

484495

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ СССР
МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ
УЧИЛИЩЕ имени Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

ЕАШЕВ Леонид Федорович

УДК 621.791.793

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ С ПРИСАДКОЙ
КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ
ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

05.03.06 - 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 - 1989

Работа выполнялась в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
ЯКУШИН Б.Ф.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
ХАКИМОВ А.Н.
кандидат технических наук, с.н.с.
РОЩИН М.Б.

Ведущее предприятие - Пензхиммаш

Защита диссертации состоится "11" мар 1989 г. на заседании специализированного Совета К 053.15.03 Московского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища имени Н.Э.Баумана по адресу: 107005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные
Г. _____ россу.

Бiblioteке МВТУ имени

1989 г.

В.И.Гирш

Ш 484795

кз.

Н.Э.Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Конструкции из металла большой толщины наиболее рационально изготавливать с использованием электрошлаковой сварки. Однако низкая ударная вязкость сварного соединения вследствие большого тепловложения и перегрева изделия, характерного для электрошлакового процесса, необходимость последующей термообработки - нормализации, снижает экономическую эффективность этого способа сварки. Сокращению тепловложения в свариваемое изделие способствует увеличение скорости сварки, что в условиях электрошлакового процесса неприемлемо, так как приводит к образованию горячих трещин в металле шва. В связи с этим актуально совершенствование технологии электрошлаковой сварки, обеспечивающее снижение склонности сварного соединения к образованию горячих трещин наряду с ограничением тепловложения в свариваемое изделие и повышением его механических свойств.

Цель работы. Повышение сопротивляемости металла шва образованию горячих трещин при электрошлаковой сварке и улучшение механических свойств сварных соединений низколегированных конструкционных сталей толщиной 40-150 мм.

Методы исследования. Анализ структуры и технологической прочности электрошлаковых швов выполнены расчетным и экспериментальными методами. Разработаны методики расчета скорости введения присадки в сварочную ванну и ширины зоны равноосной структуры, достоверность которых подтверждена экспериментально. Для оценки сопротивляемости сварного соединения образованию горячих трещин в условиях электрошлаковой сварки разработана новая методика, позволяющая исследовать металл шва на стойкость против образования горячих трещин; методика защищена авторским свидетельством. Форма сварочной ванны, макро- и микроструктура металла сварных соединений исследовалась металлографическими методами. Оценка склонности к хрупкому разрушению осуществлялась при ударном изгибе, а эксплуатационная прочность сварного соединения - при циклическом нагружении образцов с усталостной трещиной. Термические циклы электрошлаковой сварки с присадочной проволокой рассчитаны с помощью ЭВМ.

Научная новизна. 1. Установлено, что в условиях электрошлаковой сварки подача проволоочной присадки в центральную область



металлической ванны в количестве более 30 % к весу электродной проволоки вызывает локальное переохлаждение жидкой фазы, прилегающей к фронту затвердевания, снижает глубину сварочной ванны и приводит к образованию мелких равноосных кристаллитов, объем зоны которых прямо пропорционален количеству присадки.

2. Показано, что технологическая прочность металла шва, полученного при электрошлаковой сварке стали 09Г2С с присадочной и электродной проволоками Св.08ГА, зависит от размеров зоны равноосных кристаллитов и возрастает в 1,5-2,0 раза по сравнению со сваркой без присадки при ширине этой зоны 5-10 мм в поперечном сечении соединения.

3. На основании выявленной пропорциональной зависимости глубины сварочной ванны и ширины зоны равноосной структуры от электрического сопротивления, замеренного на вилете присадочной проволоки $H, \text{г.} \cdot f(R)$, разработан способ управления технологической прочностью металла шва в процессе сварки.

Практическая ценность работы. Разработан новый способ и технология электрошлаковой сварки с подачей присадочной проволоки, позволяющие увеличить технологическую прочность сварных швов и повысить ударную вязкость сварных соединений до приемочных значений без их нормализации. Способ защищен авторским свидетельством. Разработаны и внедрены рекомендации по использованию новой технологии электрошлаковой сварки с присадочной проволокой. В результате внедрения подтверждена эффективность новой технологии, состоящая из увеличения коэффициента наплавки одновременно с повышением механических свойств, что позволило заменить послесварочную нормализацию тяжелых сварных конструкций высоким отпускком.

