

Стрельников Илья Владимирович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ СЖАТОЙ
ДУГОЙ БОКОВОЙ СТЕНЫ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА
ИЗ КОРРОЗИОННО-СТОЙКОЙ СТАЛИ**

05.02.10 - Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2012

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

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
КОНОВАЛОВ Алексей Викторович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
ЯМПОЛЬСКИЙ Виктор Модестович

доктор технических наук,
ПОЛОСКОВ Сергей Иосифович

Ведущая организация: **ЗАО НО «Тверской институт
вагоностроения», г. Тверь.**

Защита диссертации состоится 31 » мая 2012г. в 14:30 часов
на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском
государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

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

Ваш отзыв на автореферат диссертации в двух экземплярах, заверенных
печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого
секретаря диссертационного совета.

Телефон для справок (499) 267-09-63

Автореферат разослан « 27 » апреля 2012 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.01,
доктор технических наук, доцент

 **А.В. Коновалов**

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1997057

Стрельников И.В. Разработка

- 058

2484

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время согласно директиве РЖД на Тверском вагоностроительном заводе осуществляется переход с производства пассажирских вагонов из углеродистой стали на производство вагонов из коррозионно-стойкой стали, которые имеют нормативный срок эксплуатации 50 лет. Одним из основных крупногабаритных листовых многослойных сборочных узлов вагона является боковая стена. При изготовлении боковых стен для сварки нахлесточных соединений традиционно используется односторонняя контактная точечная сварка (КТС). Однако в ряде случаев применение КТС затруднено либо постановкой нечетного числа сварных точек, либо недостаточным для пары сварных точек расстоянием до края нахлестки, либо отсутствием медной подкладки под частью деталей. В этих случаях возможно применение дуговой точечной сварки. Учитывая достаточно высокие требования к качеству лицевой поверхности (отсутствие короблений, сварочных брызг, раковин), к коррозионной стойкости, а также к стабильности качества сварки, целесообразно использовать дуговую точечную сварку сжатой дугой (PSW-сварку).

Эффективное использование PSW-сварки сдерживается отсутствием нормативной документации на геометрию сварной точки, дефектность, допустимую величину зазора, и т.д. Применение нормативных требований для сварных соединений, полученных при сварке свободной дугой, к PSW-соединениям затруднительно вследствие характерных особенностей поперечного сечения точки.

Цель работы: обеспечение качества сварных соединений коррозионно-стойкой стали, выполняемых точечной сваркой сжатой дугой.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Исследовать влияние конструктивно-технологических параметров сварки сжатой дугой на формирование сварной точки;
2. Исследовать влияние основных конструктивно-технологических параметров сварки сжатой дугой на прочность соединения;
3. Исследовать влияние геометрии рабочего торца электрода на его стойкость, стабильность сварки, проплавления и геометрию сварной точки.
4. Разработать рекомендации по назначению режима сварки, обеспечивающего получение бездефектной сварной точки заданной прочности.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применялись экспериментальные и теоретические методы исследований: металлографический анализ микро- и макроструктуры с использованием оптического микроскопа OLYMPUS BX51M (Япония), фрактографический анализ, измерения микротвердости сварных шлифов на цифровом микротвердомере DM8 (Италия), механические испытания сварных соединений на универсальной разрывной машине N100K-S Tinius Olsen (США), определение границ сплавления сварной точки магнитопорошковым методом, планирование эксперимента и статистическая обработка экспериментальных

данных, компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния сварного соединения с использованием метода конечных элементов.

Научная новизна.

1. Установлено, что при точечной сварке сжатой дугой электромагнитные силы в сварочной ванне направлены от периферии точки к ее центру и лишены тангенциальной составляющей, что опровергает гипотезу об образовании характерных дефектов типа усиления по краям, лунки в центре и центральной поры в результате интенсивного вращения расплавленного металла.

2. Установлено, что причиной образования указанных дефектов является быстрая кристаллизация деформированной давлением дуги и плазменной струи сварочной ванны при завершении сварки.

3. Экспериментально показано, что эффективным путем устранения характерных дефектов типа усиления по краям, лунки в центре и центральной поры при точечной сварке сжатой дугой является снижение расхода защитного газа и плавное снижение тока на завершающем этапе сварки.

4. Установлены количественные взаимосвязи между геометрическими параметрами сварных точек деталей из коррозионно-стойкой стали и конструктивно-технологическими параметрами сварки сжатой дугой, на основе которых разработаны методические рекомендации по назначению режимов сварки для получения бездефектных сварных соединений при требуемой производительности.

