

На правах рукописи

Зыбин Игорь Николаевич

**РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ
НАВАРКИ ПРОВОЛОКОЙ НАКЛОННЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ**

**Специальность 05.03.06 – Технологии и машины сварочного
производства**

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



Москва – 2003

КФМБ

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

Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент
Дубровский В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ямпольский В.М.

доктор технических наук, профессор
Поляченко А.В.

Ведущая организация — ЗАО "Калужский авторемонтный завод"

Защита состоится « 15 » мая 2003 г. на заседании диссертационного совета Д212.141.01. 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 одном экземпляре, 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.

Автореферат разослан « 1 » апреля 2003 г.

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



А.В. Коновалов

Подписано к печати 26.04.2003 г.

Объем 1 п. л.

Тираж 100 экз.

Заказ № 47

АП "Полиграфия", г. Калуга, ул. Тульская, д.13а

231

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Актуальность работы. Для машиностроительных и ремонтных предприятий важной задачей является повышение качества восстановления деталей машин при одновременном снижении материальных и трудовых затрат.

Решение данной задачи в значительной мере связано с внедрением в производство перспективных ресурсосберегающих технологий. С целью снижения капитальных затрат наиболее целесообразно использование технологий, обеспечивающих возможность восстановления деталей машин широкой номенклатуры на одном и том же оборудовании.

Одной из таких технологий является электроконтактная наварка проволокой (ЭКНП) оплавлением. В настоящее время ЭКНП оплавлением применяется на машиностроительных, ремонтных предприятиях при восстановлении деталей машин различного назначения. При этом наряду с цилиндрическими поверхностями деталей возникает необходимость в восстановлении конических поверхностей с углами конуса поверхности, в большинстве случаев находящихся в диапазоне от 0° до 30° . Однако широкое внедрение процесса сдерживается возникновением дефектов наваренного металла. Металлографическими исследованиями установлено, что основными дефектами являются непровары в зоне соединения металлов и несплошности между валиками наваренного металла.

В связи с изложенным предотвращение образования непроваров и несплошностей при электроконтактной наварке проволокой оплавлением является актуальной задачей.

Целью работы является повышение качества наваренного металла при электроконтактной наварке проволокой поверхностей деталей за счет предотвращения образования непроваров и дефектов сплошности.

Методы исследований. Основные задачи работы решались на основе сочетания теоретических и экспериментальных методов исследования.

В зависимости от технологической схемы выполнения процесса проводились вычисления шага наварки. В работе выполнялись теоретические расчеты геометрии контакта проволоки с деталью с использованием ПЭВМ и толщины слоя наваренного металла, получаемой при наварке за проход.

Экспериментальные исследования изменения формы кромок валика наваренного металла выполнялись на свинцовых моделях с применением разработанного в работе приспособления для их деформирования. Исследование зависимости осадки проволоки от параметров режима осуществлялось с использованием метода планирования эксперимента. Экспериментальные исследования осевой деформации проволоки и ширины контакта проволоки с деталью проводились на установке для электроконтактной наварки УЭН-01. Макроструктура поверхностного слоя наваренных деталей, ширина контакта проволоки с деталью определялись с помощью электронного микроскопа INTEL QX3. Качество соединения металлов оценивалось металлогра-

фическими исследованиями макро- и микрошлифов с использованием электронного микроскопа INTEL QX3 и оптического микроскопа МИМ-8 соответственно.

Для получения экспериментальных зависимостей, описывающих форму кромок валика наваренного металла и осевую деформацию проволоки при ее осадке, применялись статистические методы обработки результатов эксперимента.

Научная новизна работы:

1. Установлено, что соединение металлов при электроконтактной наварке проволокой оплавлением формируется за счет механизмов образования в твердой фазе и частично в жидкой фазе, которая способствует дроблению и удалению поверхностных пленок, прежде всего с поверхности детали.
2. Показано, что с увеличением угла наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали возрастают тангенциальные усилия, действующие в зоне контакта соединяемых металлов, которые способствуют интенсификации процессов схватывания металлов. Это позволяет выполнять электроконтактную наварку проволокой поверхностей деталей наклонными электродами при пониженных плотностях тока в зоне наварки, что способствует уменьшению вероятности появления выплесков и вырывов металла по сравнению с наваркой при отсутствии угла наклона электрода.
3. Установлено, что форма боковых кромок валика наваренного металла определяется осадкой проволоки вблизи этих кромок и практически не зависит от угла наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали. С увеличением осадки проволоки до 60...70% осевая деформация проволоки возрастает до 50% и остается далее неизменной.

Практическая ценность работы. Разработан процесс ЭКНП наклонными электродами, который позволяет получать качественные соединения основного и присадочного металлов без несправов и дефектов сплошности при восстановлении деталей машин.