Апробация. Результаты проведенных исследований докладывались на III Всесоюзной конференции молодых исследователей и конструкторов химического машиностроения (г.Краснодар, октябрь 1981 г.) и на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им.Н.Э.Баумана (1982 г.). Технология электрошлаковой сварки с проволоочной присадкой прошла промышленное опробование и внедрена на заводах "Пензхиммаш", г.Пенза и "Волгоцеммаш" г.Тольятти с экономическим эффектом 53 тыс. рублей.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и приложения. Выполнена на 173 машинописных листах, содержит 80 рисунков, 16 таблиц, 116 найменованных литературных источников.

Глава I посвящена анализу способов повышения технологической прочности и механических свойств металла шва и зоны термического влияния. В главе I рассмотрены преимущества и недостатки известных способов воздействия на механические свойства сварного соединения при электрошлаковой сварке и технологическую прочность металла шва. Анализ теплофизических условий кристаллизации, термических циклов и структуры сварных соединений, проведенный в работах М.Х.Шоршорова, А.Н.Хакимова, Дж.Кристиана, Р.Кана, выявил отдельные факторы, направленные на улучшение механических свойств зоны термического влияния и технологической прочности металла шва. Рост механических свойств сварного соединения наблюдается при увеличении скорости сварки, но при этом снижается стойкость металла шва к образованию горячих трещин. Проблема обеспечения технологической прочности наплавленного металла рассмотрена в работах Н.Н.Прохорова, Б.А.Мовчана, Б.И.Медовара, И.Гривняка, Х.Кохары и является актуальной при электрошлаковой сварке легированных сталей и сплавов. Известные способы ограничения тепловложения в свариваемое изделие: дозирование тепловой мощности, зональное регулирование термических циклов, введение расплавленных в шлаковой ванне гранулированных присадок - не решают проблем повышения технологической прочности, так как не вносят принципиальных изменений в структуру сварного шва. Существующие способы увеличения технологической прочности: введение ультразвуковых колебаний, электромагнитное перемешивание сварочной ванны - не снижают тепловложение в свариваемое изделие и не обеспечивают требуемых механических свойств. Таким образом, перечисленные способы совершенствования технологии электрошлаковой сварки решают отдельно либо задачу ограничения тепловложения, либо задачу повышения технологической прочности, что недостаточно для сварки сталей.

В настоящей работе выдвинуто и подвергнуто проверке предположение, что комплексное воздействие на структуру сварного шва и его технологическую прочность, а также на ограничение тепловложения в свариваемое изделие при электрошлаковой сварке может оказать подача проволоочной присадки в сварочную ванну. Факторами для эффективного плавления проволоочной присадки в объеме сварочной ванны служили большой перегрев жидкого металла, ведущий к излишнему тепловложению в свариваемое изделие, и интенсивное перемешивание металлической ванны, обеспечивающее ее массоперенос. Прово-

лочная присадка должна подаваться со скоростью большей, чем скорость ее плавления в шлаковой ванне и в твердом состоянии поступать на дно металлической ванны, где она создаст локальный сток тепла у межфазной поверхности и обеспечит условия для зарождения равноосных кристаллитов. В результате этого столбчатая дендритная структура металла шва с характерной зоной слабину, образуемой при срастании кристаллитов, будет заменена мелкозернистой равноосной, что повысит технологическую прочность наплавленного металла. Кроме того, при введении дополнительного металла присадки будет достигнут рост коэффициента наплавки, приводящий к естественному увеличению скорости сварки и соответствующему ограничению тепловложения в изделие, что улучшит механические свойства зоны термического влияния сварного соединения. Также возможно и преднамеренное увеличение скорости сварки за счет возрастания технологической прочности наплавленного металла; наличие проволоочной присадки, достигающей дна ванны, позволит использовать ее и в качестве датчика для активного контроля глубины металлической ванны, определяющей структуру металла шва и его структурочувствительные свойства при неизбежных технологических возмущениях.

