

к 903

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР  
ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ

---

Инженер Г. Д. КУЛИКОВ

*На правах рукописи*

ИССЛЕДОВАНИЕ  
КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН  
ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ВИБРОДУГОВОЙ  
НАПЛАВКЕ И РАЗРАБОТКА ГОЛОВОК  
С РАЦИОНАЛЬНЫМИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫМИ  
СИСТЕМАМИ

05.03.06

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель —  
кандидат технических наук,  
доцент И. Р. Пацкевич

ЧЕЛЯБИНСК  
1964 г.

4111

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР  
ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ



Инженер Г. Д. КУЛИКОВ

*На правах рукописи*

ИССЛЕДОВАНИЕ  
КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН  
ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ВИБРОДУГОВОЙ  
НАПЛАВКЕ И РАЗРАБОТКА ГОЛОВОК  
С РАЦИОНАЛЬНЫМИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫМИ  
СИСТЕМАМИ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель —  
кандидат технических наук,  
доцент И. Р. Пацкевич



ЧЕЛЯБИНСК  
1964 г.

Работа выполнена в проблемной лаборатории кафедры сварочного производства Челябинского политехнического института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Совета по присуждению ученых степеней Челябинского политехнического института или прислать свой отзыв в двух экземплярах.

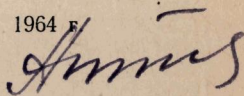
О дне и времени защиты за 10 дней будет опубликовано в газете «Челябинский рабочий».

Защита назначена на 18/I . 1965 года. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Адрес института: г. Челябинск, 44, проспект имени В. И. Ленина, 76, телефон 9-33-79.

Автореферат разослан 17/XII . 1964 г.

Ученый секретарь Совета  
доцент, к. т. н. В. Н. ГОНЧАР



## ВВЕДЕНИЕ

Увеличение долговечности и восстановление работоспособности машинного парка является важнейшей проблемой народного хозяйства нашей страны. Расходы на текущий и капитальный ремонт оборудования составляют примерно десятую часть средств, предусмотренных в 1963 г. государственным бюджетом на финансирование народного хозяйства страны.

Наплавка, являясь одной из основных отраслей современной сварочной техники, позволяет наиболее эффективно восстанавливать изношенные и упрочнять новые детали.

Одним из эффективных методов восстановления изношенных деталей является автоматическая вибродуговая наплавка. Известные преимущества этого процесса обусловили его широкое применение на многих предприятиях промышленности, строительства и на транспорте. В СССР в 1961 г. действовало более 1000 вибродуговых установок. Особенно широкое применение способ получил на предприятиях по ремонту сельскохозяйственных машин, где к концу 1962 г. действовало свыше 300 вибродуговых установок. Однако достигнутый здесь уровень применения наплавки позволяет восстанавливать лишь 10% от возможного количества деталей.

Дальнейшее увеличение объема применения вибродуговой наплавки должно быть достигнуто не только на основе роста числа установок, но также путем создания более производительных, самонастраивающихся и надежных в работе вибродуговых головок.

Качество наплавленных деталей в значительной мере зависит от характеристики вибродуговых головок.

Многие исследователи отмечают, что колебательные системы с электромагнитным приводом обладают существенными недостатками, которые обуславливают вибра-

цию с произвольно изменяющейся интенсивностью и получение наплавленного слоя с большой высотой неровностей. Большая высота неровностей поверхности наплавленного слоя порождает необходимость предусматривать припуск на механическую обработку до 1,5 мм на сторону, что, в ряде случаев в несколько раз превышает величину износа наплавленной детали. По этой причине эффективность применения вибродуговой наплавки значительно снижается.

В последние годы были опубликованы несколько работ, посвященных исследованию зависимости высоты неровностей наплавленного слоя от частоты и размаха вибрации электрода, но они недостаточно систематизированы, а иногда противоречивы. Влияние других колебательных величин (вибрационных скорости и ускорения, чистоты форм вибрации и т. д.) на процесс наплавки до настоящего времени не изучалось. Не изучалось также и влияние на процесс наплавки физических свойств колебательных систем вибродуговых головок.

Основной целью настоящей работы явилось:

1. Исследование влияния колебательных величин на качественные характеристики процесса наплавки
2. Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств колебательных систем головок.
3. Разработка методики расчета параметров рациональной колебательной системы, способной улучшать качество саморегулирования процесса наплавки.
4. Создание, экспериментальная и промышленная проверка автоматической вибродуговой головки с рациональной колебательной системой.

