

Булычев Всеволод Валериевич

**РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРИИ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПУТЕЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
СТАБИЛЬНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОНЫ
СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ
ПРИВАРКЕ ПРОВОЛОКИ**

Специальность 05.02.10 - Сварка, родственные процессы и технологии

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Москва - 2012

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
НЕРОВНЫЙ Вячеслав Михайлович

доктор технических наук
МЕНЬШИКОВ Геннадий Аркадьевич

доктор технических наук, с.н.с.
ДРАГУНОВ Виктор Карпович

Ведущая организация – Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка (ГНУ ГОСНИТИ), г. Москва

Защита состоится « 21 » июня 2012 г. на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени Н.Э. Баумана.

Телефон для справок: 267-09-63.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1997081

Булычев В.В. Разработка эле

Автореферат разослан « 10 » мая 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., доцент

А.В. Коновалов

21/6

Актуальность проблемы

Процесс электроконтактной приварки (ЭКП) проволоки является одним из перспективных способов восстановления деталей машин различного назначения: путевых машин и подвижного состава, автотракторных деталей, деталей энергетического оборудования и т.д. Сварное соединение между металлами при ЭКП образуется за счет нагрева импульсами тока и совместного пластического деформирования привариваемого металла и поверхностного слоя детали. Высокая прочность соединения металлопокрытия с деталью может быть достигнута без расплавления соединяемых металлов, что выгодно отличает процесс ЭКП от технологий дуговой наплавки. Отсутствие перемешивания присадочного и основного металлов, минимальное тепловложение в деталь, возможность наращивания слоев металла различной толщины и химического состава позволяет обеспечить высокие эксплуатационные свойства восстановленных поверхностей, снизить материальные и трудовые затраты. Исследованию и совершенствованию процесса ЭКП посвящены многочисленные работы Э.С. Каракозова, Ю.В. Клименко, Р.А. Латыпова, Б.А. Молчанова, А.В. Поляченко, В.А. Емельянова, В.Б. Шляпина, В.А. Дубровского, М.Н. Фархшатава, М.З. Нафикова и других авторов.

Однако существенной проблемой при промышленном использовании ЭКП является обеспечение повторяемости и стабильности параметров качества формируемого металлопокрытия, прежде всего его структуры и прочности соединения с основным металлом.

Особенностью ремонтного производства является его единичный и мелкосерийный характер, что затрудняет отработку режимов на образцах-свидетелях. Имеющиеся справочные данные не позволяют без предварительных экспериментов для каждой конкретной детали определить оптимальные режимы ЭКП, обеспечивающие заданные показатели восстановленной поверхности. Назначение режимов ЭКП с пониженным тепловложением приводит к снижению прочности соединения приваренного и основного металлов, завышение тепловложения – к образованию очагов плавления с дефектами сплошности в виде трещин, пор, включений металла электрода.

Снижение стабильности формирования покрытия при ЭКП в значительной мере вызывается резкими изменениями мощности теплового источника из-за изменения площади контакта между роликовым электродом и проволокой в течение термомеханического цикла ЭКП, наличия следов износа на рабочей поверхности роликового электрода, изменения усилия прижатия роликовых электродов, попадания в зону приварки оксидных пленок, жировых и масляных загрязнений.

Возникающие дефекты структуры приваренного металла затрудняют проведение последующих операций технологического процесса восстановления изношенных деталей машин, связанных с силовым или термическим воздействием: обработку поверхностно-пластическим деформированием, локальную дуговую наплавку.

В представленной работе проблема обеспечения повторяемости и стабильности параметров качества формируемого металлопокрытия решается на основе снижения доли тепловой и повышения доли механической энергии в общем балансе энергии активации образования сварного соединения, что позволяет избежать возникновения очагов плавления при обеспечении высокой прочности соединения приваренного и основного металлов. Такой подход требует разработки математической модели для количественной оценки совместного влияния теплового и механического видов энергии сварки на прочность получаемого ЭКП соединения металлов, проведения исследований тепловых и деформационных процессов в зоне приварки.

Цель и задачи исследования

Целью работы является повышение эффективности восстановления деталей машин с применением процесса электроконтактной приварки проволоки за счет повышения стабильности формирования зоны соединения между приваренным и основным металлами.

Для достижения указанной цели были решены следующие задачи:

1. Разработана математическая модель и на ее основе выполнено исследование особенностей механизма образования соединения между металлами при ЭКП, включая расчетную оценку прочности получаемого соединения;
2. Исследованы основные закономерности формирования физического контакта между роликовым электродом, проволокой и поверхностью детали, разработаны технологические мероприятия по предотвращению контактного плавления привариваемого металла;
3. Исследованы основные закономерности и способы интенсификации проскальзывания привариваемой проволоки по поверхности детали, выявлено влияние проскальзывания на прочность соединения проволоки с основным металлом;
4. Исследованы особенности формирования межвитковых и межслойных соединений и разработаны технологические мероприятия по повышению стабильности формирования сплошного металлопокрытия;
5. Разработано оборудование и технологические мероприятия по повышению эффективности восстановления деталей машин с применением процесса ЭКП.

Методы исследования

Поставленные задачи решены сочетанием экспериментальных и теоретических методов исследований. Для теоретического исследования механизма соединения металлов с получением количественных оценок его прочности разработана математическая модель образования соединения при ЭКП, основанная на дислокационной модели образования соединения металлов при сварке давлением и основных положениях теории дислокаций. Адекватность модели подтверждена сопоставлением результатов расчетов с известными экспериментальными данными. Экспериментальное исследование процесса ЭКП выпол-

няли на установке УЭН-01, оснащенной разработанной сварочной головкой ГКПО-01 и сопутствующей технологической оснасткой. Силу тока приварки замеряли с помощью индуктивного датчика. Исследования электротепловой обстановки в зоне ЭКП были выполнены с применением метода конечных элементов. Структура зоны соединения была исследована посредством оптической микроскопии. Замеры микротвердости образцов проводили на приборе ПМТ-3М. Теоретическое исследование деформирования привариваемого металла выполнено на основе основных положений теории пластичности металлов. Экспериментальное исследование деформирования привариваемого металла выполняли посредством замеров геометрических размеров единичных валиков, а также осаживаемых свинцовых моделей с нанесенной координатной сеткой. Результаты экспериментов подвергали обработке методами математической статистики.

Научная новизна работы

Научная новизна связана с исследованием механизма образования соединения металлов при ЭКП проволоки и особенностей формирования сплошного металлопокрытия, получаемого перекрытием смежных валиков приваренного металла. Установлено, что

1. Образование сварного соединения является термодинамически вероятным в том случае, если уменьшение свободной энергии системы из-за исчезновения свободных поверхностей соединяемых металлов превышает ее рост вследствие возникновения искажения кристаллической решетки металлов вдоль границ возникающих очагов схватывания. Такой характер изменения свободной энергии обуславливает наличие минимального, термодинамически устойчивого размера очага схватывания, зависящего от физических свойств и температуры соединяемых металлов. Очаги схватывания меньших размеров являются термодинамически неустойчивыми и самопроизвольно разрушаются.

2. Между склонностью металлов к образованию сварного соединения при холодной сварке, определяемой по требуемой степени пластического деформирования $\epsilon_{\min}$, и критической температурой T_{cr} , определяемой из условия образования термодинамически устойчивого единичного очага схватывания, существует функциональная зависимость, что позволяет использовать T_{cr} для оценки склонности металлов к образованию сварного соединения.

3. Зависимость относительной прочности соединения металлов от температуры, которая при ЭКП определяет степень пластической деформации привариваемой проволоки, в общем случае состоит из трех характерных участков. Первый участок характеризуется интенсивным приростом относительной прочности, обеспечивающимся в основном за счет роста плотности активных центров при мало меняющихся размерах очагов схватывания. На втором участке интенсивность прироста относительной прочности снижается за счет уменьшения интенсивности образования активных центров. На третьем участке скорость роста относительной прочности вновь повышается за счет интенсивного увеличения размеров очагов схватывания при мало меняющейся плотности ак-

тивных центров. Полученная зависимость позволяет выполнить количественную оценку относительной прочности соединения приваренного и основного металла в зависимости от режимов ЭКП.

4. Повышение прочности соединения при увеличении пути скольжения привариваемого металла по подложке вследствие его пластического деформирования определяется, прежде всего, повышением плотности дислокаций и, соответственно, повышением плотности активных центров вследствие многократной пластической деформации микровыступов контактирующих металлов в условиях действия касательных напряжений, снижающих уровень напряжений деформирования.

5. При увеличении мощности и продолжительности импульсов тока приварки в условиях подачи в зону приварки охлаждающей воды, с удалением от поверхности детали суммарный объем разупрочненных зон возрастает из-за постоянного выделения теплоты в объеме основного металла при прохождении тока приварки и интенсивного теплоотвода с поверхности детали.

Положения, выносимые на защиту

1. Модель образования соединения между металлами при ЭКП, а также методика расчетной оценки размеров единичных очагов схватывания, плотности активных центров и относительной прочности получаемого соединения

2. Механизм и методика расчетной оценки влияния проскальзывания привариваемого металла на прочность получаемого соединения.

3. Особенности деформирования привариваемого металла в зависимости от условий ЭКП.

4. Механизм формирования межвитковых соединений при ЭКП.