Для проверки выдвинутых предположений были сформулированы следующие задачи исследования:

1. Оптимизация режимов подачи проволоочной присадки в сварочную ванну по стабильности электрошлакового процесса и его производительности.

2. Оценка эффективности влияния проволоочной присадки на первичную структуру металла шва.

3. Выявление факторов, обуславливающих повышение технологической прочности металла шва при сварке с проволоочной присадкой.

4. Исследование работоспособности схемы управления глубиной металлической ванны, структурой шва и его технологической прочностью при использовании присадки в качестве датчика активного контроля.

5. Анализ механических свойств сварного соединения, выполненного с применением проволоочной присадки.

Глава 2 посвящена разработке способа и технологии электрошлаковой сварки с проволоочной присадкой. Анализ существующих схем подачи проволоочной присадки в сварочную ванну, предложем-

ных Ф.Ф.Бенуа, А.И.Катлер, А.М.Макарой, Б.И.Мовчаном, В.И.Авраменко, Б.Н.Кушниренко, выявил их недостатки, главными из которых являются увеличение сварочного зазора и неравномерность проплавления свариваемых кромок из-за охлаждающего действия проволоочной присадки. С целью устранения этих недостатков предложена схема подачи проволоочной присадки, изображенная на рис.1, которая обеспечивает симметричное охлаждение металлической ванны и равномерное проплавление свариваемых кромок без увеличения сварочного зазора. Проволоочная присадка 2 подается изолированно от электродной проволоки 1 через шлаковую ванну 3 на дно металлической ванны 4 под небольшим углом к электродной проволоке. Такая схема подачи проволоочной присадки отвечает сформулированному выше требованию создания локального стока тепла на межфазной поверхности.

Проведенные эксперименты по оптимизации процесса электрошлаковой сварки с проволоочной присадкой выявили область режимов, обеспечивающих стабильность электрошлакового процесса при максимальном коэффициенте наплавки. Установлено, что наилучшим углом наклона проволоочной присадки к электродной проволоке следует считать $5-15^{\circ}$, при этом проволоочная присадка направляется в центр сварочной ванны — область, находящуюся под электродом. На стабильность электрошлакового процесса и коэффициент наплавки большое влияние оказывает расстояние между электродной и присадочной проволоками, фиксируемое на уровне металлической ванны. С увеличением этого расстояния снижается коэффициент наплавки, а уменьшение расстояния до касания проволок приводит к разбрызгиванию шлаковой ванны и нарушению стабильности электрошлакового процесса. На основе ряда экспериментов выявлено, что обоим условиям удовлетворяет расстояние между проволоками 5-7 мм.

Оптимизация диаметра проволоочной присадки осуществлялась по максимальному коэффициенту наплавки. С увеличением диаметра проволоочной присадки возрастает ее массовая скорость плавления в сварочной ванне, но ухудшаются условия подачи к месту сварки, вызванные жесткостью проволоки. С технологической точки зрения наилучшим диаметром присадочной проволоки является диаметр 3-3,5 мм.

Для определения отношения между скоростями подачи электродной и присадочной проволоки произведен аналитический расчет ре-

жимов подачи проволочной присадки. Он основан на сохранении теплового баланса при использовании теплоты перегрева металлической ванны Q_n для плавления присадки:

$$Q_n = Q_m \quad (1)$$

где $Q_n = V_n \gamma_n \{C_n(T_n - T_m) + q_n\}$ (2) - теплота, необходимая для расплавления проволочной присадки, подогретой теплом шлаковой ванны; $Q_m = V_m \gamma_m C_m (T_m - T_k)$ (3) - теплота перегрева металлической ванны, расходуемая на расплавление присадки.

При расчете были приняты следующие допущения:

1. Температура шлаковой ванны постоянна во всем ее объеме.
2. Температура металлической ванны постоянна во всем ее объеме.
3. Глубина шлаковой ванны во время сварки постоянна.

