

На правах рукописи
УДК 621.791

Зезюля Валерий Владимирович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ЦИКЛИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ ВАЛОВ
МНОГОСЛОЙНОЙ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАВАРКОЙ ПРОВОЛОКОЙ**

Специальность 05.03.06 - Технологии и машины сварочного производства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2009

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

Научный руководитель: к.т.н., доцент **Булычев Всеволод Валерьевич**

Официальные оппоненты: д.т.н., проф. **Ямпольский Виктор Модестович**
к.т.н., доцент **Бурак Павел Иванович**

Ведущее предприятие: Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка (**ГНУ ГОСНИТИ**)

Защита состоится «_17_»___декабря___2009 года на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в 1 экз., заверенный печатью, просим высылать по указанному адресу.

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

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Автореферат разослан «__03__»___ноября___2009 года.

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

Коновалов А.В.

Актуальность работы. Восстановление изношенных деталей является важным резервом повышения эффективности использования различных машин и механизмов. Значительную часть восстанавливаемых деталей машин с изношенными посадочными и опорными шейками составляют различные валы и оси, подверженные в процессе эксплуатации действию циклических нагрузок. Технологии восстановления таких деталей не должны снижать усталостной прочности. Одной из перспективных технологий восстановления цилиндрических поверхностей является метод электроконтактной наварки проволокой (ЭКНП). Большой вклад в развитие электроконтактной наварки внесли Э.С. Каракозов, Ю.В. Клименко, А.В. Поляченко, В.А. Дубровский, Нафиков М.З., Фархшатов М.Н. и др. Однако задача обеспечения усталостной прочности восстановленных ЭКНП деталей решена не полностью. Мало исследованы причины и способы предотвращения разрушения многослойных покрытий при последующей упрочняющей обработке поверхностно-пластическим деформированием (ППД). Возникают затруднения и при восстановлении шеек с галтельными переходами ступенчатых валов. Решение этих задач позволит расширить номенклатуру восстанавливаемых ЭКНП деталей, повысить их надежность и предотвратить поломки в процессе эксплуатации.

Целью работы является повышение усталостной прочности деталей типа «вал», восстановленных с применением многослойной ЭКНП.

Методы исследований. Основные задачи работы решались на основе сочетания теоретических и экспериментальных методов исследования. Экспериментальные исследования процесса ЭКНП производились на машине УЭН-01. Макро- и микроструктура поверхностного слоя наваренных деталей исследовалась на шлифах с применением оптического микроскопа МИМ-7. Микротвердость структур определялась при помощи твердомера ПМТ-3. Математическое моделирование электротепловой обстановки при ЭКНП осуществлялось методом конечных элементов. Обработка ППД выполнялась с помощью разработанного приспособления для чеканки. Усталостные испытания образцов производились на машине МУИ-01М. При обработке экспериментальных данных использовался аппарат математической статистики.

Научная новизна работы:

1. Установлено, что причиной возникновения дефектов сплошности в «гребешках» слоя наваренного металла является повышенная плотность тока в поперечном сечении осаживаемой проволоки со стороны ранее наваренного валика. Это приводит к местному перегреву части присадочного металла, его выдавливанию из-под электрода и охлаждению на поверхности ранее наваренного валика в условиях отсутствия проковки. Увеличение ширины рабочей части роликового электрода свыше некоторого значения, зависящего от диаметра присадочной проволоки, величины ее осадки, шага наварки, предотвращает выдавливание осаживаемой проволоки из-под электрода и исключает причины образования указанных дефектов.

2. Установлено, что увеличение момента проворачивания роликового электрода приводит к повышению прочности образуемого сварного соединения за счет увеличения относительной осевой деформации присадочной проволоки.

3. Установлено, что увеличение относительной осевой деформации присадочной проволоки приводит к замедлению вращения роликового электрода. Это позволяет контролировать относительную осевую деформацию присадочной проволоки непосредственно в процессе наварки через подсчет количества оборотов роликового электрода и детали.

4. Установлено, что дуговая наплавка галтелей и кромки слоя, наваренного электроконтактным методом на цилиндрическую часть шейки, совместно с последующей обработкой ППД всей восстановленной поверхности приводит к повышению усталостной прочности ступенчатых валов за счет восстановления геометрии галтелей и упрочнения наваренного металла в процессе ППД.

Практическая ценность работы. Разработаны технологические мероприятия, предотвращающие межслойные разрушения покрытий в процессе последующей упрочняющей обработки ППД. Разработана технология ремонта циклически нагруженных ступенчатых валов комбинированной наплавкой с последующей обработкой ППД.

Реализация результатов работы. Разработанная технология восстановления шеек стальных валов с галтельными переходами комбинированной наплавкой прошла опытно-промышленную проверку и внедрена на предприятии ООО НПП «Велд» (г. Калуга).

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на Региональных научно-технических конференциях «Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении» (г. Калуга, 2005г., 2006г.); на 7-ой международной практической конференции «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки» (г. Санкт-Петербург, 2005 г.); на 5-ой международной научно – технической конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий» (г. Киев, Украина, 2005 г.); на 5-ом Московском международном салоне инноваций и инвестиций (г. Москва, 2005 г.); на Всероссийских научно-технических конференциях «Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе» (г. Калуга, 2005, 2006, 2007, 2008 гг.); на научных семинарах кафедр «Агропромышленная инженерия», «Технологии сварки» КФ МГТУ им. Н.Э.Баумана (г. Калуга, 2007, 2009 гг.) и «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э.Баумана (г. Москва, 2008, 2009 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, из них по списку ВАК - 2.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе, списка литературы и приложения. Изложена на

155 страницах машинописного текста, содержит 83 рисунка, 24 таблицы и 140 наименований использованных литературных источников.