5. Особенности формирования разупрочненных зон в основном металле

6. Технологические схемы и приемы, направленные на повышение стабильности и повторяемости свойств формируемых металлопокрытий.

Практическая значимость работы

Сформулированы температурно-деформационные условия обеспечения высокой прочности соединения металлов при ЭКП, что позволяет целенаправленно управлять режимами ЭКП с целью обеспечения заданных эксплуатационных показателей восстанавливаемых деталей.

Разработаны технологические мероприятия и схемы ЭКП, позволяющие повысить стабильность и повторяемость свойств покрытий на основе снижения доли тепловой и повышения доли механической энергии в общем балансе энергии активации образования сварного соединения.

Разработаны технологические мероприятия и схемы ЭКП по снижению пиковых значений мощности тепловыделения в зоне ЭКП и предотвращению случаев локального плавления привариваемого металла.

Разработаны технологические рекомендации по подбору режимов ЭКП и формирования сплошного металлопокрытия, получаемого перекрытием смежных валиков приваренного металла.

Разработано элементы технологического оборудования, использованные при изготовлении установок ЭКП, реализации разработанных схем ЭКП и проведении последующих технологических операций.

Результаты проведенных исследований использованы при разработке технологий восстановления более 600 наименований деталей машин путевых машин и подвижного состава, автотракторной техники, энергетического и технологического оборудования номенклатур ОАО «Калугапутьмаш», «Ярославского электровозоремонтного завода», ОАО «Калугатехремонт», автотранспортных и сельскохозяйственных предприятий Калужской области. Результаты исследований использованы при разработке установок ЭКП и сопутствующей технологической оснастки, поставленных 25 предприятиям РФ.

Апробация работы

Результаты работы доложены и обсуждены на Всероссийских научно-технических конференциях в г. Калуге (1998 – 2011 г.г.), на международных конференциях: Киев (2005 г.), Санкт-Петербург (2005, 2006, 2010, 2011 г.г.), Харьков (2005, 2006 г.г.), Донецк (2008 г.), Москва, Курск (2010 г.), на научных семинарах кафедр «Технологии сварки», «Автомобиле- и тракторостроение» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана (2010, 2011 г.г.), кафедры «Металлургия сварочных процессов» Московского государственного вечернего металлургического института, кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана (2011 г.).

Публикации

По результатам работы над диссертацией автором опубликованы более 50 печатных работ, из них 22 работы в журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Диссертация содержит 209 листов, в том числе 120 рисунков и 5 таблиц. Список литературы состоит из 283 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, показана необходимость развития теоретических представлений о механизме образования соединения между металлами при ЭКП и разработки научно обоснованных технологических мероприятий, направленных на повышение стабильности и повторяемости показателей качества восстановленных деталей машин, снижения материальных и трудовых затрат при подборе режимов приварки и выявления причин брака. Кратко отражено основное содержание диссертационной работы.

Первая глава посвящена анализу современного состояния теории и практики ЭКП компактных материалов. Рассмотрены основные способы ЭКП

компактных материалов и используемое технологическое оборудование. Показано, что одним из основных показателей качества нанесенных металлопокрытий является прочность соединения приваренного и основного металлов. На основании работ Э.С. Каракозова, Ю.В. Клименко, Б.А. Молчанова, Р.А. Латыпова, М.З. Нафикова, и других авторов сделан вывод о том, что высокая прочность соединения металлов при ЭКП может быть достигнута без их расплавления. Результаты экспериментальных исследований, выполненных указанными авторами, свидетельствуют о сильном влиянии на прочность соединения таких параметров, как сила и продолжительность импульса тока приварки, шероховатость поверхности детали, диаметр роликового электрода.

Проведенные предварительные эксперименты показали, что назначение режимов ЭКП с пониженным тепловложением часто приводит к формированию зоны соединения с регулярно повторяющимися дефектами (рис.1), что можно объяснить неравномерным распределением температур и условий пластической деформации привариваемого металла в зоне образования сварного соединения.

В процессе ЭКП колебания силы тока при формировании смежных площадок приваренного металла могут достигать 20...30%. Чрезмерное увеличение тепловыделения вследствие преднамеренно установленных режимов ЭКП, либо вызванное случайными колебаниями силы тока в процессе ЭКП, приводит к возникновению очагов плавления с образованием дефектов сплошности в виде пор, трещин, включений металла роликовых электродов (рис. 2).

Теоретическое рассмотрение вопроса формирования соединения между металлами при ЭКП базируется на положении о трех стадиях образования сварного соединения без расплавления металлов, обоснованных в работах М.Х. Шоршорова, Ю.Л. Красулина. Ю.В. Клименко, Р.А. Латыповым показано, что достаточная эксплуатационная надежность деталей с металлопокрытиями зачастую обеспечивается на стадии схватывания, т.е. формирования соединения с ориентированной в плоскости контакта межзеренной границей.



Рис. 1. Зона соединения приваренного и основного металлов с регулярно возникшими дефектами (x 60)

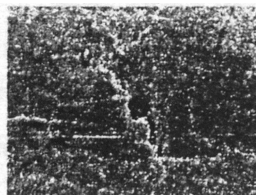


Рис.2. Дефекты сплошности в слое приваренного металла (x 140)

Исследованию природы и механизма образования соединения металлов при сварке давлением посвящены работы С.Б. Айбиндера, А.П.Семенова,

М.Х. Шоршорова, Б.И. Костецкого, И.П. Ивженко, Ю.Л. Красулина, А.С. Гельмана, Э.С. Каракозова, В.П. Алехина, Н.Ф. Казакова, Р.А. Мусина, Г.В. Коношкова. Большинство исследователей отмечается важная роль поверхностных дефектов кристаллической решетки соединяемых металлов. В качестве оценки прочности сварного соединения часто принимают относительную прочность $\bar{\tau}$

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_{св}}{\tau_{осн}}, \quad (1)$$

где $\tau_{св}$ - прочность полученного сварного соединения; $\tau_{осн}$ - прочность компактного металла.

Процесс ЭКП проволоки относится к способам сварки давлением со среднеинтенсивным силовым воздействием. Величина деформирования проволоки достигает 60...70% и осуществляется за сотые и десятые доли секунды. При таких условиях деформирования основными дефектами кристаллической решетки металлов являются дислокации. Согласно дислокационной модели, соединение металлов по плоскости контакта формируется из отдельных очагов схватывания, возникающих в местах выхода дислокаций. В этом случае относительная прочность $\bar{\tau}$ может быть определена, как

$$\bar{\tau} = \rho_a s, \quad (2)$$

где ρ_a - плотность активных центров; s - площадь одного очага схватывания.

Для теоретического исследования механизма образования соединения при сварке давлением с низкоинтенсивным силовым воздействием Э.С. Каракозовым с сотрудниками разработан ряд математических моделей, базирующихся, по сути, на следующих основных положениях:

- а) устойчивый очаг схватывания возникает в каждом месте выхода на поверхность металла дислокации независимо от температуры сварки;
- б) увеличение плотности активных центров ρ_a определяется увеличением плотности дислокаций в деформируемом металле вследствие его деформационного упрочнения.

Предположение а) исключает из рассмотрения термический канал активации образования очага схватывания, что для способов сварки давлением с подогревом представляется мало обоснованным. Принятие этого допущения приводит к возможности образования сварного соединения между любыми металлами независимо от температуры сварки, при этом прочность соединения определяется количеством активных центров. На стадии схватывания роль температуры сварки сводится к влиянию на процессы деформирования микронеоднородностей контактирующих поверхностей, описываемых с позиции неустановившейся ползучести. Под активацией поверхности понимается, соответственно, увеличение количества активных центров.

Допущение б) при рассмотрении процесса ЭКП является недопустимым, так как деформирование привариваемого металла является следствием упрочнения из-за постоянного повышения температуры в течение термомехани-

ческого цикла приварки. Поэтому объяснить рост прочности при увеличении осадки за счет деформационного упрочнения не представляется возможным.

Методика количественной оценки s в анализируемых моделях сводится к следующему:

- экспериментально определяются значения $\bar{\tau}$ в зависимости от времени сварки;
- выполняется прогнозирование приращения плотности дислокаций в деформируемом металле и на этой основе прогнозируется плотность активных центров ρ_a ;
- по зависимости (2) выполняется оценка s .

Таким образом, известные математические модели не позволяют выполнить непосредственную количественную оценку $\bar{\tau}$, а величина s оказывается зависимой от принятой методики оценки ρ_a . Полученные значения s предлагается использовать для оценки энергетического барьера, необходимого для схватывания металлов в области активного центра. С этой целью рассмотрена краевая дислокация с распределением энергии по модели Пайерлса-Набарро. Задавшись значением s в предположении осевой симметрии очага схватывания находится его радиус и, по модели Пайерлса-Набарро, соответствующее этому радиусу значение энергии искажения кристаллической решетки. Эта энергия и принимается за значение искомого энергетического барьера. Ошибочность такого подхода к определению энергетического барьера заключается, на наш взгляд, в ничем не обоснованном для способов сварки давлением с подогревом исключении из рассмотрения термического канала активации.

Попытка получить количественные оценки влияния термического и механического видов энергии сварки на прочность сварного соединения была предпринята К.А. Кочергиным. Согласно развиваемым К.А. Кочергиным представлениям, вся механическая энергия пластического деформирования свариваемых металлов приравнивается к тепловой и полагается равномерно распределенной по площади контакта. Однако, как отмечает ряд исследователей, результаты расчетов часто мало соответствуют экспериментальным данным. Причиной этого, на наш взгляд, является пренебрежение дискретностью распределения механической энергии в деформируемом металле, связанной с образованием и движением дислокаций и других дефектов кристаллической решетки.