Реализация результатов работы. Разработанный процесс наварки поверхностей деталей наклонными электродами прошел опытно-промышленную проверку и внедрен на НПП “Велд”.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на Всероссийских научно-технических конференциях “Создание прогрессивных технологий, конструкций, систем и социально-экономические проблемы производства” (г. Калуга, 1998г.), “Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении” (г. Калуга, 1999г., 2000г.); на региональной “Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении” (г. Калуга, 2000г.); на научных семинарах кафедр “Технологии сварки” КФ МГТУ им. Н.Э.Баумана (г. Калуга, 2002г.) и “Технологии сварки и диагностики” МГТУ им. Н.Э.Баумана (г. Москва, 2002г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе и приложения. Изложена на 138 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков, 11 таблиц и 111 наименований использованных литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования и дается общее представление о работе.

Первая глава посвящена анализу деталей типа “вал” номенклатуры ОАО “Калугапутыаш”, НПП “Велд”, ЗАО “Калужский авторемонтный завод”, требованиям, предъявляемым к восстановленным деталям, анализу основных способов их восстановления, а также постановке цели и задач работы.

Детали, у которых конические поверхности являются конструктивными элементами, характеризуются заданным углом конуса поверхности, который в большинстве случаев находится в диапазоне от 0° до 30° . Эти поверхности могут являться посадочными поверхностями, поверхностями трения скольжения или трения качения. Наличие конических поверхностей на восстанавливаемых деталях может быть предусмотрено технологией восстановления этих деталей. В этом случае конические поверхности являются технологическими элементами. В работе угол конуса поверхностей деталей находился в интервале от 0° до 30° . Диаметры восстанавливаемых поверхностей деталей рассмотренной номенклатуры изменяются в основном от 30 до 100 мм. Поэтому рассматриваемый диапазон изменения диаметров деталей в работе соответствовал вышеуказанному.

Основными требованиями, предъявляемыми к восстановленным деталям, являются отсутствие дефектов типа пор, несплошностей, непроваров и деформации деталей. Прочность соединения металлов должна быть близка к прочности самих металлов. Требуемая твердость поверхности варьируется в интервале от 20 до 55 HRC при толщине наносимого металла от десятых долей до нескольких миллиметров. Детали изготавливаются, как правило, из среднеуглеродистых и среднеуглеродистых легированных сталей (45, 40Х, 38ХС и другие), которые являются ограниченно свариваемыми материалами.

Для восстановления деталей рассмотренной номенклатуры, необходимо выбрать наиболее рациональный способ, который бы наиболее полно удовлетворял указанным выше требованиям к восстановленным деталям, и характеризовался бы минимальными трудовыми и материальными затратами на внедрение и реализацию способа. Поэтому был выполнен анализ основных способов восстановления, применяемых на машиностроительных, ремонтных предприятиях. К этим способам относятся: напыление, наплавка металлов (в углекислом газе, под флюсом, вибродуговая, плазменная) и электролитические способы (хромирование, железнение).

Процессы напыления, как правило, характеризуются нестабильной и невысокой прочностью сцепления металлов (менее 30...50 МПа). Характерной особенностью напыленных покрытий является пористость. Указанные процессы отличаются значительными материальными и трудовыми затратами на их реализацию.

В отличие от напыления способы наплавки позволяют получать высокую прочность соединения металлов и значительную толщину наплавленного металла, характеризуясь меньшими материальными и трудовыми затратами на реализацию процесса.

Однако наплавкой в углекислом газе твердость поверхности получают не более HRC 30. Наплавка под слоем флюса поверхностей деталей диаметром менее 40...60 мм затруднена ввиду перегрева детали, стекания расплавленного металла и флюса с ее поверхности. При вибродуговой наплавке в струе жидкости возникают трудности при получении слоя наплавленного металла без дефектов типа пор и трещин. Плазменная наплавка отличается дополнительными материальными затратами, связанными с высокой стоимостью защитного газа – аргона. Кроме этого дуговые способы обычно характеризуются значительным тепловложением в металл основы, и, как следствие, значительными остаточными деформациями деталей.

Хромирование и железнение практически не связаны с каким-либо термическим воздействием на деталь, и, как следствие, характеризуются отсутствием деформаций деталей при восстановлении. В тоже время толщина хромового покрытия, как правило, не превышает 0,1...0,2 мм, а железного – 1...3 мм. Способы отличаются сложностью и большим объемом работ при выполнении процесса восстановления деталей. Их целесообразно применять при значительных объемах восстановления, соответствующих серийному и массовому типам производства. Электролитические способы являются экологически вредными и поэтому следует предусматривать мероприятия, направленные на улучшение экологической обстановки при восстановлении деталей.

