образных сварных соединений с требуемой прочностью и точностью геометрических параметров, предложена специализированная оснастка для ее реализации.

Объектом исследований являются Т-образные соединения, выполняемые рельефной сваркой. *Предмет исследований* - основные факторы, оказывающие влияние на термомодеформационные процессы формирования Т-образных соединений при рельефной сварке.

Положения выносимые на защиту

1. Математическая модель процесса образования соединений при рельефной сварке, отличающаяся использованием пошагово-совмещенного анализа электрических, температурных и деформационных полей с учетом изменения контактных сопротивлений и возможностью обеспечения сходимости вычислительного процесса при значительных пластических деформациях металла, позволившая установить взаимосвязи между формой, размерами рельефа, основными параметрами режима сварки, размерами деталей, свойствами свариваемых материалов и кинетикой образования Т-образных соединений.

2. Новая методика выбора технологических параметров режима рельефной сварки Т-образных соединений с учетом динамического изменения размеров контактной поверхности в процессе осадки рельефа, которая позволила получить математические зависимости для определения размеров рельефов, величины сварочного тока, длительности его нарастания и протекания в зависимости от типа и геометрических размеров соединений при сварке углеродистых сталей, обеспечивающие радиально направленную упругопластическую де-

формацию металла зоны сварки, активацию контактных поверхностей, высокие показатели прочности и точности соединений.

3. Уменьшена деформация внутренней стенки детали и вероятность повреждения резьбы при помощи использования формы рельефа, отличающейся наличием тороидальной канавки и плоской площадки среза, которые позволили обеспечить направленную упругопластическую деформацию металла рельефа, отсутствие зазоров между свариваемыми деталями, повышение статической прочности соединений на 15 – 20 % и снижение размаха прочности в 1,5 раза.

4. Теоретически и экспериментально установлен диапазон скоростей осадки рельефов (2,6 – 4,2 мм/с), в пределах которого обеспечиваются направленная упругопластическая деформация металла, высокие показатели прочности и точности Т-образных сварных соединений, и позволяющий определить требования к динамическим свойствам механизмов сжатия машин рельефной сварки.

Личный вклад соискателя. При выполнении работы автором лично разработана математическая модель процесса рельефной сварки, проведен анализ кинетики образования соединений, получены математические зависимости по выбору основных параметров режима сварки, предложены рекомендации по выбору формы и размеров рельефов. Бендик Т.И. принимала непосредственное участие в разработке методики и проведении экспериментальных исследований. В работах, опубликованных с соавторами (В.П. Березиенко, С.М. Фурманов, С.В. Болотов), автор участвовала на всех этапах их выполнения.

Научному руководителю доктору технических наук В.П. Березиенко принадлежит общая идея работы. Определение целей и задач исследований, обобщение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем.

Апробация результатов диссертации. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на III и IV международных научно-практических семинарах “Контактная сварка и другие виды сварки давлением. Технологии и оборудование” (Санкт-Петербург, 2006, 2007), республиканских научно-технических конференциях “Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности” (Могилев, 2005, 2006, 2007), международных научно-технических конференциях “Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии” (Могилев, 2005, 2006, 2008).

Опубликованность результатов диссертации. Основное содержание диссертации опубликовано в 5 статьях, включенных в перечень научных изданий ВАК Республики Беларусь, с объемом 2,25 авторских листа, 2 статья в зарубежных научных изданиях, 7 тезисах докладов на международных научно-технических конференциях, получен 1 патент Республики Беларусь на полезную модель с общим объемом 1,27 авторских листов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации составляет 148 страниц, из них 74 рисунка на 22 страницах, 5 таблиц на 2 страницах, 3 приложения на 14 страницах и 104 библиографические ссылки на 7 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность научно-технической задачи, решаемой в диссертационной работе, намечены основные направления повышения прочностных показателей и точности геометрических характеристик Т-образных сварных соединений.

Первая глава посвящена обзору и анализу литературных данных по теме диссертации. Рассмотрены вопросы качества сварных соединений, получаемых в твердой фазе. Показано, что преобладающее большинство дефектов сварных соединений (табл. 1) вызвано нерациональным выбором параметров режима сварки, формы и размеров применяемых рельефов. Следствием возникновения данных дефектов является нарушение точности сварных соединений.

Таблица 1.1 – Нарушение точности геометрических параметров при возникновении дефектов в Т-образных сварных соединениях

Вид дефекта и причина его возникновения	Макрошлифы Т-образных сварных соединений	
Выплески на лицевых и резьбовых поверхностях изделия из-за нерационального выбора параметров режима сварки и формы рельефа		
Повреждение лицевых поверхностей изделия из-за грубой механической обработки и нерационального выбора формы рельефа		
Непровар из-за отклонения от параллельности поверхностей свариваемых деталей		
Непровар из-за нерационального выбора параметров режима сварки		

Среди отечественных авторов разработкой теоретических и технологических основ процесса рельефной сварки занимались Гельман А.С., Гилевич В.А., Гуляев А.И., Чулошников П.Л., Каракозов Э.С., Березиенко В.П., чехословацкие исследователи Липа М., Голасек Я., а также зарубежные технические группы – американское общество сварщиков (AWS) и промышленная ассоциация контактной сварки (RWMA), Международный институт сварки (IIW). Проведенные ими исследования включают в себя накопленный промышленный опыт применения рельефной сварки и содержат рекомендации по выбору параметров

режима сварки конкретных изделий.

Однако обобщенных и систематизированных данных, используя которые можно определить форму и размеры рельефа, исходя из геометрических параметров и материала свариваемых деталей, а также определить соответствующие параметры режима технологического процесса, фактически не существует.

В качестве основного инструмента для определения параметров режима рельефной сварки, обеспечивающих требуемые показатели качества Т-образных соединений, эффективно использование математической модели процесса, которая позволяет определить оптимальные законы регулирования основных факторов, оказывающих влияние на работоспособность и точность геометрических параметров получаемых сварных соединений. Известные методы расчёта тепловых и электрических полей, напряженно-деформированного состояния при контактной точечной и рельефной сварке (математические модели Судника В.А., Ерофеева В.А., Киселева С.Н., Куркина А.С., Березиенко В.П., Попковского В.А., Фурманова С.М., Прохорова А.Н., Чакалева А.А., Nied H.A., Dong P., Sun X. и др.) не могут быть использованы для решения поставленной в настоящей работе задачи. Все вышеупомянутые исследования базируются на методе конечных элементов, считая, что геометрические параметры математической модели существенно не изменяются в течение всего процесса сварки.

Основная же сложность численной реализации модели процесса рельефной сварки Т – образных соединений заключается в том, что в локальной зоне деформации рельефа металл подвергается значительной пластической деформации. В процессе расчета при подобных узловых перемещениях площадь конечного элемента становится практически равной нулю. Это приводит к недопустимым искажениям конечноэлементной сетки модели, неблагоприятно влияет на точность решения и является основной причиной преждевременного вынужденного окончания расчета. В связи со сложностью достижения сходимости вычислительного процесса при моделировании процессов рельефной сварки Т – образных соединений в литературе не представлены сведения о разработке таких моделей.