Ю.Л. Красулиным выполнена расчетная оценка энергии, выносимой дислокациями на поверхность деформируемого металла. Эта энергия приравнивалась к тепловой. Однако при оценке возникающих на поверхности температур механическая энергия также предполагалась равномерно распределенной по всей поверхности. Следствием этого явился вывод о незначительном влиянии энергии дислокаций на среднюю температуру поверхности при способах сварки с низко – и среднеинтенсивным силовым воздействием, что не позволило более глубоко вскрыть роль дефектов кристаллической решетки в образовании сварного соединения.

Следствием пренебрежения ролью дефектов кристаллической решетки в образовании сварного соединения, по нашему мнению, является широкое распространение оценки термодинамической вероятности образования твердофазного соединения между однородными металлами в виде:

$$\Delta F = F_{\text{ср}} - 2F_n < 0, \quad (3)$$

где ΔF - изменение свободной энергии системы, $F_{\text{ср}}$ - свободная энергия межзеренной границы, F_n - свободная энергия поверхности.

Условие (3) никак не учитывает неравномерность распределения механической энергии по контактирующим поверхностям и, по сути, соответствует пленочной гипотезе образования сварного соединения, изложенной в работах И.Р. Уайтхэда, С.Б. Айбиндера с сотрудниками. Согласно условию (2) сварное соединение между металлами должно образовываться самопроизвольно при любых температурах после формирования физического контакта между ювениальными поверхностями.

Таким образом, известные теоретические модели не позволяют выполнить количественную оценку совместного влияния термического и механического видов энергии сварки на прочность получаемого соединения на стадии схватывания. Применение ряда теоретических подходов для оценки прочности сварного соединения, разработанных при исследовании способов сварки с низкоинтенсивным силовым воздействием, для описания процесса ЭКП представляется некорректным.

Вторая глава посвящена разработке математической модели образования соединения металлов при ЭКП и теоретическому исследованию влияния тепловой и механического видов энергии на прочность сварного соединения.

В качестве оценки прочности соединения приняли относительную прочность $\bar{\tau}$, рассчитываемую по зависимости (2). При расчете s принимали, что образование химических связей между металлами происходит в некоторой окрестности R_U активного центра с уровнем энергии $U \geq E_a$, где E_a - энергия активации образования сварного соединения. При расчете U учитывали не только энергию упругого поля дефекта кристаллической решетки U_δ , но и тепловую энергию сварки U_T , а также механическую энергию U_M упругого сжатия соединяемых поверхностей сварочным усилием (рис. 3)

$$U = U_\delta + U_T + U_M. \quad (4)$$

Величину U_δ находили для случая краевой дислокации по модели Пайерлса-Набарро. Тепловую составляющую энергии сварки U_T определили через постоянную Больцмана k и температуру T . Механическую энергию U_M упругого сжатия свариваемых поверхностей определили на основании закона Гука. На основании принципа эквивалентности теплового и механического видов энергии активации приняли, что энергия активации составляет $E_a = kT_{пл}$ (где $T_{пл}$ - температура плавления).

ниже которой соединение металлов с реальной прочностью достигнуто быть не может. Для ответа на этот вопрос была рассмотрена термодинамическая вероятность образования твердофазного соединения. Был рассмотрен единичный очаг схватывания с радиусом R при сварке двух "идеальных" кристаллов (рис.4).

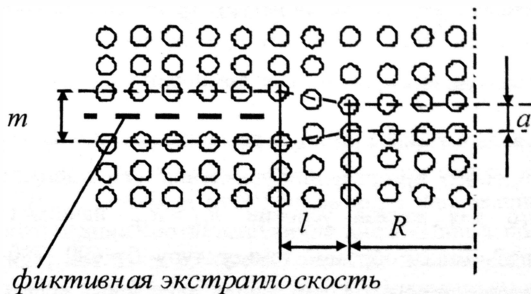


Рис.4. Модель очага схватывания

Наличие химических связей в пятне схватывания свидетельствует о том, что поверхностные атомы двух тел сближены до величины периода кристаллической решетки a . Отсутствие химической связи вне этого пятна говорит о том, что поверхностные атомы тел удалены друг от друга на некоторое расстояние $m > a$. Изменение расстояния между поверхностными атомами двух тел в некоторой зоне l перехода от очага схватывания к свободным поверхностям должно вызывать появление упругих искажений кристаллической решетки, убывающих с удалением от границы очага схватывания. С учетом сказанного, изменение свободной энергии системы ΔF при образовании очага схватывания должно учитывать не только ее уменьшение на величину $\Delta F_s = F_{zp} - 2F_n$, но и увеличение на некоторую величину ΔF_l за счет искажения кристаллических решеток свариваемых тел у границы образующегося очага схватывания $\Delta F = -\Delta F_s + \Delta F_l$.

Критическое значение радиуса очага схватывания $R_{кр}$, при превышении которого образующиеся очаги схватывания являются термодинамически устойчивыми, соответствует условию $\frac{d(\Delta F)}{dR} = 0$. Представляя границу очага схватывания в виде призматической дислокации (Дж. Хирт и И. Лоте) с фиктивной экстраплоскостью между свободными поверхностями (рис.4), получили

$$\Delta F = -\pi R^2 (2f_n - f_{zp}) + \pi R \frac{Gb_\phi^2}{2(1-\mu)} \left(\ln \frac{32R}{b_\phi} - 1 \right), \quad (7)$$

где f_n, f_{zp} - удельные свободные энергии поверхности и межзеренной границы соответственно, b_ϕ - вектор Бюргерса фиктивной призматической дислокации.

$$R_{кр} \approx 1,25 \frac{Gb\phi^2}{\pi(1-\mu)(2f_n - f_{зр})}. \quad (8)$$

Условием образования устойчивых очагов схватывания является выполнение неравенства $\frac{R_U}{R_{кр}} \geq 1$. Температуру, приводящую к выполнению условия

$$\frac{R_U}{R_{кр}} = 1, \text{ обозначили как критическую температуру } T_{кр}.$$

Сопоставление значений R_U , рассчитанных по зависимости (5), и $R_{кр}$, численно найденных при решении уравнения (7), в допущении $b_\phi = b = a$, показывает, что для железа условие $R_U > R_{кр}$ начинает выполняться при $T > 600...700^\circ\text{C}$. Таким образом, температуру $T \approx 600...700^\circ\text{C}$ можно рассматривать в качестве пороговой для сварки давлением железа, что согласуется с экспериментальными данными, приведенными в работах А.С. Гельмана, Н.Ф. Казакова. Другим подтверждением существования $R_{кр}$ и $T_{кр}$ является то, что расположение таких металлов, как *Au*, *Ag*, *Al*, *Cu*, в порядке возрастания критической температуры $T_{кр}$ совпадает с известной (А.С. Гельман), экспериментально установленной склонностью к образованию сварного соединения при холодной сварке, определенной по требуемой степени пластического деформирования $\epsilon_{\min}$. Металлы с более низкими значениями $T_{кр}$ требуют для образования сварного соединения меньшей пластической деформации. Сопоставление $T_{кр}$ и $\epsilon_{\min}$ выявило наличие линейной зависимости между $\epsilon_{\min}$ и $T_{кр}$ с коэффициентом корреляции 0,95 (рис. 5)

$$\epsilon_{\min} = 32 + 0,1T_{кр}. \quad (9)$$

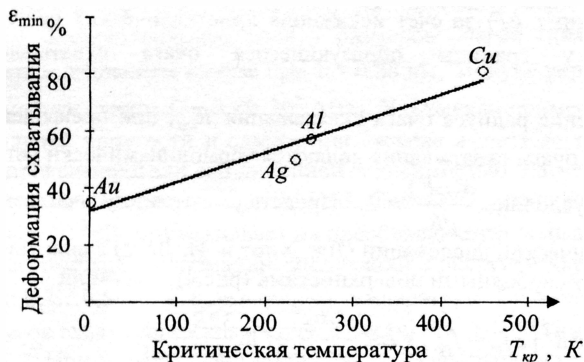


Рис. 5. Зависимость между $\epsilon_{\min}$ и $T_{кр}$

Увеличение степени пластического деформирования соединяемых металлов сопровождается ростом плотности дислокаций и, следовательно, повышением плотности активных центров. Уменьшение расстояний между активными центрами должно приводить к обрезанию полей упругих деформаций

фиктивных призматических дислокаций и уменьшению свободной энергии границ очагов схватывания ΔF_l , обеспечивая образование термодинамически устойчивых очагов схватывания при меньших температурах. Таким образом, для данных металлов увеличение степени пластической деформации равносильно повышению температуры нагрева, что и отражает зависимость (9).

Для железа при температурах $T_{кр} \approx 600...700$ °C расчеты дают значения $R \approx R_{кр} \approx 3a$. Следовательно, при расчете относительной прочности $\bar{\tau}$ по зависимости (2) для сталей следует использовать только площади очагов схватывания s , соответствующих условию $R_U > 3a$.