Приняв перечисленные допущения и подставив значения:

$$V_m = \frac{\pi d_3^2 V_3 t}{4} + (b_w - b_3) \delta v_c t; \quad V_n = \frac{\pi d_n^2}{4} v_n t; \quad v_c = \frac{\pi (d_3^2 V_3 + d_n^2 V_n)}{4 b_3 \delta}$$

в уравнения 2, 3 из уравнения I определим величину скорости подачи присадочной проволоки V_n :

$$V_n = \frac{b_w d_3^2 V_3 \gamma_m C_m (T_m - T_k)}{d_n^2 \{b_3 \gamma_n [C_n (T_n - T_m) + q_n] - (b_w - b_3) \gamma_m C_m (T_m - T_k)\}} \quad (4)$$

где γ_n , γ_m - удельный вес присадочной проволоки и жидкого металла ванны; T_n , T_m - температура плавления и подогрева присадочной проволоки; T_m , T_k - температура расплава металлической ванны и его кристаллизации; d_3 , d_n - диаметры электродной и присадочной проволок; V_n , V_3 , v_c - скорость подачи присадочной, электродной проволок и сварки соответственно; b_w - ширина сварного шва; b_3 - величина зазора между свариваемыми кромками; δ - толщина свариваемого металла.

Анализируя уравнение 4, можно заметить, что скорость подачи присадочной проволоки, при которой происходит ее плавление в металлической ванне, регламентируется скоростью подачи электродной проволоки, диаметрами проволок, а также шириной шва, которая при прочих равных условиях (одинаковая глубина шлаковой ванны, зазор между кромками и скорость сварки), определяется напряжением сварки.

В зависимости от скорости подачи присадочной проволоки и ее химического состава выявлены следующие механизмы ее плавления в сварочной ванне:

1. Присадка плавится в шлаковой ванне и в виде капель поступает в металлическую ванну.
2. Присадка пронизывает шлаковую ванну и полностью переплавляется в металлической ванне.
3. Присадка достигает дна металлической ванны в твердо-жидком состоянии и под действием усилия подачи разламывается на куски, которые вплавляются в металл шва.
4. Присадка упирается в дно металлической ванны и укладывается в ее объеме спиралеобразно без полного расплавления.

Стабильному протеканию электрошлакового процесса соответствует скорость подачи присадки, которая обеспечивает ее плавление по первым трем вариантам; количество присадочной проволоки в этом случае не превышает 50-70 % к весу электродной проволоки. С целью повышения процентного соотношения присадочной проволоки опробован электроконтактный подогрев присадки вплоть до температуры солидуса от отдельного источника тока. Относительное количество присадки при этом увеличивается до 100 %, а тепло подогрева составляет 10-20 % от тепловой мощности электрошлакового процесса.

Глава 3 посвящена анализу влияния присадочной проволоки на технологическую прочность металла шва, его первичную структуру и форму металлической ванны. Оценке влияния присадочной проволоки на оспротивляемость металла шва образованию горячих трещин предшествовала разработка методики исследования, пригодной для условий электрошлаковой сварки. Принципиальное отличие предлагаемой методики состоит в изменении схемы нагружения испытуемого образца - усилие растяжения P приложено в точке C , то есть ниже уровня металлической ванны, а закрепление подвижной пластины образца I производится в точке O (рис.2). Предложенная схема приложения растягивающих усилий и закрепления пластин образца обеспечивает градиент темпа деформации по длине шва и имеет преимущество перед известными способами исследований в том, что для снижения трудоемкости эксперимента, особо значимой для электрошлаковой сварки, определение количественного показателя технологической прочности сварного соединения производится

