

На правах рукописи

УДК 621.791

Дубровский Владимир Анатольевич

**СОЗДАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАВАРКИ ПРОВОЛОКОЙ
ОПЛАВЛЕНИЕМ**

05.03.06 – Технологии и машины сварочного производства

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



Калуга - 2006

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Неровный Вячеслав Михайлович
доктор технических наук, профессор
Ластовирия Вячеслав Николаевич
доктор технических наук,
Никифоров Николай Иванович

Защита
совета Д21
университете
105005, г. Мо

y1757973

Задании диссертационного
основном техническом

Дубровский В.А.

Создание технологий и
оборудования
электроконтактной наварки

Y 1757943

ТЮ

H. 3.

ієни

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

[illegible]

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Одним из важнейших направлений повышения технико-экономической эффективности использования продукции машиностроения является повышение качества ее ремонта и, в частности, повышение качества восстановления изношенных деталей машин. Более 60 % деталей выбраковывается из-за износа цилиндрических и резьбовых поверхностей, что указывает на целесообразность качественного и низкочувствительного восстановления деталей с такими поверхностями. В настоящее время наиболее распространенными способами ремонта являются различные технологии дуговой наплавки: наплавка под флюсом, наплавка в углекислом газе, вибродуговая наплавка в воде и т.д. Однако дуговая наплавка значительной доли изношенных деталей мало целесообразна. Это вызвано большой глубиной проплавления, чрезмерными припусками наплавленного металла на последующую механическую обработку, недопустимыми остаточными деформациями и т.д. Кроме того, определенные трудности возникают при ремонте поверхностей деталей диаметром до 50 мм с формированием слоя наплавленного металла высокой твердости. Разработанный для этих целей в 60-х годах прошлого столетия способ вибродуговой наплавки в воде не отвечает современным требованиям обеспечения качества восстановления.

Отдельную группу технологий ремонта составляют различные способы электроконтактной наварки (ЭКН), являющиеся разновидностью процесса шовной сварки. Их преимущества по сравнению с дуговыми процессами вызваны отсутствием сварочной ванны и малым тепловложением в деталь, возможностью восстановления деталей различного диаметра с использованием присадочных материалов различного химического состава. Процессы ЭКН могут быть реализованы с применением присадочных материалов в виде ленты, порошка, проволоки. Электроконтактную наварку лентой и порошком целесообразно применять для формирования достаточно тонких слоев, что ограничивает область применения этих технологий. Более широкими технологическими возможностями обладает известный способ электроконтактной наварки проволокой (ЭКНП) в твердой фазе. Однако существенным недостатком этого процесса является сильная зависимость прочности получаемого соединения от состава окружающей среды и состояния поверхности металлов. Невысокая стабильность прочности соединения приводит к частому отслоению и разрушению слоя наваренного металла как при последующей механической обработке, так и в процессе эксплуатации деталей. Это вызывает необходимость проведения дальнейших исследований процесса образования соединения присадочного и основного металлов, разработку технологических мероприятий по обеспечению ее высокой прочности.

Малоисследованным остается вопрос о влиянии процесса ЭКНП на такой важный показатель работоспособности восстановленных деталей, как

усталостная прочность. Учет этого фактора является необходимым при восстановлении целого ряда деталей типа «вал», воспринимающих в процессе эксплуатации циклические нагрузки.

Для эффективного практического применения процесса ЭКН проволокой необходимо также решить ряд задач, связанных с повышением производительности процесса, разработкой технологического оборудования и типовых технологических процессов. При этом основным фактором, влияющим на возможность использования процесса ЭКНП для восстановления широкой номенклатуры деталей машин, следует считать качество восстановленных деталей.

Цель работы.

Разработать научно обоснованные технологические решения и оборудование для электроконтактной наварки проволокой, направленные на повышение качества восстановления изношенных поверхностей деталей машин. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- разработать процесс электроконтактной наварки проволокой с локальным оплавлением присадочного и основного металлов в зоне их контакта (ЭКНО);
- выполнить комплексное исследование процесса формирования соединения между основным и присадочным металлами применительно к условиям ЭКНО;
- исследовать основные закономерности формирования структур в слое наваренного металла и зоне термического влияния (ЗТВ);
- выявить причины возникновения основных дефектов ЭКНО, предложить технологические мероприятия по их предотвращению;
- исследовать усталостную прочность деталей после ЭКНО, разработать способы ее повышения;
- разработать технологические схемы и оборудование для практической реализации технологии ЭКНО;
- разработать технологические рекомендации по использованию процесса ЭКНО при восстановлении изношенных деталей машин, результаты исследований довести до промышленного применения.

Методы исследования.

Основные задачи работы решались на основе сочетания теоретических и экспериментальных методов исследования. Экспериментальные исследования процесса выполнялись на разработанной установке электроконтактной наварки. Исследования электротепловой обстановки в зоне наварки были выполнены с применением метода конечных элементов. Изменение формы проволоки при наварке было исследовано посредством замеров геометрических параметров единичных валиков наваренного металла, а также осаживаемых свинцовых моделей. Влияние режимов наварки на осадку наваренной проволоки было исследовано с применением

метода планирования эксперимента. Влияние режимов наварки на структуры слоя наваренного металла, зоны соединения и металла ЗТВ было исследовано посредством оптической микроскопии. Усталостная прочность наваренных образцов была исследована на разработанной машине МУИ-01М.

Научная новизна работы.

Осуществлено решение научной проблемы управления процессом формирования и качеством получаемых с помощью ЭКНО поверхностей вращения различных деталей машин. К научной новизне работы следует отнести следующее:

1. Установлено, что из-за кривизны поверхности электродов и детали каждым импульсом тока наваривается единый объем присадочной проволоки, частично приваренный и деформированный предыдущим импульсом тока наварки, что приводит к двухстадийности формирования соединения при электроконтактной наварке проволокой и необходимости согласования параметров режимов наварки с величиной осадки наваренной проволоки.

2. Установлен и экспериментально подтвержден механизм получения стабильно прочного соединения при электроконтактной наварке оплавлением, заключающийся в образовании в зоне контакта проволока – деталь жидкой фазы уже на первой стадии процесса при осадке проволоки до 60...65% для обеспечения разрушения оксидных пленок с частичным их удалением из зоны контакта и существовании жидкой фазы на всем протяжении импульса тока наварки с последующей осадкой на второй стадии процесса до 65...70% и более для обеспечения образования общих зерен в зоне соединения.

3. Установлены основные закономерности влияния условий ведения процесса электроконтактной наварки оплавлением на структуру и физико-механические свойства слоя наваренного металла, в том числе и при использовании присадочной проволоки с резко отличными от основного металла детали электро и теплофизическими свойствами.

4. Установлено, что основным параметром режима наварки, определяющим расположение области максимальных температур в зоне контакта присадочного и основного металлов на второй стадии процесса наварки, является продолжительность пропуска тока наварки.

5. Установлено, что при наварке одного слоя выносливость деталей повышается с увеличением содержания углерода в присадочной проволоке, что можно объяснить явлением роста напряжения сжатия в результате образования в слое наваренного металла закалочных структур. При этом положительный эффект от увеличения остаточных напряжений сжатия преобладает над возможным отрицательным эффектом увеличения микродефектности структуры слоя наваренного металла в результате образования закалочных трещин.

Положения, выносимые на защиту.

1. Принципиально новый подход к рассмотрению процесса формирования слоя наваренного металла при ЭКНП.
2. Количественные критерии, определяющие механизм формирования соединения между основным и присадочным металлами.
3. Алгоритм расчета электрических и температурных полей в зоне образования соединения при ЭКНП с учетом деформации присадочной проволоки.
4. Инженерная методика определения параметров режима процесса ЭКНО.
5. Механизм образования соединения при ЭКНО металлов с существенно различающимися электро- и теплофизическими свойствами.
6. Научно-обоснованные значения пределов выносливости деталей машин, восстановленных с помощью ЭКНО.

Практическая ценность работы.

Разработан процесс электроконтактной наварки проволокой с локальным оплавлением присадочного и основного металлов в зоне их контакта (ЭКНО), обеспечивающий стабильность прочности соединения. Выявлены причины возникновения основных дефектов наварки и предложены технологические мероприятия по их предотвращению. Разработано технологическое оборудование для электроконтактной наварки двумя проволоками. Определено влияние процесса ЭКНО на изменение усталостной прочности восстанавливаемых деталей. С применением процесса ЭКНО разработано более 800 технологических процессов восстановления изношенных деталей машин различного назначения.

Разработанные технологии и оборудование прошли опытно-промышленное апробирование и внедрение на 25 предприятиях РФ.

Апробация работы.

Результаты работы доложены и обсуждены на Всероссийских научно-технических конференциях в г. Калуге (1998 – 2004 г.г.), МГТУ (2000 г.), на 7-й международной конференции-выставке «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования инструмента и технологической оснастки» (2005 г.), 5-й международной научно-технической конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий» (2005 г.), а также на научных семинарах кафедр «Технологии сварки», «Агропромышленная инженерия» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана (2003, 2004 г.г.), «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана (2004 г.).

Публикации.