Содержание работы

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

В первой главе проанализированы случаи усталостных разрушений деталей после ЭКНП, проведен обзор возможных способов повышения циклической прочности восстановленных деталей. С учетом выполненных предварительных экспериментов сформулирована цель и задачи исследования.

К деталям, подверженных в процессе эксплуатации действию циклических нагрузок, относятся: поворотные кулаки и полуоси автотракторной техники, коленчатые валы и многие другие детали. Наиболее распространенными сталями для их изготовления являются, стали типа 40Х, 45, 45С и др. Диаметры восстанавливаемых шеек находятся в диапазоне от 40 до 110 мм. Износы шеек валов достигают 0,4 мм и более. В работах Дубровского В.А., Емельянова В.А. и др. показано, что эффективным способом повышения усталостной прочности деталей после однослойной наварки является обработка ППД. При восстановлении валов с износами более 0,4...0,6 мм необходимо выполнять многослойную наварку. Возможность и особенности обработки ППД многослойных покрытий в настоящее время мало исследованы.

Как показали предварительные эксперименты, чеканка образцов после многослойной наварки может приводить к разрушению и отслаиванию слоя наваренного металла. Выявлено два характерных вида разрушений покрытий. Во-первых, пояски различной протяженности с трещинами и шелушением. Во-вторых, отслоение всего слоя. Во всех случаях разрушение первого слоя не наблюдалось. Проведенные металлографические исследования показали, что пояски дефектного покрытия возникают над цепочкой дефектов сплошности (пор, микротрещин) ранее наваренного слоя. Наиболее вероятным местом появления дефектов сплошности является зона межвитковых соединений. Однако механизм формирования межвитковых соединений, и, следовательно, причины возникновения дефектов, остаются мало исследованными.

Причиной отслоения всего слоя следует считать пониженную прочность соединения между наваренными слоями из-за сплошной прослойки окисных и гидроокисных включений. Как показано в работах Б.М. Аскинази, Э.С. Каракозова, для предотвращения интенсивного окисления навариваемой поверхности могут быть использованы способы травления ортофосфорной кислотой или наварки в аргоне. Это позволяет повысить прочность соединения слоя с деталью на 20-30%. Однако в условиях ремонтного производства эти мероприятия крайне не технологичны.

В работах С.Б. Айнбиндера, А.С. Гельмана показано, что в условиях сварки давлением приложение тангенциальной нагрузки позволяет в несколько раз увеличить прочность получаемого сварного соединения за счет снижения

напряжений пластического деформирования. В условиях ЭКНП сдвиговые перемещения происходят за счет пластической деформации проволоки как в радиальных (поперек формирующегося валика наваренного металла), так и в осевом (вдоль формирующегося валика наваренного металла) направлениях. Для интенсификации сдвиговых перемещений в радиальных направлениях И.В. Зыбиным был предложен и исследован процесс ЭКНП наклонными электродами. Однако этот способ наварки имеет ряд существенных ограничений и недостатков. В исследованиях, выполненных М.З. Нафиковым, И.И. Загировым, увеличение осевой деформации проволоки достигали за счет увеличения ее осадки при повышении температуры нагрева (увеличение силы тока, продолжительности импульса). Способы повышения осевой деформации проволоки, не связанные с увеличением тепловложения в деталь, в настоящее время не разработаны.

Значительную часть восстанавливаемых деталей составляют ступенчатые валы. Зафиксированы случаи разрушения восстановленных деталей в процессе эксплуатации. Излом деталей происходит в области галтелей вдоль кромок слоя наваренного металла, которые затрудняют выполнение упрочняющей обработки ППД. Проведенные расчеты показали, что кромки наваренного слоя приводят к повышению концентрации напряжений в области галтелей более чем на 30%. Выполнение разгрузочных канавок не позволяет в полной мере восстановить несущую способность вала. Поэтому предпочтительным является полное восстановление геометрии галтелей вала.

В связи с изложенным были сформулированы следующие задачи исследования:

- исследовать механизм образования межвитковых соединений при ЭКНП и разработать мероприятия по предотвращению дефектов сплошности;
- исследовать процесс осевой деформации и способы ее управления;
- исследовать возможность и особенности обработки ППД (чеканкой) после многослойной ЭКНП;
- разработать технологию восстановления деталей с полным восстановлением геометрии галтели и исследовать влияние её на усталостную прочность;
- разработать технологические рекомендации по восстановлению шеек стальных валов, довести результаты исследований до промышленного применения.

Вторая глава исследованию механизма формирования межвитковых соединений при многослойной ЭКНП.

Процесс формирования межвитковых соединений неразрывно связан с процессами совместного деформирования навариваемой проволоки и смежного, ранее наваренного валика. С целью получения исходных данных для математического описания температурных и деформационных процессов было выполнено экспериментальное исследование процесса формирования смежных валиков наваренного металла. На цилиндрический образец

наваривали смежные, чередующиеся валики проволоками двух марок: Нп-30ХГСА и Нп-40Х13. Диаметр проволок составлял 1,6 мм, ширина рабочей части роликового электрода 6 мм. Из наваренного образца изготавливали продольный шлиф (рис.1), который подвергали травлению 4-х % раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Из-за различной травимости использованных для наварки сталей, шлиф дает наглядную картину чередования смежных валиков и особенностей деформирования навариваемой проволоки.