на одном образце. Скорость деформирования в нижней точке образца должна быть выше критической, что приведет к образованию горячей трещины 2 в металле шва. В связи с уменьшением скорости деформирования по высоте в процессе сварки возникает момент, когда темп деформирования станет равным критическому и меньше его, что остановит распространение трещины по шву. Прекращение распространения горячей трещины приведет к пластической деформации шва у вершины трещины, подостуживанию и возрастанию прочности металла шва, а дальнейшее деформирование образца вызывает упруго-пластический изгиб подвижной пластины на уровне точки А - места остановки горячей трещины. Замеряя расстояние от оси вращения подвижной пластины до конца распространения горячей трещины в металле шва, рассчитывается критическая скорость:

$$V_{кр} = \frac{V_n \ell_1}{\ell_0} \quad (5)$$

где: $V_{кр}$, V_n - критическая и начальная скорость растяжения металла шва; ℓ_0 - расстояние до места приложения растягивающего усилия; ℓ_1 - расстояние от оси вращения до места прекращения горячих трещин в металле шва.

Применение предложенной методики позволяет провести комплексное исследование на одном образце стойкости металла шва против образования горячих трещин, в результате этого сокращается время исследований и его трудоемкость.

Оценка сопротивляемости металла образованию горячих трещин производилась по описанной выше методике, в качестве показателя технологической прочности использован критический темп деформации $\beta_{кр} = V_{кр} / W_{тх}$. Скорость охлаждения металла шва в температурном интервале хрупкости $W_{тх}$ определялась непосредственно при растяжении образца записью термических циклов. Обнаружен рост сопротивляемости образованию горячим трещинам при увеличении количества проволоочной присадки, идентичной по составу с электродом (рис.3). Для объяснения причин возрастания технологической прочности металла шва было произведено исследование влияния присадочной проволоки на структуру сварного шва, выполненное по ГОСТ 10243-75. Анализ макроструктуры выявил общий характер ее изменения под действием проволоочной присадки. При малых количествах присадки в шве сохраняется отлобчатое дендритное строение, а критический темп деформации изме-

яется мало. Появление равноосных дендритов наблюдается при скорости подачи присадки более 0,04 м/с (диаметр присадки 3 мм), что соответствует заметному росту технологической прочности металла шва. Дальнейшее увеличение количества проволоочной присадки приводит лишь к расширению зоны равноосной структуры.

Образование равноосной структуры свидетельствует об изменении тепловой обстановки на фронте затвердевания, что наиболее полно отражается на очертании металлической ванны. Она обычно характеризуется известным коэффициентом формы (отношением ширины к глубине). Для оценки влияния проволоочной присадки на глубину и форму металлической ванны было произведено исследование, выполненное методом серных отпечатков путем введения в сварочную ванну сернистого железа. Подача проволоочной присадки в количестве 40-50 % к весу электродной проволоки приводит к уменьшению глубины металлической ванны в 1,7-2,0 раза по сравнению со сваркой без присадки. Важно отметить качественное изменение очертаний металлической ванны - на ее дне образуется выступ, вызванный ускорением кристаллизации при поступлении проволоочной присадки; ширина выступа пропорциональна размеру зоны равноосной структуры.

Расчет ширины зоны равноосной структуры произведен при использовании формул для расчета внутренних холодильников, которые были применены для отливки деталей в металлические формы в работе Скворцова А.А.

$$r = \sqrt{\frac{4 d_n^2 V_n [C_n (T_n - T_m) + q_n] b_s \delta}{\pi (d_s^2 V_s + d_n^2 V_n) \gamma_m [C_m (T_m - T_k) + q_k]}} \quad (6)$$

Анализируя уравнение 6, можно заметить, что ширина зоны равноосной структуры в первую очередь зависит от режима подачи присадочной и электродной проволоки; другим существенным фактором является температура подогрева проволоочной присадки тепловой шлаковой и металлической ванны или независимым источником тепла. Задавая режимы подачи проволоочной присадки и ее температуру, можно прогнозировать в сварных швах необходимую ширину зоны равноосной структуры. Однако этот процесс подвержен многим технологическим возмущениям, особенно в начале и конце шва, где зазор имеет переменную величину.