Для расчета плотности активных центров была принята следующая физическая модель их образования. Известно, что в процессе пластической деформации на поверхности соединяемых металлов выходят дислокации. После образования очагов схватывания соответствующие дислокации в поверхностном слое металла аннигилируют. В то же время, развитие пластического деформирования привариваемого металла сопровождается образованием и выхода на поверхность новых дислокаций. Таким образом, плотность активных центров оказывается большей, чем плотность дислокаций в металле в каждый конкретный момент времени. Согласно изложенной модели, рост количества активных центров зависит не только от плотности дислокаций, но и от величины пластической деформации.

На основании дислокационной теории пластического деформирования металлов получена зависимость, связывающая плотность дислокаций ρ с температурой пластического деформирования T

$$\rho = \left(\frac{0,5\sigma_{m,0}}{AbG} \right)^2 \left(1 - \frac{T}{T_{nl}} \right)^4, \quad (10)$$

где $\sigma_{m,0}$ - предел текучести при 20 °C.

Расчеты по выражению (10) показывают резкое снижение ρ с увеличением T . Полагая, что количество вышедших на поверхность новых дислокаций пропорционально отношению $\frac{\Delta h}{L}$ (где Δh - приращение величины деформирования привариваемого металла; L - расстояние пробега дислокации), а также, что расстояние между дислокациями $L = \rho^{-0,5}$, получили

$$\rho_a = B \sum_{i=1}^N \left(\frac{\sigma_{m,0}}{AbG} \right)^3 \left(1 - \frac{T_i}{T_{nl}} \right)^6 \Delta h_i, \quad (11)$$

где ρ_a - плотность активных центров; B - поправочный коэффициент, учитывающий погрешности схематизации принятой модели изменения ρ_a ; T_i - температура на i -м шаге вычислений; N - количество шагов вычислений.

В качестве начальной температуры приняли $T_0 = 700$ °C, как соответствующей началу образования термодинамически устойчивых очагов схватыва-

ния. Расчеты по выражению (11) показывают увеличение плотности активных центров ρ_a с повышением T несмотря на снижение ρ .

Результаты выполненных расчетов $\bar{\tau}$ сопоставили с известными экспериментальными данными, приведенными в работах Э.С. Каракозова с сотрудниками. Использовали результаты экспериментов, полученные при продолжительности импульса тока приварки $t=0,02$ с, чтобы, по возможности, исключить влияние на прочность соединения диффузионных процессов и ограничиться рассмотрением только стадии схватывания. Сопоставление теоретических и расчетно-экспериментальных зависимостей $\bar{\tau} = f(T)$ показывает их хорошее совпадение для случая $b=a$ (рис.6). Относительная прочность $\bar{\tau}$ меняется от $\bar{\tau}=0,17$ при $T=700^\circ\text{C}$ до $\bar{\tau}=1$ при $T=1350^\circ\text{C}$. При изменении температуры от 700°C до 1000°C $\bar{\tau}$ повышается примерно в 3 раза. В этом же температурном диапазоне наблюдается и 3-х кратное повышение плотности активных центров ρ_a . Такое сопоставление указывает на то, что в этом температурном диапазоне прочность соединения повышается преимущественно за счет повышения количества активных центров. Площади s очагов схватывания увеличиваются незначительно, что объясняется резким падением энергии упругой деформации кристаллической решетки вблизи дислокаций при относительно незначительном вкладе в энергетический баланс тепловой энергии.

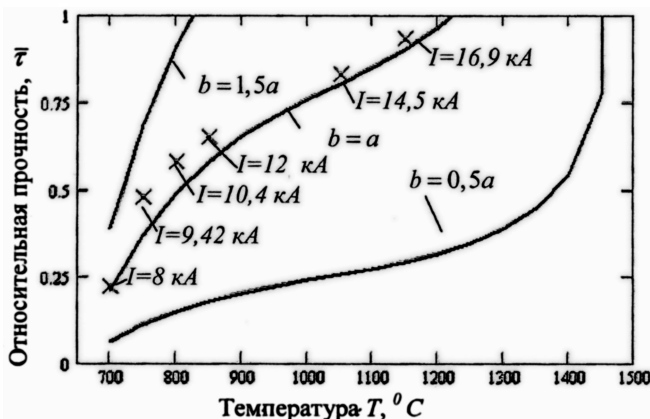


Рис.6. Зависимость $\bar{\tau}$ от температуры T и вектора Бюргерса b дислокации:

- - теоретические кривые
- x - расчетно-экспериментальные значения с использованием известных данных

В диапазоне температур от 1000°C до 1200°C имеет место дальнейший, но более замедленный, рост $\bar{\tau}$. Такой характер изменения $\bar{\tau}$ определяется, с одной стороны, замедлением роста ρ_a вследствие значительного снижения

плотности дислокаций ρ в соединяемых металлах, и, с другой стороны, более значительным увеличением s из-за повышения доли тепловой энергии в общем энергетическом балансе. При дальнейшем повышении температуры (для кривой $b = 0,5a$) вновь наблюдается увеличение интенсивности прироста $\bar{\tau}$ из-за преобладающего влияния на s тепловой энергии, при этом очевидно, что при $T \rightarrow T_{нл}$ имеет место $s \rightarrow \infty$.

Таким образом, в общем случае кривая роста относительной прочности соединения, получаемого при ЭКП проволоки, в зависимости от температуры состоит из 3-х характерных участков (рис.7).

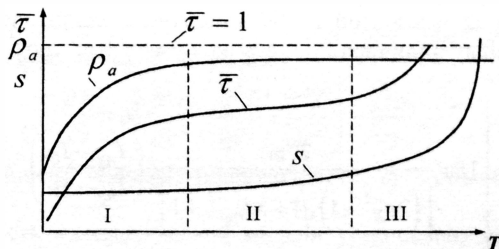


Рис. 7. Обобщенная кривая зависимости относительной прочности от температуры

Область 1 характеризуется интенсивным приростом относительной прочности, обеспечивающимся в основном за счет роста плотности активных центров при мало меняющихся размерах очагов схватывания. В области 2 интенсивность прироста несколько ниже за счет уменьшения интенсивности образования активных центров. В области 3 интенсивность прироста относительной прочности снова возрастает за счет интенсивного увеличения размеров очагов схватывания при мало меняющейся плотности активных центров. Таким образом, обеспечить высокую прочность соединения металлов при снижении количества вводимой в зону приварки тепловой энергии можно за счет повышения плотности активных центров вследствие интенсификации процессов пластического деформирования металлов в зоне образования сварного соединения.

В третьей главе выполнено исследование формирования физического контакта между привариваемой проволокой, поверхностью детали и роликовым электродом, а также рассмотрены технологические мероприятия по предотвращению контактного плавления соединяемых металлов и электрода.

Необходимым условием образования прочного соединения между привариваемой проволокой и деталью является формирование между ними плотного физического контакта. Опираясь на исследования в области механики контактного взаимодействия твердых тел таких исследователей, как Н.Б. Демкин, К. Джонсон, Ф. Боуден, Д. Тейбор, в итоге получена зависимость, позволяющая выполнить расчетную оценку относительной площади контакта $\bar{S}$ между про-

волокой и поверхностью детали в зависимости от условий горячего деформирования металлов

$$\bar{S} = \left[2 \left(1 - \frac{T_S}{T_{nl}} \right)^{\frac{2}{n_s}} \left(\frac{3\sigma_{m,0} m_s}{P_{св}} \right)^{\frac{1}{n_s}} - 1 \right]^{-1} \sqrt{1 + 3f_{mp}^2}, \quad (12)$$

где n_s , m_s - эмпирические коэффициенты, зависящие от геометрических параметров рельефа поверхности (по Н.Б. Демкину); T_S - температура поверхности; f_{mp} - коэффициент трения.

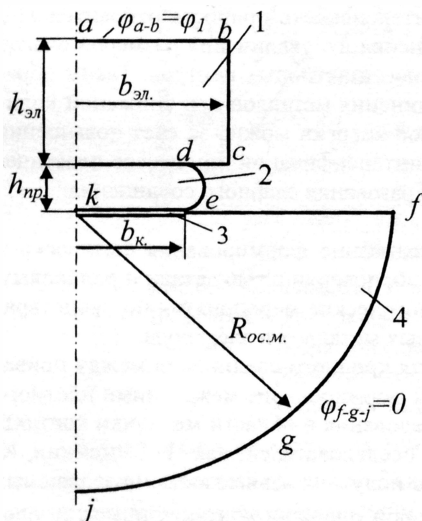
Схематизируя объем привариваемого металла в виде цилиндра с основанием диаметром D и высотой H была получена аналитическая зависимость, связывающая осадку цилиндра ε_V с осадкой микровыступов ε_S

$$\varepsilon_V = 1 - \left[18\psi \frac{2^n m}{\left[(2\varepsilon_S^{-1} - 1) \sqrt{1 + 3f_{mp}^2} + 1 \right]^n} \left(\frac{T_{nl} - T_S}{T_{nl} - T_V} \right)^2 - 6 \right]^{-\frac{2}{3}}, \quad (13)$$

$$\varepsilon_S = \frac{2\bar{S}}{1 + \bar{S}},$$

где $\psi = \frac{H}{D}$ - коэффициент начальной формы привариваемого металла;

ε_S - осадка микровыступов, T_V - средняя температура цилиндра.



Оценку температур T_S и T_V выполнили посредством математического моделирования температурных полей в зоне ЭКП. Расчетная схема пояснена на рис. 8. Область 3 в расчетной схеме имитирует зону действия теплового источника на контактом электрическом сопротивлении. Толщина области 3 была принята равной 0,1 мм, что близко к суммарной шероховатости двух соприкасающихся поверхностей.