Кроме вышеперечисленных способов восстановления в настоящее время находят применение и способы электроконтактной наварки лентой (ЭКНЛ), ЭКНП в твердой фазе и оплавлением, электроконтактной наварки порошковыми материалами (ЭКНПМ). Наварка лентой применяется в основном для восстановления поверхностей деталей, имеющих износ не более 0,5 мм. Применение ЭКНПМ целесообразно при нанесении слоя наваренного металла толщиной не более 0,3...0,5 мм. Данный способ характеризуется пористостью покрытия и пониженной производительностью по сравнению с ЭКНП и ЭКНЛ. Наварка проволокой в твердой фазе характеризуется зависимостью прочности соединения металлов от состава окружающей среды и состояния поверхности детали перед наваркой.

В.А. Дубровским разработан процесс ЭКНП оплавлением, который позволяет устранить эти недостатки наварки в твердой фазе. Прочность соеди-

нения металлов при наварке оплавлением соответствует прочности одного из соединяемых металлов. Данный способ позволяет наносить слои наваренного металла от десятых долей до нескольких миллиметров на поверхности деталей диаметром от 10 мм и более, обеспечивая высокую твердость наваренного металла до HRC 60.

На основании проведенного анализа способов восстановления сделан вывод, что наиболее рациональной технологией восстановления рассмотренной номенклатуры деталей с учетом требований, предъявляемых к деталям, является ЭКНП оплавлением.

Для обеспечения высокой производительности процесса целесообразно выполнять наварку двумя проволоками. В этом случае процесс можно осуществлять по нескольким технологическим вариантам, что расширяет технологические возможности наварки.

Для снижения капитальных затрат, при наварке конических поверхностей деталей процесс экономически целесообразно реализовывать на оборудовании для ЭКНП цилиндрических поверхностей деталей – установке УЭН-01. Данная установка реализует вариант наварки двумя проволоками. При восстановлении конических поверхностей деталей на этой установке имеет место угол наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали (β), т.е. наварка выполняется наклонными электродами.

Однако широкое внедрение электроконтактной наварки проволокой оплавлением в производство сдерживается возникновением дефектов наваренного металла. Кроме того, механизм формирования соединения металлов недостаточно исследован, что затрудняет подбор режимов наварки.

Предварительные эксперименты по наварке поверхностей деталей, выполненные на установке УЭН-01, показали, что основными дефектами наваренного металла являются непровары в зоне соединения металлов и несплошности между валиками наваренного металла. Наиболее характерно появление этих дефектов при наличии угла наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали, что, очевидно, связано с влиянием данного угла на процесс наварки наклонными электродами. Непровары могут приводить к отслоению наваренного металла при последующей механической обработке или при эксплуатации детали, а несплошности – к возникновению трещин. Выявлено, что появление непроваров связано с режимами наварки, а наличие несплошностей прежде всего связано с шагом наварки, который зависит от формоизменения проволоки при наварке.

В связи с изложенным для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать влияние параметров режима на процесс наварки единичного валика металла, учитывая угол наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали;

- провести исследование влияния угла наклона электрода на условия формирования соединения металлов при наварке наклонными электродами;

-разработать технологические схемы наварки, обеспечивающие получение слоя наваренного металла без дефектов сплошности между валиками наваренного металла;

-разработать технологические рекомендации по наварке поверхностей деталей наклонными электродами проволокой диаметром 1,6 мм и довести результаты исследований до промышленного применения.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию процесса наварки единичного валика металла.

Основными параметрами режима наварки являются: усилие сжатия электродов, ток наварки, длительность импульса тока, продолжительность паузы между импульсами тока, частота вращения детали (скорость наварки).

В работах В.А. Дубровского, В.В. Булычева показано, что при ЭКНП оплавлением усилие сжатия электродов следует принимать минимальным из условия отсутствия разбрызгивания расплавленного металла в зоне соединения металлов и предотвращения возникновения вырывов на поверхности детали. Поэтому усилие сжатия электродов принималось в работе постоянным и равным 1,5 кН. Согласно литературным данным диапазоны тока наварки принимались 8...14 кА, длительности импульса тока 0,04...0,12 с.

Известно, что продолжительность паузы между импульсами тока должна составлять от 1 до 2 длительностей импульса тока исходя из условия обеспечения охлаждения электродов между импульсами тока наварки.

Частоту вращения детали (скорость наварки) следует назначать с учетом обеспечения требуемого перекрытия единичных площадок наваренного металла (30...50%).

Из исследований В.А. Дубровского, В.В. Булычева известно, что наиболее доступным показателем контроля качества соединения металлов при наварке оплавлением цилиндрических поверхностей деталей вертикальными электродами ($\beta=0^\circ$) является осадка проволоки. При ее значении более 70% получаемое соединение металлов характеризуется отсутствием несправов в зоне контакта металлов. Экспериментальные исследования, выполненные Ю.В. Клименко при наварке цилиндрических поверхностей вертикальными электродами, позволили получить зависимость осадки проволоки от параметров режима, имеющую нелинейный характер. Однако данные эксперименты были проведены в узком диапазоне изменения длительности импульса тока: 0,005...0,04 с. Кроме того, вопрос об использовании осадки проволоки для контроля качества получаемого соединения металлов при наварке оплавлением наклонными электродами не исследован. Поэтому для выявления возможности применения осадки проволоки как показателя контроля качества соединения металлов при наварке наклонными электродами были проведены исследования влияния тока наварки, длительности импульса тока и угла наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали на осадку проволоки и структуру зоны соединения металлов.