Наличие в процессе проволоочной присадки, погруженной в ме-

таллическую ванну, позволяет использовать ее в качестве датчика активного контроля глубины металлической ванны и ширины зоны равноосной структуры. Схема контроля приведена на рис.1, принцип ее работы состоит в следующем: скорость подачи присадочной проволоки 1 определяется скоростью ее плавления в металлической ванне 4. На вылете присадочной проволоки блоком 5 измеряется электрическое сопротивление R , которое определяется температурой присадки и прямо пропорционально глубине металлической ванны. Для ее стабилизации в блок сравнения 6 вводится значение параметра, пропорционального оптимальной глубине металлической ванны. Увеличение глубины металлической ванны приводит к росту электрического сопротивления R на вылете присадки и рассогласованию блока 6, который выдает блоку управления 7 сигнал на снижение силы тока и скорости подачи электродной проволоки через механизмы подачи 8. Это приведет к уменьшению глубины металлической ванны и пропорциональному изменению электрического сопротивления R , величина которого становится равной заданному значению; система возвращается в исходное состояние. Аналогично действует система при технологических возмущениях, когда глубина металлической ванны становится меньше заданной. Сохранение неизменной температуры проволоочной присадки стабилизирует ширину зоны равноосной структуры металла шва и всех его структурочувствительных свойств. Экспериментальная проверка предложенной системы показала ее работоспособность при использовании приборов, регистрирующих электрическое сопротивление в пределах до 0,0001 Ом (100 мкОм).

Глава 4 посвящена исследованию механических свойств сварного соединения, выполненного на стали 09Г2С с подачей электродной и проволоочной присадки аналогичного химического состава. Анализ результатов механических свойств сварного соединения, выполненного с подачей проволоочной присадки, выявил зависимость ударной вязкости металла зоны термического влияния от погонной энергии электрошлакового процесса, а для металла шва - от количества проволоочной присадки.

Рост ударной вязкости металла зоны термического влияния объясняется снижением погонной энергии процесса в связи с повышением скорости сварки из-за роста коэффициента наплавки при подаче проволоочной присадки. Так, сравнение термических циклов

нагрева металла зоны термического влияния до температур 1100°C при подаче проволочной присадки и без нее, полученные расчетным путем на ЭВМ по модели, учитывающей действие присадки, как стока тепла и подтвержденные экспериментальным путем, показывают сокращение времени нагрева до указанной температуры в 2,4 раза, а времени пребывания выше этой температуры в 2,0 раза. Ветви термических циклов на участках δ - α превращения идентичны со сваркой без присадки, что сохраняет все преимущества электрошлаковой сварки для предотвращения холодных трещин. Структура зоны термического влияния характеризуется меньшей протяженностью зоны крупного зерна (балл I и выше), которая вкраивается в 1,5 раза по сравнению со сваркой без присадки; видмаштеттова структура характеризуется 3 баллом, то есть большей дисперсностью.

Увеличение ударной вязкости металла шва объясняется созданием зоны равноосных кристаллитов на межфазной поверхности и их меньшим размером по сравнению со столбчатыми кристаллитами, так как рост их прекращается сразу же при подходе основного фронта кристаллизации. Наличие нерасплавившихся кусков проволочной присадки в металле шва не снижает ее ударной вязкости и выносливости сварного соединения при циклических нагрузках.

Таким образом, применение проволочной присадки обуславливает меньший перегрев металла зоны термического влияния и способствует образованию равноосных кристаллитов по оси шва, что повышает механические свойства шва и зоны сплавления, то есть сварного соединения в целом. Статистический анализ качества сварного соединения подтвердил повышение надежности сварного соединения. Это позволяет в некоторых случаях рекомендовать отказ от последующей нормализации сварного соединения.

Более высокие свойства металла шва могут быть получены путем его легирования через проволочную присадку, в том числе легкоокисляющимися и высокоактивными элементами. Важным преимуществом такого процесса легирования является высокий коэффициент усвоения таких элементов, поскольку металл присадки не проходит через шлаковую ванну в стадии капли. Указанный фактор в работе не исследовался; он является резервом технологических возможностей данного способа сварки.

Глава 5 посвящена модернизации сварочного оборудования и

разработке рекомендаций по внедрению способа электрошлаковой сварки с проволоочной присадкой в производство.