Рис.8. Схема для расчета электрических и температурных полей:

1- электрод; 2 - привариваемый металл; 3 - область контактного сопротивления; 4 - основной металл

Электрические потенциалы φ точек расчетной области находили из решения дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0. \quad (14)$$

Рассчитанные потенциалы использовали для расчета плотности тока

$$j(x, y, z) = \frac{1}{\rho_{эл}} \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z}\right)^2}, \quad (15)$$

где $\rho_{эл}$ - удельное электросопротивление.

Значения температур T находили из решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{j^2 \rho}{c\gamma}, \quad (16)$$

где a - коэффициент температуропроводности; $c\gamma$ - объемная теплоемкость; t - время.

Адекватность математической модели установлена сопоставлением результатов моделирования электрических полей с известными аналитическими решениями для частных случаев задания граничных условий, и сопоставлением результатов моделирования температурных полей с распределением структур металла в зоне термического влияния (ЗТВ) изготовленных шлифов. На основании выполненных расчетов приняли, что $\frac{T_S}{T_V} = 1, 1 \dots 1, 2$. С учетом этого расчеты по выражению (13) показали, что для формирования сплошного физического контакта при $\psi = 1$ необходима осадка $\varepsilon_V = 50 \dots 70\%$ в зависимости от принятых коэффициентов m_S , n_S и f_{mp} , что соответствует практике ЭКП проволоки. Повышение f_{mp} способствует формированию физического контакта при снижении температуры. Во всем исследованном диапазоне варьируемых параметров сплошной контакт между при ЭКП сталей обеспечивается при температурах $1000 \dots 1200$ °C. Это позволяет рассматривать указанные температуры, как минимально допустимые для получения соединения металлов в условиях ЭКП с относительной прочностью $\bar{\tau} = 1$.

При вращении детали максимальное электросопротивление возникает в контакте между роликовым электродом и проволокой перед началом термомеханического цикла, когда во время паузы роликовый электрод накатывается на холодный, недеформированный участок привариваемой проволоки. С целью снижения пиковых значений выделяемой тепловой энергии и предотвращения локального плавления металла проволоки в начальные моменты пропускания импульса тока приварки было предложено осуществлять предварительный подогрев привариваемой проволоки. В этом случае роликовый электрод между импульсами тока приварки накатывается на нагретый участок привариваемой

проволоки, частично деформируя его и обеспечивая плотный физический контакт между проволокой и электродом. Для исследования влияния нагрева подаваемой под роликовый электрод проволоки на качество формируемого металлопокрытия была использована схема ЭКП, приведенная на рис. 9. Привариваемые проволоки 2 посредством гибких шин 3 включали в сварочный контур установки ЭКП. При подаче на клещевинны напряжения часть тока приварки шунтируется через шины и привариваемые проволоки, нагревая последние. При отсутствии попадания на проволоку охлаждающей воды нагретые участки проволоки сохраняют повышенную температуру на всем протяжении паузы. Применение данного технологического мероприятия опробовано для случаев приварки к образцам из стали 40Х проволоки Нп-30ХГСА, В

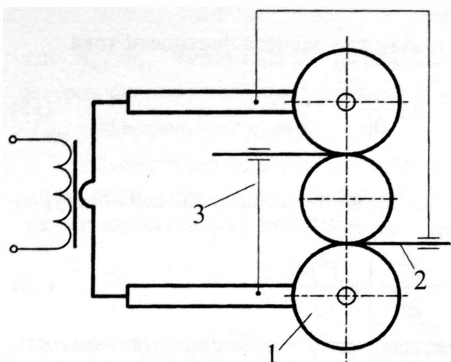


Рис. 9. Схема включения привариваемых проволок в сварочную цепь:

1 – роликовый электрод, 2 - проволока, 3 – токоподвод

среднем колебания силы тока в процессе ЭКП были снижены до 10...15%. В зоне соединения (рис. 10) и приваренном металле очагов плавления не выявлено.



Рис. 10. Структура зоны соединения (х350) (травление 4 %-м раствором азотной кислоты в этиловом спирте)

В четвертой главе выполнено исследование возможности снижения тепловой мощности ЭКП за счет интенсификации проскальзывания привариваемой проволоки по поверхности детали.

Как показано в работах К. Джонсона, Ф. Боудена, Д. Тейбора, И.В. Крагельского, Д.Н. Гаркунова, процесс трения сопровождается многократным пластическим деформированием микровыступов. С целью оценки возможного повышения плотности активных центров при трении скольжения была выполнена сравнительная энергетическая оценка влияния осадки проволоки и трения поверхностей на плотность дислокаций.

Принимали, что удельная работа на единицу площади A_p , совершаемая при осадке ε проволоки диаметром d_{np} , составляет

$$A_p \approx 0,5 p_{св} d_{np} \varepsilon. \quad (17)$$

Упругой составляющей деформации пренебрегали. Полагали, что (2...10) % работы пластической деформации расходуется на структурные изменения, повышая накопленную энергию $\Delta E_\partial = k_\partial A_p$ (где $k_\partial = 0,02 \dots 0,1$) деформированного слоя за счет увеличения плотности дислокаций ρ . В итоге получили, что

$$\rho = \frac{p_{св} k_\partial a}{Q_\partial} \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right). \quad (18)$$

Удельную работу, совершаемую силой трения f_{mp} на единице площади, определили как

$$A_{mp} = 0,5 p_{св} f_{mp} m_{mp}, \quad (19)$$

где m_{mp} - средняя длина пути трения.

Тогда

$$\rho_{mp} = \frac{p_{св} f_{mp} a k_\partial m_{mp}}{Q_\partial z_{mp}}, \quad (20)$$

где z_{mp} - толщина поверхностного слоя металла, претерпевающая многократное пластическое деформирование при трении.

Из выражений (18) и (20) нашли соотношение между ρ и ρ_{mp} в виде

$$\frac{\rho_{mp}}{\rho} = \frac{f_{mp} m_{mp}}{z_{mp}} \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right). \quad (21)$$

Полагая $z_{mp} \approx 0,1$ мм, $m_{mp} \approx 1$ мм, $f_{mp} \approx 0,1$, $\varepsilon \approx 0,5$ получили, что

$\frac{\rho_{mp}}{\rho} \approx 1$. Результаты расчетной оценки соотношения плотностей дислокаций

свидетельствуют, что осадка проволоки под действием нормальной силы и скольжение привариваемого металла дают одинаковый порядок плотностей дислокаций, и, следовательно, одинаковый порядок плотностей активных центров ρ_a . Отсюда можно заключить, что скольжение присадочного металла в общем случае, не является необходимым условием получения высокой прочности соединения. В то же время, реализация скольжения дополнительно увеличивает плотность ρ_a активных центров, что должно позволить повысить $\bar{\tau}$ при снижении тепловложения.

Суммарное проскальзывание $\delta_{\text{пр}}$ проволоки 1 относительно поверхности 2 в произвольной точке A состоит из осевой $\delta_{\text{ос}}$ и поперечной $\delta_{\text{п}}$ составляющей (рис.11)

$$\delta_{\text{пр}} = \sqrt{\delta_{\text{ос}}^2 + \delta_{\text{п}}^2} . \quad (22)$$

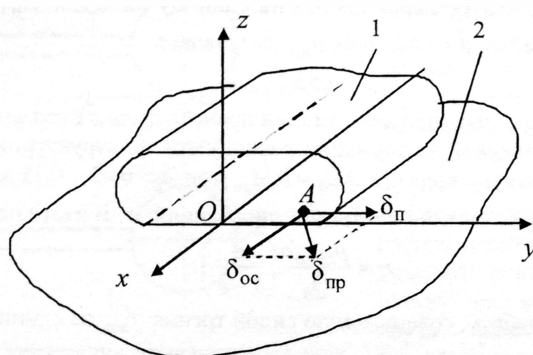


Рис.11. Схема деформирования проволоки при ЭКП.

Расчеты показали, что при любой фиксированной осадке ϵ увеличение ϵ_y приводит к значительному росту проскальзывания проволоки $\delta_{\text{пр}}$ по поверхности детали. При осевой деформации $\epsilon_y > 0,2 \dots 0,3$ рост $\delta_{\text{пр}}$ становится практически линейным. Так, при $\epsilon = 0,6$ увеличение ϵ_y с 0,3 до 0,6 приводит к повышению $\delta_{\text{пр}}$ с 0,67 до 1,2 мм, что соизмеримо с величиной пластического деформирования привариваемой проволоки. Исследование особенностей пластического течения осаживаемой проволоки в поперечном направлении $\delta_{\text{п}}$ исследовали на цилиндрических свинцовых моделях диаметром $D_{\text{м}} = 14$ мм. На торцы моделей наносили координатную сетку. Модели деформировали между двумя параллельными плитами (рис.12).

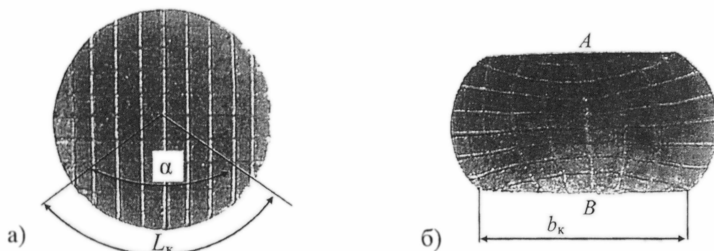


Рис.12. Сечение деформированной свинцовой модели: а) $\epsilon = 0$; б) $\epsilon = 0,4$

Осадку моделей ε рассчитывали по зависимости

$$\varepsilon = \frac{D_M - h_M}{D_M}, \quad (23)$$

где h_M - высота осаженной модели.