## **СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЗАДАЧИ И ОБЩАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

Первая глава диссертации содержит обзор работ, посвященных исследованию процессов дуговой сварки и наплавки вибрирующим электродом. Показана противоречивость мнений о физической сущности процесса наплавки вибрирующим электродом. Приведены результаты наших исследований физической сущности процесса. Определена роль вибрации при вибродуговой наплавке. Показано, что колебательные величины существенным

образом влияют на качественные характеристики процесса наплавки. Установлено, что синусоидальная форма вибрации электрода является наиболее благоприятной для применяемых при вибродуговой наплавке рабочих напряжений, поэтому исследованию подвергались головки только с синусоидальной формой вибрации.

В результате обзора колебательных систем существующих вибродуговых головок установлено, что разработка головок до последнего времени осуществлялась без изучения и учета физических свойств колебательных систем, а иногда и без учета особенностей процесса вибродуговой наплавки. Вследствие этого интенсивность вибрации колебательных систем таких головок, под воздействием некоторых возмущающих факторов, изменяется в направлении, отрицательно влияющем на устойчивость процесса наплавки и качество наплавляемых деталей.

В заключении первой главы изложены основные задачи и общий план исследований.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВИБРОДУГОВЫХ ГОЛОВОК С СИНУСОИДАЛЬНОЙ ФОРМОЙ ВИБРАЦИИ**

Во второй главе описывается разработанная методика и аппаратура для измерения колебательных величин. Исследование колебательных величин выполнялось с помощью индукционного датчика — виброщупа, представляющего собой виброизмерительный генераторный прибор дистанционного действия. Датчик позволял одновременно регистрировать вибрационные смещение и скорость. Сигналы датчика при необходимости записывались на осциллографе одновременно с записью кривых тока в рабочей цепи, напряжения и мощности. Сигналы одной из двух катушек датчика подавались непосредственно на вход шлейфового осциллографа Н-102, сигналы второй катушки подавались на второй канал осциллографа через виброметр. Калибровка аппаратуры и контроль измерения размаха колебаний осуществлялись оптическим методом с точностью измерения — 0,05 мм.

С помощью датчика были исследованы форма и чистота форм вибрации колебательной системы с электромагнитным приводом. В результате исследования уста-

новлено, что чистота форм вибрации зависит от сил сопротивления, действующих в колебательной системе, от наложения внешних импульсов силы. Наибольшее влияние на характер кривых вибрационной скорости и смещения оказывают удары колебательной системы о неподвижные части головки. Вследствие ударов форма вибрации изменяется от синусоидальной до существенно несинусоидальной.

Расчеты, выполненные по экспериментальным кривым вибрационной скорости колебательной системы, показывают, что коэффициент формы близок к значению этого коэффициента для синусоидального колебания. Различие коэффициентов составляет 1—4%. Столь незначительная разница в коэффициентах формы изучаемых колебаний по сравнению с синусоидальными позволяет рассматривать их как синусоидальные колебания. При ударе якоря электромагнита о стержень магнитопровода чистота форм вибрации резко ухудшается.

В качестве меры чистоты периодического колебания был принят клирфактор, представляющий отношение корня квадратного из суммы квадратов амплитуд гармоник выше первой к амплитуде первой гармоники периодического колебания. По мере увеличения интенсивности удара якоря о стержень магнитопровода клирфактор возрастал до значения 0,5. Чистота форм вибрации колебательных систем с эксцентриковым приводом прогрессивно ухудшается по мере образования и развития люфтов в шарнирных сочленениях и подшипниках.

Во второй главе рассмотрены также факторы, влияющие на интенсивность вибрации колебательной системы при холостой работе (без наплавки). Установлено, что изменение интенсивности вибрации колебательных систем с электромагнитным приводом происходит по причине изменения напряжения питания катушек вибратора, изменения частоты собственных колебаний системы или частоты вынуждающей силы. При нормальной степени насыщения магнита изменение напряжения питания катушек вибратора на 1% приводит к изменению интенсивности вибрации на 2%.

В процессе эксплуатации головок отдельные детали и узлы подвергаются значительным вибрационным нагрузкам. Упругий элемент колебательной системы в виде спиральной пружины под воздействием вибрационных на-

грузок имеет возможность поворачиваться вокруг собственной оси. Вследствие отсутствия строгой параллельности торцов цилиндрической пружины даже незначительный ее поворот (на  $2-5^\circ$ ) вызывает заметное изменение частоты собственных колебаний системы.

Изменение же частоты собственных колебаний системы, настроенной в область резонанса, неизбежно приводит к изменению интенсивности вибрации. По этой же причине изменяется интенсивность вибрации при изменении частоты вынуждающей силы.

За малым исключением колебательные системы головок устроены таким образом, что колебания происходят относительно определенной оси качания, вследствие чего концевая часть электрода перемещается по дуге близкой к прямой, наклоненной к горизонтали под некоторым углом. В этом случае вибрация электрода будет иметь две составляющих: нормальную и параллельную касательной к точке окружности наплавляемой детали, которая определяется местом подвода электрода. Для краткости в дальнейшем их будем называть нормальной и касательной составляющими вибрации.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА НАПЛАВКИ**

В третьей главе рассматривается механизм образования чешуйчатости, отдельных валиков и неровностей поверхности наплавленного слоя. Образование резко выделенных чешуек обусловлено большими колебаниями максимальных значений тока по циклам. Наличие мелких чешуек связано с изменением тока в пределах одного цикла процесса.