Осмотр шлифов выявил, что на поверхности смежного валика происходит выдавливание из-под электрода части металла навариваемой проволоки. Именно в этих объемах металла находятся ранее выявленные дефекты сплошности в виде пор и трещин. При однослойной наварке эти дефекты удаляются последующей механической обработкой и не приводят к снижению качества покрытия. При многослойной наварке их возникновение недопустимо.

На основании проведенных экспериментов разработана двухмерная модель для исследования электротепловой обстановки в поперечном сечении деформируемой проволоки, геометрия которой пояснена на рис.2. Поле потенциалов φ находили из решения дифференциального уравнения

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0,$$

Плотности тока $j(y, z)$ рассчитывали по выражению

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

где ρ - удельное электросопротивление.

Температурные поля находили, решая дифференциальное уравнение теплопроводности

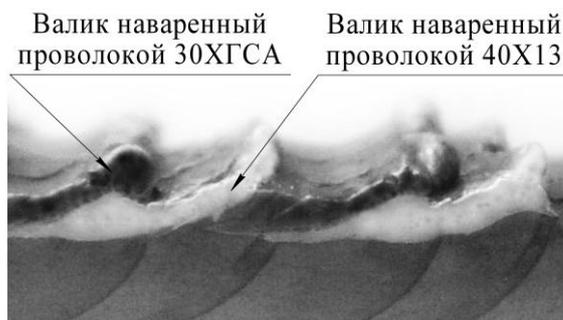


Рис.1. Макрошлиф образца после ЭКНП проволоками Нп-30ХГСА и 40Х13

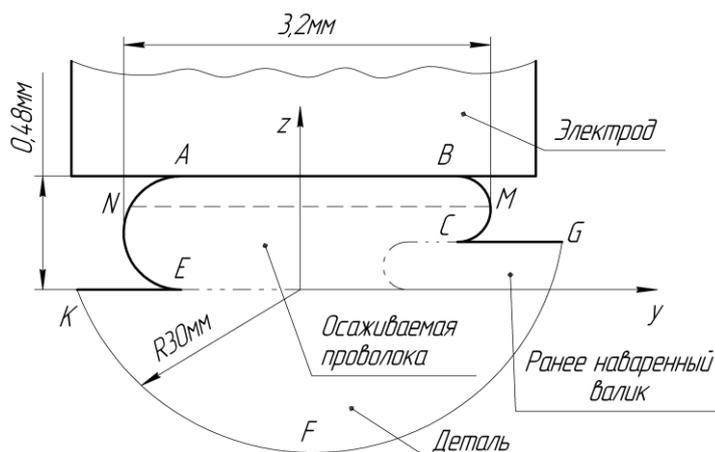


Рис.2. Геометрическая модель расчетной области при осадке проволоки 70%

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

где T – температура расчетной области; $c\gamma$ – объемная теплоемкость; t – время; a – коэффициент температуропроводности.

При решении электрической задачи задавали разность потенциалов между поверхностями А-В и К-F-G. 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 поверхности К-F-G принималась постоянной и равной начальной температуре. Электро- и теплофизические свойства детали и проволоки принимали одинаковыми.

Расчеты показали, что на всех стадиях осадки проволоки максимальная плотность тока наблюдается со стороны ранее наваренного валика. Это приводит к неравномерному нагреву осаживаемой проволоки и возникновению повышенных температур в этой зоне. При увеличении продолжительности импульса тока неравномерность нагрева проволоки по сечению снижается, но при этом сохраняется в пределах 25...30%. Такая неравномерность может приводить к плавлению металла проволоки на смежном валике и выдавливанию расплавленного металла из-под электрода. Кристаллизация этого объема металла без обжатия электродом, по нашему мнению, и приводит к образованию дефектов сплошности усадочного характера, некачественному соединению выдавленного объема проволоки с поверхностью.

Для предотвращения выдавливания расплавленного металла было предложено увеличить ширину рабочей части электрода до таких значений, при которых весь навариваемый металл будет проковываться электродом на всей стадии его осадки. Разработанная расчетная схема связывает такие основные параметры наварки, как ширина электрода b , диаметр проволоки d , шаг наварки H , величину осадки проволоки с объемом выдавливаемого металла

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \left((b_1 - H)h - k \cdot h \cdot \frac{b - 2H + b_1}{2} \right)},$$

где $b_1 = \frac{\pi \cdot d^2}{4h(1 + \varepsilon)}$ – ширина наваренного валика; D – высота неровности; k –

коэффициента неравномерности течения металла; h – высота наваренного валика; ε – осевая деформация проволоки.

Неравномерность деформирования проволоки из-за ограничения смежным валиком была исследована экспериментально и аппроксимирована линейной зависимостью

$$k = 0,163b - 0,8$$

Адекватность разработанной модели была проверена сопоставлением результатов расчетов волнистости наваренного слоя и ее экспериментально

найденными значениями. Расхождения между расчетом и экспериментом не превысили 5%.

Оптимальная ширина электрода соответствует нулевому значению объема выдавленного металла и находится из выражения

$$b = \left(5,992 - \frac{\pi \cdot d}{8(1-\eta)(1+\varepsilon)} \right) + 4,237\sqrt{a}, \quad (1)$$

где $a = \left(1,414 - \frac{0,03\pi \cdot d}{(1-\eta)(1+\varepsilon)} \right)^2 + \frac{0,201\pi \cdot d}{(1-\eta)(1+\varepsilon)} - 3,414$; η - величина осадки

проволоки.