Для получения зависимости осадки проволоки от параметров режима в работе был применен метод планирования эксперимента и принят план второго порядка.

При проведении эксперимента использовалась низкоуглеродистая сварочная проволока Св-08 диаметром 1,6 мм, а образцы были изготовлены из стали марки 40Х. Диаметр навариваемой поверхности детали составлял 100 мм, что позволяет вычислять требуемое значение тока наварки для меньших диаметров поверхности в исследуемом диапазоне изменения параметров режима, учитывая полученные в третьей главе выражения для вычисления площади контакта проволоки с деталью.

Обработка результатов эксперимента позволила получить математическую модель:

$$\varepsilon_2 = 9,54 + 6,555I - 0,185I^2 + 117,25t_u - 1,27\beta - 0,0296\beta^2. \quad (1)$$

Выполненный регрессионный анализ математической модели процесса наварки с помощью критерия Фишера показал адекватность модели.

Анализ уравнения регрессии показал, что угол наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали (β , град.) оказывает наибольшее влияние на осадку проволоки (ε_2 , %) по сравнению с током наварки (I , кА) и длительностью импульса тока (t_u , с). При этом с увеличением угла наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали осадка проволоки уменьшается. С увеличением тока наварки и длительности импульса тока осадка проволоки возрастает.

Металлографическими исследованиями макрошлифов установлено, что соединения металлов без непроваров при наварке поверхностей деталей наклонными электродами обеспечивается при осадке проволоки вблизи большей кромки валика наваренного металла не менее 65%. Таким образом, осадка проволоки может служить показателем контроля качества соединения металлов при наварке поверхностей деталей наклонными электродами без непроваров. Установлено, что с увеличением угла наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали требуемая осадка проволоки, необходимая для получения соединения металлов без непроваров, уменьшается с 70 до 65%.

Посредством металлографических исследований макрошлифов установлено, что соединение металлов при ЭКНП оплавлением формируется за счет механизмов образования в твердой фазе и частично в жидкой фазе, которая появляется в зоне контакта металлов. При деформировании проволоки жидкая фаза, образующаяся в зоне соединения металлов, выдавливается к периферии контакта металлов и участвует в формировании боковых кромок валика наваренного металла.

По данным С.Б. Айнбиндера, А.С. Гельмана при сварке давлением пластическая деформация металла не менее 60% способствует дроблению поверхностных пленок. В отличие от деформации проволоки деформация ме-

талла основы при наварке практически отсутствует, что затрудняет разрушение и удаление поверхностных пленок с поверхности детали. Поэтому положительная роль жидкой фазы при электроконтактной наварке проволокой оплавлением заключается в том, что она способствует дроблению и удалению поверхностных пленок, прежде всего с поверхности детали.

Третья глава посвящена исследованию основных закономерностей влияния угла наклона электрода на условия формирования соединения металлов с учетом влияния данного угла на формоизменение проволоки при наварке наклонными электродами.

Исследование форм боковых кромок деформированной проволоки проводилось на свинцовых моделях вследствие близости механических свойств свинца и сталей при высоких температурах. Для повышения точности замеров диаметр моделей был принят 14 мм. В работах Ю.В. Владимирова и др. показано, что форма боковых кромок деформированной проволоки определяется только осадкой и не зависит от диаметров валков, и, следовательно, длины зоны деформации проволоки. Это позволяет провести исследование форм боковых кромок проволоки при ее деформировании посредством осадки моделей между плоскими плитами и исключить необходимость изготовления стенда для прокатки моделей. Поэтому исследование форм боковых кромок валика наваренного металла выполнялось при деформировании моделей плоскими плитами на разработанном в работе приспособлении. Угол наклона между плоскими плитами при осадке моделей составлял $0^\circ, 4^\circ, 8^\circ$ и 19° . Осадка вблизи боковых кромок находилась в диапазоне от 20 до 80%.

Выполненные исследования показали, что форма боковых кромок деформированной проволоки может быть описана частью окружности радиусом (R) с центром на оси симметрии поперечного сечения проволоки (рис.1). Указанный радиус определяется осадкой вблизи этих кромок и практически не зависит от угла между деформирующими поверхностями:

$$R = \frac{z}{2} + \frac{d^2(1 - 0,01\varepsilon)^2}{8z}; \quad (2)$$

$$z = kd \exp[2,323(1 - 0,01\varepsilon)]; \quad (3)$$

$$k = 0,038...0,043;$$

где d -диаметр проволоки; ε -осадка вблизи боковой кромки деформированной проволоки; z -ширина сечения боковой кромки деформированной проволоки; k -эмпирический коэффициент.