Известно, что в сварочной дуге между электродом и наплавляемой деталью возникает интенсивный поток газов, паров и частиц металла, направленный от электрода в сторону ванны. Этот поток оказывает давление на жидкий металл; вследствие чего происходит его перемещение. Известно, что давление дуги пропорционально квадрату тока.

В результате статистической обработки осциллограмм



установлено, что в случае низкой стабильности параметров циклов максимальные значения тока (при принятых условиях опытов) изменяются в пределах от 220 до 675 а. При высокой стабильности процесса пределы изменения тока составляют 450—570 а. Расчеты показали, что давление дуги изменяется при этом соответственно от 1,8 г до 15,3 г и от 4,2 г до 10,8 г. В последнем случае чешуйчатость валика и обусловленная ею высота неровностей наплавленного слоя значительно ниже, чем в первом. Высота неровностей слоя может зависеть также от неравномерного расплавления и переноса электродного металла и других факторов.

Высота неровностей наплавленной поверхности в работе оценивалась параметром  $R_z$  по ГОСТ 2789—59. Измерение производилось на универсальном измерительном микроскопе УИМ-21, специально для этой цели оснащенный индикаторной головкой и измерительной иглой.

Исходные параметры режима наплавки были приняты из условия получения наплавленных деталей высокого качества, согласно известным рекомендациям. За исключением нескольких особо оговоренных случаев, принятые параметры режима оставались постоянными: напряжение холостого хода 24 в, общее сопротивление рабочей цепи 0,031 ом, индуктивность цепи 0,16 мГн, проволока класса I по ГОСТ 9389—60, диаметром 2 мм, скорость перемещения электрода вдоль оси наплавляемой детали 3 мм/об, расход охлаждающей жидкости 0,5 л/мин. Оптимальные значения скорости подачи электродной проволоки, скорости наплавки и колебательных величин были определены в третьей главе и в последующих этапах также оставались постоянными.

Работами, проведенными И. Р. Пацкевичем в лаборатории сварки Челябинского политехнического института, установлено, что максимальное значение тока по циклам зависит от длительности периодов короткого замыкания, которая в свою очередь, при неизменных исходных электрических параметрах рабочей цепи зависит от состояния ванночки расплавленного металла. Периодическое возрастание и спад рабочего тока в каждом цикле процесса вызывает пульсацию силы давления дуги и колебание уровня ванночки расплавленного металла. Параметры колебаний влияют на высоту неровностей поверхности наплавленных слоев. На высоту неровностей поверхности

и поле рассеяния величин, характеризующих длительность короткого замыкания также влияет интенсивность химического кипения ванны расплавленного металла.

Для изучения изменений уровня ванночки в момент начала и конца короткого замыкания был использован разработанный нами метод, основанный на совместной записи вибрационного смещения электрода, кривых рабочих тока и напряжения. Данный метод позволяет также измерять длину перемычки жидкого металла между электродом и ванночкой.

Расшифровкой виброграмм-осциллограмм различных процессов наплавки и последующей обработкой с помощью эмпирических кривых распределения установлено, что данные (параметры колебания уровня ванночки, длительность периодов короткого замыкания и горения дуги, максимальные значения тока по циклам), соответствующие стабильному процессу имеют нормальный закон распределения. Нестабильные процессы характеризуются данными, закон распределения которых отличен от нормального.

При наплавке высокоуглеродистой проволокой, вследствие интенсивного химического кипения металла ванны, упомянутые выше данные имеют большое поле рассеяния, а поверхность наплавленного слоя — большую высоту неровностей. Заметная стабилизация процесса наблюдается при использовании разработанного нами нового способа вибродуговой наплавки в потоке воздуха. Поток воздуха, подаваемый в зону горения дуги, интенсифицирует окисление углерода в каплях металла. Доля углерода, выгорающего в ванне и ее химическое кипение уменьшается.

На стабильность процесса кроме электрических параметров оказывают влияние колебательные величины. Касательная составляющая вибрации способствует перемещению активного пятна на ванночке металла, уменьшению давления дуги и предварительному прогреву полоски металла на детали, что благоприятно отражается на формировании наплавленного валика и снижает высоту неровностей поверхности наплавленных слоев.

С возрастанием амплитуды вибрации электрода до 1,15 мм высота неровностей убывает. Дальнейшее увеличение амплитуды вибрации приводит к возрастанию вы-

соты неровностей поверхности наплавленных слоев и потерь электродного металла на угар и разбрызгивание.