По результатам работы над диссертацией автором опубликована 51 печатная работа.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Диссертация содержит 217 листов, в том числе 108 рисунков и 11 таблиц. Список литературы состоит из 200 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность диссертационной работы, показана перспективность совершенствования технологических процессов электроконтактной наварки, кратко отражено основное содержание диссертационной работы.

В первой главе проанализированы причины ограниченного применения технологии электроконтактной наварки проволокой в ремонтном производстве. Одной из основных причин этого является сильная зависимость прочности соединения между присадочным и основным металлами от состава окружающей среды и состояния поверхности металлов. Трудно прогнозируемое влияние этих факторов на прочность соединения приводит к ее невысокой стабильности, возникновению непроваров, что вызывает частое отслоение и разрушение слоя наваренного металла как при последующей механической обработке, так и в процессе эксплуатации деталей.

Непровар проявляется в виде четкой границы раздела между наваренной проволокой и поверхностью детали, видимой на поперечных шлифах наваренных образцов (рис.1). Длительное время такая структура соединения с непроваром считалась характерной для процесса ЭКНП. Причиной этого являлось представление о целесообразности ведения процесса наварки исключительно в твердой фазе, без какого-либо оплавления навариваемой проволоки и поверхности детали, что обосновывалось предотвращением образования дефектов в слое наваренного металла, снижением размеров ЗТВ. Анализ работ, посвященных сварке давлением, показал, что основной причиной возникновения непроваров при ЭКН в твердой фазе следует считать затрудненность удаления из зоны контакта окисных и гидроокисных пленок. Так, если при стыковой сварке сопротивлением окисные пленки вытесняются в грат, то при ЭКН в твердой фазе протекание данных процессов затруднительно, так как пластическая деформация основного металла практически полностью отсутствует. Окисные пленки (рис.2) возникают на нагреваемых в процессе наварки объемах присадочного и основного металлов, поэтому предварительная очистка поверхности детали, при всей целесообразности данной операции, не исключает их образование.

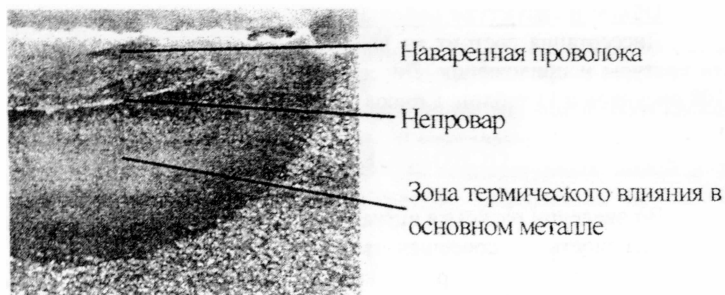


Рис.1. Макроструктура наваренного образца с непроваром



Рис.2. Окисные пленки на поверхности детали

Значительно более толстые окисные и гидроокисные пленки образуются на поверхности слоя наваренного металла, что необходимо учитывать при многослойной наварке.

Роль окисных пленок в образовании соединения при ЭКН подтверждается результатами экспериментальных исследований.

Так, в экспериментах по электроконтактной наварке проволокой в высаженную канавку, проведенных Б.М. Аскинази и Г.Г. Минибаевым, сплошное соединение металлов без четкой границы раздела было получено только при удалении возникающей оксидной пленки концентрированной ортофосфорной кислотой.

В работах Э.С. Каракозова и др. показано, что вероятность получения такого сплошного соединения повышается при ЭКНП в аргоне, то есть в среде, препятствующей окислению металлов. Однако применение данных мероприятий в реальных условиях ремонтного производства весьма затруднительно.

Более приемлемым способом удаления окисных пленок из зоны контакта представляется предложенный Ю.В. Клименко процесс, названный им как электроконтактная наварка с плавлением пограничного слоя. Проведенные Ю.В. Клименко немногочисленные эксперименты показали принципиальную возможность реализации процесса ЭКНП на режимах, обеспечивающих плавление металлов в зоне их контакта. На основании проведенных экспериментов автор предложил использовать данный процесс для наварки уплотняющих и направляющих поясков. Наварку деталей перекрывающимися валиками автор не рассматривал, по всей видимости, по причине слишком большой полученной волнистости кромок наваренных валиков. В настоящее время отсутствуют сведения о результатах промышленного использования предложенной технологии, методике подбора режимов наварки, эксплуатационных свойствах восстановленных деталей и т.д. Несмотря на почти полное отсутствие исследований процесса ЭКНП с плавлением пограничного слоя и результатов его практического использования, именно этот процесс, а точнее способ удаления окисных пленок из зоны контакта, представляется наиболее перспективным для дальнейшего исследования.

Учитывая ранее сказанное, разработанный в представленной диссертационной работе способ наварки был обозначен нами как электроконтактная наварка оплавлением, что указывает на важную роль жидкой фазы в процессе образования соединения.

Промышленному применению технологии ЭКНП препятствует и высокая вероятность разрушения восстановленных деталей, воспринимающих в процессе эксплуатации переменные нагрузки. Немногочисленные известные экспериментальные данные, изложенные в работах Ю.В. Клименко, Э.С. Каракозова, В.А. Емельянова, В.Б. Шляпина, свидетельствуют о снижении выносливости восстановленных деталей, наваренных ЭКНП в твердой фазе. Литературных данных о влиянии на усталостную прочность наварки проволокой на режимах, обеспечивающих плавление металлов в зоне их контакта, нами не установлено. Это вызывает необходимость проведения соответствующих исследований, направленных на выявление основных причин, влияющих на снижение усталостной прочности деталей после ЭКНО и разработке технологических мероприятий по ее повышению.

Анализ известных технологических схем наварки показал, что их общим недостатком является низкая производительность процесса ЭКНП, вызванного применением только одной присадочной проволоки. Таким образом, актуальной задачей является разработка технологических вариантов и соответствующего оборудования для двухпроволочной наварки широкой номенклатуры деталей машин.

Вторая глава посвящена исследованию процесса электроконтактной наварки оплавлением.

Рассмотрим процесс формирования валика наваренного металла. Во время пропускания тока наварки происходит осадка присадочной проволоки. Из-за кривизны электрода и детали осадка изменяется от максимального значения в центре контакта до нуля на периферии. Как показали проведенные эксперименты, разрыв проволоки происходит после отслоения от поверхности приваренного участка с малой степенью осадки (рис. 3). Матовая поверхность следа свидетельствует о некотором схватывании металлов. Таким образом, в осевом направлении навариваемого участка проволоки можно выделить два участка: участок вблизи центра контакта с максимальными значениями осадки и прочным соединением металлов и периферийный участок с недостаточной прочностью сцепления.



Рис.3. Отрыв наваренной проволоки

За время паузы электрод накатывается на недеформированный участок проволоки. Ранее нагретый объем металла охлаждается. Затем цикл наварки повторяется. Для формирования равнопрочного соединения по всей длине валика наваренного металла необходима доварка частично деформированных на предыдущем термомеханическом цикле участков проволоки. Таким образом, наварка каждого единичного объема присадочной проволоки происходит в две стадии: на I стадии имеет место предварительная осадка, на второй – окончательная наварка с формированием прочного соединения. Проведенные металлографические исследования позволили установить, что отсутствие непроваров и отслоений проволоки достигается при ее осадке не

менее 65...70%. Отсюда величина осадки, при которой заканчивается предварительный термический цикл, составляет не более 65%.

На первой стадии из-за малой площади контакта температура плавления металлов может быть достигнута уже в первые моменты пропускания импульса тока. Отсутствие уплотнительного пояска приводит к выдавливанию (вплоть до выплескивания) расплавленного металла из зоны контакта (рис.4). Отсюда сила тока должна ограничиваться условием отсутствия чрезмерных выплесков, нарушающих стабильность процесса наварки. Перемещение жидкой фазы вдоль

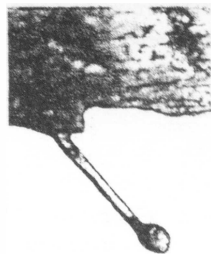
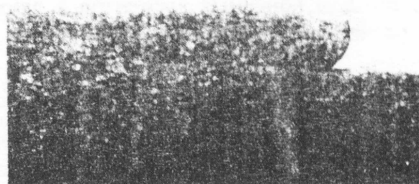


Рис.4. Выплеск

поверхности образующегося контакта проволока-деталь способствует выравниванию температур в зоне контакта, что является благоприятным фактором. На второй стадии осуществляется последующая осадка проволоки примерно до 70 % и более. Проведенные металлографические исследования показали, что на этой стадии достигается отсутствие границы раздела наваренного и основного металлов (рис.5).



а)



б)

Рис. 5. Макроструктуры соединения а) при осадке 50%, б) при осадке 75 %

Таким образом, легко контролируемая осадка проволоки может служить показателем качества процесса, что важно при практическом применении процесса ЭКНО в производственных условиях.

Влияние продолжительности импульса тока на распределение температурных полей в зоне наварки исследовалось посредством математического моделирования. С целью повышения точности и достоверности математического моделирования температурных полей предварительно было выполнено экспериментальное исследование процесса деформирования присадочной проволоки. Влияние осадки на боковые кромки валика наваренного металла, а также процесс массопереноса в поперечном сечении осаживаемой проволоки исследовались на свинцовых

моделях с нанесенной сеткой (рис.6). В результате математической обработки результатов замера получены эмпирические зависимости для расчета геометрии боковых кромок и траекторий перемещений узлов сетки в зависимости от величины осадки.

