М336611

НА ДОМ ВЫДАЕТСЯ

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

ПАХАНЬЯН Давид Манукович

# СОЕДИНЕНИЕ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ (ЧУГУН+СТАЛЬ) ДУГОВЫМИ ТОЧЕЧНЫМИ ШВАМИ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ТЕРМИЧЕСКИМ ЦИКЛОМ

Специальность 05.04.05 - "Технология и машины сварочного производства"

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва 1979

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ
ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

ПАХАНЬЯН Давид Манукович

01336611 ф

# СОЕДИНЕНИЕ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ (ЧУГУН+СТАЛЬ) ДУГОВЫМИ ТОЧЕЧНЫМИ ШВАМИ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ТЕРМИЧЕСКИМ ЦИКЛОМ

Специальность 05.04.05 - "Технология и машины сварочного производства"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1336611
Паханьян Д.М. Соединение р

Москва 1979

Работа выполнена в Ростовском-на-Дону институте сельскохозяйственного машиностроения.

Научный руководитель – кандидат технических наук, профессор Н.М. БУДНИК

Официальные оппоненты – д.т.н. профессор ОЛЬШАНСКИЙ Н.А.
к т.н. профессор БЛИНОВ А.Н.

Ведущее предприятие – Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт технологии машиностроения

Защита состоится "____"_____ 1979 г. на заседании специализированного совета Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища имени Н.Э. Баумана по адресу: г.Москва, Б-5, 2-я Бауманская ул., дом 5.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке училища.

Автореферат разослан "____"_____ 1979 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
д.т.н., профессор СТЕКЛОВ О.И.

Типография МВТУ им. Баумана. № А-73476 Дата разрешения к печати 14. II 1979 г. Тираж 100 Объем 1 п.л. Заказ 310

МВТУ
им. Н.Э. Баумана
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Получение качественных сварных соединений разнородных металлов является традиционно сложной задачей, решению которой посвящено большое количество работ. Но несмотря на достигнутые успехи, свойства сварных швов, как правило, хуже свойств соединяемых металлов. Лучшие результаты удается получить применением сложной технологии и специальных сварочных материалов.

Между тем, в практике автомобильного, тракторного и сельскохозяйственного машиностроения получение качественных и экономичных соединений из разнородных металлов (чугуна и стали, разнородных сталей и др.) является актуальной проблемой.

В этой связи представляют практический интерес способы производства конструкций с применением сварки без образования зоны общей кристаллизации соединяемых металлов. В результате удается устранить известные недостатки сварных соединений, вызванные ограниченной взаимной растворимостью металлов с различными физико-химическими свойствами, и сохранить высокую производительность процесса сварки.

Цель работы. Целью настоящей работы явилась разработка способа соединения разнородных металлов дуговой точечной сваркой через отверстие в верхнем элементе без образования зоны общей кристаллизации соединяемых металлов и обеспечивающего требуемые эксплуатационные качества изделия и высокую производительность процесса.

Общая методика. Для достижения поставленной в работе цели использован комплексный метод, который включал в себя выбор аналитической модели, проведение расчетов и экспериментальные исследования с помощью статистических моделей, осциллографирования, скоростной киносъемки, металлографии, статических и динамических испытаний. Численная реализация результатов исследований осуществлялась с использованием ЭВМ "Наири-2 " и "Минск-32".

Научная новизна работы заключается в теоретическом обосновании и экспериментальном подтверждении возможности дуговой точечной сварки через отверстие без расплавления верхнего элемента, что позволяет получить качественное соединение разнородных металлов. В основу теоретического обоснования положена аналитическая модель процесса распространения тепла от кругового источ-

ника постоянной мощности, перемещающегося вдоль оси отверстия со скоростью его заплавления. Получено, что с повышением тепловой мощности дуги за счет сварочного тока температура в верхнем элементе уменьшается благодаря увеличению скорости заплавления.