Полученная зависимость (1) позволяет на стадии разработки технологического процесса наварки обосновано назначать оптимальную ширину электрода. Так, при использовании проволоки диаметром 1,6 мм оптимальная ширина электрода должна составлять 8 мм. Проведенные



Рис.3. Макрошлиф образца после ЭЖНП проволоками Нп-30ХГСА и 40Х13

эксперименты показали, что выдавливания навариваемой проволоки не происходит (рис.3). Волнистость наваренного слоя составляет около 0,2 мм и образуется при внедрении электрода в ранее наваренные валики. При этом плавление металла смежного валика не происходит, что и объясняет отсутствие дефектов сплошности. Таким образом, превышение критической ширины электрода меняет условия формирования зоны перекрытия смежных валиков, устраняет причину возникновения в этой зоне дефектов сплошности и предотвращает вызываемое этими дефектами отслоение последующего слоя.

Третья глава посвящена исследованию процесса осевой деформации, разработке способов ее управления, а также экспериментальной проверке возможности обработке ППД (чеканкой) многослойных покрытий.

Рассматривая процесс деформации проволоки, как плоское напряженное состояние получим, что вертикальное напряжение σ_y и горизонтальное напряжение σ_x будут главными нормальными напряжениями.

Тогда

$$\varepsilon = \frac{1}{E^*} \left(\sigma_x + \frac{\sigma_y}{2} \right), \quad (2)$$

где E^* - модуль пластичности.

Для нахождения напряжений σ_x и σ_y были рассмотрены силы, действующие на проволоку 1 со стороны вращающейся со скоростью ω_0 детали 2 и роликового электрода 3, вращающимся со скоростью ω_3 (рис.4). Примем

допущение о том, что равнодействующие всех сил приложены к проволоке в точках A и B . Из-за кривизны поверхностей роликового электрода и детали вертикальная сила F_y приводит к возникновению горизонтальных сил F_{x1} и F_{x2} , действующих вдоль оси навариваемой проволоки

$$F_{x1} = F_y \operatorname{tg} \alpha_1,$$

$$F_{x2} = F_y \operatorname{tg} \alpha_2,$$

$$\alpha_1 = \arcsin \left(\frac{L}{R_3} \right),$$

$$\alpha_2 = \arcsin \left(\frac{L}{R_0} \right),$$

где $L = \sqrt{\frac{2R_3R_0(d-h)}{R_3+R_0}}$ - длина зоны деформирования проволоки, R_3 , R_0 -

радиусы роликового электрода и детали соответственно.

Осевому деформированию проволоки препятствуют сила трения, возникающая при скольжении проволоки по поверхности детали

$$F_{mp.2} = f_{mp} F_y,$$

где f_{mp} - коэффициент трения скольжения проволоки о навариваемую деталь.

Роликовый электрод приводится во вращение действием силы трения F_{mp1} между ним и проволокой. Создаваемой силой F_{mp1} момент

$$M_3 = F_{mp1} R_3, \tag{3}$$

должен быть достаточным для преодоления момента трения M_{oc} в оси роликового электрода

$$M_{oc} = F_y f^* r,$$

где f^* - коэффициент трения скольжения при вращении роликового электрода на оси; r - радиус оси роликового электрода 4.

С учетом сказанного равнодействующая сила F_x , вызывающая осевую деформацию проволоки, составит

$$F_x = F_{x2} - F_{mp.2} + F_{x1} + F_{mp.1}. \tag{4}$$

Напряжения σ_x и σ_y рассчитывали по формулам

$$\sigma_x = \frac{F_x}{S_y}, \tag{5}$$

$$\sigma_y = \frac{F_y}{S_x}, \tag{6}$$

где S_y - средняя площадь поперечного сечения деформируемой проволоки; S_x - средняя площадь контакта проволока-деталь.

Модуль пластичности $E^* = 510$ МПа нашли из выражения (2) посредством экспериментального определения относительной осевой деформации ε в процессе электроконтактной наварки. Проверку адекватности разработанной математической модели осевого деформирования проволоки провели посредством сопоставления расчетных и экспериментальных значений относительной осевой деформации проволоки ε в зависимости от диаметра детали. Образцы из стали 45 диаметром от 40 до 150 мм наваривали проволокой Нп-30ХГСА диаметром 1,6 мм. Радиус роликового электрода составлял $R_э = 100$ мм. В зависимости от диаметра образца силу тока наварки меняли в диапазоне $I_n = 5,0 \dots 12,0$ кА, продолжительность импульсов тока составляла $t_n = 0,06 \dots 0,14$ с. Погрешность между рассчитанными и аппроксимирующей экспериментальными данными не превысила 7%.

Из выражений (2-6) следует, что относительная осевая деформация ε прямо пропорциональна равнодействующей силе F_x . Приложив к роликовому электроду дополнительный момент $M_{дон}$, совпадающий по направлению с моментом M_{oc} , можно увеличить силу трения F_{mp1} , равнодействующую силу F_x и, в итоге, осевую деформацию проволоки. При ЭКНП детали диаметром $D_д = 40$ мм и радиусе электрода $R_э = 100$ мм создание момента 40 Нм позволило увеличить относительную осевую деформацию с 0,4 до 0,65 при неизменных остальных параметрах режима наварки (рис. 5).