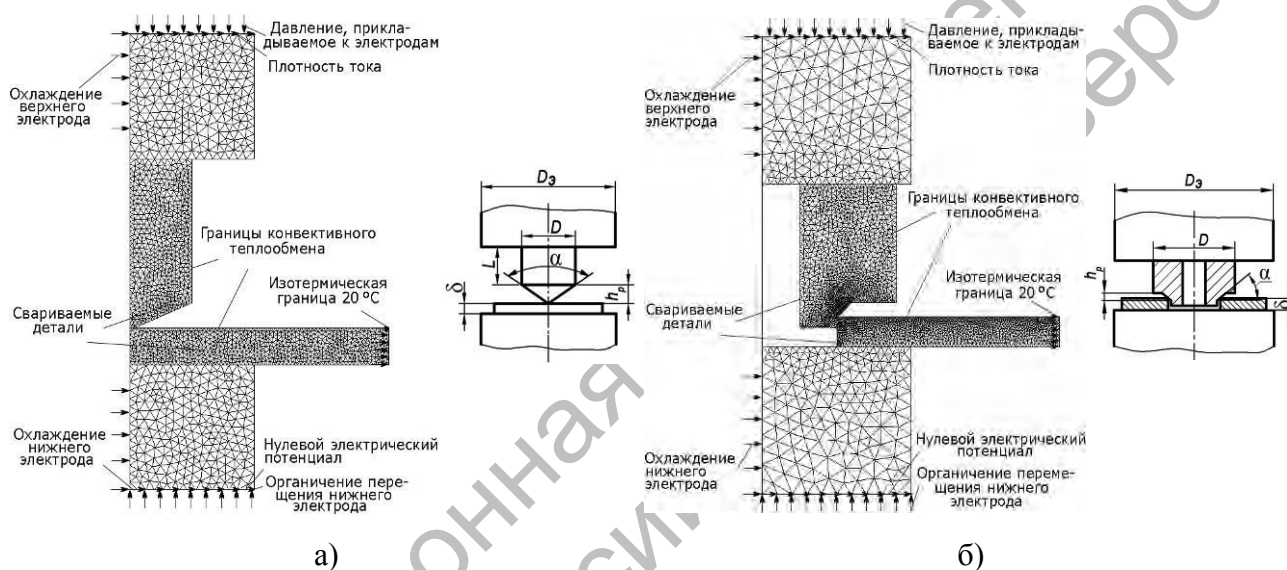
Ввиду отсутствия математической модели процесса рельефной сварки Т-образных соединений, позволяющей решить проблему численной реализации быстропротекающих пластических деформаций, которым подвергается зона сварки в процессе осадки рельефа, необходимо разработать модель, удовлетворяющую вышеописанным требованиям.

Во второй главе дается описание методики математического моделирования процесса упругопластического деформирования металла зоны соединения при рельефной сварке, оценки адекватности предложенной нами математической модели, а также приводятся сведения об экспериментальной установке для регистрации параметров режима, методике и оборудовании для проведения металлографических и прочностных испытаний.

В предложенной нами математической модели алгоритм численной реализации включает в себя пошагово-совмещенное решение следующих задач: электрической, тепловой и деформационной. Моделируемый объект обладает геометрической осью симметрии. Поэтому, предполагая, что начальные и гра-

нические условия также симметричны по отношению к оси электродов, все расчеты можно рассматривать, как решение осесимметричной задачи в цилиндрической системе координат. На рис. 1 показано разбиение осесимметричных моделей электрод - детали - электрод на конечные элементы для двух рассматриваемых типов сварных соединений.

Согласно разработанного нами алгоритма численной реализации математической модели, вначале производился ввод исходных данных, осуществлявшийся с помощью созданной пользовательской программы «ProjectionWELD». Данная программа обеспечивает удобный интерфейс для работы, позволяет осуществить задание параметров, требуемых для построения геометрии, формирования начальных и граничных условий, а также содержит ряд подмодулей для расчета контактных сопротивлений и коэффициентов конвективного теплообмена.



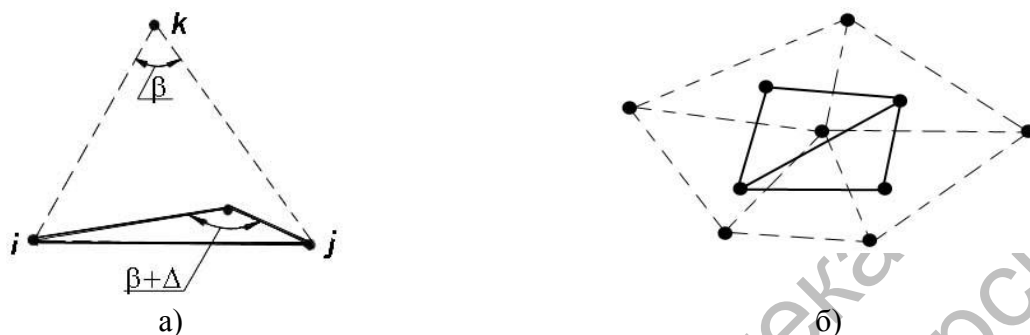
а – сварка стержня с листом; б – сварка бобышки с листом (сварка «острой гранью»);
 D_3 – диаметр электрода; D – диаметр стержня (бобышки); h_r – высота рельефа;
 α – угол рельефа; δ – толщина листа

Рисунок 1 – Разбиение осесимметричной модели на конечные элементы и схемы соединений

В разработанной нами математической модели осуществляется модификация сетки конечных элементов в процессе расчета с учетом изменения и обновления граничных условий. На рис. 2, а показано, что при деформации конечного элемента угол между его гранями изменяется на величину Δ , и, если в процессе расчета Δ достигнет 40° , происходит процедура переразбиения сетки конечных элементов.

Для проведения комплекса экспериментальных исследований процесса рельефной сварки Т – образных соединений, включающих косвенное измерение и регистрацию основных параметров режима сварки, нами использовалась экспериментальная установка, включающая машину для контактной сварки МТ-3201, устройства для регистрации величины сварочного тока (датчик ДТПХ-32000 на основе эффекта Холла) и перемещения подвижного электрода (датчик ДУПХ-30-1), систему сбора данных, портативную ЭВМ и механическую часть,

необходимую для установки средств регистрации на контактную машину. Визуализация результатов измерений обеспечивалась применением системы сбора данных NI USB-6009, позволяющей преобразовывать информацию в цифровой код и обрабатывать сигнал на ЭВМ, используя современное программное обеспечение LabView 6.0.