Установлено, что диаметр зоны проплавления в нижнем элементе, определяющий прочность соединения, уменьшается при увеличении тока сварки благодаря экранирующему действию массы наплавленного металла, а энергетические характеристики источника тепла, удовлетворяющие требованию минимального тепловложения в верхний элемент, не гарантируют надежного проплавления нижнего элемента. Оптимальные свойства соединения обеспечиваются программированием термического цикла сварки.

На основе предложенной модели процесса разработана технология получения дугового точечного соединения без расплавления верхнего элемента.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в разработке способа соединения разнородных металлов дуговой точечной сваркой через отверстие в верхнем элементе без расплавления последнего; в обосновании технологической и экономической целесообразности соединения большой группы разнородных металлов с сохранением их эксплуатационных свойств.

Реализация работы в промышленности. В результате выполненного в работе комплекса исследований разработана технология соединения чугунных и стальных элементов кожуха моста ведущих колес комбайнов "Колос" и "Нива" с применением дуговой точечной сварки взамен механических креплений. Стендовые испытания опытных партий мостов, проведенные в ГСКБ по зерноуборочным комбайнам и самоходным шасси, подтвердили высокую надежность нового соединения.

На основе полученных в работе результатов спроектирована и изготовлена опытно-промышленная установка, которая внедрена для производства серий мостов. Внедрение в массовое производство новой технологии обеспечит экономический эффект применительно к условиям Таганрогского комбайнового завода в размере 43772 руб.

Апробация работы. Диссертационная работа и ее основные положения доложены на общемосковских научных семинарах сварщиков при МВТУ им.Н.Э.Баумана (1975 и 1978 г.г.), зональных научно-технических конференциях сварщиков Урала (г.Курган, 1975 г. и г.Свердловск, 1976 г.), научно-технической конференции молодых

ученых (г.Ростов-на-Дону, 1973 г.), научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава РИСХма (1973 - - 1978 г.г.).

Публикация. По теме опубликовано 6 печатных работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, двух приложений и списка литературы. Выполнена на 109 машинописных страницах, содержит 60 рисунков, 15 таблиц и 108 наименований литературных источников.

В главе I освещены состояние изучаемого вопроса, цель и задачи исследований. На основе анализа физических признаков проведена классификация известных технологических процессов соединения разнородных металлов, сведенных в две основные группы: с образованием и без образования атомно-молекулярных связей. В результате применения технологических способов (сварка плавлением, сварка давлением, пайка, склеивание), относящихся к первой группе, механические свойства сварного (клеянного) шва, как правило, уступают свойствам соединяемых металлов.

Проведенный анализ соединений разнородных металлов, в частности чугуна и стали, позволяет сделать вывод о том, что лучшее качество обеспечивают способы, где химическое взаимодействие металлов минимально или вообще отсутствует. К последним относятся технологические процессы с применением сварки без образования связей атомно-молекулярной природы между соединяемыми разнородными металлами. Подобное соединение, полученное с применением производительного процесса сварки в углекислом газе точечными швами по заранее подготовленному отверстию, рассмотрено в данной работе.

Процесс образования соединения (рис. I ) характеризуется заплавлением отверстия в верхнем элементе присадочным металлом, который в начальное время сварки образует зону сплавления с металлом нижнего элемента, обладающего лучшей свариваемостью. Заполнение полости присадочным металлом производится без расплавления верхнего элемента, благодаря чему устраняются вредные последствия, характерные для сварки разнородных металлов. Вместе с тем, применение этого способа позволяет сохранить основное преимущество сварки - ее высокую производительность.

Выбор материалов, а также основная направленность работы определились из необходимости разработки и внедрения прогрессивной технологии соединения чугунных и стальных корпусных элементов ко-

жуха моста ведущих колес комбайнов "Колос" и "Нива" взамен малопроизводительных и трудоемких механических креплений: резьбовых и заклепочных.