Влияние осевой деформации на прочность образующегося с деталью соединения оценивали по усилию отрыва проволоки, наваренной при заниженной силе тока 3,6 кА. Усилие отрыва прикладывали к не наваренному концу проволоки по нормали к поверхности детали. Увеличение осевой деформации с 0,4 до 0,65 позволило повысить усилие отрыва почти в три раза. При этом, как показали металлографические исследования, с увеличением

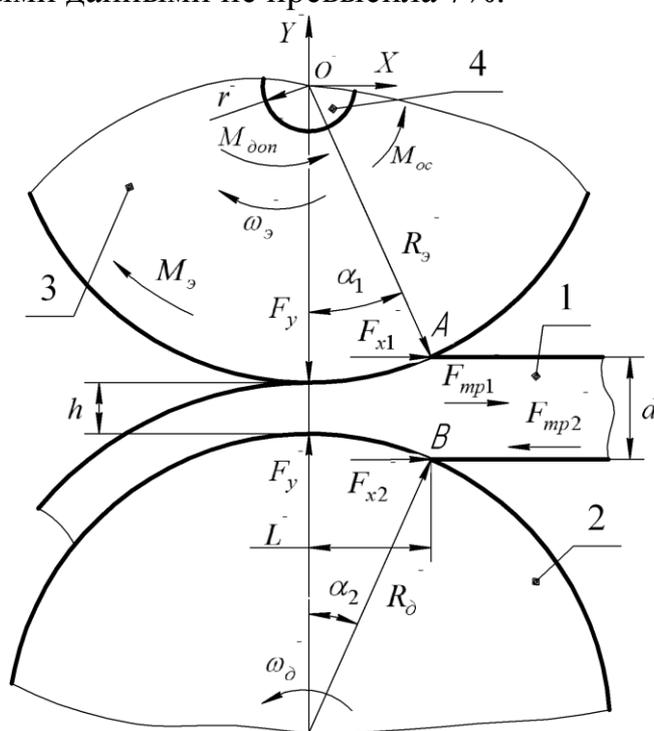


Рис.4. Схема действия сил в плоскости роликового электрода

осевой деформации проволоки количество окисных включений между слоями снижается, они имеют единичный, раздробленный характер.

Для практического применения способа наварки с притормаживанием роликовых электродов разработан способ текущего контроля осевой деформации навариваемой проволоки. Так как электрод приводится во вращение посредством контакта с заземляемой проволокой, а проволока подвергается осевой деформации в направлении, противоположной ее подаче, то линейная скорость вращения роликового электрода оказывается меньше линейной скорости вращения детали. Тогда относительная осевая деформация проволоки составит

$$\varepsilon = \left(\frac{1 - k_c t_n}{t_n} \right) - \left(\frac{t_n + t_n}{t_n} \right) k_{эл}$$

где $k_{эл}$ - коэффициента отставания вращения роликового электрода, равного отношению линейных скоростей вращения детали и электрода; k_c - коэффициент, учитывающий частичное проскальзывание электрода во время паузы и определенный опытным путем ($k_c \approx 0,75 \dots 0,8$); t_n - время паузы; t_n - время импульса.

Очевидно, что значение коэффициента $k_{эл}$ не зависит от количества циклов наварки, приведших к формированию валика длиной $L_в$. По этой причине коэффициент $k_{эл}$ на практике можно легко определить через подсчет количества оборотов детали $N_д$ и роликового электрода $N_{эл}$

$$k_{эл} = \frac{D_{эл} N_{эл}}{D_д N_д}$$

С целью проверки эффективности всех разработанных мероприятий по предотвращению межслойных разрушений образцы после многослойной наварки и черновой шлифовки были подвергнуты чеканке с энергией удара 6 Дж. Толщина слоя наваренного после черновой шлифовки составляла 1,6 мм. Глубина упрочнения, определенная расчетным путем, а также экспериментально на основе изменения микротвердости по нормали к поверхности, составила 3,5-4 мм и включила как слой наваренного металла, так и зону

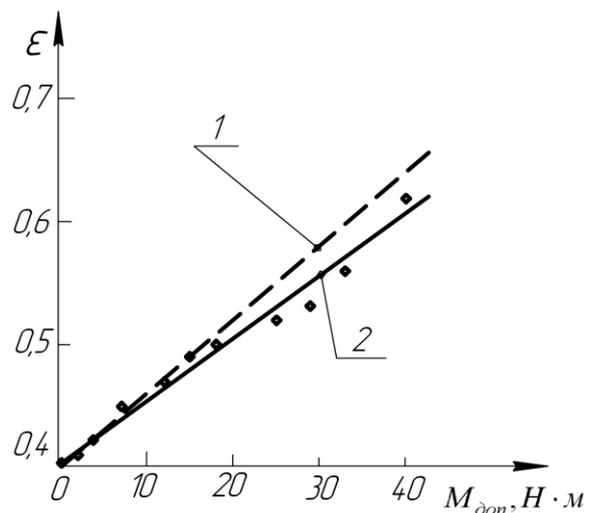


Рис.5. Зависимость ε от $M_{дон}$: 1- расчет по (2); 2 – кривая, аппроксимирующая экспериментальные значения (8); ◇ - экспериментальные значения

термического влияния. Дефекты в виде отслоений и разрушения покрытия отсутствовали.

Четвертая глава посвящена разработке технологии восстановления валов с галтельными переходами комбинированной наплавкой и исследованию её влияния на усталостную прочность образцов.