Практическая значимость работы. На основе полученных результатов подобраны оптимальные параметры режима точечной сварки боковой стены вагона сжатой дугой, разработан стандарт организации СТО 05.1943-2010 «Плазменная точечная сварка. Соединения сварные точечные», даны рекомендации по минимизации характерных дефектов (центральной поры и глубокой лунки).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждены на II и III Всероссийских конференциях молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва 2009, 2010), VIII Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (С.-Петербург, 2009), I Всероссийской научно-практической конференции «Прогрессивные технологии и перспективы развития» (Тамбов, 2009), XVII Всероссийской научно-практической конференции «Инновации. Интеллект. Культура» (Тобольск, 2009), XI Международной научно-технической Интернет-конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении» (Брянск, 2010), II Всероссийской научно-практической конференции «Прогрессивные технологии и перспективы развития» (Тамбов, 2010), II Всероссийской молодежной научной конференции «Научный потенциал молодежи – будущее России» (Муром, 2011).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК, получен патент на изобретение.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех

глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Диссертация написана на 130 стр., и содержит 63 рисунка, 14 таблиц, списка литературы из 110 наименований, 7 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность диссертационной работы, сформулированы научная новизна, основные цели и задачи, определена практическая значимость полученных результатов.

В первой главе приведены требования к боковой стене пассажирского вагона и особенности ее конструкции, рассмотрены возможности и проанализированы исследования различных видов и способов точечной сварки.

Большой вклад в совершенствование дуговой точечной сварки внесли А.Г. Потапьевский, В.С. Хожило, А.З. Блитштейн, Д.И. Вайнбойм, Н.А. Соснин, С.А. Ермаков, П.А. Тополянский, В.Л. Руссо, Б.В. Кудояров, В.А. Коновалов, В.И. Вишняков, В.И. Астахин, В.И. Столбов, В.П. Сидоров, И.П. Куркин, А.Е. Аснис, В.С. Виноградов, В.А. Веселов, С.И. Полосков, С.В. Крылов, В.В. Мартынович, К.В. Лялин, А.Н. Тимошенко, В.П. Лозовский, А.И. Акулов, В.М. Ямпольский, И.П. Куркин, А.Я. Бродский, Н.М. Будник, Л.А. Доброквашин, Н.И. Каховский, А.А. Казимиров, В.Я. Дубовецкий, Е.В. Пенкевич, М.М. Дубашинский, М.П. Богдановский, М.И. Домбровский, А.Ф. Ромашев, М.М. Крайчик, А.В. Обухов, С.А. Егоров, S. Giessler, R. Pinkernelle и др., которыми решен ряд задач в области обеспечения качества, стабильности, экономичности процесса, а также повышения стойкости неплавящегося электрода, «образмеривания» нестандартных соединений.

Проведенный анализ способов точечной сварки показал, что для сварки крупногабаритной тонколистовой конструкции боковой стены железнодорожного пассажирского вагона из коррозионно-стойкой стали с жесткими требованиями к обратной (видовой) поверхности целесообразно применение PSW-сварки. Однако, эффективное использование плазменной точечной сварки сдерживается недостаточным знанием закономерностей протекания процесса, а также отсутствием нормативной технической документации (НТД). Установлено, что поперечное сечение плазменной точки имеет характерную геометрию с достаточно широкой номенклатурой конструктивных элементов (рис. 1), отличную от геометрию сварной точки, полученной свободной дугой.

Отмечаются случаи появления на сварной точке центральной поры или глубокой лунки, порой переходящей в сквозной свищ (рис. 2). Если поры можно визуально обнаружить и измерить их глубину, то для того, чтобы выявить внутренние поры необходимо проведение механических испытаний, либо изготовление макрошлифов с разрушением образцов-свидетелей.

Центральные поры, глубокие лунки и непровары значительно снижают прочность точечного соединения, и требуют постановки дополнительных «запасных» сварных точек. Выплески и полости с оборотной стороны приводят трудоемкой операции по исправлению (подварки и механической зачистки) и снижают эстетичность изделия, что особенно важно, если сторона является видовой.