Кожух моста представляет собой стальную трубу с напрессованными на нее чугунными корпусами боковых редукторов и дифференциала. Материал трубы (нижний элемент соединения)—сталь 45, материал корпусов (верхний элемент)—ковкий чугун КЧ 45-6.

На основании анализа эксплуатационной схемы нагружения моста ведущих колес были сформулированы основные требования к точечному соединению без расплавления верхнего элемента, что определило основные направления исследований:

I) изучение влияния различных условий ведения процесса дуговой точечной сварки через отверстия в верхнем элементе на тепловой режим металла верхнего элемента;

2) выбор расчетной схемы для оценки распределения температуры в верхнем элементе соединения;

3) исследование особенности формирования зоны сплавления наплавленного металла с нижним элементом соединения;

4) определение оптимальных соотношений параметров режима сварки для обеспечения высокой прочности и надежности соединения некоторых пар металлов;

5) решение конструкторско-технологических вопросов по разработке технологии и оборудования для соединения разнородных металлов;

6) проведение промышленной апробации результатов работы.

В главе П рассмотрены вопросы получения точечного соединения без расплавления верхнего элемента. В общем случае процесс образования точечного соединения характеризуется двумя стадиями: развитием физического контакта между присадочным и основным металлом верхнего элемента (В Э) и осуществлением физико-химического взаимодействия.

Получение рассматриваемого в работе соединения предполагает исключение самой возможности физического контакта двух фаз путем установления необходимого энергетического баланса в системе дуга-ванна с одной стороны и основной металл ВЭ с другой. Необходимым условием достижения этого является устранение контакта электрически активного пятна дуги с поверхностью ВЭ ($D_{a.n} < D_{отв}$). Тогда достаточным условием будет такая ситуация, когда температура наиболее нагретых точек поверхности отверстия не достигает

температуры плавления металла ВЭ ($T_A < T_{пл.б.э}$) (рис. I). Однако соблюдением необходимого и достаточного условий не исчерпывается круг стоящих технологических задач: необходимо не только предотвратить плавление ВЭ как уязвимого с точки зрения сварки, но и обеспечить в нем благоприятный термический цикл.

Таким образом, при условии технологического обеспечения благоприятной энергетической обстановки кинетику образования соединения можно представить следующей схемой (рис. I): по мере перемещения фронта расплавленного металла вверх новые его порции

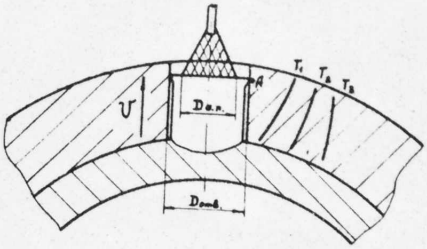



Рис. I. К анализу предполагаемого процесса образования соединения

входят в контакт с поверхностью ВЭ и охлаждаются, происходит их кристаллизация и естественный отход от охлаждающей поверхности. Следовательно, наиболее интенсивное тепловое воздействие на металл ВЭ оказывает поверхностный слой ванны, который, очевидно, можно рассматривать как подвижный круговой источник тепла.

Переходя к аналитическому решению задачи, принимаем следующие допущения: I) теплофизические свойства материала $\lambda$, $\gamma$, $a$ считаем независимыми от температуры; 2) поверхность ванны расплавленного электродного металла рассматриваем плоской, не учитывая силового воздействия дуги; 3) температура поверхности ванны одинакова во всех ее точках; 4) тепло дуги равномерно распределено по пятну нагрева, диаметр которого равен диаметру отверстия. Тогда выбранную схему можно сформулировать: источник тепла постоянной мощности $q$, равномерно распределенной по площади круга радиусом $r_0$, перемещается в бесконечном теле со скоростью $V$ в направлении $OZ$ (рис. 2). Ввиду того, что источник движется не по поверхности тела и распределение тепла, очевидно, носит преимущественно плоскорадиальный характер, счи-

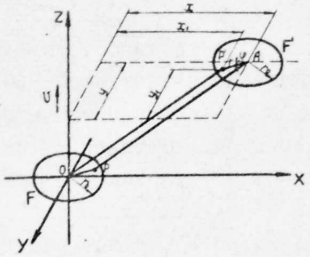



Рис. 2. Схема к расчету температуры в точке А от источника $q$, распределенного по площади круга $F$.