Численный анализ выражения (2) показал, что при осадке вблизи боковых кромок деформированной проволоки более 40% можно использовать более простую зависимость М.И. Злотникова:

$$R = 0,6d(1 - 0,01\varepsilon). \quad (4)$$

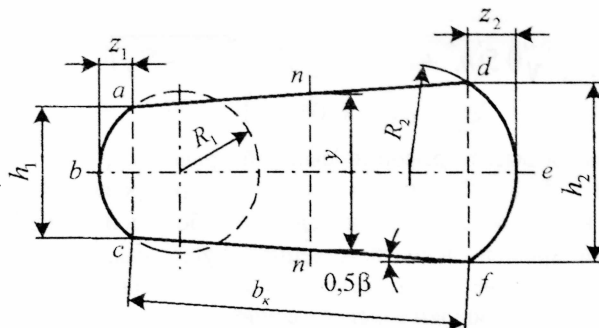


Рис.1. Схематическое изображение формы поперечного сечения модели, деформированной наклонными плитами

В работе Л.Н. Соколова, В.Т. Катренко показано, что ширина контакта проволоки с деталью зависит от площади поперечного сечения деформированной проволоки. В работах Ю.В. Владимирова, А.И. Целикова, посвященных исследованию процесса прокатки проволоки, установлено, что площадь поперечного сечения деформированной проволоки, в свою очередь, зависит от осевой деформации проволоки. Поэтому были проведены экспериментальные исследования осевой деформации проволоки при ЭКНП оплавлением. При проведении экспериментов использовались отрезки проволоки фиксированной длины L_0 . Режим наварки подбирался из условия достижения требуемой осадки проволоки. После наварки измеряли длину L валика наваренного металла и определяли относительную осевую деформацию проволоки с учетом этой длины и первоначальной длины проволоки (рис.2):

$$\eta = \frac{L - L_0}{L_0} 100; (\%). \quad (5)$$

Статистическая обработка результатов эксперимента показала, что осевую деформацию проволоки (η) при ее осадке $\epsilon_{\text{усл}} \leq 60 \dots 70 \%$ можно определять по формуле:

$$\eta = \frac{\epsilon_{\text{усл}}^2}{100}; (\%); \quad (6)$$

где $\epsilon_{\text{усл}}$ - условная осадка проволоки, определяемая из условия деления площади поперечного сечения деформированной проволоки на две равные площади относительно вертикальной линии $n-n$ (рис.1):

$$\varepsilon_{\text{усл}} = \frac{d - y}{d} \cdot 100\%; \quad (7)$$

$$y = \sqrt{0,5(h_1^2 + h_2^2) + 2\text{tg}0,5\beta(S_{c2} - S_{c1})}; \quad (8)$$

$$h_{1,2} = d(1 - 0,01\varepsilon_{1,2}); \quad (9)$$

где y — условная высота деформированной проволоки; h_1 и h_2 — высоты вблизи меньшей и большей боковых кромок деформированной проволоки соответственно; ε_1 и ε_2 — осадки вблизи меньшей и большей боковых кромок деформированной проволоки соответственно; β — угол наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали; S_{c1} и S_{c2} — площади сегментов abc и def деформированной проволоки соответственно:

$$S_{c1,2} = \frac{\pi R_{1,2}^2}{2} - (R_{1,2} - z_{1,2}) \sqrt{z_{1,2}(2R_{1,2} - z)} - R_{1,2}^2 \arcsin\left(\frac{R_{1,2} - z}{R_{1,2}}\right). \quad (10)$$

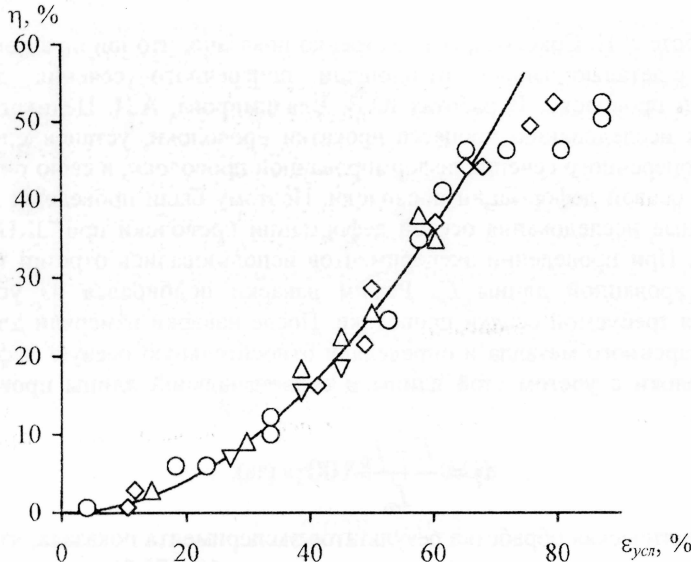


Рис.2. Зависимость осевой деформации присадочной проволоки от ее осадки:

— расчет по формуле (6);

○, ◇, Δ, ▽ — экспериментальные данные, полученные при наварке наклонными электродами с углами наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали 0°, 5°, 10° и 15° соответственно

Эксперименты показали, что при $\epsilon_{\text{учл}} > 60 \dots 70\%$ осевую деформацию проволоки можно принять 50% (рис.2).