Для полного восстановления геометрии шеек с галтельными переходами была предложена технология комбинированной наплавки. Вначале электроконтактной наваркой производится восстановление цилиндрической части шеек с одновременным обеспечением требуемой твердости поверхности. Затем, для восстановления геометрии галтелей выполняется их дуговая наплавка низкоуглеродистой проволокой. Применение присадочной низкоуглеродистой проволоки исключает опасность возникновения в наплавленном металле закалочных трещин, а малый объем наплавки не приводит к значительному нагреву восстанавливаемых шеек. Присадочная проволока для ЭКНП должна обеспечивать как необходимую твердость слоя наваренного металла, так и отсутствие трещин в зоне термического влияния (ЗТВ) наплавленных на галтели валиков. Указанным требованиям удовлетворяет проволока Нп-30ХГСА, которая и была взята для дальнейших исследований. Дугую наплавку осуществляли в среде углекислого газа проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм.



Рис.6. Макрошлиф продольного сечения образца после ЭКНП 3-х слоев и дуговой наплавки галтели



Рис.7. Микросшлиф области галтельного перехода (x350)

Экспериментальные исследования показали, что наплавка галтелей не приводит к отслоению и разрушению ранее наваренного многослойного покрытия (рис. 6,7).

Важной характеристикой комбинированной наплавки является возможное разупрочнение наваренного слоя металла при последующей дуговой наплавке галтелей. Проведенные расчеты по схеме мгновенного точечного источника и с использованием зависимости Холломона-Джейфа, а также экспериментальные исследования на образцах после наварки проволокой Нп-30ХГСА, имитирующих шейку вала с галтельным переходом, показали, что ширина разупрочненной дорожки вдоль поверхности ЭКНП составляет не более 3 мм.

Максимальное разупрочнение составило 6 - 10 HRC, что допустимо для большинства валов.

Исследование влияния разработанной технологии на усталостную прочность проводили на ступенчатых цилиндрических образцах диаметром 30 мм и радиусом галтелей 5 мм. Образцы изготавливали из стали 40X после улучшения. Основным критерием при определении пределов выносливости и построении кривых усталости являлось полное разрушение образца. Были исследованы четыре серии образцов:

1. Образцы без наварки – «основной металл».
2. Образцы после ЭКНП проволокой Нп-30ХГСА в три слоя до галтелей.
3. Образцы после ЭКНП проволокой Нп-30ХГСА в три слоя до галтелей, с последующей дуговой наплавкой галтелей проволокой Св-08Г2С;
4. Образцы после комбинированной наплавки и чеканки всей наплавленной поверхности.

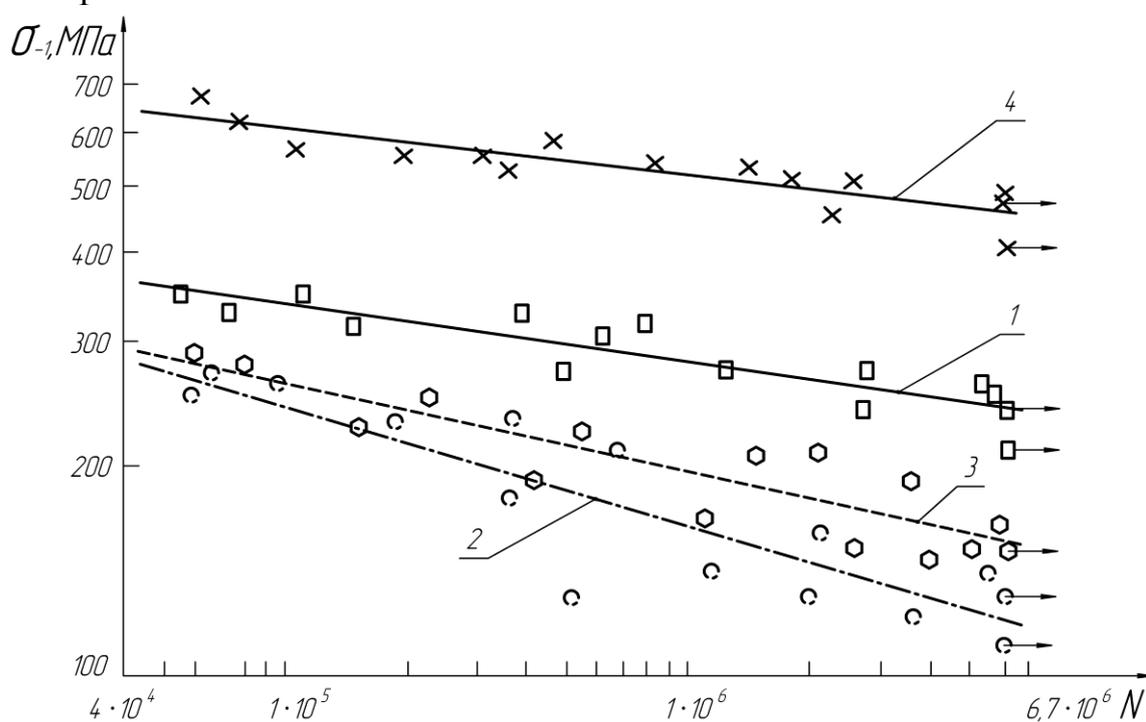


Рис. 8. Результаты усталостных испытаний

Результаты усталостных испытаний представлены на рис.8. Предел выносливости первой серии образцов составил 245 МПа. Разрушение образцов происходило по галтели, зоны зарождения трещин единичны и находятся на поверхности образца (рис.9,а). Многослойная электроконтактная наварка (серия 2) снизила усталостную прочность на 51% по отношению к «основному металлу». Излом образцов происходил в зоне окончания электроконтактной наварки в области галтелей. Зарождение усталостных трещин наблюдается по всему периметру сечения образца (рис.9,б) что свидетельствует о большом влиянии концентраторов напряжений вдоль кромок крайних валиков. Дуговая наплавка галтелей (серия 3) несколько повысила усталостную прочность