таем тело неограниченным в трех измерениях.

Предельное состояние процесса распространения тепла выражается уравнением:

$$T_{пр}(r_0, R, r, Z) = \frac{q e^{-\frac{\vartheta z}{2a}}}{4\pi^2 \lambda r_0^2} \int_0^{r_0} r dr \int_0^{2\pi} \frac{e^{-\frac{\vartheta}{2a}\sqrt{R^2+r^2+2r(x\cos\varphi - y\sin\varphi)}}}{\sqrt{R^2+r^2+2r(x\cos\varphi - y\sin\varphi)}} d\varphi, \quad (I)$$

где $Z$ и $R$ -аппликата и сферический радиус - вектор точки А - центра круга; $r_0$ - радиус круга источника, равный радиусу отверстия. Остальные обозначения общеприняты в теории теплопроводности или приведены на рис. 2.

Однако для того, чтобы применение аналитической модели (I) дало объективные результаты, необходимо иметь постоянную площадь источника тепла. Это возможно в том случае, когда известна область режимов сварки, где соблюдаются выдвинутые ранее необходимое и достаточное условия, т.е. диаметр поверхности ванны не превышает диаметра отверстия. Между тем, входящие в аналитическое выражение $q$ и $\vartheta$ не раскрывают действительного влияния основных технологических параметров процесса: $I_{св}$, $U_д$, $d_{эл}$, $D_{отв}$ на температуру и характер их взаимодействия.

Экспериментальные исследования, проведенные с привлечением методики математического планирования эксперимента, позволили в достаточно широкой области варьирования параметров режима сварки ($I_{св}$, $U_д$, $d_{эл}$, $D_{отв}$) установить их влияние на максимальную температуру характеристических точек в ВЭ. Фиксирование температуры осуществлялось по осциллограммам термических циклов, датчиками служили хромель-алюмелевые термопары, зачеканенные в ВЭ.

Анализ полученной статистической модели

$$T = 39{,}1 U_д + 26{,}45 D + 476 d_{эл} - 1{,}404 I_{св} - 1014{,}6 \quad (2)$$

с экстраполяцией по току сварки и напряжению дуги и параллельный комплекс макро- и микроструктурных исследований дали возможность определить оптимальную область режимов ($I_{св}$ = 200-250А; $U_д$ = = I8-24В; $d_{эл}$ = I,2 мм; $D_{отв}$ = I2-I8 мм), применение которых позволяет избежать плавление верхнего чугунного элемента.

Специальная методика с применением скоростной киносъемки позволила визуально изучить процесс формирования точечного соединения, протекающий без расплавления ВЭ и подтвердить выдвинутую ранее гипотетическую схему (рис. I).

При сварке в пределах оптимальной области режимов чугунный ВЭ по толщине нагревается неравномерно, а изменение температуры в любой точке происходит в стадии теплонасыщения и последующего выравнивания, т.е. квазистационарное состояние не устанавливается. Менее нагреты нижние слои, что вызвано значительным расходом тепла дуги в начальной стадии процесса на образование зоны сплавления в основании точечного шва и на нагрев нижнего элемента. Температура точек среднего и верхнего слоев к моменту окончания сварки практически одинакова. Применение в качестве материала ВЭ металлов с высокой теплопроводностью, в частности алюминия АДI, характеризуется более равномерным распределением температуры по толщине и снижением ее максимальных значений.