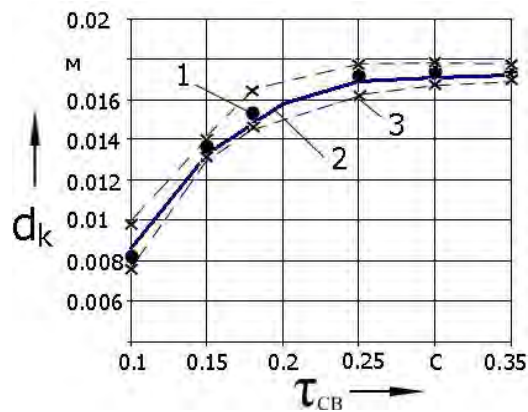
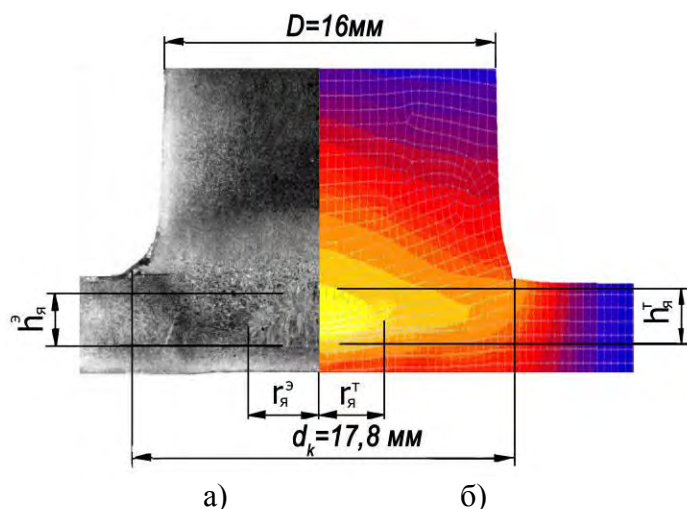
а – деформация конечного элемента в процессе расчета; б – расположение модифицированной сетки конечных элементов; - - - - - грани конечного элемента на предыдущем инкременте; ——— грани конечного элемента на последующем инкременте

Рисунок 2 – Процедура модификации сетки конечных элементов

Выходной переменной для оценки значимости и адекватности математической модели являлся диаметр контакта деталь-деталь d_K , величина которого определялась по макрошлифам соединений на различных стадиях процесса сварки. Для нахождения теоретической зависимости изменения d_K в процессе сварки использовалась программная опция, позволяющая идентифицировать узлы математической модели, которые пришли в контакт на данном временном шаге расчета. На рис. 3 в качестве примера показано сравнение экспериментальных и расчетных данных при сварке стержня диаметром 16 мм с пластиной из низкоуглеродистой стали Ст3 толщиной 3 мм. Проведенная оценка теоретических данных показала, что разработанная нами математическая модель является адекватной и работоспособной. Причина количественных отклонений в значениях диаметра (5 – 8 %) и высоты зоны расплавления (5 – 10 %) заключается в недостатке данных о реальных характеристиках материалов свариваемых материалов при температурах, близких к температуре плавления.

Третья глава посвящена исследованию процессов упругопластического деформирования металла зоны сварного соединения. Показано, что процесс формирования Т-образных соединений можно разбить на 4 этапа, каждый из которых имеет характерную зону на экспериментальной кривой, описывающей вертикальное перемещение подвижного электрода в процессе сварки.

Первый этап начинается с предварительного сжатия деталей и создания между ними механического контакта. Деформация рельефа до момента включения сварочного тока способствует стабилизации электрического сопротивления контакта и является необходимым условием получения качественных сварных соединений.



1 – среднее значение диаметра контакта деталь-деталь d_k в эксперименте; 2 – расчетные значения d_k , полученные по модели; 3 – доверительный интервал оценки; $r_{я}^э$, $r_{я}^T$, $h_{я}^э$, $h_{я}^T$ – полученные экспериментально и теоретически радиус и высота зоны расплавления;

Рисунок 3 – Макрошлиф сварного соединения (а), результаты математического моделирования (б) и зависимость диаметра контакта деталь-деталь d_k от длительности протекания сварочного тока (в)

Второй этап образования сварного соединения начинается с момента включения сварочного тока. При прохождении первых импульсов сварочного тока металл зоны сварного соединения нагревается до температуры разупрочнения $T > 800$ К, что сопровождается интенсивным ростом площади контакта деталь-деталь. Стабильность процесса сварки на данном этапе зависит от соблюдения следующих условий:

- наличие плавного увеличения сварочного тока, компенсирующего малую площадь контакта деталь-деталь в момент включения сварочного тока;
- нарастание величины сварочного тока должно соответствовать изменению размера площади контакта при деформации рельефа.

При этом характер протекания направленной упругопластической деформации металла должен обеспечивать удаление оксидов из зоны контакта деталь-деталь и образование ювенильных поверхностей.

На третьем этапе значительно снижается скорость перемещения подвижного электрода, что объясняется интенсивным ростом размера площади контакта и некоторым снижением плотности тока. В процессе протекания сварочного тока размеры зоны сварки, а, значит, и прочность соединения растут, и к моменту выключения сварочного тока металл разогревается до температур порядка 1450 К, что соответствует температуре образования сварных соединений в твердой фазе (рис. 4). Окончанием этапа является полная осадка рельефа на всю его высоту.

Четвертый этап образования соединения начинается с момента выключения сварочного тока. На данном этапе развивается объемное взаимодействие в зоне сварки. Оно начинается в активных центрах (дислокациях, вакансиях и других дефектах структуры) и протекает путем роста и слияния очагов взаимодействия по всей контактной поверхности. Затем происходит релаксация напряжений, образование промежуточных фаз, рекристаллизация и т.д.

Изучение кинетики образования Т-образных соединений показало, что геометрические параметры рельефа оказывают непосредственное влияние на характер распределения электрического и температурного поля, а также процесс упругопластического деформирования металла зоны сварки на первых двух этапах формирования соединения.

Наряду с теоретическим изучением процесса рельефной сварки нами также были проведены металлографические исследования структур сварных соединений низкоуглеродистых сталей при различных условиях термического цикла сварки цилиндрических тел (стержней, бобышек) с плоскими деталями (листами). Из-за несимметричности температурного поля относительно плоскости соединения деталей и разных условий теплоотвода рассматривались участки ЗТВ как со стороны стержня (бобышки), так и со стороны листа. Показано, что получаемые в зоне сварного соединения структуры разнообразны по характеру и размерам зерен (рис. 5). Наибольшее влияние на работоспособность Т-образных соединений при рельефной сварке оказывает зона перегрева, в которой возможно появление закалочных структур и видманштеттовой структуры.

Анализ данных математического моделирования и металлографических исследований сварных соединений показал, что формирование зоны расплавления возможно при приварке стержней диаметром свыше 12 мм к листовым деталям толщиной более 2 мм (данное соотношение геометрических размеров деталей обеспечивает всестороннее сжатие нагреваемого сварочным током металла). При этом диаметр зоны расплавления составляет не более 30 – 40 % от общей площади сварного соединения. При меньших диаметрах стержня формирование сварного соединения происходит в твердой фазе (температура в зоне контакта деталь-деталь не достигает температуры плавления), и зона расплавления не формируется в широком диапазоне параметров режима сварки.

Проведенные нами исследования структур сварных соединений при сварке «острой гранью» показали, что, в отличие от Т-образной сварки стержней, формирование сварного соединения происходит исключительно без наличия расплавленной зоны.