образцов до 154 МПа, что подтверждает роль концентраторов напряжений в виде кромок слоя наваренного металла. Однако уровень прочности основного металла не достигается. Усталостная прочность образцов после комбинированной наплавки и чеканки (серия 4) на 92% выше усталостной прочности «основного металла» и составляет 465 МПа. Изломы образцов становятся похожими на изломы образцов 1-ой серии (рис.9,в) – очаги зарождения трещины единичны, скорость развития трещины в упрочненном слое мала. Причинами этого следует считать как формирование после обработки ППД остаточных напряжений сжатия, так упрочнения металла вследствие его наклепа. В частности замеры микротвердости показали ее увеличение после чеканки в среднем с 5200 МПа до 6600 МПа (примерно 25%).

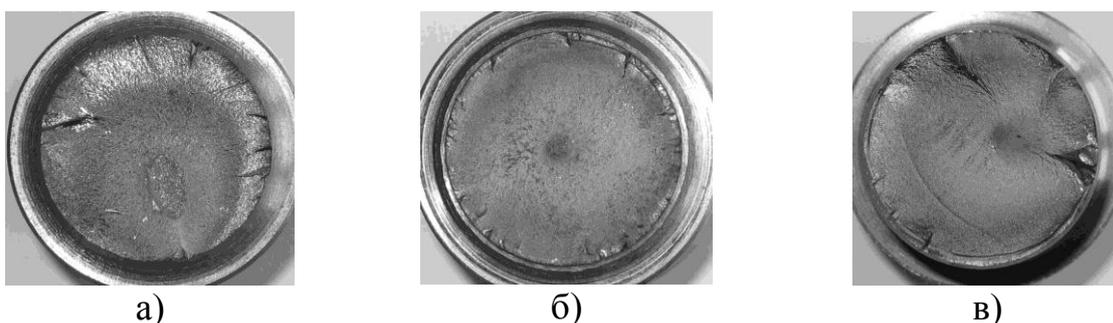


Рис.9. Характерные изломы образцов: а) серия 1, б) серия 2, в) серия 4

Таким образом, проведенные исследования показали, что технология комбинированной наплавки с последующей обработкой ППД не снижает усталостной прочности образцов и может применяться для восстановления шеек с галтельными переходами циклически нагруженных валов.

Пятая глава посвящена вопросу практической реализации процесса восстановления валов согласно разработанной технологии на основании результатов исследований, проведенных в работе.

Для реализации процесса ЭКНП с притормаживанием электрода было разработано устройство, конструкция которого пояснена на рис.10. Роликовый электрод 1 с втулкой 2 установлен с возможностью вращения на оси 3, жестко закрепленной в клещевине 4. К боковой поверхности роликового электрода 1 пружиной 5 поджимается прижимная втулка 6 с фрикционным

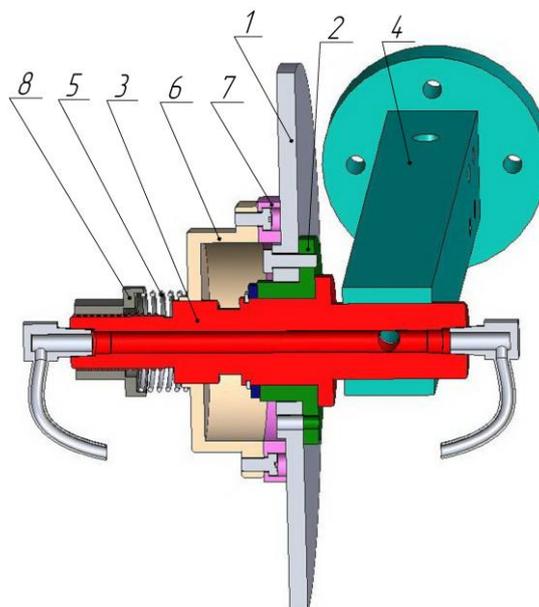


Рис.10. Устройство для управления вращением роликового электрода

диском 7. Прижимная втулка 6 сопрягается с осью 3 шлицевой поверхностью и может перемещаться по оси 3 только в продольном направлении. Усилие сжатия пружины 5 регулируется гайкой 8. Затягивание гайки 8 приводит к увеличению усилия прижатия фрикционного диска 7 к боковой поверхности роликового электрода 1 и увеличению момента его проворачивания.

Типовой технологический процесс восстановления шеек валов состоит из следующих основных операций: дефектация вала; ЭКНП проволокой Нп-30ХГСА цилиндрических части шеек вала с отступом от галтелей; дуговой наплавки галтелей проволокой Св-08Г2С в углекислом газе; чернового шлифования; упрочнения шеек и галтелей чеканкой; чистового шлифования шеек вала. В работе приведены режимы выполнения операций при восстановлении шеек валов.

Технология восстановления стальных коленчатых валов удостоена серебряной медали V Московского международного салона инноваций и инвестиций. Технология внедрена на предприятии ООО НПП «Велд». Экономический эффект от внедрения технологии составил 370 тыс. рублей.

Общие выводы и результаты работы

1. Восстановление валов с износами более 0,4...0,6 мм многослойной наваркой сдерживается снижением их усталостной прочности. Выполняемая с целью повышения усталостной прочности последующая обработка ППД может приводить к межслойным разрушениям из-за наличия дефектов сплошности в ранее наваренном слое и пониженной прочности межслойного соединения из-за сплошных окисных и гидроокисных включений.