С увеличением частоты вибрации электрода с 10 гц до 100 гц высота неровностей поверхности уменьшается в 2,5 раза, но возрастают потери электродного металла на угар и разбрызгивание с 5% до 11%. Однако, как показывают расчеты, общие потери металла, связанные с механической обработкой, разбрызгиванием и угаром по мере увеличения частоты вибрации уменьшаются.

При ударах колебательной системы, совпадающих по времени с концом периода горения дуги, резко (до 60%) увеличиваются потери электродного металла на разбрызгивание.

Высота неровностей наплавленной поверхности зависит также от скоростей подачи проволоки и наплавки. Лучшие результаты получаются при превышении скорости подачи проволоки над скоростью наплавки в 2—2,5 раза.

Интенсивность вибрации (по амплитудам вибрационной скорости или смещения) в процессе наплавки изменяется под воздействием таких возмущающих факторов, как демпфирование колебательной системы ванночкой расплавленного металла и удар электрода о наплавленную деталь.

Параметры колебательной системы обуславливают ее важнейшие физические (внутренние) свойства — чувствительность к силе и реакцию системы на воздействие силы. Эти свойства определяют величину и направление изменения параметров вибрации, что в свою очередь обуславливает изменение мощности, выделяемой в рабочем промежутке. Зависимость мощности от амплитуды и частоты вибрации является той основой, используя которую можно значительно улучшить качество саморегулирования процесса наплавки. Гибкие колебательные системы с электромагнитным приводом обладают свойствами увеличивать или уменьшать амплитуду вибрации. По мере увеличения разности между скоростями подачи и расплавления электродной проволоки интенсивность удара электрода о деталь и амплитуда вибрации изменяются.

Жесткая колебательная система имеет неизменную или почти неизменную интенсивность вибрации, независимую от состояния ванночки расплавленного металла и

ударов электрода о наплавляемую деталь. Внутренние свойства такой колебательной системы не принимают активного участия в улучшении качества саморегулирования процесса наплавки. К числу подобных головок с автономными колебательными системами можно отнести следующие типы головок: ВАМ-46-8, ВДГ-5, NVE-300, ГМВК-1, АНКЭФ-1 и др.

## ОСНОВЫ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВИБРОДУГОВЫХ ГОЛОВОК

В четвертой главе сформулированы требования к колебательным системам головок, проведено исследование дифференциального уравнения движения средней точки колебательной системы и на этой основе исследована частотная и фазовая чувствительность колебательной системы, установлена возможность использования внутренних свойств колебательной системы для улучшения саморегулирования процесса наплавки. Экспериментально-расчетным путем определены степень демпфирования колебательной системы ванночкой расплавленного металла и изменение жесткости системы в результате удара электрода о наплавляемую поверхность детали.

Колебательные системы автоматических головок с синусоидальной формой вибрации имеют одну степень свободы и, в первом приближении могут рассматриваться как системы с сосредоточенными параметрами. В таких колебательных системах при действии на массу вынуждающей силы, изменяющейся по гармоническому закону

$$F(t) = F_a \cos pt,$$

уравнение движения имеет вид

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + cx = F_a \cos pt, \quad (1)$$

где  $F_a$  — амплитуда силы,

$p$  — угловая частота вынуждающей силы,

$m$  — эквивалентная масса подвижных деталей,

$h$  — коэффициент сопротивления,

$c$  — коэффициент упругости,

$x$ ,  $\dot{x}$  и  $\ddot{x}$  — соответственно вибрационные смещения, скорость и ускорение.

Решение уравнения (1) позволяет определить величину статического смещения  $x_1$  в результате статического приложения вынуждающей силы:

$$x_1 = \frac{F_a}{c}, \quad (2)$$

амплитуду стационарных (установившихся) вынужденных колебаний

$$x_0 = \frac{F_a}{p \sqrt{h^2 + \left(\frac{c}{p} - pm\right)^2}}, \quad (3)$$

и коэффициент увеличения

$$B = \frac{x_0}{x_1} = \left[ (1 - K^2)^2 + K^2 \varepsilon^2 \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где  $K$  — коэффициент, равный отношению  $\frac{p}{\omega}$ ,

$\omega$  — угловая частота собственных колебаний,

$\varepsilon$  — коэффициент, равный отношению  $\frac{2\vartheta}{\vartheta_{кр}}$ ,

$\vartheta$  и  $\vartheta_{кр}$  — соответственно коэффициент затухания и критическое значение затухания.