Показано, что при сварке стержней с применением сферической формы и в виде усеченного конуса затруднена направленная упругопластическая деформация металла зоны контакта деталь-деталь и процесс удаления оксидных пленок из вышеупомянутой зоны. При сварке в твердой фазе это может стать причиной возникновения непровара и снижения прочности сварного соединения. Поэтому для рельефной сварки стержней с листовой деталью предпочтение следует отдавать конической форме рельефа, при этом угол рельефа выбирает-

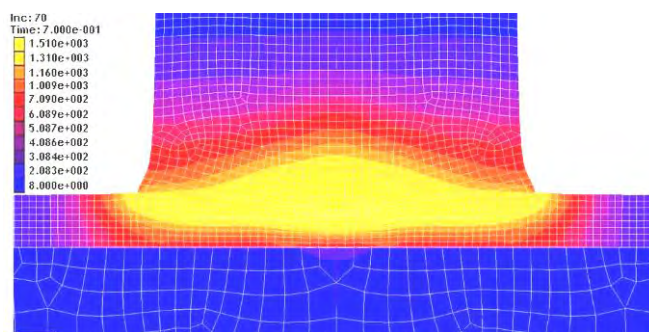


Рисунок 4 – Распределение температурного поля в момент выключения тока (температура в К)

ся в пределах $120 - 170^\circ$ для стержней с диаметрами $D = 6 - 25$ мм, исходя из следующей зависимости $\alpha = 180 - \frac{350}{D} \pm 1$ (1). Следует отметить, что отклонения величины угла рельефа, которые могут возникнуть в процессе механической подготовки торца стержня, в пределах $\pm 1^\circ$ не оказывают качественного воздействия на процесс формирования сварного соединения.

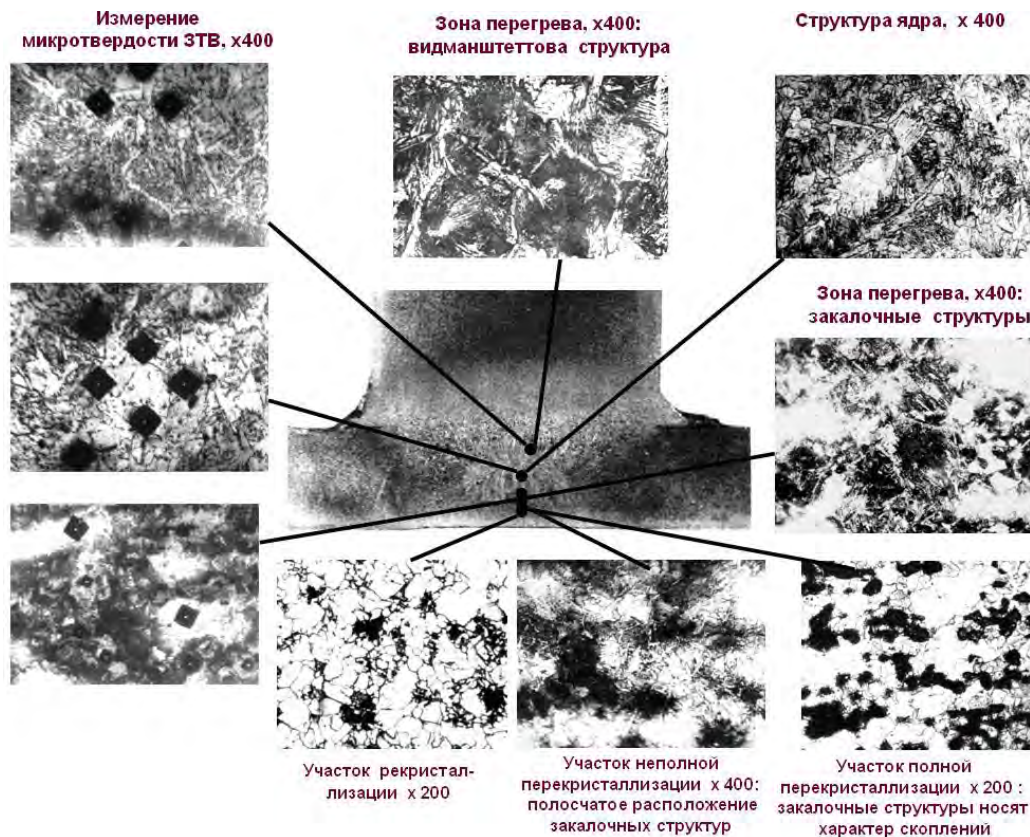
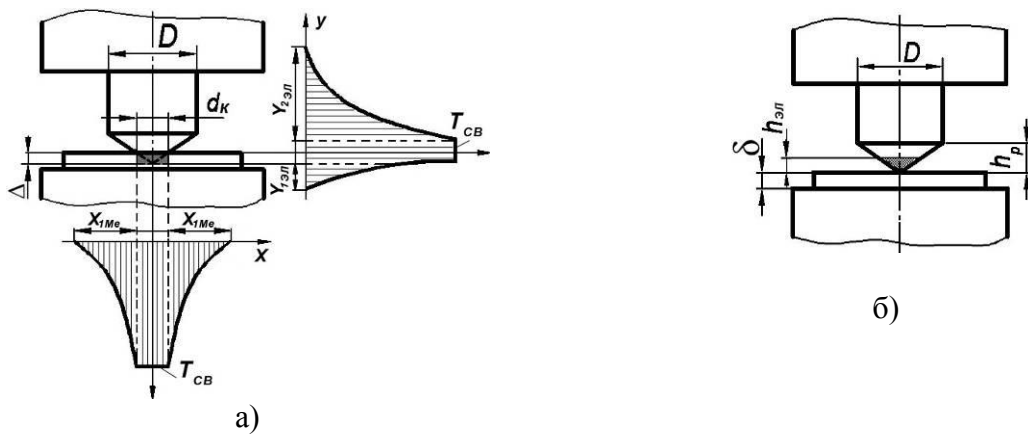


Рисунок 5 – Металлографические исследования сварного образца с наличием зоны взаимного расплавления деталей

Предложена методика, которая позволяет определить форму и величину сварочного тока с учетом динамического изменения размеров свариваемого контакта в процессе осадки рельефа. При расчете сварочного тока определяли общее количество теплоты, выделяемой на участке электрод-электрод $Q_{ЭЭ}$. Анализ кинетики образования сварного соединения показал, что распределение температурного поля в свариваемых деталях имеет несимметричный характер. Поэтому расчет составляющих теплового баланса мы производили отдельно для стержня и листа (рис. 7, а, б). Количество теплоты, необходимое для нагрева до температуры $T_{СВ}$ столбика металла диаметром d_K и высотой Δ , вычисляли, исходя из текущего значения диаметра контакта деталь-деталь, определявшегося по формуле: $d_K = 2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot h_{ЭЛ}$ (2).