Показано, что этот способ может быть рекомендован на серийно выпускаемом оборудовании, что сокращает сроки внедрения. Для электрошлаковой сварки с проволоочной присадкой применимы серийно выпускаемые аппараты А-535, А-1170 и другие. Применительно к аппаратам, у которых электродные проволоки изолированы друг от друга (А-535 и ему подобные), разработаны модернизированные конструкции подающих муфштуксов. В случае использования аппарата А-1170 и ему подобных разработана документация на комплектацию их механизмом для подачи проволоочной присадки от аппаратов А-820, А-537; источники сварочного тока используются серийно выпускаемые (ВДУ-1201, ВДУ-1601, ТЭС-1000/3, ТЭС-3000/1, ТРМК-3000/1). Устройство для управления глубокой металлической ванны выполнено в виде автономного блока, схема которого приведена в рекомендациях.

Производственная проверка возможностей электрошлаковой сварки с подачей проволоочной присадки произведена на заводах "Пензхиммаш" г. Пенза и "Волгоцеммаш" в Тольятти; выполнялась сварка сталей 09Г2С, 16ГС толщиной 50-60 мм, применяемой для изготовления корпусных конструкций химической и цементной промышленности. Процесс внедрен в производство, экономический эффект от внедрения способа составил 53 тыс. рублей. По результатам выполненной работы выданы рекомендации, служащие основой для составления инструкций и технологических процессов по выполнению электрошлаковой сварки с проволоочной присадкой.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Электрошлаковая сварка характеризуется низкой ударной вязкостью сварного соединения, которая обусловлена большим тепловложением в свариваемое изделие; ограничение тепловложения путем увеличения скорости сварки приводит к образованию горячих трещин в металле шва вследствие его столбчатой транскристаллитной структуры. Существующие способы совершенствования электрошлаковой сварки низколегированных сталей не решают одновременно вопросов снижения тепловложения в свариваемое изделие и повышения технологической прочности металла шва.

2. Предложено использовать присадочную проволоку как инструмент комплексного воздействия на структуру сварного шва, его технологическую прочность и тепловложение в свариваемое изделие, что улучшает механические свойства сварного соединения.

3. Установлено, что в условиях электрошлаковой сварки подача проволоочной присадки в центральную область металлической ванны в количестве более 30 % к весу электродной проволоки вызывает локальное переохлаждение жидкой фазы, прилегающей к фронту затвердевания, и приводит к образованию мелких равноосных кристаллитов, объем зоны которых прямо пропорционален количеству присадки.

4. Разработана методика расчета ширины зоны с равноосной структурой в зависимости от режима сварки и количества присадочной проволоки, дающая хорошее совпадение с экспериментальными данными.

5. Разработана методика определения технологической прочности сварного соединения в реальных условиях электрошлаковой сварки, основанная на градиентном распределении темпа деформации по длине шва в процессе сварки, что позволяет сократить трудоемкость исследований. Введение присадочной проволоки вызывает рост критического темпа деформирования до 1,5 раз при количестве присадки 40 % к весу электрода.

6. На основании выявленной прямо пропорциональной зависимости электрического сопротивления, замеренного на вылете присадочной проволоки, от глубины металлической ванны разработан способ управления технологической прочностью металла шва в процессе сварки.

7. Рост коэффициента наплавки и технологической прочности за счет введения проволоочной присадки в 1,5-2,0 раза увеличивает скорость сварки без опасности возникновения горячих трещин в металле шва, что позволяет снизить тепловложение в свариваемое изделие и уменьшить время нахождения зоны термического влияния выше температур интенсивного роста зерна в 2,0-2,4 раза.

8. Ограничение погонной энергии процесса сварки и образование зоны мелкозернистых равноосных кристаллитов по оси шва приводят к росту ударной вязкости и к снижению порога хладноломкости сварного соединения, что дает возможность упростить послесварочную термообработку конструкции, работающих при температу-

рах до -40°C , заменив нормализацию высоким отпускком.