Результаты исследования осевой деформации проволоки позволили получить зависимости для расчета ширины контакта (b_k) проволоки с деталью:

- при осадке вблизи большей кромки валика наваренного металла не более 60...70%:

$$b_k (d(1 - 0,01\epsilon_2) \cos 0,5\beta - 0,5b_k \sin \beta) = f; \quad (11)$$

$$f = \frac{\pi d^2}{4(\epsilon_{\text{учл}}^2 10^{-4} + 1)} - S_{c1} - S_{c2}; \quad (12)$$

- при осадке вблизи большей кромки валика наваренного металла более 60...70%:

$$b_k = \frac{d}{2 \sin 0,5\beta} \left(1 - 0,01\epsilon_2 - \sqrt{(1 - 0,01\epsilon_2)^2 - \frac{2}{3} \pi d^2 \operatorname{tg} 0,5\beta} \right). \quad (13)$$

Выполненные эксперименты по наварке единичного валика металла показали возможность использования полученных зависимостей для расчета ширины контакта проволоки с деталью.

Геометрическую площадь контакта (P) проволоки с деталью при наварке поверхностей деталей наклонными электродами можно определять по зависимости, полученной Л.Н. Соколовым, В.Т. Катренко, после ее преобразования:

$$P = D_\delta \int_0^{0,5b_k} \arcsin \frac{ax^2 + L_\delta}{0,5D_\delta} dx; \quad (14)$$

где D_δ -диаметр поверхности детали; a -постоянный коэффициент, определяемый из уравнения кривой, ограничивающей проекцию площади контакта на плоскость, касательную к навариваемой поверхности; L_δ -длина зоны деформации проволоки.

При осадке вблизи большей кромки валика наваренного металла более 60...70% площадь контакта проволоки с деталью можно вычислять по формуле:

$$P = b_k L_\delta. \quad (15)$$

С учетом рассчитанной площади контакта проволоки с деталью была вычислена средняя плотность тока в зоне наварки. Расчеты показали, что при фиксированной осадке проволоки с увеличением угла наклона электрода средняя плотность тока в зоне наварки уменьшается, что должно приводить к снижению средней температуры нагрева проволоки. Это в свою очередь должно было бы увеличить вероятность возникновения непроваров в зоне соединения металлов. В то же время, как показали металлографические ис-

следования, выполненные в предыдущей главе, с увеличением угла наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали отсутствие непроваров обеспечивается при меньшей осадке проволоки, чем при наварке цилиндрических поверхностей. Это кажущееся противоречие можно объяснить тем, что с увеличением угла наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали в зоне контакта соединяемых металлов возрастают тангенциальные усилия. Как показано в работах А.С. Гельмана, С.Б. Айнбиндера наличие даже небольших тангенциальных усилий в зоне контакта металлов, не вызывающих процессы массоперемещений, при сварке давлением способствует интенсификации процессов схватывания металлов, что имеет место и при наварке поверхностей деталей наклонными электродами.

Таким образом, снижение требуемой осадки проволоки для получения соединения металлов без непроваров при наварке наклонными электродами по сравнению с наваркой, когда $\beta=0^\circ$, становится возможным вследствие возникновения в зоне контакта соединяемых металлов тангенциальных усилий. Это позволяет выполнять наварку наклонными электродами при пониженных плотностях тока в зоне наварки, что способствует уменьшению вероятности появления выплесков и вырывов металла по сравнению с наваркой цилиндрических поверхностей вертикальными электродами.

Четвертая глава посвящена разработке технологии наварки проволокой наклонными электродами. Разработаны технологические схемы наварки, а также методики расчета режимов наварки и толщины слоя наваренного металла.

В зависимости от угла наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали предложены технологические схемы наварки поверхностей деталей, обеспечивающие получение слоя наваренного металла без дефектов сплошности между валиками наваренного металла посредством определения требуемого шага наварки. Шаг рассчитывался с учетом ранее выполненных исследований формоизменения присадочной проволоки при наварке.

При разработке технологических схем наварки учитывалось положительное влияние угла наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали на формирование соединения металлов при наварке наклонными электродами.

Для предотвращения возможного появления выплесков металла и дефектов типа вырывов при наварке цилиндрических поверхностей целесообразно выполнять разворот электродов относительно навариваемой поверхности детали на угол $\beta < 8^\circ$ (осадка проволоки $\varepsilon_2=65\%$, ширина электрода 6 мм), что обеспечивает отсутствие внедрения кромки электрода в деталь.