а – схема расчета теплового баланса листовой детали; б – схема расчета теплового баланса стержня; D – диаметр привариваемого стержня, h_p – высота рельефа; δ – толщина листовой детали; d_k – диаметр контакта деталь-деталь; $h_{эл}$ – перемещение верхнего электрода; Δ – высота столбика металла листа, нагретого до температуры T_{CB}

Рисунок 7 – Расчетная схема сварного соединения

В расчете теплового баланса температуру, при которой происходит образование сварного соединения, принимали равной температуре плавления металла $T_{CB} = T_{пл}$ для сварки стержней диаметром $D > 12$ мм с листом толщиной $\delta > 2$ мм. При диаметре привариваемого стержня $D < 12$ мм T_{CB} принимаем равной температуре образования сварных соединений в твердой фазе $T_{CB} = 0,85 \cdot T_{пл}$. Рассчитав общее количество теплоты, необходимое для образования соединения, определяли действующее значение сварочного тока I_{CB} и закон его изменения в зависимости от величины осадки

фа: $I_{CB} = \frac{Q_{э\delta} \cdot V_{эл}}{U_{\delta\delta} \cdot h_p} \quad (3)$, где $U_{\delta\delta}$ – падение напряжения на участке деталь-деталь; $V_{эл}$

- скорость перемещения электрода. Для нахождения величин $h_{эл}$, $V_{эл}$ и $U_{\delta\delta}$ использовали результаты математического моделирования и экспериментальные данные, полученные в ходе осциллографирования параметров режима сварки.

Закон изменения сварочного тока в зависимости от величины осадки рельефа учитывался при расчете длительности модуляции импульсов сварочного тока (при реализации технологического процесса рельефной сварки на машинах переменного тока модуляция импульсов тока осуществлялась в течение времени 0,04 – 0,08 с). При сварке низкоуглеродистых сталей зависимость действующего значения сварочного тока I_{CB} (в А) от диаметра стержня D (в мм) и толщины пластины δ (в мм) нами представлена в виде следующей зависимости:

$I_{CB} = (11\sqrt{D} - 20) \cdot 1000 \cdot \delta^{0,1\delta} \quad (4)$, где $\delta^{0,1\delta}$ – коэффициент учета изменения толщины листа. При этом длительность протекания сварочного тока (τ_{CB} , с) прямо пропорциональна диаметру привариваемого стержня и определяется, исходя

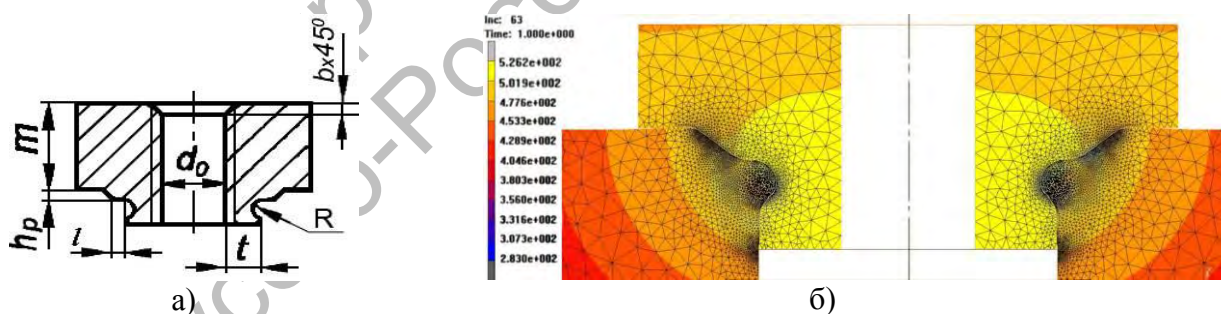
из следующей зависимости: $\tau_{CB} = (0,06 + 0,02D) \cdot \delta^{0,1\delta} \quad (5)$.

Установлено, что при сварке «острой гранью», с целью предотвращения возникновения деформаций внутренней стенки бобышки (резьба не должна повреждаться при выполнении сварочной операции) и обеспечения направленной упругопластической деформации, угол рельефа следует выбирать в пределах 40 – 45 ° вне зависимости от типоразмера привариваемой бобышки и толщины

листа. Установлено, что для получения требуемых параметров точности сварного соединения толщина стенки бобышки (t , мм) должна быть не менее $t \geq 0,8 + 0,2d_0$ (6), а высота рельефа должна находиться в следующей функциональной зависимости от диаметра резьбы $h_p = 0,17 \cdot d_0^{0,95}$ (7). Для определения величины сварочного тока I_{CB} (в А) в зависимости от диаметра резьбового отверстия d_0 (в мм) нами предложена математическая зависимость: $I_{CB} = 650 \cdot d_0^{1,45} \cdot \delta^{0,1\delta}$ (8). Длительность протекания сварочного тока (τ_{CB} , с) определяются, исходя из следующей зависимости: $\tau_{CB} = (0,06 + 0,03d_0) \cdot \delta^{0,1\delta}$ (8).

В четвертой главе представлены результаты практического применения научных исследований при разработке технологии рельефной сварки Т-образных соединений.

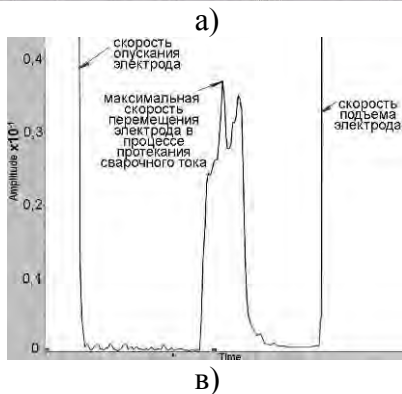
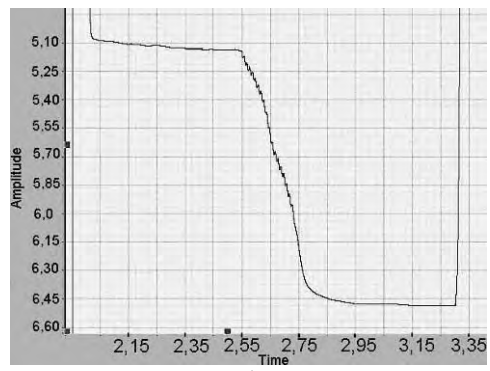
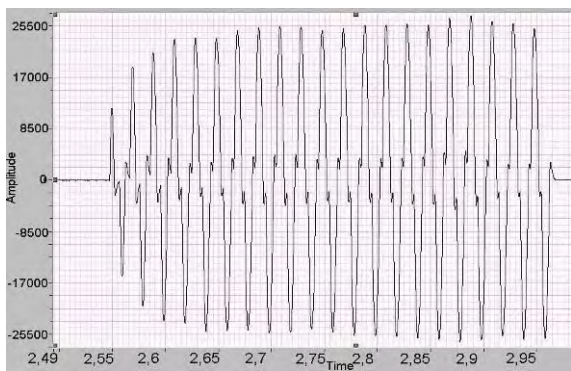
Предложена новая форма рельефа для сварки «острой гранью» с выполненной канавкой тороидальной формы радиуса R и наличием плоской площадки среза длиной l (рис. 8). При этом геометрические параметры формы рельефа следует выбирать из соотношений: радиус выточки $R = 0,085 \cdot d_0^{0,94}$ (9); длина площадки $l = R$ в зависимости от диаметра резьбового отверстия d_0 . Данная форма рельефа обеспечивает направленную упругопластическую деформацию металла, приводящую к заполнению сформированной канавки пластичным металлом. При этом обеспечивается требуемая точность геометрических характеристик, а также сохраняются высокие и стабильные прочностные показатели сварных соединений из-за уменьшения зазора между деталями и увеличения площади сварки. Наличие площадки длиной l обеспечивает точную центровку верхней детали в отверстии пластины и гарантирует наличие первоначального контакта деталь-деталь, стабилизируя контактное сопротивление в момент включения сварочного тока.