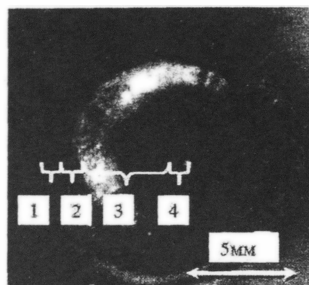
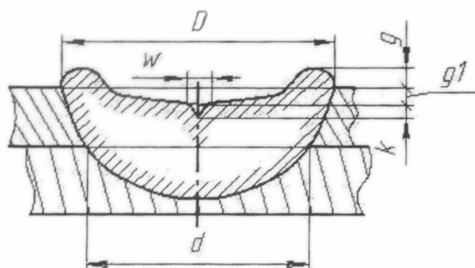


Рис. 1. Конструктивные элементы (а) и внешний вид (б) PSW-соединения:

- D и d – наружный диаметр и диаметр литого ядра;
- g и g_1 – усиление и общее ослабление;
- w и k – диаметр и глубина лунки;
- 1 – зона термического влияния с цветами побежалости;
- 2 и 3 – «кайма» усиления и общее ослабление;
- 4 – центральная лунка

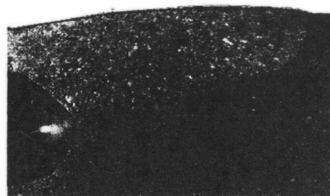
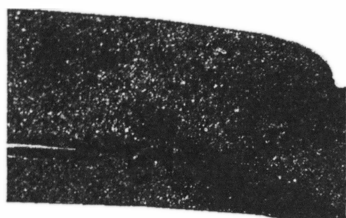


Рис. 2. Дефекты PSW-соединения:
а – в виде глубокой лунки;
б – в виде поры

Следует также отметить, что технология PSW-сварки осуществляется без присадочного или электродного металла. Поэтому особую остроту приобретает вопрос обеспечения стабильности качества PSW-сварки: воспроизводимость глубины проплавления, диаметра литого ядра и геометрии внешней поверхности, а также отсутствие характерных дефектов зависят от многочисленных технологических факторов. Так, к последним следует отнести, прежде всего зазор между свариваемыми листами, состояния электрода, плотность поджатия нахлесточного соединения к медной подложке (при ее наличии).

С учетом довольно существенного расхождения процессов TIG и PSW-сварки необходима разработка методических рекомендаций по настройке и оптимизации режима.

Вторая глава посвящена исследованию влияния конструктивно-технологических параметров на особенности формирования PSW-соединения.

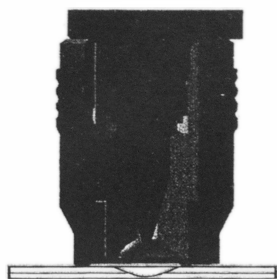


Рис.3. Разрез горелки для PSW-сварки

Процесс PSW-сварки заключается в сквозном расплавлении верхнего и частично нижнего листов струей ионизированного газа (смесью аргона с 5% водорода) в течении одного или нескольких импульсов с заданной конфигурацией без использования присадочного материала. Новая технология принципиально отличается от сварки свободной дугой большим давлением плазмообразующего газа, более высокой концентрацией тепловой энергии дуги, а также особой конструкцией сварочной горелки (рис. 3).

Для проведения исследований использовалось оборудование PSW 500 фирмы SBI (Австрия), с особой фокусировкой плазменной струй, электронным программированием параметров режима (конфигурации импульса), возможностью проведения сварки в автоматическом режиме.

Возможность использования PSW-сварки при изготовлении листовых конструкций была оценена путем проведения сравнительных механических испытаний с КТС. Механические сравнительные испытания на срез, отрыв и скручивание показали сопоставимость плазменных и контактных сварных точек для сочетаний толщин боковой стены по диаметру литого ядра, срезающему усилию, а также по глубине проплавления и пластичности (таблица 1). Результаты испытаний соответствуют требованиям отраслевого стандарта ОСТ 24.050.34 «Проектирование и изготовление стальных сварных конструкций вагонов».

Таблица 1.

Сравнение PSW-сварки и КТС

Сочетание толщин, мм	Вид сварки	Минимальный диаметр литого ядра, мм		Минимальное срезающее усилие, кН	
		Факт. значения	По ОСТ 24.050.34	Факт. значения	По ОСТ 24.050.34
2,5+1,5	PSW	7,6/7,7/7,6	7,0	23/24/23	15,0
	КТС	7,6/7,5/7,6		23/24/24	
1,5+2	PSW	7,4/7,5/7,4	6	22/22/22	11,0
	КТС	7,5/7,4/7,5		22/22/22	

Для оценки влияния возмущающих факторов на стабильность качества PSW-сварки был проведен сравнительный анализ сварных точек, выполненных в различных технологических условиях.