Показано, что для неизменной частоты собственных колебаний системы и переменной частоты вынуждающей силы амплитуда колебаний равна:

$$x_0 = \frac{F_a}{m \omega^2} B. \quad (5)$$

Однако большинство процессов вибродуговой наплавки сопровождается ударами электрода о наплавляемую деталь, вследствие чего частота собственных колебаний изменяется. Полагая частоту вынуждающей силы неизменной получаем, что

$$x_0 = \frac{F_a}{mp^2} K^2 B \quad (6)$$

Первые множители в выражениях (5) и (6) — величины постоянные, тогда амплитуда  $x_0$  при  $\omega = \text{const}$  будет пропорциональной коэффициенту увеличения  $B$ . Для случая, когда  $p = \text{const}$  амплитуда  $x_0$  пропорциональна произведению квадрата коэффициента  $K$  на коэффициент увели-

чения В. Выражения (5) и (6) определяют существенные особенности частотных характеристик колебательных систем. Максимальные значения амплитуды  $x_0$  в первом случае ( $\omega = \text{const}$ ) располагаются слева, а во втором случае справа от резонансной частоты.

Анализом чувствительности колебательных систем к возмущающим факторам установлено, что при демпфировании системы (например, ванночкой расплавленного металла) во всех случаях амплитуда  $x_0$  уменьшается тем в большей мере, чем ее исходная настройка ближе к резонансной частоте. Увеличение жесткости системы приводит к уменьшению амплитуды  $x_0$ , если система настроена на резонансную частоту или при  $p < \omega$ . При настройке  $p > \omega$  увеличение жесткости системы вызывает увеличение амплитуды  $x_0$ . Приведенная формулировка, строго говоря, справедлива лишь для систем с большой добротностью, характерной для вибродуговых головок. Для систем с малой добротностью формулировка требует дополнительных уточнений. Это замечание относится также и к последующим выводам.

Известно, что в колебательных системах амплитуда смещения и амплитуда вынуждающей силы сдвинуты по фазе друг относительно друга. Сдвиг по фазе характеризуется величиной угла  $\varphi$  равного:

$$\varphi = \arctg \frac{K\varepsilon}{1 - K^2}. \quad (7)$$

Анализ фазовых характеристик колебательной системы показал, что фазовая чувствительность системы также различная. Наивысшая чувствительность колебательных систем к демпфированию ванночкой расплавленного металла соответствует значениям

$$K = 1,02 \text{ и } 0,98.$$

При резонансе угол  $\varphi = 90^\circ$ , независимо от сил внутреннего сопротивления и демпфирования системы ванночкой расплавленного металла.

При небольших силах внутреннего сопротивления и  $K = 0,9$  вынужденные колебания почти совпадают по фазе с внешней силой, а при  $K = 1,1$  находятся почти в противофазе. Пределы изменения угла  $\varphi$  сокращаются по мере уменьшения добротности системы. Максимум фазо-

вой чувствительности к изменению коэффициента  $K$  имеет место при резонансной частоте.

Из анализа частотной и фазовой чувствительности колебательной системы к возмущающим факторам следует, что система обладает целой гаммой различных свойств, влияющих на процесс вибродуговой наплавки.

В начальной стадии процесса наплавки, когда жидкая ванночка металла еще отсутствует, происходит удар электрода о деталь. В результате удара кинетическая энергия системы преобразуется в потенциальную, аккумулятором которой является сам электрод. В момент удара электрод упруго (в отдельных случаях пластически) деформируется и тем самым повышает жесткость системы. Это явление в работе названо эффектом пружинящего действия электрода, который при превышении частоты собственных колебаний над частотой вынуждающей силы ( $p < \omega$ ) вызывает уменьшение амплитуды вибрации и, наоборот, при  $p > \omega$  увеличение амплитуды вибрации. Эффект пружинящего действия электрода при  $p > \omega$  способствует наиболее быстрому достижению требуемой длительности периода короткого замыкания и установлению нормального процесса наплавки за 0,02 — 0,03 сек.

В процессе наплавки этот эффект проявляется при отклонении скорости подачи электродной проволоки от скорости ее плавления. Увеличение амплитуды вибрации вызывает кратковременное изменение электрических параметров цикла и увеличение мощности в разрядном промежутке, что обуславливает кратковременное возрастание скорости плавления электродной проволоки до установления равенства скоростей ее подачи и расплавления. Происходит улучшение качества саморегулирования процесса наплавки. На этой основе улучшается стабильность процесса наплавки и уменьшается на 15 — 20% высота неровностей поверхности наплавленного слоя, измеренная по параметру  $R_z$ .

Наименьшая высота неровностей ( $R_z = 200$  мк) соответствует настройке системы когда  $K = 1,08$ ; по мере уменьшения этого отношения до 0,9 высота неровностей возрастает до  $R_z = 300$  мк.

Эффективность использования внутренних свойств колебательной системы для улучшения качества саморегулирования процесса наплавки зависит также от добротности системы и от отношения логарифмического декре-

мента затухания системы при холостом ходе ( $\lambda_{xx}$ ) к условному логарифмическому декременту затухания системы в процессе наплавки ( $\lambda_p$ ).