2. Одной из причин снижения усталостной прочности ступенчатых валов, восстановленных ЭКНП, является суммирование действия концентраторов напряжений от галтельных переходов и кромок слоя наваренного металла. Для предотвращения снижения усталостной прочности ступенчатых валов необходимо выполнять полное восстановление геометрии шеек и галтельных переходов.

3. Установлено, что дефекты сплошности в наваренном слое могут возникать в перегретых объемах металла осаживаемой проволоки, выдавливаемых из-под электрода со стороны ранее наваренного валика и охлаждающихся в условиях отсутствия проковки. Причиной перегрева выдавливаемых объемов металла является повышенная плотность тока в этих зонах поперечного сечения осаживаемой проволоки.

4. Применение роликовых электродов с шириной рабочей поверхности, определенной по полученной в работе зависимости, предотвращает выдавливание осаживаемой проволоки из-под электрода, обеспечивает проковку навариваемой проволоки на всей стадии ее осадки и исключает причины образования указанных дефектов.

5. Выявлена возможность повышения прочности формируемого межслойного соединения за счет притормаживания вращения роликового электрода и вызванного этим увеличение осевой деформации навариваемой проволоки. С увеличением осевой деформации проволоки количество окисных включений между слоями снижается, они приобретают единичный, раздробленный характер.

6. Показано, что из-за осевой деформации проволоки линейная скорость рабочей поверхности вращающегося роликового электрода меньше скорости наварки. Полученная с учетом этого математическая зависимость была использована для контроля осевой деформации проволоки непосредственно в процессе наварки через подсчет количества оборотов роликового электрода и детали.

7. С целью проверки эффективности разработанных мероприятий по предотвращению межслойных разрушений образцы после многослойной наварки и черновой шлифовки были подвергнуты чеканке с энергией удара 6 Дж. Толщина слоя после черновой шлифовки составляла 1,5 мм. Глубина упрочнения, определенная по замерам микротвердости, составила 3,5...4 мм. Металлографические исследования межслойных разрушений многослойного покрытия не выявили.

8. Для полного восстановления геометрии шеек и галтельных переходов предложена технология комбинированной наплавки, заключающаяся в ЭКНП цилиндрической части шейки проволокой Нп-30ХГСА и последующей дуговой наплавке галтелей проволокой Св-08Г2С в углекислом газе. Дуговая наплавка вызвала появление вдоль сварного шва частично разупрочненной дорожки шириной около 3 мм и твердостью 35...45 НRC, что является допустимым для большинства деталей машин. Металлографические исследования показали, что проплавление галтелей и ранее наваренного слоя происходит без образования трещиноподобных дефектов, непроваров и пор.

9. Усталостные испытания ступенчатых цилиндрических образцов из стали 40Х диаметром 30 мм и радиусом галтелей 5 мм показали, что ЭКНП в три слоя до галтелей снижает усталостную прочность на 51%. Усталостная прочность образцов после комбинированной наплавки и чеканки на 92% выше образцов из основного металла.

10. Разработаны технологические рекомендации по восстановлению циклически нагруженных валов многослойной наваркой. Экономический эффект от внедрения разработок в НПП «Велд» (г. Калуга) составил 370 тыс. рублей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

1. Зезюля В.В. Основные задачи восстановления изношенных шеек коленчатых валов комбинированной наплавкой // Прогрессивные технологии,

конструкции и системы в приборо – и машиностроении: Тезисы докладов РНТК. М., 2005. С. 110 – 112.

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

3. Булычев В.В., Зезюля В.В. Восстановление коленчатых валов комбинированной наплавкой // Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 5 – й международной научно – технической конференции. Киев. 2005. С. 38 – 40.

4. Булычев В.В., Зыбин И.Н., Зезюля В.В. Приспособление для упрочнения шеек коленчатых валов чеканкой // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо – и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: Тезисы докладов ВНТК. М., 2005. С. 65 – 66.

5. Зезюля В.В. Исследование влияния технологии комбинированной наплавки на выносливость образцов // Научные технологии в приборо - и машиностроении: Тезисы докладов РНТК. М., 2006. С. 241 – 243.

6. Зезюля В.В. Расчет температурных полей при дуговой наплавке цилиндрических деталей // Научные технологии в приборо – и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: Тезисы докладов ВНТК. М., 2006. С. 116-118.

7. Нормирование электроконтактной наварки проволокой оплавлением / В.А. Дубровский [и др.] // Научные технологии в приборо – и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: Тезисы докладов ВНТК. М., 2007. С. 58-60.

8. Дубровский В.А., Зезюля В.В, Столяров И.В. Определение расхода проволоки при электроконтактной наварке оплавлением // Научные технологии в приборо – и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: Тезисы докладов ВНТК. М., 2008. С. 53-55.

9. Булычев В.В., Зезюля В.В. Уменьшение волнистости наваренной поверхности при электроконтактной наварке проволокой // Научные технологии в приборо – и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: Тезисы докладов ВНТК. М., 2008. С. 264-265.

10. Булычев В.В., Зезюля В.В. Технология восстановления стальных коленчатых валов комбинированной наплавкой // Ремонт, восстановление и модернизация. 2008. № 12. С. 14-18.

11. Дубровский В.А., Зезюля В.В, Столяров И.В. Расчет прямых затрат на электроконтактную наварку проволокой оплавлением // Сварочное производство. 2008. № 12. С. 41-44.