Для рассматриваемого процесса сварки характерно горение дуги в отверстии толстого верхнего элемента, поэтому в отличие от сварки точечными швами с проплавлением верхнего листа, в данном случае следует ожидать уменьшения потерь тепла на разбрызгивание и излучение. Последнее подтверждено исследованиями, проведенными с применением методики калориметрирования с целью определения тепловой эффективности процесса. Расчетным можно считать значение эффективного к.п.д., равное 0,95. С изменением тока сварки от I70 до 300А эффективный к.п.д.практически остается постоянным, а с ростом напряжения от 20 до 28В незначительно уменьшается в пределах от 0,96 до 0,94, что объясняется некоторым увеличением потерь тепла при большей длине дуги.

Знание области режимов сварки, где соблюдаются необходимое и достаточное условия, характера энергетического взаимодействия наплавленного и основного металлов, а также тепловой эффективности процесса сварки позволяет перейти к выбору технологических параметров, обеспечивающих наиболее благоприятную тепловую обстановку в ВЭ с помощью аналитической модели (I).

Расчет термических циклов производится с использованием коэффициента теплонасыщения $\Psi$ для точечного источника тепла. Возможность применения этого коэффициента для случая распределенного источника тепла подтверждается известным принципом местного влияния. Таким образом, температура в стадии теплонасыщения определяется по формуле:

$$T_н(t) = \Psi(\beta, \tau)\, T_{пр} , \qquad (3)$$

где $T_{пр}$ – температура предельного состояния, полученная в результате решения уравнения (I).

Температура $T_в(t)$ в процессе выравнивания находится с использованием фиктивного источника и стока теплоты:

$$T_в(t) = T_{пр}[\Psi(t) - \Psi(t_ф)] . \qquad (4)$$

Для расчетного представления термического цикла точки необходимо знать значение максимальной температуры $T_m$ и время ее достижения $t_m$, что связано с определением производной функции температуры $T_{пр}$ по расстоянию $Z$. Такое аналитическое определение $T_m$ в рассматриваемом случае сопряжено с трудностями.

В результате обработки осциллограмм термических циклов получены эмпирические зависимости:

$$t_m = t_{св} + 0{,}57(r - r_0) \qquad (5)$$

и

$$t_m - t_{св} + 0{,}12\,(r - r_0) \qquad (6)$$

для ковкого чугуна и алюминия АДI соответственно, которые позволяют с достаточной точностью определить время достижения максимальной температуры в точках ВЭ.

Зависимость (5) может быть рекомендована для приближенных расчетов теплового состояния различных марок чугуна и стали, учитывая незначительную разницу их коэффициентов теплопроводности при температуре выше 600°С.

Сравнение расчетных и экспериментальных кривых показывает, что рассмотренная методика тепловых расчетов с достаточной надежностью может применяться для оценки температурного поля в чугунах и сталях. Наиболее достоверные результаты получаются при сварке токами 200 – 250А.

Однако в металлах с высокой теплопроводностью, в частности

в алюминии и алюминиевых сплавах, схема подвижного источника с пространственным распространением тепла не отражает реальной картины. Здесь необходимо учитывать отражение тепловой волны от граничных поверхностей ВЭ. Наиболее достоверные результаты в этом случае дает применение схемы неподвижного линейного источника тепла постоянной мощности, совмещенного с осью отверстия и непрерывно действующего в пластине. Температура в ВЭ определяется из известного уравнения:

$$T(r;t) = -\frac{q}{4\lambda\pi\delta} E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right), \qquad (7)$$

где $E_i$ – интегральная показательная функция.

Однако область режимов сварки, оптимальная с точки зрения минимального тепловложения в ВЭ, не обеспечивает качественного сплавления в корне шва и следовательно, достаточной прочности соединения. Вместе с тем, в настоящее время нет данных относительно условий формирования зоны сплавления точечных швов при сварке толстых элементов через отверстия больших диаметров: от 12 до 18 мм.

В главе Ш рассмотрено влияние параметров режима сварки на формирование зоны сплавления в корне точечного шва. Применение методики планирования эксперимента, где факторы $I_{св}$, $U_д$, $D_{отв}$, $d_{эл}$, а параметр оптимизации – диаметр зоны сплавления, дало возможность выявить влияние технологических факторов на рассматриваемый параметр:

$$D = 0{,}275\,U_д - 0{,}0124\,I_{св} + D_{отв} - 6{,}3\,. \qquad (8)$$

Статистически незначим вклад диаметра электродной проволоки.