Экспериментально-расчетным путем установлены значения  $\lambda_{xx}$  и  $\lambda_p$ , соответствующие оптимальным условиям наплавки. Эти величины равны  $\lambda_{xx} = 0,16$ ,  $\lambda_p = 0,25$ . По величине  $\lambda$  можно определить энергию, расходуемую на поддержание вынужденных колебаний и требуемую мощность вибратора.

Эффект пружинящего действия электрода проявляется тем в большей мере, чем выше добротность колебательной системы. Однако, при достижении некоторого значения добротности, система становится чрезмерно чувствительной к возмущающим факторам, что вызывает изменение амплитуды вибрации в пределах, отрицательно влияющих на устойчивость процесса. В принятых условиях наплавки оптимальное значение добротности системы равно 15—22.

Другими важными параметрами колебательной системы, существенно влияющими на эффективность использования ее внутренних свойств, является эквивалентная масса подвижных деталей —  $m$  и жесткость системы —  $C$ .

Предложены формулы для определения этих параметров:

$$m = \frac{\Delta C \cdot n}{\omega_2^2 - \omega_1^2}, \quad (8)$$

$$C = \frac{\omega_1^2 \cdot \Delta C \cdot n}{\omega_2^2 - \omega_1^2}, \quad (9)$$

где  $\Delta C$  — экспериментально определенное изменение жесткости колебательной системы за один удар электрода о деталь;

$\omega_1$  — исходная частота собственных колебаний системы;

$\omega_2$  — частота собственных колебаний системы в момент установления нормального процесса наплавки;

$n$  — длительность установления нормального процесса наплавки в циклах;

$C$  — исходная жесткость колебательной системы.



Под рациональной колебательной системой головок понимается система с параметрами, обеспечивающими наиболее эффективное использование ее внутренних свойств для улучшения качества саморегулирования процесса наплавки.

## **РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКИХ ВИБРОДУГОВЫХ ГОЛОВОК С РАЦИОНАЛЬНЫМИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ**

В пятой главе, на основе полученных результатов, излагается общий принцип проектирования автоматических головок и обоснование выбора параметров колебательных систем. Приводится расчет колебательных систем с синусоидальной формой вибрации с электромагнитным и электромоторным приводами. В пятой главе также представлены результаты экспериментальной проверки, промышленного испытания разработанных головок и расчеты по эффективности их применения.

Габаритные размеры хоботка головки определяются размерами и конфигурацией наплавляемых деталей. При выборе частоты вибрации электрода (системы) учитывалось, что с увеличением частоты возрастает устойчивость процесса наплавки и уменьшается высота неровностей поверхности наплавленных слоев. С другой стороны, частота вибрации в головках с электромоторным приводом, из условия работоспособности колебательной системы, регламентируется величиной максимально допустимых ускорений в элементах системы, содержащих шарнирные сочленения. По этим соображениям частота вибрации 50—60 гц при размахе 3,0 мм является предельной. В колебательных системах с электромагнитным приводом, где имеется только одно шарнирное сочленение на оси качания, частота вибрации 100 гц не вызывает опасных ускорений.

Гибкая колебательная система с электромагнитным приводом исключительно проста в изготовлении и эксплуатации. Наметившаяся в последние годы тенденция к замене электромагнитных приводов колебательных систем на электромоторные объясняется неизученностью внутренних свойств систем и факторами конструктивного характера.

В целях устранения неблагоприятного влияния изменения напряжения в цепи питания катушек электромагнита на интенсивность вибрации и процесс наплавки, нами разработана конструкция автоматической головки, в которой электромагнитный вибратор работает за пределом магнитного насыщения сердечника магнита. Упругий элемент колебательной системы выполнен в виде торсиона, что исключает возможность произвольного изменения жесткости колебательной системы в процессе наплавки.

Возможность использования внутренних свойств колебательной системы для улучшения качества саморегулирования процесса наплавки обусловлена минимальной величиной зазора между электродом и направляющим каналом хоботка. С этой целью спроектирована новая конструкция электродоподводящего хоботка, в котором проволока прижимается к направляющему каналу откидной цепочкой, с регулируемой величиной натяжения. Эта конструкция хоботка позволяет предельно сократить зазор между проволокой и каналом, и сделать его независимым от износа канала хоботка. Параметры колебательной системы головки определены по формулам (8) и (9). Автоматическая вибродуговая головка с описанными качествами получила название ВДГ-3М.

Гибкая колебательная система с электромоторным приводом при использовании электродвигателя постоянного тока с числом оборотов, зависимым от рабочего напряжения, позволяет путем изменения частоты и амплитуды вибрации электрода автоматически поддерживать заданное рабочее напряжение.