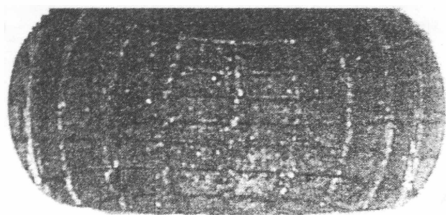


Рис.6. Деформированная свинцовая модель с сеткой

Влияние на осадку основных параметров наварки было экспериментально исследовано посредством применения математического аппарата планирования эксперимента. Полученные зависимости были использованы при задании закона изменения осадки проволоки от времени.

Математическое моделирование температурных полей выполнялось методом конечных элементов в двухмерной постановке задачи. Геометрия расчетной модели пояснена на рис. 7.

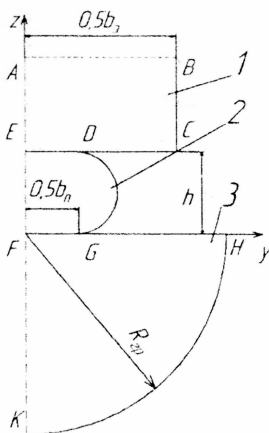


Рис.7. Геометрическая модель расчетной области

Ввиду симметричности модель включает половину поперечного сечения зоны наварки, включающей роликовый электрод 1, деформируемую присадочную проволоку 2 и объем основного металла 3 радиусом R_{np} .

Расчету температурных полей на каждом шаге временного интервала предшествовал расчет электрических полей с целью определения поля тепловых источников

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

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

где φ – электрический потенциал точек расчетной области; y, z – координаты в прямоугольной системе координат; j – плотность тока.

Полученные значения плотности тока учитывались при решении дифференциального уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{j^2 \rho}{c\gamma}, \quad (3)$$

где T – температура; $c\gamma$ – объемная теплоемкость; t – время.

При решении электрической задачи задавалась разность потенциалов между поверхностями А-В и К-Н (рис.7). При решении температурной задачи на поверхности детали вне зоны контакта задавалось граничное условие 3 – го рода, позволяющее учесть поверхностную теплоотдачу, вызванную подачей охлаждающей жидкости в зону наварки. Температура на поверхностях А-В и К-Н принималась постоянной и равной начальной температуре. Алгоритм вычислений представлен на рис.8.

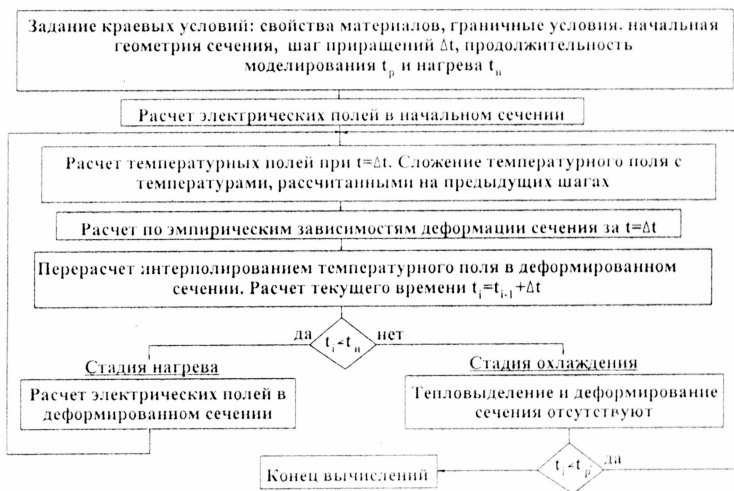


Рис. 8. Алгоритм расчета температурных полей

Выполненные расчеты показали, что на первой стадии продолжительностью 0,02...0,04 с максимальные температуры достигаются в центре контакта проволока-деталь. Из-за малой площади контакта температура плавления металлов может быть достигнута уже в первые моменты пропускания импульса тока. Перемещение жидкой фазы вдоль поверхности образующегося контакта проволока-деталь способствует выравниванию температур в зоне контакта, что является благоприятным фактором. На второй стадии из-за небольшой степени осадки проволоки расчет температурных полей можно выполнять без учета деформации проволоки в процессе нагрева, максимальные температуры в процессе пропускания тока наварки достигаются на периферии валика. С увеличением продолжительности импульса тока зона максимальных температур смещается к центру контакта проволока-деталь и под поверхность детали (рис.9).

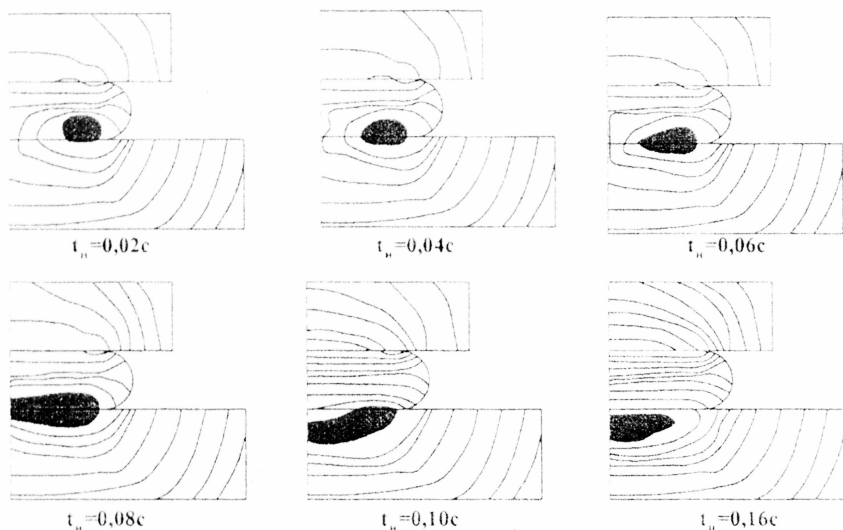


Рис.9. Перемещение высокотемпературной зоны с увеличением времени импульса

По этой причине продолжительность второй стадии более 0,06...0,08 с нецелесообразна, так как в центральной зоне контакта проволока-деталь возможно образование закрытой ванны расплавленного металла, кристаллизация которого в условиях небольшой осадки может привести к образованию кристаллизационных дефектов (усадочных пор и раковин) (рис.10).

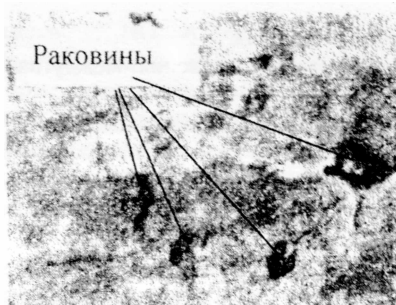


Рис.10. Раковины в основном металле

В связи с изложенным общая продолжительность импульса тока наварки не должна превышать $0,08...0,12$ с, а сила тока наварки должна быть достаточна для достижения температур плавления на всем протяжении импульса тока. На завершающей стадии формирования валика наваренного металла обеспечивается образование прочного сварного соединения с обшими для присадочного и основного металлов зернами. Жидкая фаза после окончания импульса тока наварки участвует в формировании боковых кромок валика наваренного металла.

Зона соединения на периферии контакта зачастую характеризуется повышенной дефектностью (наличие непроваров, микропор и рыхлостей), что объясняется, по всей видимости, малым временем контактирования металлов.

На стадии охлаждения зоны максимальных температур смещаются к центру валика и в глубь детали. Охлаждение валика наваренного металла в момент выключения тока наварки осуществляется главным образом за счет теплоотвода в электрод, за счет теплоотвода с боковых кромок валика в охлаждающую среду и в деталь.

Охлаждение объема основного металла вблизи зоны наварки происходит за счет теплопередачи с поверхности детали и теплоотвода в глубь детали. При этом поверхностный тепловой поток является преобладающим, что свидетельствует о важной роли поверхностного охлаждения. Выполненные расчеты термических циклов показали, что скорости охлаждения объемов металла, нагретых выше температуры $850...900$ °С, превышают критические скорости, что приводит к образованию закалочных структур. С удалением от поверхности скорости охлаждения снижаются, время пребывания при максимальных температурах увеличивается. В объемах металла, нагреваемых до температур ниже начала аустенитного превращения, может наблюдаться некоторый рост зерна из-за процессов рекристаллизации предварительно наклепанного основного металла. Этот факт экспериментально зафиксирован на глубинах $0,5...1,0$ мм от поверхности детали. Таким образом, в общем случае можно выделить 4 основные зоны при образовании сварного соединения в условиях ЭКНО:

1. Слой наваренного металла.

2. Переходная зона (зона сплавления) между наваренным и основным металлами.

3. Зона перекристаллизации (зона мелкого зерна).

В случае восстановления или изготовления деталей из наиболее применяемых конструкционных сталей проволоками с повышенным содержанием углерода в этих трех зонах формируются закалочные структуры.

4. Зона частичного отпуска ранее закаленного металла. В этой зоне происходит рекристаллизация предварительно наклепанного металла.

Проведенные металлографические исследования шлифов наваренных образцов выявили, что в зоне соединения основного и присадочного металлов видны разрозненные включения, представляющие собой, по всей видимости, раздробленные окисные пленки. Механизм образования оксидных включений пояснен на рис. 11.