В отличие от известных данных в рассматриваемом соединении диаметр сплавления электродного металла с нижним элементом уменьшается с ростом тока сварки, что, как оказалось, связано с увеличением количества наплавленного металла, который охлаждаясь по периферии отверстия, оказывает защитное влияние на проплавление нижнего элемента. Этот факт подтвердился изучением кадров скоростной киносъемки процесса формирования точечного шва.

В результате движения по градиенту поверхности отклика уравнения регрессии (8) определены соотношения факторов ( $I_{св}$ =

= I50–I80А; $U_д$ = 32–34В), оптимальность которых подтверждена механическими испытаниями и металлографическими исследованиями зоны термического влияния в нижнем элементе. Последнее особенно важно, когда применяются стали, склонные к закалке.

Однако, что касается ВЭ, то применение этих режимов сопровождается его активным расплавлением. Значения тепловой мощности здесь находятся в пределах II00–I400 кал/с, а скорость заплавления равна 0,055–0,08 см/с. Между тем анализ выражения (I) дает основание утверждать, что минимально допустимые значения скорости, соответствующие данному уровню тепломощности дуги, должны составлять 0,I4 – 0,I5 см/с. Только при этих условиях можно избежать расплавления металла ВЭ.

Проведенные исследования термического цикла верхнего элемента соединения и формирования зоны сплавления в корне шва позволили получить две группы оптимальных режимов. Однако однозначное применение одной из них не дает комплексного решения вопроса качества точечного соединения. В связи с этим возникает необходимость ведения процесса сварки на двухступенчатом режиме. Первая ступень должна обеспечить надежный провар в корне шва, вторая – минимальное тепловложение в верхний элемент. Переход от первой ступени ко второй должен осуществляться в автоматическом режиме без гашения дуги.

Теплота, сообщаемая изделию во время сварки на первой ступени ($t_{св}$ = I,5–2с), практически полностью поглощается нижним элементом, поэтому процесс распространения тепла в ВЭ соединения с достаточной точностью описывается рассмотренной ранее моделью (I), где исходными величинами являются параметры второй ступени режима сварки, а отсчет времени ведется от начала горения дуги в режиме второй ступени.

Особенностью рассматриваемого соединения является то, что процесс его формирования характеризуется усадкой наплавленного металла. Однако благодаря шероховатости поверхности застывшего металла, его неравномерной усадке и налипанию брызг существуют участки контакта ВЭ и наплавленного металла. Полное смятие их и образование зазора происходит при нагружении, соответствующем 25–40% от разрушающей нагрузки на срез, при этом среднестатистическая величина перемещения деталей составляет 0,0549 мм. Однако, как показали результаты динамических испытаний, наличие зазора такого порядка не оказывает влияния на работоспособ-

ность конструкций.

Проведенные в работе исследования посвящены сварке точечными швами по цилиндрическим отверстиям. Подобная подготовка отверстий оправдана в тех случаях, когда конструктивное исполнение соединяемых деталей устраняет возможность их взаимного перемещения в направлении нормальном сопрягаемым поверхностям (например, соединение типа "труба в трубе"). Однако, когда такое перемещение не исключено (плоские детали), требуется специальная подготовка отверстий. Они могут быть либо коническими, либо цилиндрическими с зенковкой.

Данные о влиянии диаметра отверстий на термический цикл ВЭ позволяют сделать вывод о возможности сварки в конусное отверстие, диаметр которого изменяется в пределах от 12 до 18 мм. При этом температура точек, одинаково удаленных от поверхности отверстия, но расположенных на различных уровнях, изменяется незначительно.