Амплитуда вибрации автоматически изменяется вследствие приближения или удаления частоты вынуждающей силы к резонансной частоте. На основе использования зависимости рабочего напряжения от частоты и амплитуды вибрации создана автоматическая вибродуговая головка с регулируемыми по рабочему напряжению амплитудой и частотой вибрации.

Экспериментальная проверка и промышленное испытание головки ВДГ-3М подтвердили правильность теоретических расчетов и выявили высокую эффективность ее применения. Изменение напряжения питания электромагнитного вибратора на 15% не вызывает изменения интенсивности вибрации электрода. Колебательная система с упругим элементом в виде торсиона обладает высокой

работоспособностью и при ее настройке на соответствующие параметры обеспечивает улучшение качества саморегулирования процесса наплавки.

Расчет экономической эффективности применения вибродуговой наплавки на Сибайском медносерном и Гайском горнообогатительном комбинатах показывает, что при наплавке одной тонны изношенных деталей достигается экономия 450 руб. Годовой экономический эффект от применения вибродуговой наплавки на Сибайском медносерном комбинате составил 24 245 руб., а на Гайском горнообогатительном комбинате — 38 780 руб.

Применение автоматической вибродуговой головки типа ВДГ-3М обусловило уменьшение высоты неровностей поверхности наплавленного слоя и снижение припуска на механическую обработку наплавленных деталей. По этой причине на 15—20% уменьшается расход электродной проволоки и электроэнергии, на 20—30% возрастает производительность наплавки по площади, наплавленной в единицу времени, значительно сокращается машинное время, необходимое для механической обработки наплавленных деталей.

## ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Вибродуговая наплавка является разновидностью способа дуговой наплавки вибрирующим электродом. Вибрация электрода при вибродуговой наплавке значительно уменьшает длительность периода установления процесса наплавки, расширяет диапазон режимов, обеспечивающих получение качественного наплавленного слоя.

2. Разработка автоматических вибродуговых головок осуществлялась до последнего времени без изучения и учета физических свойств колебательных систем, обеспечивающих вибрацию электрода, а иногда и без учета особенностей процесса вибродуговой наплавки. Вследствие этого, интенсивность вибрации колебательных систем таких головок под воздействием ряда факторов (изменение напряжения или частоты в питающей сети, изменение жесткости системы) изменяется в пределах, отрицатель-

но влияющих на устойчивость процесса наплавки и качество наплавляемых деталей.

3. Параметры колебательной системы определяют значения колебательных величин и обуславливают ее важнейшие физические свойства, проявляющиеся во время наплавки, — чувствительность к внешней силе и реакцию системы на воздействие силы. Эти свойства определяют величину и направление изменения параметров вибрации при воздействии силы, что в свою очередь, обуславливает характер изменения параметров цикла процесса.

4. Колебательные величины (амплитуда, частота, форма, чистота формы, интенсивность вибрации, вибрационная скорость и ускорение) оказывают существенное влияние на качественные характеристики процесса наплавки. Экспериментально найденные оптимальные значения колебательных величин вошли в исходные данные при исследовании и выборе параметров колебательных систем.

5. С помощью разработанной методики и аппаратуры рассмотрен механизм образования чешуйчатости валиков. Установлено, что высота неровностей поверхности слоев зависит от поля рассеяния по циклам максимальных значений тока в рабочей цепи ( $I_{\max}$ ), периодов короткого замыкания ( $t_{к. з.}$ ) и горения дуги ( $t_d$ ), а также от состояния ванночки расплавленного металла (изменения уровня ванночки, химического кипения металла и пр.).

6. Применение нового способа вибродуговой наплавки — в потоке воздуха, разработанного с участием автора, обеспечивает уменьшение поля рассеяния величин  $t_{к. з.}$ ,  $t_d$ ,  $I_{\max}$ .

7. Физические свойства колебательных систем, изученные в работе путем анализа дифференциального уравнения движения системы и последующей экспериментальной проверки основных результатов анализа, в широких пределах зависят от параметров системы.

8. Жесткая колебательная система имеет практически неизменную в процессе наплавки интенсивность вибрации. Удары электрода о наплавляемую деталь, при использовании гибкой колебательной системы, вызывают изменение частоты собственных колебаний системы, вследствие чего изменяются коэффициент  $K$  (равный от-

ношению частоты вынуждающей силы к частоте собственных колебаний) и амплитуда вибрации. При превышении частоты вынуждающей силы над частотой собственных колебаний системы удар электрода вызывает увеличение амплитуды вибрации. Обратное сочетание частот обуславливает при ударе уменьшение амплитуды вибрации. Реакция колебательной системы на удар электрода о деталь, названная в работе эффектом пружинящего действия электрода, в зависимости от настройки параметров системы может улучшать или ухудшать качество саморегулирования процесса наплавки.