9. Разработанные по результатам исследования рекомендации приняты к внедрению при изготовлении корпусных конструкций из низколегированных сталей (09Г2С, 12ГС, 16ГС и других) толщиной 40-150 мм с годовым экономическим эффектом 53 тысячи рублей.

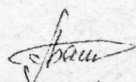
Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Повышение технологической прочности сварного соединения при электрошлаковой сварке / Якушин Б.Ф., Башев Л.Ф., Тихонов В.И. и др. // Автоматическая сварка. - 1982. № 10. - С. 51-53.

2. Якушин Б.Ф., Башев Л.Ф. Исследование процесса электрошлаковой сварки с применением присадочного металла // Известия вузов. Машиностроение. - 1982. № 7. - С. 97-99.

3. А.с. 884775 СССР, МКИ В 23 К 25(00) Способ электрошлаковой сварки / Б.Ф.Якушин, Л.Ф.Башев, В.И.Тихонов и др. (СССР). № 3248087/25-27; Заявл. 19.02.81; Опубл. 30.12.82. Бюл. № 48 // Открытия.Изобретения. - 1982. № 48. - С. 58.

4. А.с. 886062 СССР, МКИ В 23 К 25(00). Способ испытания сварного соединения на стойкость против образования горячих трещин / Б.Ф.Якушин, Л.Ф.Башев (СССР). - № 3357875/25-27; Заявл. 27.11.81; Опубл. 23.02.83. Бюл. № 7 // Открытия.Изобретения. - 1983. № 7. - С. 83.



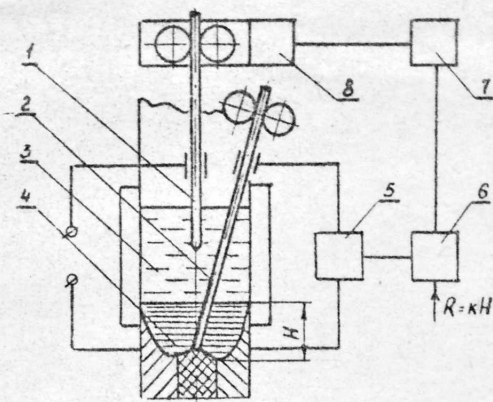


Рис.1. Схема процесса электрошлаковой сварки с присадочной проволокой. 1- электродная проволока; 2- присадочная проволока; 3- шлаковая ванна; 4- металлическая ванна; 5- блок измерения электрического сопротивления металлической ванны; 6- блок сравнения; 7- блок управления механизмом подачи; 8- механизм подачи электродной проволоки.

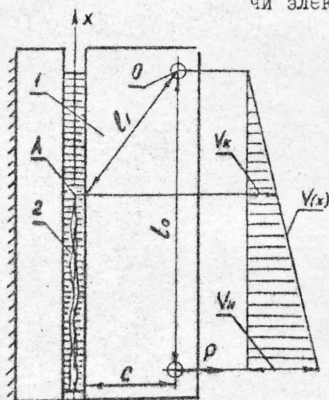


Рис.2. Схема деформирования образца для оценки технологической прочности сварного соединения; эюра распределения скорости перемещения (V_k). 1- подвижная пластина образца; 2- кристаллизационная трещина в металле шва; V_n , V_k - начальная и критические скорости перемещений.

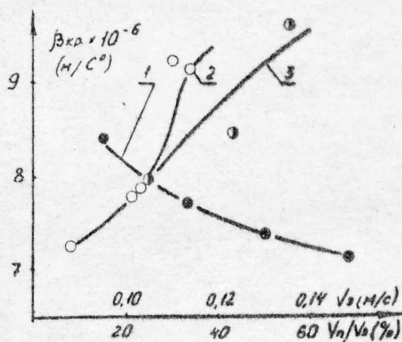


Рис.3. Зависимость критического темпа деформации $\beta_{кр}$ от количества присадочной присадки. 1- сварка без присадки; 2- сварка с присадочной присадкой, $V_0 = 0,14$ м/с; 3- $V_0 = 0,11$ м/с