Наварка единичного валика

Наварка слоя

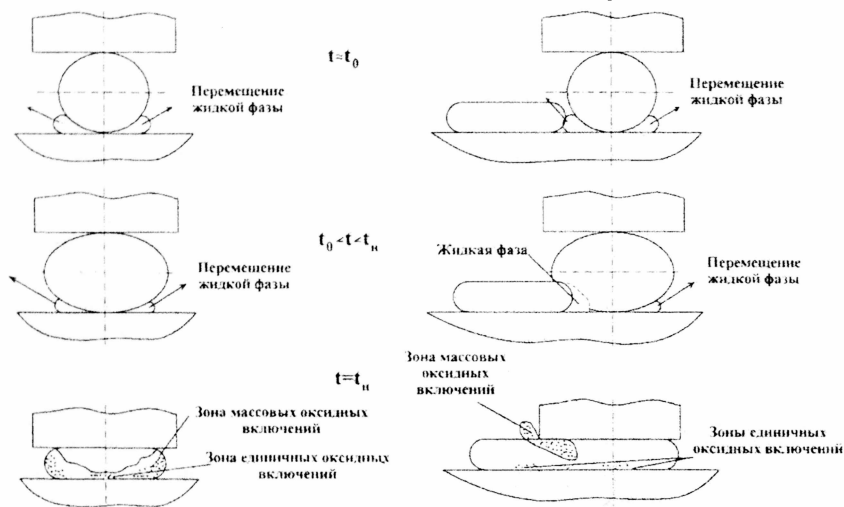


Рис. 11. Механизм образования оксидных включений

Толщина зоны, содержащей эти включения, составляет примерно 0,3...0,5 мм, что, очевидно, соответствует толщине образующейся жидкой прослойки. Массовые оксидные включения располагаются вблизи кромок валика наваренного металла, вблизи межвитковых соединений и в выдавленном из-под электрода металле. По этой причине наличие в зоне соединения наваренного и основного металлов, а также в межвитковых соединениях разрозненных окисных включений является характерной

особенностью процесса ЭКНО и не является дефектом процесса. Выполненные металлографические исследования данных образцов выявили также отсутствие в зоне соединения литой структуры металла, что вполне объяснимо большими скоростями охлаждения металла и большими степенями пластической деформации.

При наварке сплошного слоя металла наличие зон отпуска приводит к появлению неравномерной твердости слоя наваренного металла и поверхностного слоя основного металла. Основной причиной этого является многократный отпуск наваренного металла вблизи боковых кромок роликовых электродов. Математическое моделирование зон разупрочнения, а также проведенные эксперименты показали, что устранить «пятнистость» поверхностной твердости за счет оптимизации режимов наварки невозможно. Так, при наварке пружинной проволокой диаметром 1,6 мм разупрочнение может достигать до 10 единиц по шкале HRC, а суммарная площадь разупрочненных зон - до 40...50 %. Уменьшить ширину разупрочненных дорожек можно увеличением расхода охлаждающей воды и продолжительностью пауз между импульсами. Возможность управления шириной отпущенных зон мощностью сварочных импульсов и уменьшением перекрытия единичных площадок наваренного металла ограничивается условием предотвращения непроваров. Таким образом, появление пятнистой твердости наваренного металла вызвано особенностями термического цикла ЭКН и ее не следует рассматривать в качестве браковочного признака.

В третьей главе рассматриваются технологические мероприятия, направленные на предотвращение основных дефектов электроконтактной наварки, прежде всего, непровара как наиболее трудно выявляемого дефекта. При наварке проволокой со схожими с основным металлом свойствами непровар легко предотвращается правильным подбором режимов наварки. Так, с учетом проведенных исследований предложена следующая методика подбора режимов наварки. Вначале устанавливаются минимальные ток I_n и продолжительность импульса тока t_n , обеспечивающие явно заниженную тепловую мощность сварочного импульса. Продолжительность паузы t_n между импульсами устанавливается равной $(1...2)t_n$. Затем при неизменной величине продолжительности импульса t_n увеличивается сила тока I_n до появления некоторого разбрызгивания присадочного металла. Осадка присадочной проволоки ϵ должна составлять при этом 30...50%. После достижения указанной силы тока I_n увеличивается продолжительность импульса t_n до достижения осадки присадочной проволоки ϵ не менее 70%. При этом ширина образующейся на основном металле темно-фиолетовой окисной пленки должна составлять 2...3 мм. Пропорционально увеличению t_n увеличивается и продолжительность паузы между импульсами t_n . Поверхность валика наваренного металла должна быть покрыта коричневой окисной пленкой. После определения оптимальных параметров сварочного импульса (I_n и t_n) уточняются продолжительность паузы t_n и число оборотов шпинделя ω_d из условия формирования сплошного валика наваренного

металла. При этом следует учитывать, что уменьшение t_0 приводит к увеличению степени нагрева детали.

Шаг наварки определяется по выражению $m = k_m b_c$ (где b_c - ширина валика наваренного металла, мм; $k_m \sim 0,6...0,8$). Оптимальный шаг наварки m должен обеспечивать наложение присадочной проволоки на поверхность основного металла, а не на предыдущий соседний валик наваренного металла, что имеет место при слишком малом m . Увеличенный шаг наварки приводит к появлению пропусков между валиками наваренного металла.

Точность установки и поддержания шага m в процессе наварки должна составлять $0,2...0,3$ мм. К отклонению шага наварки от требуемых значений приводит его возможное колебание из-за случайных продольных перемещений проволоки вдоль рабочей поверхности роликового электрода. Для предотвращения возможных случайных колебаний шага наварки разработан способ наварки, согласно которому на рабочей поверхности роликового электрода выполнена кольцевая проточка радиусом $0,1...0,2$ от диаметра навариваемой проволоки. Эта проточка играет роль направляющей канавки, фиксируя положение навариваемой проволоки (рис.12). Наличие такой канавки затрудняет обеспечение качественного привара проволоки, но обеспечивает ее закрепление на детали. Согласно предложенному способу шаг наварки и ширина роликового электрода должны быть такими, чтобы прихваченная проволока доваривалась боковой частью рабочей поверхности электрода при его перемещении вдоль детали по винтовой линии.

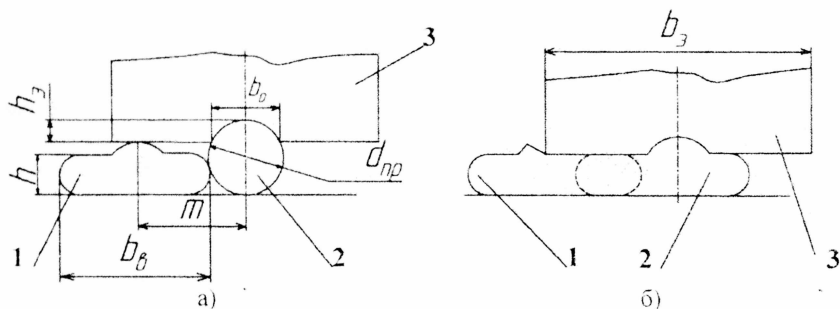


Рис.12. Схема ЭКН электродами с кольцевой проточкой: а) перед началом импульса тока наварки; б) после окончания импульса тока наварки (1 – ранее наваренный валик; 2 – привариваемая проволока; 3 – электрод)

При наварке проволок с существенно отличными от материала детали физическими свойствами возникает ряд затруднений. Так, при наварке стальной проволокой на чугунную основу имеет место преждевременное плавление чугуна при недостаточном нагреве проволоки, что вызывает, в свою очередь, появление непроваров.

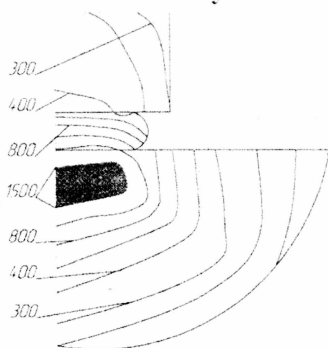
При наварке высоколегированной нержавеющей проволокой на стальную основу имеет место противоположный случай – преждевременное плавление присадочной проволоки, что вызывает повышенное разбрызгивание и перенос расплавленного металла на рабочую поверхность электрода.

Математическое моделирование температурных полей показало, что причиной этого следует считать смещение зоны максимальных температур либо в проволоку, либо в деталь (рис.13). Для поиска путей выравнивания скоростей нагрева основного и присадочного металлов был выполнен анализ уравнения теплового баланса в зоне наварки, полученного на основании рассмотрения системы уравнений

$$\begin{cases} Q_{np,0} = Q_{np,1} \\ Q_{oc,0} = Q_{oc,1} \end{cases}, \quad (4)$$

где $Q_{np,0}$, $Q_{oc,0}$ – количества теплоты, необходимые для сплавления привариваемого единичным импульсом тока объема присадочной проволоки и контактной поверхности основного металла; $Q_{np,1}$, $Q_{oc,1}$ – количества теплоты, затрачиваемые на нагрев единичным импульсом тока объема присадочной проволоки и приконтактного объема основного металла в процессе электроконтактной наварки.