9. Конструктивные решения колебательных систем большинства существующих вибродуговых головок не обеспечивают стабильной работы этих систем и надежного проявления эффекта пружинящего действия электрода. Исполнение упругого элемента системы в виде торсиона и применение пружинящего поджатия электродной проволоки к стволу хоботка устраняет отмеченные недостатки.

10. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана методика расчета рациональных колебательных систем головок, улучшающих качество саморегулирования процесса наплавки. По этой методике спроектирована и изготовлена автоматическая вибродуговая головка ВДГ-3М.

11. Проведенные экспериментальные исследования и опыт промышленной эксплуатации автоматической вибродуговой головки типа ВДГ-3М на Гайском горнообогатительном комбинате показали высокую эффективность ее применения. Экономические расчеты показали, что эффективность применения наплавки, с использованием головки ВДГ-3М, возрастает в результате того, что уменьшаются высота неровностей на поверхности наплавленного слоя и припуск на механическую обработку. При этом на 20—30% возрастает производительность процесса (по площади, наплавляемой в единицу времени), на 15—20% достигается экономия электродной проволоки и электроэнергии и на 30—50% увеличивается производительность на механической обработке.

12. По запросам предприятий выслано 20 комплектов чертежей разработанной нами головки типа ВДГ-3М. Колебательную систему с параметрами головки типа ВДГ-3М планируется включить в проект автоматической

вибродуговой головки для серийного производства, разрабатываемый Челябинским политехническим институтом и Челябинским тракторным заводом по заданию координационного Совета по сварке, при институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР.

Диссертация состоит из пяти глав, 195 стр. текста, 78 фигур и снабжена приложениями, включающими чертеж общего вида спроектированной автоматической головки ВДГ-3М, расчеты экономической эффективности применения новой головки.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ ПЕЧАТНЫХ ИЗДАНИЯХ

1. Пацкевич И. Р., Куликов Г. Д., «Исследование и внедрение автоматической дуговой наплавки деталей вибрирующим электродом», Сварочное производство, № 5, 1956.

2. Пацкевич И. Р., Куликов Г. Д., Пинчук И. С., «Исследование процесса автоматической вибродуговой наплавки», Сб. Восстановление изношенных деталей автоматической вибродуговой наплавкой, Челябингиз, 1956.

3. Пацкевич И. Р., Куликов Г. Д., Гришин М. А., «Вибродуговая наплавка валов электродвигателей», Сварочное производство, 1958, № 1.

4. Куликов Г. Д., Камалов М. А., Пацкевич И. Р., Авторское свидетельство № 158358 на изобретение «Автоматическая головка для вибродуговой наплавки и сварки», с приоритетом от 1 июня 1963.

5. Куликов Г. Д., Пацкевич И. Р., Авторское свидетельство № 163686 на изобретение «Способ вибродуговой наплавки и сварки», с приоритетом от 23 марта 1962.

6. Куликов Г. Д., Пацкевич И. Р., «Вибродуговая наплавка в потоке воздуха», Сб. Исследование и применение вибродуговой наплавки под редакцией И. Р. Пацкевича, издательство «Машиностроение», 1964.

7. Куликов Г. Д., Пацкевич И. Р., «Исследование колебательных величин при автоматической вибродуговой наплавке», там же.

8. Куликов Г. Д., «Исследование и выбор параметров колебательной системы с электромагнитным приводом для вибродуговых головок», там же.

9. Пацкевич И. Р., Попков А. М., Куликов Г. Д., Пирогова В. Д., «Роль вибрации при автоматической дуговой наплавке», там же.

10. Пацкевич И. Р., Куликов Г. Д. «Исследование и внедрение вибродуговой наплавки применительно к восстановлению деталей горнообогатительного оборудования», регистрация отчета по научно-исследовательской работе в Гос. комитете по делам изобретений и открытий СССР, № 43415, март 1964.

### По результатам работы сделаны доклады:

1. Задачи в области исследования, разработки и производства оборудования для вибродуговой наплавки, на тематическом координационном совещании по вибродуговой наплавке, октябрь, 1961, г. Челябинск.

2. Исследование колебательных величин при автоматической виб-

родуговой наплавке, на XVI научно-технической конференции Челябинского политехнического института, 1963.

3. Автоматические головки для вибродуговой наплавки с рациональными колебательными системами, на второй научно-производственной конференции г. Челябинска, апрель, 1964.

4. Исследование колебательных величин при автоматической вибродуговой наплавке и разработка автоматических головок с рациональными колебательными системами, на XVII научно-технической конференции ЧПИ, апрель, 1964.

5. Исследование колебательных величин при автоматической вибродуговой наплавке и разработка головок с рациональными колебательными системами, на объединенном заседании Ученого Совета механико-технологического факультета и кафедры сварочного производства Челябинского политехнического института, октябрь, 1964.