Длину дуги L_K рассчитывали по зависимостям

$$L_K = \left(\frac{\alpha}{2\pi} \right) D_M, \quad (24)$$

$$\alpha = 2 \arcsin \frac{2N_c h_c}{D_M},$$

где α - угол, образующий дугу L_K ; N_c - количество ячеек координатной сетки, образующих на деформированной модели контакт шириной b_K ; h_c - размер ячейки координатной сетки недеформированной модели.

Рассчитанное значение L_K сравнивали с шириной контакта деформированного образца b_K . Осмотр деформированных моделей показал, что при $\varepsilon < 0,4 \dots 0,5$ контакт формируется преимущественно за счет осадки образца без его растекания по поверхности опорной плиты. При осадке $\varepsilon = 0,4 \dots 0,5$ ширина контакта формируется из дуги длиной $L_K^* = 0,3\pi D_M$. При дальнейшем деформировании образца увеличение контакта b_K происходит преимущественно за счет растекания поверхности образца длиной L_K^* , сопровождающимся скольжением образца по поверхности опорной плиты. Учитывая выше изложенное, величину поперечного скольжения деформированной проволоки при $\varepsilon \geq 0,4$ рассчитывали по зависимости

$$\delta_{\Pi} = 0,5(b_K - 0,3\pi d_{\Pi}). \quad (25)$$

Приняв ряд допущений, связанных с расчетом ширины контакта b_K , в итоге получили

$$\delta_{\Pi} = \pi d_{\Pi} \left(0,125 \left[(1 - \varepsilon)^{-1} (1 + \varepsilon_y)^{-1} + \varepsilon \right] - 0,275 \right), \quad (26)$$

где ε_y - осевая деформация проволоки.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями выявлено влияние на осевую деформацию проволоки основных параметров и условий режима ЭКП, в частности момента проворачивания роликового электрода.

Одной из сил, действующих на проволоку в осевом направлении и вызывающей ее удлинение, является сила трения F_{mp} между роликовым электродом 1 и проволокой 2 (рис.13). Именно сила трения F_{mp} вызывает проворачивание роликового электрода при вращении детали 3, создавая момент

$$M_3 = F_{mp} R_3. \quad (27)$$

Момент M_3 преодолевает момент M_{oc} сопротивления вращению роликового электрода, возникающего из-за сил трения между вращающимся электродом и неподвижной осью 4. Прикладывая к роликовому электроду дополнительный момент $M_{доп}$, можно увеличить момент его проворачивания

$$M_3 = M_{oc} + M_{доп}, \quad (28)$$

и, тем самым, увеличить силу трения до максимально возможных значений

$$F_{тр} = \frac{M_{oc} + M_{доп}}{R_3}. \quad (29)$$

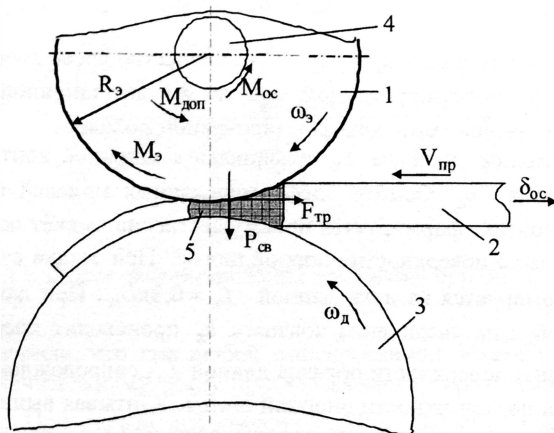


Рис.13. Схема действия сил в зоне ЭКП: 1 – роликовый электрод, 2 - привариваемая проволока, 3 – деталь, 4 – ось крепления роликового электрода, ω_3 , $\omega_о$ - скорости вращения детали и роликового электрода, $P_{ос}$ - усилие прижатия роликового электрода

Выявлена близкая к линейной зависимость между моментом проворачивания роликового электрода и осевой деформацией проволоки при неизменных остальных параметрах режима ЭКП. Увеличение момента проворачивания роликового электрода до $M_{oc} = 40 \text{ Н} \cdot \text{м}$ позволило повысить осевую деформацию с 40 до 60%

Экспериментально выявлена близкая к линейной зависимость между моментом проворачивания роликового электрода, осевой деформацией и прочностью соединения проволоки с подложкой при неизменных остальных параметрах режима ЭКП. Проведенные исследования свидетельствуют о возможности существенного (до 2...3-х раз) повышения прочности соединения проволоки с деталью при пониженном тепловложении только за счет увеличения осевой деформации проволоки. Возможность управления осевой деформацией проволоки изменением момента проворачивания роликового электрода позволяет рас-

смагивать осевую деформацию проволоки в качестве еще одного независимого параметра режима ЭКП.

Пятая глава посвящена исследованию условий формирования сплошного металлопокрытия, получаемого перекрытием смежных валиков приваренного металла, также влиянию последующей обработки ППД на структуру металла покрытия и циклическую прочность восстановленных деталей.

Выявлено, что минимально допустимый шаг приварки $w_{\min}$ должен обеспечивать подачу привариваемой проволоки на поверхность основного металла вблизи кромки смежного, ранее сформированного валика. При меньшем шаге и подаче проволоки на поверхность ранее приваренного металла затрудняется образование физического контакта между проволокой и основным металлом, что приводит к снижению прочности соединения с поверхностью детали всего металлопокрытия.

Особенности формирования межвитковых соединений исследовали при ЭКП чередующихся проволок НП-30ХГСА и 40Х13. Из-за различной травимости использованных для приварки сталей, продольный шлиф образца с металлопокрытием шлиф дает наглядную картину чередования смежных валиков и особенностей деформирования металла в межвитковых соединениях. Выявлено, что для качественного формирования межвитковых соединений необходимо совместное пластическое деформирование проволоки и кромки ранее сформированного металлопокрытия, при этом межвитковая граница оказывается наклонно ориентированной к поверхности детали (рис. 14).



Рис.14. Макроструктура продольного шлифа слоя приваренного металла из проволок НП-30ХГСА и 40Х13

При многослойной ЭКП приварка проволоки осуществляется на слой ранее приваренного металла, поверхность которого окислена и имеет неравномерный профиль. В межслойных соединениях, полученных ЭКП со свободно вращающимися электродами, присутствуют протяженные оксидные включения. Притормаживание роликового электрода приводит к дроблению окисных включений. При послойной механической очистке поверхности покрытия вращающимися металлическими щетками удалось достигнуть формирования зоны соединения практически свободной от оксидных пленок (рис. 15,а). Известно, что вдоль кромок валика приваренного металла в зоне ЗТВ формируются дорожки частично отпущенного металла с пониженной

твердостью. Выявлено, что с удалением от поверхности детали объем частично отпущенных зон увеличивается (рис.15,б).

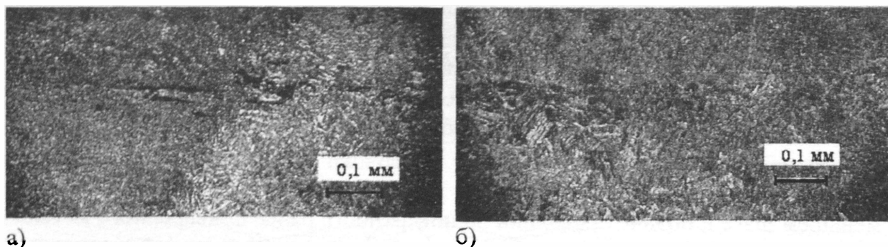


Рис.15. Микроструктура зоны соединения приваренного металла 30ХГСА и основного металла 40Х: а) ЭКП со свободно вращающимся роликовым электродом; б) ЭКП с притормаживанием роликового электрода и послышной очисткой вращающейся металлической щеткой

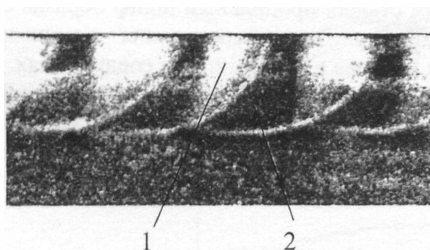


Рис. 16. Макроструктура продольного шлифа образца из стали 40Х после ЭКП проволоки Нп-30ХГСА (x10): 1-объемы закаленного металла, 2 – объемы частично отпущенного металла.