Наварка пружинной проволоки второго класса на чугунную основу



Наварка высоколегированной проволоки на стальную основу

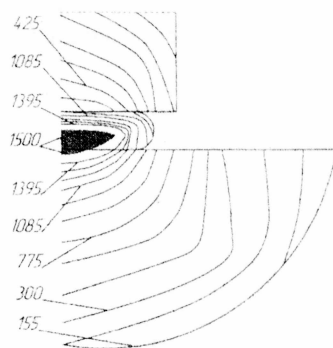


Рис.13. Смещение высокотемпературных зон при наварке проволок с резко отличными теплофизическими свойствами

В итоге, с учетом ряда допущений, получено следующее выражение, отражающее зависимость требуемой продолжительности импульса тока наварки в зависимости от теплофизических свойств проволоки и детали:

$$Bx^2 = t_n, \quad (5)$$

$$B = \frac{1}{a_{oc}} \left[\frac{\gamma_{np} c_{np} \rho_{oc} (T_{np, n1} - T_{np, n})}{\gamma_{oc} c_{oc} \rho_{np} (T_{oc, n1} - T_{oc, n})} \right]^2, \quad (6)$$

где x - некоторая толщина поверхностного слоя металла основы, где плотность сварочного тока значительна и количество выделяемой теплоты существенно для нагрева поверхности детали до температуры плавления ($x = 0,25 \dots 0,50$ мм); a_{oc} - коэффициент температуропроводности металла основы; γ_{np} , γ_{oc} - плотность металла проволоки и основы; c_{np} , c_{oc} - удельные теплоемкости металла проволоки и основы; ρ_{np} , ρ_{oc} - удельные электросопротивления металлов проволоки и основы; $T_{np, n1}$, $T_{oc, n1}$ - температуры плавления металлов проволоки и основы; $T_{np, n}$, $T_{oc, n}$ - начальные температуры металлов проволоки и основы.

Проведенные расчеты, выполненные с использованием выражений (4-6) показали, что для рассматриваемых комбинаций основного и присадочного металлов варьированием только силы тока и продолжительности нагрева добиться близких скоростей их нагрева затруднительно. В то же время из выражений (5-6) видно, что требуемое время импульса зависит от начальной температуры проволоки $T_{np, n}$. Таким образом, обеспечить равномерность нагрева в случае преждевременного плавления металла основы (случай наварки стали на чугун) можно предварительным подогревом навариваемой проволоки. Для этой цели разработан способ электроконтактной наварки, согласно которому навариваемая проволока включается в сварочный контур установки, что и обеспечивает предварительный нагрев проволоки проходящим электрическим током (рис.14).

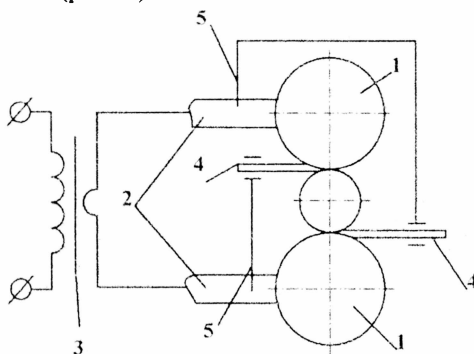


Рис. 14. Схема процесса ЭКН с подогревом проволоки: 1- роликовый электрод; 2- клещевина; 3 – сварочный трансформатор, 4 – навариваемая проволока; 5 – токоподводы к проволоке

При наварке высоколегированной проволокой на сталь уменьшить скорость нагрева проволоки можно за счет снижения плотности тока и развития процессов теплопередачи в электрод и основной металл. Это может быть достигнуто увеличением продолжительности импульса тока наварки, а также увеличением площадей контакта проволока-электрод и проволока-деталь или за счет увеличения приложенной к электродам нагрузки. Увеличение площадей контакта проволока-электрод и проволока-деталь может быть достигнуто за счет предварительного деформирования присадочной проволоки.

Учитывая двухстадийность формирования валика наваренного металла, эффект предварительного деформирования присадочной проволоки может быть усилен за счет уменьшения скорости наварки. При этом основным импульсом тока будет навариваться предварительно осаженный до больших значений объем проволоки. Данные мероприятия использованы при разработке технологии наварки проволокой 40X13 штоков подбивочных блоков путевых машин ВПР-1200, ВПР-02, ВПРС-500.

Распространенным дефектом являются зазоры и несплошности между витками, возникновение которых вызвано тремя основными причинами:

- слишком большим шагом наварки, что легко устраняется его корректировкой;
- колебанием шага наварки из-за возможных случайных продольных перемещений проволоки вдоль рабочей поверхности роликового электрода;
- слишком большой волнистостью кромок валиков наваренного металла, вызванной чрезмерно высокой скоростью наварки.

Для предотвращения возможных случайных колебаний шага разработан способ наварки, при котором на рабочей поверхности роликового электрода выполнена кольцевая проточка. Она играет роль направляющей канавки, фиксируя положение навариваемой проволоки на поверхности детали. Шаг наварки и ширина роликового электрода должны быть такими, чтобы прихваченная проволока доваривалась боковой частью рабочей поверхности электрода при его перемещении вдоль детали по винтовой линии.

Волнистость кромок валика наваренного металла регулируется скоростью наварки. Это вызвано тем, что процесс наварки проволокой по сравнению с наваркой листовой заготовкой характеризуется гораздо большей осадкой навариваемого материала и, следовательно, гораздо большей его деформацией в плоскости контакта. На основании полученных нами экспериментальных данных было установлено, что для гарантированного предотвращения дефектов сплошности в межвитковых соединениях волнистость кромки валика наваренного металла не должна превышать 0,2...0,3 мм. На основании этого требования с использованием результатов исследования формоизменения проволоки при ее осадке в работе приведены зависимости, позволяющие рассчитать скорость наварки с учетом диаметров проволоки, детали и электрода.

При наварке углеродистой проволокой в слое наваренного металла могут образовываться макро- и микротрещины. Основной причиной появления макротрещин является непровар. Такого рода трещины образуются уже, как правило, в процессе механической обработки наваренной поверхности и часто сопровождаются отслаиванием покрытия. Механизм возникновения таких трещин, по всей видимости, следующий. В процессе шлифования слоя наваренного металла в нем происходит выделение теплоты. При качественном соединении наваренного и основного металлов выделяющаяся теплота интенсивно отводится в тело детали, способствуя охлаждению обрабатываемого слоя и предотвращая возникновение чрезмерных термических напряжений. В случае же наличия непроваров возникает тепловой барьер, препятствующий отводу тепловой энергии из зоны шлифования и способствующий перегреву слоя наваренного металла. Возникающие при этом температурные напряжения, с одной стороны, и пониженная прочность соединения покрытия с основой, с другой стороны, способствуют растрескиванию слоя наваренного металла. Роль непроваров в качестве теплового барьера подтверждается тем, что образование таких трещин сопровождается образованием цветов побежалости, свидетельствующих о перегреве поверхности.

На основании имеющегося многолетнего опыта нами сделан вывод, что микротрещины являются менее опасным дефектом и для большинства деталей, не воспринимающих при эксплуатации значительных циклических нагрузок, не являются браковочным признаком. Микротрещины при ЭКН возникают, как правило, от поверхности наваренного слоя вблизи краев валиков наваренного металла и в зонах термического влияния от единичных площадок наваренного металла и не распространяются в основной металл. Их протяженность составляет не более нескольких десятых долей миллиметров. Вероятность образования микротрещин увеличивается с повышением диаметра навариваемой проволоки и толщины слоя наваренного металла. Следует отметить, что выявить микротрещины можно, прежде всего, металлографическими исследованиями шлифов. Применение для этих целей магнитных методов контроля, в частности, магнитопорошковой дефектоскопии, затруднено по причине наличия в покрытии резко очерченных зон с различными структурами металла, границы которых совпадают с наиболее вероятными местами образования микротрещин. Для предотвращения образования микротрещин можно рекомендовать применение присадочных проволок с пониженным содержанием углерода.

В главе 4 излагаются результаты исследования влияния процесса электроконтактной наварки оплавлением на усталостную прочность образцов. Для исследования выносливости образцов после электроконтактной наварки разработана машина для усталостных испытаний МУИ-01М (рис.15), реализующая схему испытаний при круговом симметричном изгибе с вращением.

Для имитации условий работы валов с прессовыми посадками было принято решение проводить испытания цилиндрических образцов. Прессовая посадка имитировалась посредством креплением образца в цангах испытательной машины. Диаметр образцов составлял 40 мм. Образцы изготавливались из стали 40Х после улучшения. Механические свойства образцов приведены в табл.1.