Показана целесообразность выполнения наварки поверхностей деталей “углом вперед” (в направлении увеличения диаметра поверхности) для предотвращения касания кромки электрода о предыдущий валик наваренного металла, которое приводит к шунтированию тока наварки.

При углах наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали $\beta < 8^\circ$, проволоку следует накладывать на металл основы рядом с ранее наваренным валиком, что предотвращает внедрение кромки электрода в деталь. С возрастанием β шаг наварки необходимо увеличивать до 40...50%. При $\beta \leq 4^\circ$ угол наклона электрода можно не учитывать при определении шага наварки.

При $\beta = 8...10^\circ$ проволоку целесообразно накладывать на предыдущий валик наваренного металла. Это приводит к тому, что внедрение кромки электрода в деталь происходит лишь в конце цикла наварки, когда валик наваренного металла практически сформирован. Шаг наварки должен быть больше соответствующего шага при ЭКНП, когда $\beta = 0^\circ$, на 40...50%. При наварке второго и последующих валиков металла для получения слоя наваренного металла без дефектов сплошности осадку проволоки следует увеличивать на 12...14% по сравнению с осадкой при наварке первого валика металла.

При углах наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали $\beta > 10^\circ$ не обеспечивается требуемая осадка проволоки вследствие внедрения кромки электрода в деталь. Эксперименты, выполненные по наварке поверхностей деталей, показали, что в этом случае происходит выдавливание из-под электрода расплавленного металла, появляются выплески металла, что ухудшает качество соединения металлов. Наблюдается пригорание электрода в месте внедрения в деталь и его деформация, что нарушает стабильность процесса. В этом случае следует выполнять разворот электродов относительно навариваемой поверхности на угол менее 8° , что обеспечивает отсутствие внедрения кромки электрода в деталь. Шаг наварки в зависимости от угла наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали необходимо уменьшать до 8...10 % по сравнению с шагом наварки при ЭКНП, когда $\beta = 0^\circ$.

Наварка при наличии угла наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали требует более точной установки шага наварки по сравнению с шагом, когда $\beta = 0^\circ$. Разница между максимальным и минимальным значениями шага наварки не должна превышать 0,3...0,4 мм, в то время как при $\beta = 0^\circ$ эта разница не должна превышать 0,4...0,6 мм. При изменении шага наварки в указанных диапазонах обеспечивается требуемое перекрытие валиков наваренного металла 30...50%.

Расчеты показали, что наклон рабочей поверхности электрода к поверхности детали приводит к уменьшению толщины слоя наваренного металла по сравнению с наваркой, когда $\beta = 0^\circ$. Минимальная толщина слоя наваренного металла при наварке за проход обеспечивается при выполнении процесса по технологической схеме с внедрением кромки электрода в деталь ($\beta = 8...10^\circ$), а максимальная толщина слоя металла за проход – при отсутствии внедрения кромки электрода в деталь ($\beta = 0^\circ$).

Разработана методика расчета режимов наварки для восстановления поверхностей деталей диаметром 30...100 мм с углом конуса от 0° до 30° электроконтактной наваркой оплавлением проволокой диаметром 1,6 мм.

Выполненные в работе исследования проводились для низкоуглеродистой проволоки (Св-08). На основании разработанной методики расчета режимов выполнялась наварка оплавлением деталей из сталей марок 45, 40Х, 38ХС низкоуглеродистой проволокой (Св-08) и высокоуглеродистой (сталь 65Г). Проведенные металлографические исследования макро- и микроструктуры поверхностного слоя наваренных деталей показали отсутствие непроваров в зоне соединения металлов и дефектов сплошности между валиками наваренного металла. Это позволяет полученные в работе результаты использовать и при наварке оплавлением поверхностей деталей высокоуглеродистой проволокой.

Пятая глава посвящена вопросу практической реализации ЭКНП оплавлением наклонными электродами на основании результатов исследований, проведенных в работе.

Разработаны технологические рекомендации по электроконтактной наварке поверхностей деталей диаметром 30...100 мм с углом конуса от 0° до 30° проволокой диаметром 1,6 мм.

Разработан типовой технологический процесс восстановления поверхностей деталей ЭКНП наклонными электродами.

Показаны примеры деталей, восстанавливаемых ЭКНП наклонными электродами: ось, имеющая цилиндрическую поверхность; ось трактора, характеризующаяся наличием конической поверхности с конусностью 1:5 (угол наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали 5°42'); вал ротора, имеющий коническую поверхность с конусностью 1:50 (угол наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали 0°34').

Приведены режимы наварки указанных выше деталей, полученные в соответствии с разработанной в работе методики расчета режимов наварки.