Проведенное математическое моделирование электрических и температурных полей показало, что причинами этого являются особенности тепловыделения и распределения тепловых потоков при ЭКП единичного валика. Выделение тепловой энергии в объеме основного металла при пропускании импульсов электрического тока приводит к увеличению размеров ЗТВ по сравнению с действием только поверхностного источника такой же продолжительности. Принудительное охлаждение поверхности детали и

вызванный этим интенсивный тепловой поток в окружающую среду повышает градиент температур и приводит к уменьшению ЗТВ вблизи поверхности детали. С удалением от поверхности детали роль поверхностного охлаждения на распределение температурных полей снижается. За время паузы происходит охлаждение зоны приварки, при этом скорости охлаждения с удалением от поверхности снижаются. При формировании следующей площадки приваренного металла происходит частичное перекрытие ЗТВ предыдущего и осуществляемого термических циклов ЭКП (рис. 17). Итоговая величина разупрочнения металла в ЗТВ зависит от количества термических циклов отпуска рассматриваемого объема металла при формировании валика приваренного металла. При увеличении частоты постановки сварных точек подповерхностные объемы металла не успевают охладиться до начальной

температуры, что способствует возникновению под упрочненной поверхностью сплошной прослойки частично разупрочненного металла.

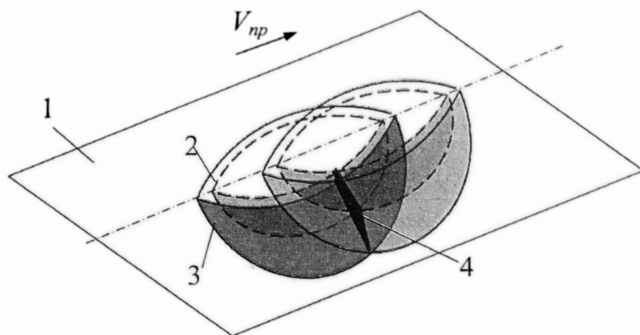


Рис. 17. Схема неравномерного разупрочнения в ЗТВ при формировании валика приваренного металла: 1 – поверхность детали, 2 – изотерма закалки, 3 – изотерма начала отпуска, 4 – зона перекрытия объемов отпуска смежных ЗТВ

Проведенные металлографические исследования выявили измельчение структуры приваренного металла после обработки ППД, при этом его микротвердость повысилась в среднем на 15...20 %. Разбросы значений микротвердости после обработки ППД снизились примерно с 1000 МПа до 600 МПа, что можно объяснить различной способностью к упрочнению структурных составляющих.

Усталостная прочность ступенчатых образцов после ЭКП цилиндрической части, дуговой наплавки галтелей и последующей чеканки на 80% превышает выносливость базовых образцов без металлопокрытия, что можно объяснить образованием в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия. Коэффициент корреляции полученных уравнений регрессии для образцов с металлопокрытиями оказался практически равным коэффициенту корреляции для базовых образцов из основного металла. Это свидетельствует о повышении стабильности эксплуатационных свойств деталей с металлопокрытиями после обработки ППД.

В шестой главе рассмотрено разработанное технологическое оборудование, содержатся технологические рекомендации по восстановлению деталей машин с применением ЭКП проволоки, приведены результаты промышленного применения результатов диссертационной работы и примеры восстановленных деталей.

С целью повышения стабильности и повторяемости процесса ЭКП уточнены конструктивные требования к установкам для ЭКП (рис. 18), реализован-

ные при их изготовлении в ООО «НПП «Велд» (г. Калуга). Разработана сварочная головка (рис.19) повышенной жесткости и с раздельной регулировкой положения сварочных клещевин, что расширило ее технологические возможности по сравнению с известными конструкциями. Кроме ЭКП проволоки, конструкция установки позволяет реализовывать ЭКП ферромагнитных порошков, подаваемых под верхний и нижний роликовые электроды (патент РФ на полезную модель № 31118).

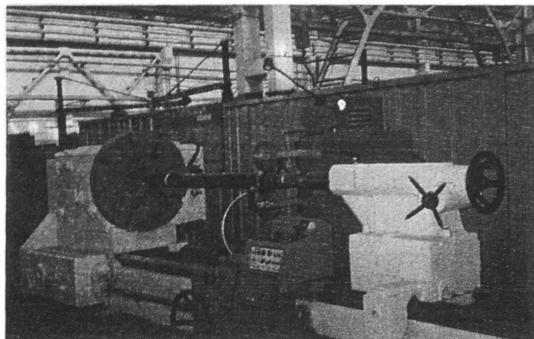


Рис. 18. Установка для ЭКП

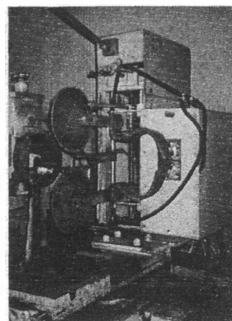


Рис.19. Сварочная головка

Результаты исследования механизма формирования соединения при ЭКП и процессов пластического деформирования привариваемой проволоки использованы при разработке процесса ЭКП с притормаживанием роликового электрода. Разработан ряд конструкций роликовых головок, как с постоянным, так и с периодически меняющимся моментом торможения. В последнем случае момент проворачивания роликового электрода увеличивается при пропускании импульсов тока приварки и уменьшается в паузах между ними, снижая интенсивность изнашивания рабочей поверхности роликового электрода. Осевую деформацию привариваемой проволоки предложено определять непосредственно в процессе приварки через подсчет числа оборотов детали N_d и роликового электрода $N_{эл}$. Процесс ЭКП с притормаживанием проволоки был опробован также при ЭКП многослойных покрытий. Сложность обеспечения высокой прочности приварки связана со значительной волнистостью и окисленностью поверхности предыдущего слоя. Именно в этом случае интенсификация процесса скольжения привариваемой проволоки представляется особенно актуальной.

С целью стабилизации электрического контакта и предотвращения локального плавления соединяемых металлов разработан процесс ЭКП с предварительным подогревом привариваемой проволоки. Нагрев привариваемой проволоки может быть достигнут ее включением в сварочную цепь установки ЭКП

(патент на изобретение РФ № 2122928) или нагревом проходящим током от отдельного источника питания.

Разработаны технологические рекомендации по определению частоты вращения детали, шагу приварки, выбору диаметра проволоки и толщины металлической ленты, количества необходимых слоев приваренного металла, расходу охлаждающей жидкости.

Обеспечение стабильной прочности соединения формируемых металлопокрытий с основным металлом позволило более широко применять следующие технологические операции, сопровождающиеся ростом в поверхностном слое остаточных напряжений, без опасности разрушения и отслоения покрытия. Разработаны технологические рекомендации по осуществлению последующей обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием, включающие определение диаметра и ширины рабочей части обкатывающего ролика, энергии удара при чеканке. С целью повышения эффективности восстановления малоответственных деталей разработаны комбинированные технологические процессы восстановления изношенных поверхностей, включающих процессы ЭКП и локальной дуговой наплавки. Для снижения тепловложения в основной металл разработан подающий механизм для полуавтоматической вибродуговой наплавки (патент на изобретение РФ №2301728).

На основании проведенных исследований разработаны технологии восстановления более 600 наименований деталей различных машин: городского автотранспорта, автотракторной техники, путевых машин и подвижного состава, горнодобывающего оборудования, станочного парка машиностроительных предприятий и т.д. Установки ЭКП внедрены на 25 промышленных предприятиях России. Результаты работы отмечены дипломами Московских Международных Салонов по Инновациям и Инвестициям (2005, 2006 г.г). Суммарный экономический эффект составил более 20 млн. руб. Научно-методические результаты исследований внедрены в учебный процесс и научно-исследовательскую деятельность Калужского филиала МГТУ им. Н.Э.Баумана, в учебный процесс Московского государственного вечернего металлургического института.

Общие выводы и результаты работы

1. Основной причиной снижения стабильности и повторяемости показателей качества формируемого ЭКП металлопокрытия, прежде всего его структуры и прочности соединения с основным металлом, является затрудненность поддержания заданного теплового режима в процессе ЭКП из-за колебаний силы тока приварки вследствие резких, в том числе и случайных, изменений электрического сопротивления зоны приварки. Одним из направлений повышения стабильности и повторяемости свойств металлопокрытий является снижение доли тепловой и повышение доли механической энергии в общем балансе энергии активации образования сварного соединения, что позволяет избежать возникновения очагов плавления при обеспечении высокой прочности соединения приваренного и основного металлов.

2. Для теоретического исследования механизма соединения металлов разработана математическая модель образования соединения при ЭКП, позволяющая выполнить количественные оценки размеров очагов схватывания, плотности активных центров и относительной прочности получаемого соединения металлов, исследовать влияние термического и механического видов энергии сварки на прочность получаемого соединения.

3. Образование соединения металлов является термодинамически вероятным в том случае, если уменьшение свободной энергии системы из-за исчезновения свободных поверхностей соединяемых металлов превышает ее рост вследствие возникновения искажения кристаллической решетки металлов вдоль границ возникающих очагов схватывания. Такой характер изменения свободной энергии обуславливает наличие минимального, термодинамически устойчивого размера очага схватывания, зависящего от физических свойств и температуры соединяемых металлов. Очаги схватывания меньших размеров являются термодинамически неустойчивыми и самопроизвольно разрушаются. Расчетная оценка дала для железа значения критической температуры около $T_{кр} = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4. Между склонностью металлов к образованию сварного соединения при холодной сварке, определяемой по требуемой степени пластического деформирования $\varepsilon_{\min}$, и критической температурой $T_{кр}$, определяемой из условия образования термодинамически устойчивого единичного очага схватывания, существует функциональная зависимость, что позволяет использовать $T_{кр}$ для оценки склонности металлов к образованию соединения.