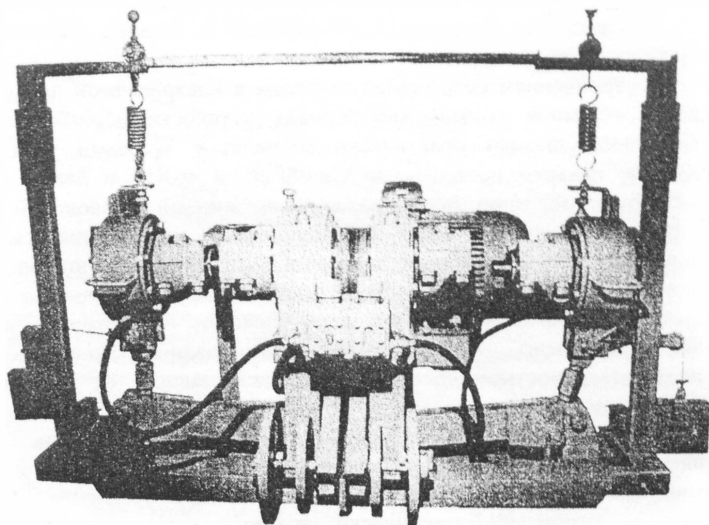


Рис.15. Машина для усталостных испытаний МУИ-01М

Таблица. 1.
Механические свойства стали 40Х для изготовления образцов

Марка стали	σ_s , МПа	σ_m , МПа	Твердость, НВ
40Х	940	740	241

Всего было изготовлено 9 серий образцов:

- серия 1 – образцы без ЭКН (основной металл);
- серия 2 – ЭКН пружинной проволокой в 1 слой;
- серия 3 – ЭКН проволокой Св-08Г2С в 1 слой;
- серия 4 – ЭКН пружинной проволокой в 2 слоя;
- серия 5 – электроконтактная закалка;
- серия 6 – ЭКН проволокой 40Х13 в 1 слой;
- серия 7 – ЭКН пружинной проволокой в 3 слоя;
- серия 8 – ЭКН пружинной проволокой в 4 слоя;
- серия 9 – ЭКН пружинной проволокой в 1 слой с последующим обкатыванием роликом.

Образцы подвергались электроконтактной наварке на режимах, применяемых в промышленных условиях при восстановлении реальных деталей. Наваренные образцы шлифовались в номинальный размер. После шлифования образцы контролировались на отсутствие на обработанной поверхности трещин, шлифовочных прижогов, отслоений и других дефектов. Образцы испытывались на базе $N = 10^7$ циклов. Результаты статистической обработки (рис. 16) позволяют сделать следующие выводы:

1. Процессы электроконтактной наварки и закалки значительно снижают усталостную прочность.

2. С увеличением содержания углерода в навариваемой проволоке выносливость образцов повышается. Кривая усталости образцов после электроконтактной закалки практически совпадает с кривыми усталости образцов после наварки проволоками Св-08Г2С и 40Х13 и лежит ниже кривой усталости образцов после наварки пружинной проволокой. Во-первых, это также подтверждает большую роль напряжений сжатия, формирующихся при образовании закалочных структур. Во-вторых, это свидетельствует о том, что падение усталостной прочности после электроконтактной наварки в 1 слой независимо от применяемой марки проволоки обусловлено, прежде всего, формированием неоднородной структуры в поверхностном слое детали и мало зависит от возможных микродефектов наваренного слоя.

3. При многослойной наварке в первом слое, имеющем ряд концентраторов напряжений в виде оксидных включений, происходит снятие напряжений сжатия, что вызывает резкое снижение усталости. Таким образом, при восстановлении циклически нагруженных деталей желательно исключить наварку нескольких слоев.

4. С увеличением толщины слоя наваренного металла зона долома располагается практически в центре образца (рис. 17), что свидетельствует о пониженной работе зарождения трещин в слое наваренного металла и зоне термического влияния.

С целью исследования возможности повышения усталостной прочности наваренных деталей была опробована обработка поверхностно - пластическим деформированием.

Установлено, что обкатывание образцов, наваренных пружинной проволокой 2 класса приводит к значительному увеличению их выносливости (рис. 16.б). Таким образом, технология восстановления циклически нагруженных деталей должна обязательно включать операцию поверхностно-пластического деформирования. На основании полученных зависимостей разработана методика предварительной оценки возможного снижения выносливости деталей после ЭКНО, которая внедрена на ОАО «Калугапутьмаш».

Глава 5 посвящена разработке технологического оборудования для ЭКН и анализу результатов промышленного использования процесса ЭКНО.

С целью восстановления деталей различных размеров и массы был разработан ряд установок (рис.18).

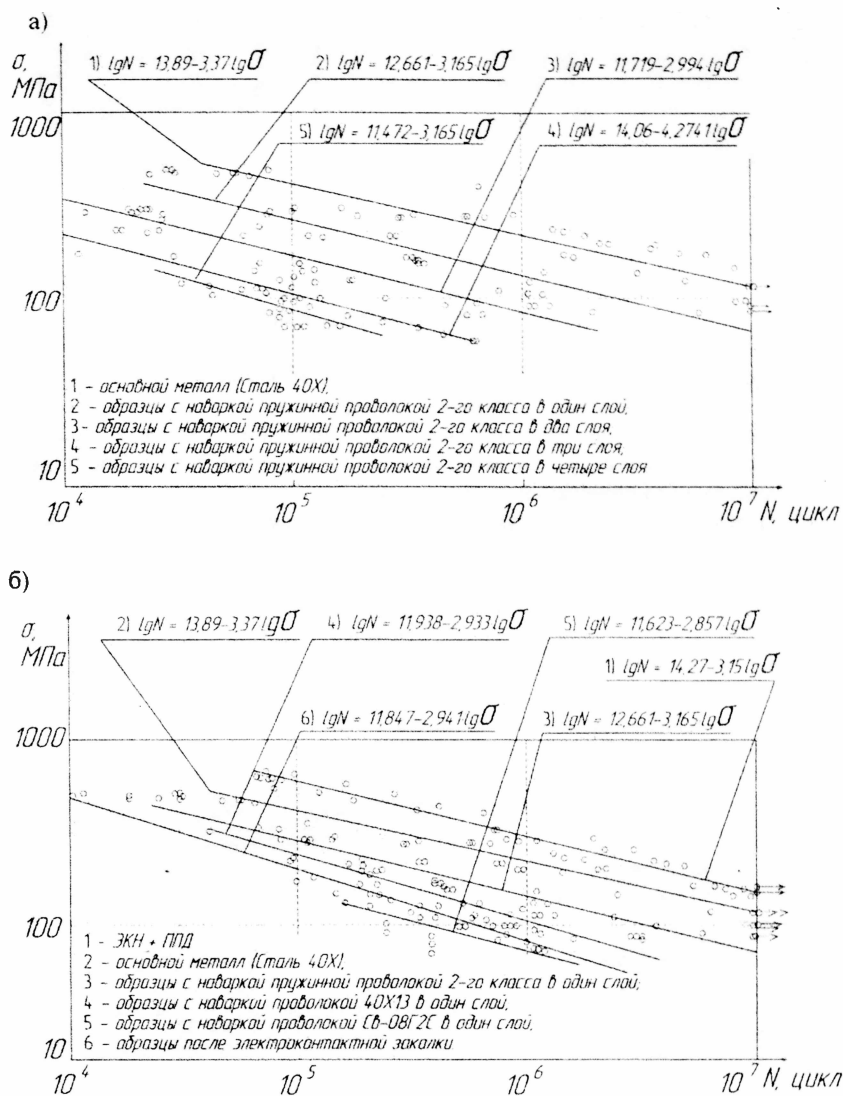


Рис.16. Результаты исследования усталостной прочности образцов после электроконтактной наварки и заковки

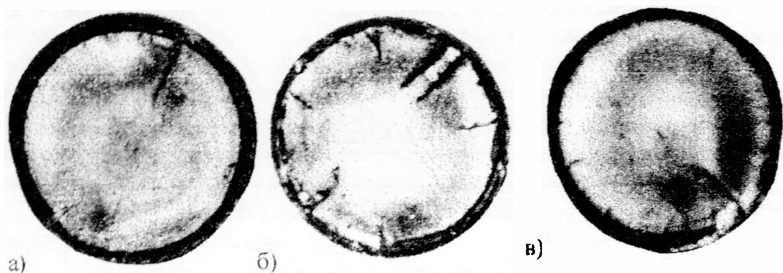


Рис. 17. Изломы образцов после наварки пружинной проволокой в 4 слоя:

- а) образец выдержал 28144 цикла при $\sigma = 304$ МПа;
- б) образец выдержал 66686 циклов при $\sigma = 156$ МПа;
- в) образец выдержал 80119 циклов при $\sigma = 98$ МПа

Для обеспечения более высокой жесткости базовых узлов и снижения затрат на изготовление установки базируются на станинах токарно-винторезных станков. Для плавного регулирования скорости вращения шпинделя установка оснащена приводом постоянного тока с постановкой дополнительного понижающего редуктора.

Приводы сжатия и регулировки раствора двух сварочных клещевин, а также сварочный трансформатор ТВК-75 размещены на поперечном суппорте станка и в случае необходимости могут отводиться назад, так чтобы клещевины не мешали установке и снятию массивных валов с помощью грузоподъемного механизма. При изготовлении установок было применено новое конструкторское решение механизма сжатия электродов с отдельными приводами перемещения и прижатия, что расширяет технологические возможности процесса ЭКНП.