а - конструктивные размеры; б - характер пластического деформирования металла

Рисунок 8 – Рельеф для сварки «острой гранью»

На основании обработки результатов математического моделирования и осциллограмм процесса сварки (рис. 9) нами определены зоны выплеска, непровара, а также качественной сварки деталей из углеродистых сталей с различными типоразмерами. На рис. 10 представлена номограмма процесса сварки бобышки с внутренним диаметром М10 и высотой рельефа 1,5 мм (материал деталей Ст3).



а — сварочный ток (в А);
 б — перемещение подвижного электрода (в мм); в — скорость перемещения электрода (мм/с)

Рисунок 9 – Типовые осциллограммы процесса сварки

Как показали проведенные нами теоретические и экспериментальные исследования, если в процессе сварки (на втором этапе образования сварного соединения) требуемая скорость осадки рельефа превысит скорость перемещения подвижного электрода машины, может возникнуть выплеск расплавленного металла, что приводит к образованию некачественного соединения. Согласно типовых номограмм процесса качественная сварка может быть получена при скоростях перемещения подвижного электрода, находящихся в диапазоне 2,6 – 4,2 мм/с.

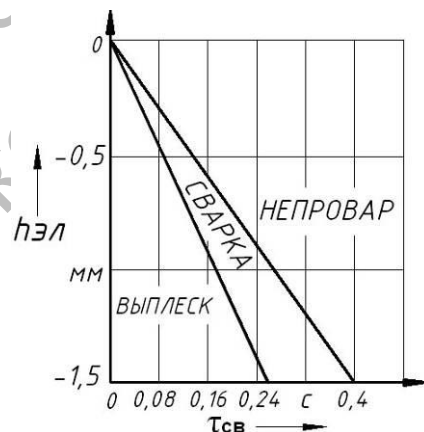


Рисунок 10 – Номограмма для оценки результативности процесса сварки по величине перемещения подвижного электрода

Освоение предложенной технологии контактной рельефной сварки осуществлено на РУП «МТЗ» при сварке узлов тракторов «Беларус» МТЗ. Результаты внедрения проведенных исследований и их практического освоения позволили перейти к использованию «жестких» режимов сварки. При этом достигнуто снижение материальных затрат, обеспечена стабильность прочностных показателей и геометрических параметров сварных соединений, улучшен товарный вид изделия. Проведена оценка экономического эффекта от использования рельефной сварки при производстве узлов лифтов, выпускаемых РУП завод «Могилевлифтмаш». Экспериментальная установка для регистрации параметров режима рельефной сварки используется в учебном процессе Белорусско-Российского университета при проведении лабораторных работ и выполнении студенческих НИР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации:

1. Разработана математическая модель упругопластического деформирования металла зоны соединения при рельефной сварке, учитывающая особенности нагрева при прохождении электрического тока, характер неизотермического упругопластического деформирования, зависимости электротеплофизических и механических свойств материалов от температуры, скрытую теплоту плавления и отличающаяся использованием конечно-элементного пошагово-совмещенного анализа электрических, температурных и деформационных полей с учетом изменения электрических и тепловых сопротивлений контактов, а также возможностью обеспечения сходимости вычислительного процесса при значительных пластических деформациях металла рельефа. На базе разработанной математической модели определен характер упругопластической деформации металла рельефа на всех стадиях цикла сварки, проведена оценка геометрических и прочностных характеристик сварных соединений в зависимости от созданных термомеханических условий процесса /1, 2, 3, 9/.

2. На основании математического моделирования и экспериментальных исследований показано, что при сварке Т-образных соединений стержня с листовой деталью при диаметре стержня менее 12 мм и углах рельефа 120-140° формирование сварного соединения происходит в твердой фазе, а при диаметрах 12-25 мм и углах рельефа 140-170° образуется зона расплавления размером не более 30-40 % от площади сварного соединения. Показано, что при выборе формы рельефа при сварке стержня с листовой деталью предпочтение следует отдавать подготовке торцевой поверхности стержня в виде конуса. Установлено, что угол рельефа необходимо выбирать в пределах 120 – 170° при диаметрах стержней от 6 до 20 мм, исходя из следующей математической зависимости: $\alpha = 180 - \frac{350}{D} \pm 1$ /1, 7, 13, 14/.

3. Предложена методика расчета величины и длительности нарастания сварочного тока, в зависимости от текущего размера контакта деталь-деталь. При этом для сварки углеродистых сталей действующее значения сварочного тока I_{CB} (в А) следует выбирать в зависимости от диаметра привариваемого стержня D и толщины пластины δ : $I_{CB} = (11\sqrt{D} - 20) \cdot 1000 \cdot \delta^{0,1\delta}$. Длительность протекания сварочного тока необходимо выбирать из следующей зависимости: $\tau_{cb} = (0,06 + 0,02D) \cdot \delta^{0,1\delta}$ /5, 7, 11/.

4. Установлено, что при сварке «острой гранью» для предотвращения деформаций внутренней стенки бобышки и обеспечения радиально направленной упругопластической деформации металла угол рельефа следует выбирать в пределах 40 – 45° вне зависимости от типоразмера привариваемой бобышки и толщины листа. Установлено, что для обеспечения требуемых параметров точности сварных соединений из углеродистой стали толщина стенки бобышки должна быть не менее $t \geq 0,8 + 0,2d_o$, а высота рельефа должна находиться в следующей функциональной зависимости от диаметра резьбы $h_p = 0,17 \cdot d_o^{0,95}$. Уста-

новлено, что для определения действующего значения сварочного тока I_{CB} (в А) следует использовать следующую зависимость: $I_{CB} = 650 \cdot d_o^{1,45} \cdot \delta^{0,1\delta}$. При этом для обеспечения требуемых параметров точности сварного соединения целесообразно применение «жестких» режимов сварки с длительностью протекания сварочного тока, равной $\tau_{cb} = (0,06 + 0,03d_o) \cdot \delta^{0,1\delta} / 4, 12, 14/$.

5. Предложена форма рельефа, отличающаяся наличием тороидальной канавки и плоской площадки среза, которые позволяют снизить деформацию внутренней стенки бобышки, повысить статическую прочность соединений на 15 – 20 %, а также снизить размах прочности в 1,5 раза за счет увеличения площади сварки путем создания направленной упругопластической деформации металла зоны соединения и отсутствия зазоров между свариваемыми деталями. Предложены математические зависимости для выбора размеров конструктивных элементов нового рельефа, а также номограммы для оценки качества процесса сварки углеродистых сталей по перемещению подвижного электрода /4, 13/.