5. Зависимость относительной прочности соединения металлов от температуры, определяющей при ЭКП степень пластической деформации привариваемой проволоки, в общем случае состоит из трех характерных участков. Первый участок характеризуется интенсивным приростом относительной прочности, обеспечивающимся в основном за счет роста плотности активных центров при мало меняющихся размерах очагов схватывания. На втором участке интенсивность прироста относительной прочности снижается за счет уменьшения интенсивности образования активных центров. На третьем участке скорость роста относительной прочности вновь повышается за счет интенсивного увеличения размеров очагов схватывания при мало меняющейся плотности активных центров. Полученная зависимость позволяет выполнить количественную оценку относительной прочности соединения приваренного и основного металла в зависимости от режимов ЭКП.

6. Локальное повышение температуры в зоне контакта и скольжение привариваемого материала по подложке интенсифицируют формирование сплошного физического контакта между соединяемыми поверхностями. Во всем исследованном диапазоне варьируемых параметров сплошной контакт при ЭКП сталей обеспечивается при температурах $1000...1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это позволяет рассматривать указанные температуры, как минимально допустимые для

получения соединения металлов в условиях ЭКП с относительной прочностью $\bar{\tau}=1$.

7. Снижение пиковых значений выделяемой тепловой энергии и предотвращение локального плавления металла проволоки в начальные моменты пропускания импульса тока приварки может быть достигнуто предварительным подогревом привариваемой проволоки. В этом случае роликовый электрод между импульсами тока приварки накатывается на нагретый участок привариваемой проволоки, частично деформируя его и обеспечивая плотный физический контакт между проволокой и электродом. В среднем колебания силы тока в процессе ЭКП были снижены до 10...15%.

8. Выявлена возможность управления осевым проскальзыванием привариваемой проволоки по поверхности детали за счет изменения момента проворачивания роликового электрода $M_{эл}$ при остальных неизменных параметрах режима ЭКП. Повышение прочности соединения при увеличении пути скольжения привариваемого металла по подложке вследствие его пластического деформирования определяется, прежде всего, повышением плотности дислокаций и, соответственно, повышением плотности активных центров вследствие многократной пластической деформации микровыступов контактирующих металлов в условиях действия касательных напряжений, снижающих уровень напряжений деформирования микровыступов.

9. С удалением от поверхности детали объем частично отпущенных зон увеличивается, что объясняется особенностями тепловыделения и распределения тепловых потоков при ЭКП единичного валика. Принудительное охлаждение поверхности детали и вызванный этим интенсивный тепловой поток в окружающую среду повышает градиент температур и приводит к уменьшению ЗТВ вблизи поверхности детали. Увеличение размеров ЗТВ с удалением от поверхности, вызванное этим увеличением количества циклов отпуска от последовательных термических циклов приварки, а также неполное охлаждение металла за время паузы между импульсами тока приварки увеличивают размеры подповерхностной зоны отпуска.

10. Получены зависимости для определения допустимого диапазона установки шага приварки в зависимости от диаметра проволоки и ее осевой деформации. Сформулированы требования к ширине электрода для обеспечения условия образования качественных межвитковых и межслойных соединений.

11. Разработаны технологическое оборудование и технологические рекомендации по восстановлению деталей машин с применением ЭКП проволоки. Разработаны технологические рекомендации по восстановлению циклически нагруженных валов. Разработано более 600 технологических процессов восстановления изношенных деталей различных машин. Разработанное оборудование и процессы поставлены на 25 промышленных предприятиях России, отмечены дипломами Московских Международных Салонов по Инновациям и Инвестициям (2005, 2006 г.г.). Суммарный экономический эффект от внедрения составил более 20 млн. руб. Научно-методические результаты исследований

внедрены в учебный процесс и научно-исследовательскую деятельность Калужского филиала МГТУ им. Н.Э.Баумана, в учебный процесс Московского государственного вечернего металлургического института.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Булычев В.В. Повышение прочности электроконтактной приварки проволоки за счет увеличения ее осевого деформирования // Ремонт, восстановление, модернизация. 2011. №9. С.7-10.
2. Булычев В.В. Теоретические предпосылки и практическая реализация электроконтактной приварки проволоки с притормаживанием роликового электрода // Наука и образование:электронное научно-техническое издание. 2011. №7. URL: [http:// technomag.edu.ru/doc/188555.html](http://technomag.edu.ru/doc/188555.html)
3. Булычев В.В., Латыпов Р.А. К вопросу о формировании соединения при электроконтактной приварке // Международный технико-экономический журнал. 2010. №5. С.59-65.
4. Булычев В.В., Латыпов Р.А. Особенности пластической деформации при получении покрытий электроконтактной приваркой // Международный научный журнал. 2010. №5. С.78-85.
5. Латыпов Р.А., Булычев В.В. Расчетная оценка энергетических условий схватывания при электроконтактной приварке // Технология металлов. 2011. №1. С.32-36.
6. Латыпов Р.А., Булычев В.В., Молчанов Б.А. Энергетическая оценка прочности соединения металлов при электроконтактной приварке// Теоретические исследования металлургических процессов. М.: МГВМИ, 2011. С. 67-96.
7. Булычев В.В., Латыпов Р.А. Исследование скольжения проволоки по подложке при ее электроконтактной приварке // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». Агроинженерия. 2010. Выпуск 2(41). С.140-142.
8. Булычев В.В., Зезюля В.В. Электроконтактная наварка проволокой с торможением роликового электрода // Сварочное производство. 2009. №11. С.8-12.
9. Булычев В.В., Зезюля В.В. Технология восстановления стальных коленчатых валов комбинированной наплавкой // Ремонт, восстановление и модернизация. 2008. № 12. С. 14-18.
10. Дубровский В.А., Булычев В.В., Пономарев А.И. Предотвращение выплесков при электроконтактной наварке проволокой из стали 40Х13 //Сварочное производство. 2003. № 6. С.12-15.
11. Дубровский В.А., Булычев В.В., Столяров И.В. Оптимизация тепловых процессов при электроконтактной наварке проволокой //Сварочное производство. 1997. №9. С.19-21.

12. Дубровский В.А., Булычев В.В., Зыбин И.Н. Изменение формы поперечного сечения проволоки при электроконтактной наплавке // Сварочное производство. 2001. №6. С.23-27.
13. Дубровский В.А., Булычев В.В. Электроконтактная наплавка проволокой с подплавлением соединяемых металлов // Сварочное производство. 1998. №1. С.22-24.
14. Дубровский В.А., Булычев В.В., Аксенов Ю.Н. Технико-экономический анализ технологий и оборудования для электроконтактной наварки проволокой // Тяжелое машиностроение. 2003. №12. С.14-16.
15. Дубровский В.А., Булычев В.В., Аксенов Ю.Н. Как повысить качество электроконтактной наварки проволокой // Локомотив. 2004. №3. С.30-32.
16. Дубровский В.А., Булычев В.В. Головка ГКПО-01 для электроконтактной наплавки и поверхностной закалки деталей тел вращения // Сварочное производство. 1997. № 10. С.36.
17. Филин В.И., Булычев В.В., Хабаров В.Н. Опыт внедрения технологии электроконтактной наплавки в ОАО "Калугапутьмаш" // Тяжелое машиностроение. 1998. № 1. С. 23-24.
18. Электроконтактная наплавка износо- и коррозионностойких материалов / В.А.Дубровский [и др.] // Тяжелое машиностроение. 2000. №9. С.19-20.
19. Восстановление деталей электровозов электроконтактной наплавкой проволокой / К.А. Кочин [и др.] // Локомотив. 2000. №3. С.32-33.
20. Дубровский В.А., Булычев В.В., Хабаров В.Н. Восстановление деталей путевых машин электроконтактной наплавкой // Путь и путевое хозяйство. 2001. №2. С.13-15.
21. Электроконтактная наварка проволокой посадочных поверхностей шестерен / В.А.Дубровский [и др.] // Тяжелое машиностроение. 2005. №9. С.30-31.
22. Дубровский В.А., Булычев В.В., Столяров И.В. Расчет некоторых показателей электроконтактной наплавки деталей типа вал // Сварочное производство. 1996. № 11. С.32-33.
23. Булычев В.В. Технологические приемы управления качеством электроконтактной наварки проволокой // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов: Сборник докладов 7-й международной конференции. Харьков, 2006. С. 148-152.
24. Булычев В.В. Выбор технологического варианта электроконтактной наварки деталей машин // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов XV международной научно-технической конференции. Донецк, 2008. С.172-175.
25. Булычев В.В. Уменьшение размеров зоны термического влияния при электроконтактной наварке проволокой // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2009. С.278-279.
26. Булычев В.В. Восстановление крупногабаритных валов электроконтактной наваркой проволокой // Научные технологии в приборостроении и машино-

строении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2007. С.122-124.

27. Математическая модель формирования разупрочненных зон в электроконтактных покрытиях / В.А. Дубровский [и др.] // Труды МГТУ. 2002. № 581. С.137-144.

28. Булычев В.В., Лебедев В.В. Повышение производительности восстановления деталей машин электроконтактной приваркой ферромагнитного порошка // Ремонт, восстановление и модернизация. 2008. № 11. С. 18-20.

29. Булычев В.В. Особенности обработки поверхностно-пластическим деформированием деталей после электроконтактной наварки // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2006. С.228-230.

30. Булычев В.В., Зыбин И.Н., Зезюля В.В. Восстановление циклически нагруженных валов с применением процесса электроконтактной наварки проволок // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: Материалы 7-й международной практической конференции - выставки. СПб., 2005. С. 24-28.