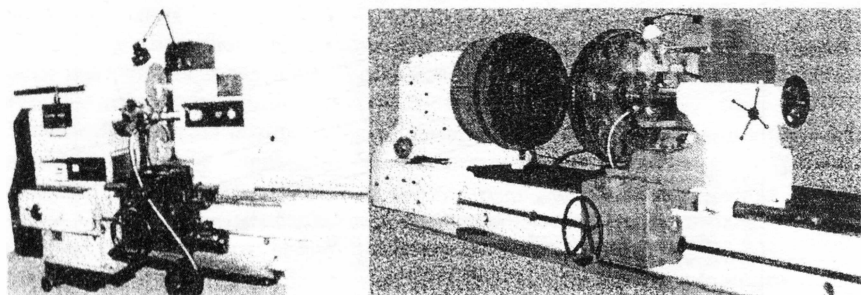


Рис. 18. Установки для электроконтактной наварки

Для предотвращения выдавливания проволоки из контакта роликового электрода с деталью, что имеет место в известных конструкциях узлов

подачи, был использован узел подачи проволоки, в котором жесткость системы направляющая трубка - роликовый электрод повышена за счет базирования направляющей трубки о боковые поверхности роликового электрода упорными пластинами. С помощью таких устройств наварка может производиться двумя проволоками, подаваемыми с двух отдельных катушек под верхний и нижний роликовые электроды. При этом наварка двумя проволоками одновременно стала возможна благодаря предотвращению выдавливания проволоки из-под электродов, что позволило отказаться от необходимости постоянного наблюдения за процессом наварки.

Марка проволоки выбирается в зависимости от требований чертежа детали и условий изнашивания восстанавливаемой поверхности. Достаточно иметь в наличии 2...3 марки проволоки, чтобы охватить большинство случаев восстановления деталей. Так, для восстановления поверхностей под прессовые посадки, высокая твердость которых согласно чертежу не требуется, может применяться низкоуглеродистая проволока Св-08, Св-08Г2С и т.д. При восстановлении поверхностей трения - углеродистые проволоки 65Г, пружинная проволока II класса, 30ХГСА и др. При необходимости восстановления поверхностей, подверженных коррозии или коррозионно-механическому износу – проволока 40Х13.

Сам процесс наварки двумя присадочными проволоками может быть реализован по двухзаходной или однозаходной технологическим схемам. При двухзаходной технологической схеме роликовые электроды устанавливаются друг напротив друга, а их продольная подача за 1 оборот детали равна двум шагам наварки так, что обе присадочные проволоки навариваются на поверхность детали. Эту технологическую схему целесообразно применять при наварке слоев небольшой толщины. При однозаходной технологической схеме роликовые электроды устанавливаются с некоторым продольным смещением относительно друг друга, а их продольная подача за 1 оборот детали равна шагу наварки. В результате этого впереди стоящим электродом на поверхности детали наваривается сплошной слой металла, а отстоящим электродом формируется уже второй слой наваренного металла. Эту технологическую схему целесообразно применять при наварке слоев повышенной толщины.

Требуемое количество слоев наваренного металла зависит от величины износа, диаметра присадочной проволоки, состояния базовых поверхностей, а также от ряда других параметров и рассчитывается по предложенной нами методике. В случае необходимости выполнения многослойной наварки процесс выполняется непрерывно путем изменения направления продольной подачи роликовых электродов.

Последующая обработка заключается в размерной механической обработке наваренной поверхности точением или шлифованием и, в ряде случаев, в правке наваренных деталей, обработке ППД для повышения усталостной прочности и т.д. Припуск на механическую обработку составляет в среднем 0,6...0,8 мм на диаметр. При шлифовании необходимо обращать внимание на недопустимость появления прижогов, которые

свидетельствуют, как правило, о наличии непроваров. Для наиболее ответственных деталей, для которых наличие непроваров категорически недопустимо в качестве метода оценки качества соединения наваренного и основного металлов можно рекомендовать обработку ППД. Вздутие слоя наваренного металла свидетельствует о наличии непроваров.

Восстановленные детали подвергаются контролю качества, который включает в себя контроль их геометрических параметров, контроль поверхностной твердости и контроль трещин в слое наваренного металла. Для большинства деталей достаточно визуального контроля макротрещин, наличие которых недопустимо и свидетельствует либо о наличии непроваров, либо о наличии трещин в основном металле.

В случае необходимости выявления микротрещин, что является целесообразным только при контроле особо ответственных деталей, воспринимающих циклические нагрузки, следует применять методы цветной дефектоскопии.

При восстановлении поверхностей с глубокими местными выработками целесообразно применять локальную предварительную дуговую наплавку.

К настоящему времени разработаны технологии восстановления более чем 800 наименований деталей машин и механизмов различного назначения, примеры которых приведены на рис.19.

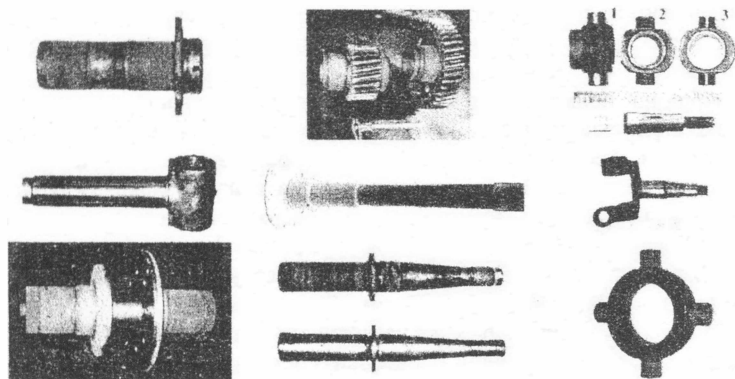


Рис.19. Примеры восстанавливаемых деталей

Преимущественная область применения процесса ЭКНП оплавлением связана:

- 1) с наваркой деталей малого диаметра, в частности, оси подбивочного блока, шеек роторов электромоторов, вал насоса;
- 2) с наваркой элементов деталей типа полый вал (шестерня гидропередачи, катки тракторов);
- 3) с наваркой поверхностей трения качения (крестовина);

4) с наваркой чугуновых деталей (коленвалы двигателей легковых автомобилей);

5) с наваркой коррозионностойких и износ-коррозионностойких слоев (шток подбивочного блока).

В то же время возможна наварка и цилиндрических поверхностей других деталей вместо наплавки под флюсом, в среде углекислого газа, вибродуговой наплавки, что и делает технологию ЭКНО более универсальной по сравнению с известными способами дуговой наплавки.

Проведенные исследования и промышленный опыт почти 15-летнего применения процесса ЭКНО позволяет рассматривать его в качестве современной альтернативы процессу вибродуговой наплавки в струе воды. По сравнению с этой технологией процесс ЭКНО характеризуется более высоким качеством слоя наваренного металла, меньшей глубиной проплавления основного металла, возможностью наваривать слои металла различного химического состава, отсутствием выделения сварочных аэрозолей и пыли, мощного светового излучения, что позволяет размещать оборудование для ЭКН непосредственно в механообрабатывающем цехе.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований, относящихся к проблеме разработки технологии электроконтактной наварки оплавлением.

1. Существенным недостатком электроконтактной наварки в твердой фазе является сильная зависимость прочности получаемого соединения от состава окружающей среды и состояния поверхности металлов. Анализ работ, посвященных сварке давлением, показал, что основной причиной этого следует считать затрудненность удаления из зоны контакты окисных и гидроокисных пленок. Наиболее приемлемым способом удаления и дробления в зоне контакта металлов окисных пленок представляется ведение процесса наварки на режимах, обеспечивающих плавление поверхностных слоев детали и проволоки в зоне их контакта. В связи с важной ролью образующейся жидкой фазы такой процесс электроконтактной наварки можно обозначить как «электроконтактная наварка оплавлением».

2. При ЭКН оплавлением из-за кривизны поверхности электродов и детали наварка единичных объемов проволоки осуществляется в две стадии. На первой стадии осуществляется осадка проволоки до 65%. В зоне контакта проволока – деталь образуется соединение, как правило, без общих зерен вследствие кратковременности термического цикла, а разрушение соединения происходит в зоне контакта, что свидетельствует о недостаточной прочности образовавшегося соединения. На второй стадии осуществляется осадка до 70 % и более. Обеспечивается образование общих зерен в центральной части валика и прочного соединения с общими зернами.

3. Для образования соединения без дефектов сплошности необходимо, чтобы уже на первой стадии жидкая фаза образовывалась в зоне контакта

проволока-деталь и существовала на всем протяжении импульса тока наварки, выдавливаясь при осадке из зоны контакта, в результате чего обеспечивается разрушение окисных пленок с частичным их удалением из зоны контакта расплавленным металлом. В результате этого создаются условия для образований на второй стадии соединения с общими зернами.

4. Основным фактором, определяющим расположение зоны максимальных температур на второй стадии, является продолжительность пропускания тока наварки. С увеличением продолжительности импульса тока эта зона смещается к центру контакта и под поверхность детали, приводя к образованию закрытой ванны расплавленного металла и способствуя возникновению дефектов сплошности усадочного характера.

5. Структура поверхностного слоя детали с наваренным металлом состоит из 4-х основных зон:

- слоя наваренного металла;
- переходной зоны (зоны сплавления) между наваренным и основным металлами толщиной до 0,5 мм с окисными включениями;
- зоны закалки глубиной до 1,5-2 мм, в этой зоне протекают процессы перекристаллизации, приводящие к образованию мелкого зерна;

В случае восстановления или изготовления деталей из наиболее применяемых конструкционных сталей проволоками с повышенным содержанием углерода в этих трех зонах формируются закалочные структуры.