Здесь полезно используется линейная усадка наплавленного металла в осевом направлении. Благодаря ей и специальной подготовке отверстий соединяемые элементы плотно фиксируются. Данные испытаний говорят в пользу применения разработанной технологии для соединения не только трубных, но и плоских элементов.

В главе IУ рассмотрены вопросы, связанные с разработкой технологии и оборудования для соединения точечными швами чугунных и стальных деталей кожуха моста комбайна. Исследована динамическая прочность изделия, приведены результаты лабораторных и стендовых испытаний на усталость. Здесь же описана конструкция разработанной и внедренной автоматической установки и принципиальная схема ее работы.

В зависимости от режима сварки зона основного металла, прилегающая к поверхности отверстия, может изменять исходную структуру и свойства. Лабораторные испытания, проведенные по методике ускоренных испытаний на усталость, показали, что не только расплавление чугунной детали, но и наличие структурной неоднородности в ней приводит к снижению прочности соединения в условиях циклического нагружения.

Сравнительные стендовые испытания натурных образцов показали, что работоспособность изделий, выполненных с применением сварки, выше, чем изделий, выполненных с применением механических креплений.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

I. Разработан способ получения качественного соединения разнородных металлов дуговой точечной сваркой через отверстие в верхнем элементе.

2. Процесс распространения тепла в верхнем чугунном элементе соединения удовлетворительно описывается расчетной аналитической моделью кругового источника тепла постоянной мощности, равномерно перемещающегося вдоль оси отверстия со скоростью, равной скорости заплавления, которая показывает, что с повышением тепловой мощности дуги за счет сварочного тока температура нагрева поверхности отверстия в верхнем элементе уменьшается благодаря увеличению скорости его заплавления, что исключает возможность расплавления верхнего элемента и обеспечивает получение качественного соединения разнородных металлов типа чугун+сталь.

3. Температура точек, равноудаленных от оси отверстия, но расположенных на разных уровнях по толщине верхнего элемента неодинакова к моменту окончания сварки. Менее нагреты точки нижнего слоя ( $\approx 0{,}3\delta$ ). Температура точек среднего и верхнего слоев практически одинакова.

4. Применение режимов сварки ( $I_{св}$ =200-250А; $U_д \leq$ 24В, $d_{эл}$ = = I,2 мм) позволяет производить заплавление отверстий диаметром I2-I8 мм не только без расплавления металла верхнего элемента, но обеспечивает сохранение его исходной структуры вблизи зоны сварки. Увеличение напряжения дуги на 2-4В относительно оптимальных значений (до 26-28В) вызывает расплавление верхнего элемента на глубину до I,5-2мм, что неприемлемо для соединяемой пары металлов: чугун + сталь. Увеличение напряжения может быть рекомендовано для соединения металлов, характеризующихся удовлетворительной взаимной свариваемостью, например, низкоуглеродистых сталей со среднеуглеродистыми, низко- и среднелегированными. В этом случае обеспечивается минимальная доля участия металла верхнего элемента в образовании сварного (точечного) шва.

5. Тепловые потери с граничной поверхности чугунного верхнего элемента толщиной $\delta$ = I0 ÷ I4 мм в процессе заплавления отверстия со скоростью $v \geq$ 0,09 см/с минимальны и не оказывают заметного влияния на процесс распространения тепла в периоде теплонасыщения и в начальной стадии выравнивания температуры.

6. При дуговой точечной сварке через отверстие диаметр зоны проплавления нижнего элемента, определяющий прочность соединения, уменьшается с ростом тока сварки, что объясняется увеличением про-

изводительности расплавления электродного металла и его экранирующим влиянием на проплавление нижнего элемента. Режимы сварки, оптимальные с точки зрения минимального тепловложения в верхний элемент (вывод 4), не обеспечивают надежного проплавления в корне точечного шва. Наибольший диаметр проплавления обеспечивается при сварочном токе $I_{св}$ = 150-180А и напряжении дуги $U_д$ =32-34В.