6. Теоретически установлен и экспериментально подтвержден диапазон скоростей осадки рельефов (2,6 – 4,2 мм/с), в пределах которого обеспечиваются высокие показатели прочности и точности Т-образных сварных соединений из углеродистых сталей, и позволяющий определить требования к динамическим свойствам механизмов сжатия машин рельефной сварки /4/.

Рекомендации по практическому использованию результатов:

1. Разработана и защищена патентом РБ на полезную модель конструкция электродного узла с улучшенными условиями охлаждения электродов, позволяющая повысить стойкость электродов и прочность сварных соединений за счет снижения вероятности возникновения несоосности отверстий бобышки и пластины из-за перекоса рабочих поверхностей электродов при их износе [15].

2. Внедрение разработанной технологии контактной рельефной сварки на РУП «Минский тракторный завод» при сварке узлов тракторов «Беларус» МТЗ позволило перейти к использованию «жестких» режимов сварки с использованием электродов из высокостойких дисперсно-упрочненных материалов. При этом достигнуто снижение материальных затрат, обеспечена стабильность прочностных показателей и геометрических параметров сварных соединений (обеспечено сохранение резьбы после выполнения сварочной операции), улучшен товарный вид изделия. Экономический эффект от внедрения научных разработок составил 15,0 млн. руб. в ценах 2008 г.

3. Проведена оценка возможности использования контактной рельефной сварки при производстве узлов лифтов, выпускаемых РУП завод «Могилевлифтмаш». Подтверждено, что результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенные нами, практические рекомендации по выбору параметров режима сварки могут быть применены в производственной практике завода при условии увеличения серийности выпуска продукции. Экономическая целесообразность использования контактной рельефной сварки при производстве узлов пассажирских лифтов, сварка которых в настоящий момент осу-

ществляется дуговыми способами, подтверждается приведенным расчетом. При этом ожидаемый экономический эффект от использования результатов научных разработок может составить более 31 млн. руб. в ценах 2009 г.

4. Экспериментальная установка для регистрации параметров режима рельефной сварки и исследования процесса осадки рельефов используется в учебном процессе ГУВПО «Белорусско-Российский университет» при проведении лабораторных работ по дисциплине «Технология и оборудование сварки давлением», а также при выполнении студенческих НИР.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в научных журналах

1. Бендик, Т.И. Особенности математического моделирования процесса Т-образной рельефной сварки / Т.И. Бендик // Сварка и родственные технологии: респ. межведомственный сборник научных трудов, 2006. – №8. – С.9-13.

2. Березиенко, В.П. Об особенностях математического моделирования процесса контактной рельефной сварки листовых низкоуглеродистых сталей / В.П. Березиенко, С.М. Фурманов, Т.И. Бендик // Вестник Могилевского государственного технического университета.– 2006.– №1.– С. 23-27.

3. Березиенко, В.П. Электротермодеформационный расчёт процессов контактной точечной и рельефной сварки./ В.П. Березиенко, С.М. Фурманов, С.В. Болотов, Т.И. Бендик //Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки.– 2008. – № 8. – С. 77-85.

4. Березиенко, В.П. О кинетике образования сварного соединения при Т-образной рельефной сварке «острой гранью»/ В.П. Березиенко, Т.И. Бендик, Фурманов С.М., Скапцов И.Л. // Сварка и родственные технологии: респ. межведомственный сборник научных трудов, Минск, 2008. – №10. – С. 85-90.

5. Березиенко, В.П. Выбор режимов контактной точечной и рельефной сварки на основе математических моделей процессов/ В.П. Березиенко, С.М. Фурманов, С.В. Болотов, Т.И. Бендик //Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки.– 2009. – № 2. – С. 23-28.

Статьи в зарубежных изданиях

6. Бендик, Т.И. О выборе геометрических характеристик выштампованных рельефов при контактной рельефной сварке нахлесточных соединений/Т.И. Бендик, С.М. Фурманов, Д.И. Якубович // Контактная сварка и другие виды сварки давлением. Технологии и оборудование: материалы 3-го междунауч.-практ. семинара, Санкт-Петербург, 13-15 июня 2006//Институт сварки России.– СПб: ООО «Агенство «ВиТ-Принт», 2006. – С. 19–25.

7. Березиенко, В.П. Перспективы использования математического моделирования для выбора технологических параметров процесса Т-образной рельефной сварки/ В.П. Березиенко, Т.И. Бендик, С.М. Фурманов // Контактная сварка и другие виды сварки давлением. Технологии и оборудование: материалы четвертого международного научно-технического семинара-Санкт-

Петербург, 23-25 октября 2007/Институт сварки России.– СПб: ООО “Агенство “ВиТ-Принт”, 2008. – С.54-59.

Материалы и тезисы конференций

8. Бендик, Т.И. Влияние формы зоны расплавления на прочность соединений, выполняемых контактной точечной и рельефной сваркой/Т.И. Бендик// Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы респуб.науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Могилев, 27 января 2005/ Бел.-Рос. ун-т – Могилев, 2005. – С.120.

9. Бендик, Т.И. О совершенствовании термомодеформационных моделей контактной точечной и рельефной сварки / Т.И. Бендик, В.П. Березиенко, С.М. Фурманов// Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы межд. науч.-техн. конф. в 2 ч, Могилев, 21-22 апреля 2005/ Бел.-Рос. ун-т; редкол.: [и др.]. – Могилев, 2005. Ч. 1.– С. 120-121.

10. Бендик, Т.И. Кинетика образования соединений при рельефной сварке листов из низкоуглеродистых сталей / Т.И. Бендик, А.А. Тимощенко// Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы респ. науч.-техн. конф., 21-22 апреля 2006, Могилев/Бел.-Рос. ун-т, 2006.- С. 84.

11. Бендик, Т.И. Об оптимизации параметров режима контактной рельефной сварки/ Т.И. Бендик, В.П. Березиенко, С.М. Фурманов// Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы межд. науч.-техн. конф., Могилев, 21-22 апреля 2006. /Бел.-Рос. ун-т, 2006.– С. 262–263.

12. Бендик, Т.И. Технологические возможности и перспективы совершенствования процесса контактной рельефной сварки/ Т.И. Бендик// Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы межд. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 24-25 января/Бел.-Рос. ун-т, редкол.: [и др.]. – Могилев, 2007.– С. 8-9.

13. Бендик, Т.И. О форме и размерах рельефов при Т-образной сварке/ Т.И. Бендик// Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы межд. науч.-техн. конф. молодых ученых - Могилев:Бел.-Рос. ун-т, 24-25 января 2007.- С. 44.

14. Бендик, Т.И. О структурных превращениях в зоне соединения при Т-образной рельефной сварке/Т.И. Бендик// Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы международной научно-технической конференции, Часть 2, Могилев, 17-18 апреля 2008г, с.-123-124.

Патенты на полезные модели

15. Электродный узел для контактной точечной и рельефной сварки: патент на полезную модель ВУ 3803, МПК 7 В23К11/14/ Е.Ю. Латыпова, С.Н. Емельянов, С.М. Фурманов, Ю.А. Цумарев, Т.И. Бендик. заявитель ГУВПО “Белорусско – Российский университет”- № 20060890; завл. 27.12.2007; опубл. 01.06.2007//Афицыйны бюл/Нац. центр интел. собственности – 2007- №4-с.125.