Разработанный процесс наварки внедрен на НПП "Велд" при восстановлении цилиндрических и конических поверхностей деталей машин. Годовой экономический эффект от внедрения электроконтактной наварки проволокой наклонными электродами в расчете на 14 наименований деталей составил 522 тыс. рублей.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Внедрение процесса электроконтактной наварки проволокой оплавлением при восстановлении поверхностей деталей машин сдерживается возникновением дефектов наваренного металла. Проведенные металлографические исследования показали, что основными дефектами являются непровары в зоне соединения металлов и несплошности между валиками наваренного металла. Предотвращение их появления может быть достигнуто на основе

исследования механизма формирования соединения металлов и особенностей образования соединения металлов при электроконтактной наварке проволокой наклонными электродами.

2. Соединение металлов при наварке оплавлением формируется за счет механизмов образования в твердой фазе и частично в жидкой фазе, которая выдавливается к периферии контакта металлов и способствует дроблению, удалению поверхностных пленок, прежде всего с поверхности детали.

3. С увеличением угла наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали возрастают тангенциальные усилия, действующие в зоне контакта соединяемых металлов, которые способствуют интенсификации процессов схватывания металлов. Это позволяет выполнять наварку поверхностей деталей наклонными электродами при пониженных плотностях тока в зоне наварки, что способствует уменьшению вероятности появления выплесков и дефектов типа вырывов металла по сравнению с наваркой при отсутствии угла наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали.

4. Форма боковых кромок валика наваренного металла определяется осадкой проволоки вблизи этих кромок и практически не зависит от угла наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали. С увеличением осадки проволоки до 60...70% осевая деформация проволоки возрастает до 50% и остается далее неизменной. Полученные результаты позволяют рассчитать шаг наварки.

5. Разработана методика расчета режимов наварки наклонными электродами, позволяющая на основании известных диаметров детали, проволоки и электродов, ширины электрода, угла конуса поверхности детали, получать слои наваренного металла без непроваров в зоне соединения металлов и дефектов сплошности между валиками наваренного металла.

6. В зависимости от угла наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали качественные соединения металлов без непроваров при ЭКНП оплавлением формируются при осадке проволоки не менее 65...70%, что позволяет использовать осадку проволоки как показатель контроля качества получаемых соединений металлов при наварке наклонными электродами. С увеличением угла наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали требуемая осадка проволоки, необходимая для получения соединения металлов без непроваров, уменьшается с 70 до 65 %.

7. При наварке наклонными электродами для получения слоя наваренного металла без дефектов сплошности между валиками наваренного металла угол наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали можно увеличивать не более чем до 8...10° и при этом необходимо увеличивать шаг наварки. При углах наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали не более 4° при определении шага наварки данный угол можно не учитывать.

8. Разработаны технологические рекомендации по наварке наклонными электродами для деталей с углом конуса поверхности от 0° до 30° прово-

локой диаметром 1,6 мм и процесс наварки внедрен на НПП "Велд". Годовой экономический эффект от внедрения в расчете на 14 наименований деталей составил 522 тыс. рублей.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Дубровский В.А., Булычев В.В., Зыбин И.Н. Влияние диаметра детали на скорость электроконтактной наплавки проволокой // Создание прогрессивных технологий, конструкций, систем и социально-экономические проблемы производства: Тез. докл. ВНТК. - Калуга, 1998. - С. 81.
2. Дубровский В.А., Булычев В.В., Зыбин И.Н. Исследование деформирования присадочной проволоки при электроконтактной наплавке // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Тез. докл. юбилейной ВНТК. - Калуга, 1999. - С. 28.
3. Дубровский В.А., Зыбин И.Н. Целесообразность исследования процесса электроконтактной наплавки конических поверхностей деталей вертикальными электродами // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Тез. докл. региональной науч. тех. конф. студентов и аспирантов. - Калуга, 2000. - С. 50.
4. Зыбин И.Н. Технологические схемы процесса ЭКНП конических поверхностей деталей // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Тез. докл. ВНТК. - Калуга, 2000. - С. 24.
5. Дубровский В.А., Булычев В.В., Зыбин И.Н. Изменение формы поперечного сечения присадочной проволоки при электроконтактной наплавке // Сварочное производство. - 2001. - № 6. - С. 23-27.
6. Dubrovskii V.A., Bulychev V.V., Zybin I.N. Variation of the shape of the cross section of filler wire in electric resistance welding // Welding International. - 2001. - Vol. 15, № 11. - P. 891-894.
7. Дубровский В.А., Зыбин И.Н., Пономарев А.И. Математическая модель осадки присадочной проволоки при электроконтактной наплавке // Труды МГТУ. - 2002. - № 581. - С. 130-136.
8. Математическая модель формирования разупрочненных зон в электроконтактных покрытиях / В.А. Дубровский, В.В. Булычев, А.И. Пономарев, И.Н. Зыбин // Труды МГТУ. - 2002. - № 581. - С. 137-144.