7. Качественное точечное соединение разнородных металлов обеспечивается сваркой на двухступенчатом режиме: первая ступень гарантирует максимальный диаметр зоны сплавления в корне шва (вывод 6), вторая - минимальное тепловое вложение в верхний элемент при заплавлении отверстия (вывод 4). Выбор параметров второй ступени режима сварки должен определяться требованиями, предъявляемыми к соединению (без расплавления или с минимальным расплавлением верхнего элемента), и взаимной свариваемостью металлов.

8. Для материалов с высокой теплопроводностью, в 1,5 -2 раза выше, чем у чугуна, сказывается ограниченность размеров верхнего элемента, его толщины. В подобных случаях, в частности для алюминия АДI, оправдано применение расчетной схемы неподвижного линейного источника тепла постоянной мощности, совмещенного с осью отверстия. Однако и в этом случае расплавление верхнего элемента исключается с повышением тепловой мощности дуги при увеличении сварочного тока за счет уменьшения времени действия источника тепла.

9. Теплота, сообщаемая изделию за время сварки на первой ступени режима ($t_{св}$ = 1,5-3с), практически полностью поглощается нижним элементом, поэтому процесс распространения тепла в верхнем элементе соединения с достаточной надежностью описывается рассмотренными расчетными схемами (выводы 2,8), где исходными величинами являются параметры второй ступени режима сварки, а отсчет времени ведется от начала горения дуги в режиме второй ступени. Погрешность при расчете термических циклов точек верхнего элемента, вызванная применением сложного режима, не превышает 6-8%.

10. Установлено, что эффективный к.п.д. ( $\eta_u$ ) процесса сварки точечными швами по отверстиям выше, чем при сварке точечными швами с проплавлением верхнего элемента и достигает 0,96-0,97. Рост напряжения дуги от 20В до 28В вызывает уменьшение $\eta_u$ от 0,96-0,97 до 0,93-0,94. При увеличении тока сварки от 160А до

290А величина $\eta_u$ практически не изменяется.

Результаты работы прошли стадию промышленных испытаний и внедрены в производство серий мостов ведущих колес комбайнов "Колос" и "Нива". Замена механических креплений в производстве мостов на точечное соединение без расплавления чугунных деталей ведет к снижению трудоемкости, дополнительных затрат и повышению долговечности конструкции на 20%. Экономический эффект от внедрения новой технологии - 45000 руб.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Особенности формирования корня шва при сварке электрозаклепками через отверстие в толстом верхнем элементе. "Сварочное производство", 1975, № 1 (соавторы Доброквашин Л.А., Заколов Г.И., Садчиков А.Д.).

2. Способ соединения разнородных металлов (чугун+сталь) посредством сварки пробочными швами. В сб."Вопросы конструирования и технологии производства сельскохозяйственных машин", Ростов-на-Дону, 1974 (соавтор Доброквашин Л.А.).

3. Усталостная прочность ковкого чугуна при соединении его со сталью наплавленными штырями. В сб.зональной научно-технической конференции сварщиков Урала. Курган, 1975 (соавторы Будник Н.М.,Иваненко В.М., Доброквашин Л.А., Заколов Г.И.).

4. Соединение деталей из стали и чугуна постановкой электрозаклепок в отверстия чугунного элемента. В сб.статей "Электродуговая сварка и наплавка", Ростов-на-Дону, 1975 (соавторы Доброквашин Л.А., Заколов Г.И.).

5. Применение сварки в производстве мостов ведущих колес комбайнов "Нива" и "Колос". В сб."Вопросы механизации и автоматизации сварочного производства". Тула, 1976 (соавторы доброквашин Л.А., Садчиков А.Д., Филин Н.И., Рощин В.А.).

6. Исследование температурного поля при сварке электрозаклепками без образования зоны общей кристаллизации соединяемых металлов. В сб.зональной научно-технической конференции сварщиков Урала. Свердловск, 1976 (соавторы Будник Н.М., Доброквашин Л.А.,Заколов Г.И.).