РЭЗЮМЕ

Рэльефная зварка Т-вобразных злучэнняў з напраўленай упругапластычнай дэфармацыяй металла

Бэндзік Таццяна Іванаўна

Ключавыя словы: рэльефная зварка, Т-вобразныя злучэнні, форма рэльефа, метады канчатковых элементаў, напраўленая упругапластычная дэфармацыя.

Аб'ект даследавання: Т-вобразныя злучэнні, выкананыя рэльефнай зваркай на правых паверхнях вырабаў.

Мэта даследавання: забяспечэнне патрабуемых трываласных паказальнікаў і дакладнасці геаметрычных параметраў Т-вобразных злучэнняў на аснове стварэння напраўленай упругапластычнай дэфармацыі металлу.

У дысертацыйнай рабоце прапанованы новы падход да доследу працэсу ўтварэння злучэнняў пры рэльефнай зварцы, які адрозніваецца выкарыстаннем канчаткова-элементнага пакрокавага аналізу электрычных, тэмпературных і дэфармацыйных палёў з улікам змянення электрычных і цеплавых супраціўленняў кантактаў, а таксама магчымасцю забяспечэння збежнасці вылічальнага працэсу пры значных пластычных дэфармацыях металла рэльефа, які дазволіў усталяваць новыя ўзаемасувязі параметраў рэжыму зваркі з геаметрычнымі характарыстыкамі і трываласнымі паказальнікамі злучэнняў.

На аснове матэматычнай мадэлі і эксперыментальных доследаў прапанавана навукова абаснаваная метадыка выбару тэхналагічных параметраў рэжыму рэльефнай зваркі Т-вобразных злучэнняў, якая ўлічвае дынамічнае змяненне памераў кантактнай паверхні ў працэсе асадка рэльефа. Прапанаваны матэматычныя залежнасці для вызначэння памераў рэльефаў, формы і велічыні зварачнага току, працягласці праходжання і нарастання зварачнага току, якія ўлічваюць тып зварнога злучэння, яго геаметрычныя памеры, і дазваляюць вызначыць параметры рэжыму зваркі, якія забяспечваюць патрабуемую трываласць і дакладнасць Т-вобразных зварных злучэнняў.

Тэарэтычна ўстаноўлены і эксперыментальна пацверджаны дыяпазон хуткасці асадка рэльефаў, у межах якога забяспечваюцца напраўленая упругапластычная дэфармацыя металлу, высокія паказальнікі трываласці і дакладнасці Т-вобразных зварных злучэнняў.

Прапанавана новая форма рэльефу, якая забяспечвае напраўленую ўпругапластычную дэфармацыю металла, патрабуемую дакладнасць геаметрычных характарыстык пры захаванні высокіх і стабільных трываласных паказальнікаў зварных злучэнняў з-за павялічэння пляцы зваркі і змяншэння зазору паміж дэталямі.

РЕЗЮМЕ

Рельефная сварка Т-образных соединений с направленной упругопластической деформацией металла

Бендик Татьяна Ивановна

Ключевые слова: рельефная сварка, Т-образные соединения, форма рельефа, метод конечных элементов, направленная упругопластическая деформация.

Объект исследования: Т-образные соединения, выполняемые рельефной сваркой.

Цель исследований: обеспечение требуемых прочностных показателей и точности геометрических параметров Т-образных соединений на основе создания направленной упругопластической деформации металла.

В диссертационной работе предложен новый подход к исследованию процесса образования соединений при рельефной сварке, отличающийся использованием конечно-элементного пошагово-совмещенного анализа электрических, температурных и деформационных полей с учетом изменения электрических и тепловых сопротивлений контактов, а также возможностью обеспечения сходимости вычислительного процесса при значительных пластических деформациях металла рельефа, позволивший установить новые взаимосвязи параметров режима сварки с геометрическими характеристиками и прочностными показателями соединений.

На основе математической модели и экспериментальных исследований предложена научно обоснованная методика выбора технологических параметров режима рельефной сварки Т-образных соединений, учитывающая динамическое изменение размеров контактной поверхности в процессе осадки рельефа. Предложены математические зависимости для определения размеров рельефов, формы и величины сварочного тока, длительности протекания и нарастания сварочного тока, которые учитывают тип сварного соединения, его геометрические размеры, и позволяют определить параметры режима сварки, обеспечивающие требуемую прочность и точность Т-образных сварных соединений.

Теоретически установлен и экспериментально подтвержден диапазон скоростей осадки рельефов, в пределах которого обеспечиваются направленная упругопластическая деформация металла, высокие показатели прочности и точности Т-образных сварных соединений.

Предложена новая форма рельефа, обеспечивающая направленную упругопластическую деформацию металла, требуемую точность геометрических характеристик при сохранении высоких и стабильных прочностных показателей сварных соединений из-за увеличения площади сварки и уменьшения зазора между деталями.

SUMMARY

T-joint projection welding with directed elastic-plastic deformation of the metal

Bendik Tatiana Ivanovna

Key words: projection welding, T-joints, projection shape, finite element method, directed elastic-plastic deformation.

Object of a research: projection welded T-joints.

The purpose of work: the providing of the T-joints strength properties and demanded geometrical parameters accuracy on the base of metal directed elastic-plastic deformation creation.

New approach to research the projection welding joints formation process has been established in this work. This approach is allowed to establish new interrelations between welding parameters, projection geometrical characteristics and strength properties of the T-joints and different by using the coupled electric thermal deformation finite element analysis taking into account changing electric and thermal resistance of contacts, and also the possibility of providing of the computing process convergence at considerable plastic deformations of the projection.

Because of mathematical model and experimental researches scientifically have been founded the method of the technological welding parameters choice, considering by dynamic change of the contact surface sizes during projection upset process. Have been offered the mathematical dependences for definition of the projection sizes, welding current, welding time which consider type of welded joints, it geometric sizes, and allow to define welding parameters providing demanded durability and accuracy of the projection welding T-joint.

Have been offered the theoretically established and experimentally confirmed projection upset speed range in which limits are provided directed elastic-plastic metal deformation, high strength properties and accuracy of the projection welding T-joint.

Have been offered the new projection shape providing directed elastic-plastic metal deformation, demanded accuracy geometrical characteristics at preservation high and stable strength parameters of welded joints because of welding area increasing and reduction of the backlash between welded details.

БЕНДИК Татьяна Ивановна

**РЕЛЬЕФНАЯ СВАРКА Т-ОБРАЗНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
С НАПРАВЛЕННОЙ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ
МЕТАЛЛА**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.03.06 – «Технологии и машины сварочного производства»

Подписано в печать 08.04.2009 г. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,4. Уч.-изд.л. 1.54. Тираж 60 экз. Заказ № 251.

Издатель и полиграфическое исполнение
Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет»
ЛИ № 02330/375 от 29.06.2004 г.
212000, г. Могилев, пр. Мира, 43

© ГУВПО «Белорусско-Российский
университет», 2009

Электронная библиотека
Белорусско-Российского университета