- зона частичного отпуска ранее закаленного металла, в этой зоне происходит рекристаллизация предварительно наклепанного металла.

При наварке сплошного слоя металла наличие последней зоны приводит к появлению неравномерной твердости слоя наваренного металла и поверхностного слоя основного металла.

6. При использовании присадочной проволоки с резко отличными от металла детали электро- и теплофизическими свойствами основная проблема при наварке заключается в преждевременном плавлении одного из металлов, что ухудшает качество наварки и приводит либо к непроварам, либо к чрезмерному плавлению одного из металлов и образованию усадочных дефектов или трещин. Как показали теоретические и экспериментальные исследования, предотвратить возникновение указанных дефектов в случае преждевременного плавления металла основы (случай наварки стали на чугун) можно предварительным подогревом навариваемой проволоки. При преждевременном плавлении проволоки (случай наварки высоколегированной проволокой стальной детали) следует снижать скорость наварки и увеличивать усилие прижатия электродов.

7. Процессы электроконтактной наварки и поверхностной закалки снижают усталостную прочность деталей. Наварка одного-двух слоев, как и поверхностная закалка, дают примерно одинаковую выносливость, которая определяется, главным образом, особенностями структуры поверхностного слоя основного металла и мало зависит от состава навариваемой проволоки и возможных микродефектов слоя наваренного металла.

8. При наварке одного слоя выносливость деталей повышается с увеличением содержания углерода в присадочной проволоке, что можно объяснить известным явлением роста напряжений сжатия в результате образования в слое наваренного металла закалочных структур. При этом положительный эффект от увеличения остаточных напряжений сжатия преобладает над возможным отрицательным эффектом увеличения микродефектности структуры слоя наваренного металла в результате образования закалочных трещин. Обработка поверхностно-пластическим деформированием (ППД) наваренных поверхностей повышает выносливость деталей.

9. Снижение выносливости деталей после многослойной наварки объясняется отпуском ранее наваренных слоев. При этом зоны формирования растягивающих напряжений и расположения микродефектов в нижних слоях наваренных металла совпадают, усиливая неблагоприятное влияние друг на друга. По этой причине детали, воспринимающие в процессе эксплуатации циклические нагрузки, не должны подвергаться многослойной наварке.

10. На основании проведенных исследований разработано более чем 800 технологий восстановления изношенных деталей различных машин: городского автотранспорта, автотракторной техники, путевых машин и подвижного состава, горнодобывающего оборудования, станочного парка машиностроительных предприятий и т.д. Для реализации процесса электроконтактной наварки оплавлением разработана установка УЭН-01 и ее модификации, которые внедрены на 25 промышленных предприятиях России. Суммарный экономический эффект составил более 55 млн. руб.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Дубровский В.А., Булычев В.В., Столяров И.В. Расчет некоторых показателей электроконтактной наплавки деталей типа вал // Сварочное производство. - 1996. - № 11. - С.32-33.

2. Соловей А.Г., Дубровский В.А. Прогрессивные технологии в производство // Тяжелое машиностроение. - 1996. - № 10. - С. 5-6.

3. Дубровский В.А., Булычев В.В. , Столяров И.В. Оптимизация тепловых процессов при электроконтактной наварке проволокой // Сварочное производство. - 1997. - № 9. - С.19-21.

4. Дубровский В.А. Восстановление коленчатых валов двигателей легковых автомобилей двухпроводной электроконтактной наплавкой // Сварочное производство. -1997.- № 11. - С.57-58.

5. Дубровский В.А. Установка УЭН-01 для электроконтактной наплавки и поверхностной закалки деталей типа вал // Сварочное производство.- 1997.- № 7.- С. 36-37.

6. Дубровский В.А., Булычев В.В. Головка ГКПО-01 для электроконтактной наплавки и поверхностной закалки деталей тел вращения // Сварочное производство. - 1997. - № 10. - С.36.

7. Дубровский В.А. Восстановление деталей сельхозмашин двухпроводочной электроконтактной наплавкой // Техника в сельском хозяйстве. -1997. -№ 5. -С. 38-39.

8. Дубровский В.А., Булычев В.В. Основные направления научно-исследовательских работ в области восстановления деталей машин электроконтактной наплавкой проволокой // Социально-экономические проблемы управления производством, создание прогрессивных технологий, конструкций и систем в условиях рынка: Тез. докл. Российской научно-технической конференции. – Калуга, 1997. - С. 122

9. Дубровский В.А., Булычев В.В. Электроконтактная наплавка проволокой с подплавлением соединяемых металлов // Сварочное производство. - 1998. - №1. - С.22-24.

10. Логинов Г.П., Дубровский В.А. Электроконтактная наплавка проволокой - эффективный способ восстановления изношенных деталей машин // Автоматизация и современные технологии. - 1998. - № 7. - С.10-12.

11. Соловей А.Г., Дубровский В.А. Перспективы внедрения технологий электроконтактной наплавки и поверхностной закалки //Тяжелое машиностроение. - 1999. -№7. - С.30-33.

12. Соловей А.Г., Дубровский В.А. Поверхностное упрочнение деталей машин электроконтактной наплавкой //Тяжелое машиностроение.- 1999. -№11. -С.11-14.

13.Дубровский В.А. Расчет электрических полей в детали применительно к процессу электроконтактной наплавки // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Труды юбилейной всероссийской научно-технической конференции. - Калуга, 1999.- С.29.

14. Электроконтактная наплавка износ- и коррозионностойких материалов / В.А. Дубровский, И.В. Столяров, В.В. Булычев и др. // Тяжелое машиностроение. -2000. -№9. -С.19-20.

15. Дубровский В.А. Расчет температурных полей при электроконтактной поверхностной закалке импульсным током // Тяжелое машиностроение.- 2000. -№ 7.- С. 31-34.

16. Восстановление деталей электровозов электроконтактной наплавкой проволокой/ К.А. Кочин, В.А. Дубровский, В.В. Булычев и др. // Локомотив.- 2000.- №3.- С.32-33.

17. Дубровский В.А. О роли предварительного деформирования присадочной проволоки в образовании соединения при электроконтактной наплавке // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Труды Всероссийской научно-технической конференции. – Калуга, 2000. -С.18.

18. Дубровский В.А., Булычев В.В. , Зыбин И.Н. Изменение формы поперечного сечения проволоки при электроконтактной наплавке // Сварочное производство. -2001.- № 6.- С.23-27.

19. Дубровский В.А., Булычев В.В., Хабаров В.Н. Восстановление деталей путевых машин электроконтактной наплавкой // Путь и путевое хозяйство.- 2001.- №2.- С.13-15.
20. Дубровский В.А., Булычев В.В., Пономарев А.И. Влияние режима электроконтактной наварки на характеристики твердости наваренного слоя // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. - Калуга, 2002.- С.45-46.
21. Дубровский В.А. Исследование выносливости образцов после электроконтактной наварки оплавлением // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. - Калуга, 2002.- С.47.
22. Дубровский В.А. Процесс электроконтактной (шовной) наварки оплавлением // Сварка на рубеже веков: Тез. докл. научно-технической конференции. - Москва, 2002.- С.74.
23. 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.
24. Дубровский В.А., Булычев В.В., Аксенов Ю.Н. Техно-экономический анализ технологий и оборудования для электроконтактной наварки проволокой // Тяжелое машиностроение. - 2003.- №12.- С.14-16.
25. Дубровский В.А., Заярный С.Л. Машина для усталостных испытаний МУИ-01М// Тяжелое машиностроение. -2003.-№6. -С.28.
26. Аксенов Ю.Н., Дубровский В.А., Булычев В.В. Установа для электроконтактной наварки и поверхностной закалки // Безопасность движения поездов: Труды IV научно-практической конференции. - Москва, 2003.- С.IV-3 – IV-4.
27. Дубровский В.А. Повышение качества восстановления изношенных деталей железнодорожного транспорта электроконтактной наваркой // Безопасность движения поездов: Труды IV научно-практической конференции. - Москва,2003.- С.IV-29 – IV-30.
28. Дубровский В.А. Исследование механизма образования соединения при электроконтактной наварке проволокой // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. - Москва, 2003. - Том 1.- С.48.
29. Дубровский В.А. Исследование тепловой обстановки в зоне электроконтактной наварки проволокой // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. - Москва, 2003.- Том 1.- С.49-50.
30. Дубровский В.А., Булычев В.В., Аксенов Ю.Н. Как повысить качество электроконтактной наварки проволокой // Локомотив. 2004. -№3.- С.30-32.

31. Дубровский В.А. Технологические особенности процесса электроконтактной наварки оплавлением // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования инструмента и технологической оснастки: Материалы 7-й международной конференции - выставки. - Санкт-Петербург, 2005. - С.38-45.

32. Дубровский В.А. Исследование усталостной прочности образцов после электроконтактной наварки // Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 5-й международной научно-технической конференции. - Киев, 2005. - С.79-81.

33. Электроконтактная наварка проволокой посадочных поверхностей шестерен / В.А. Дубровский, И.В. Столяров, В.В. Булычев и др. // Тяжелое машиностроение. -2005.- №9.- С.30-31.