Таблица 2.

Влияние условий PSW-сварки на характеристики сварной точки

Условия PSW-сварки	На подкладке		На весу
Зазор, мм	0	0,5	0
Диаметр ядра, мм	$5,5 \pm 0,5$	$4,7 \pm 1,4$	$5,4 \pm 0,6$
Усилие среза, кН	$9,3 \pm 1,1$	$7,2 \pm 3,5$	$9,5 \pm 0,9$
Брак по некруглости, %	0	20	7

Были выполнены PSW-соединения без зазора (на весу и на медной подкладке) и с зазором на медной подкладке. Согласно результатам эксперимента разброс значений срезающего усилия и диаметра литого ядра плазменной точки как при сварке на медной подкладке, так и при сварке на весу, примерно одинаков. Однако при сварке на весу диаметр литого ядра имеет несколько большее отклонение от некруглости (некруглостью принято условие $d_{\max}/d_{\min} > 1,2$), что, вероятно, вызвано ухудшением условий отвода теплоты. Повышение зазора резко ухудшает качество плазменной точки: разброс значений диаметра литого ядра значительно отклоняется от закона нормального распределения, литое ядро получается «рваное» (значительное отклонение от некруглости), разброс значений срезающего усилия растягивается в сторону с меньшими значениями (рис. 4, таблица 2).



Рис. 4. Гистограммы распределения размера диаметра литого ядра при различных условиях сварки:

- а – на медной подкладке с нулевым зазором;
- б – на весу с нулевым зазором;
- в – на медной подкладке с зазором 0,5 мм

Зависимость геометрии PSW-соединения от параметров режима, а также технологических факторов определялась экспериментально.

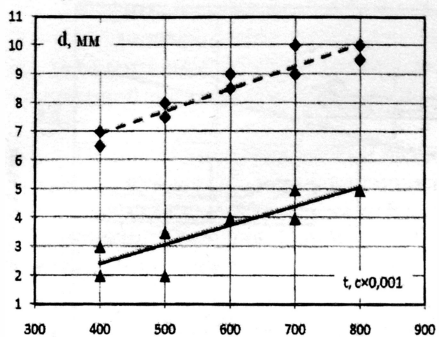


Рис. 5. Зависимости диаметра литого ядра от времени

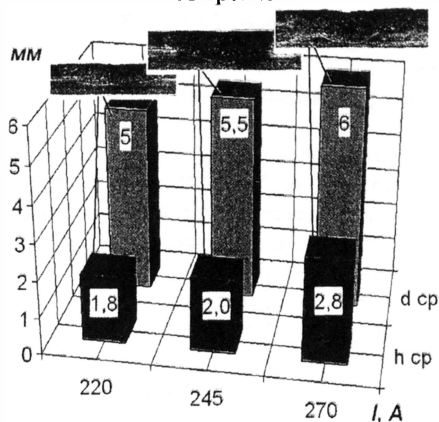


Рис. 6. Диаграммы зависимостей глубины проплавления h и диаметра литого ядра d от силы тока

Одним из важнейшим критериев PSW-соединения, определяющим прочность, является диаметр литого ядра d . Для определения зависимостей последнего от параметров режима применялся метод перебора, при котором поочередно исследовалось влияние одного параметра, при постоянных значениях остальных (рис. 5). Зависимости близки к линейным.

Вторым важным параметром, влияющим на стабильность значения прочности и сглаживающим негативное влияние зазора, является глубина провара h . Регулирование глубины провара позволяет избежать выплеска или выходящей поры (поверхностной «раковины») с обратной стороны сварной точки. На основании металлографических исследований установлено, что увеличение тока приводит к глубокому, неширокому проплавлению нижней заготовки, а увеличение времени — к увеличению диаметра литого ядра и незначительному увеличению глубины (рис.6).

Исследования взаимосвязи размеров оставшихся конструктивных элементов и параметров сварки позволили установить следующие закономерности: наружный диаметр и диаметр лунки плотно сгруппированы вдоль линии тренда и возрастают с увеличением тока и времени сварки, причем последний изменяется в абсолютном значении незначительно; глубина центральной лунки меняется незначительно при изменении времени и тока сварки, причем значения отличаются значительным разбросом; усиление и общее ослабление несколько возрастают с увеличением времени и тока сварки, в результате поверхность плазменной точки покрывается концентрической волной.

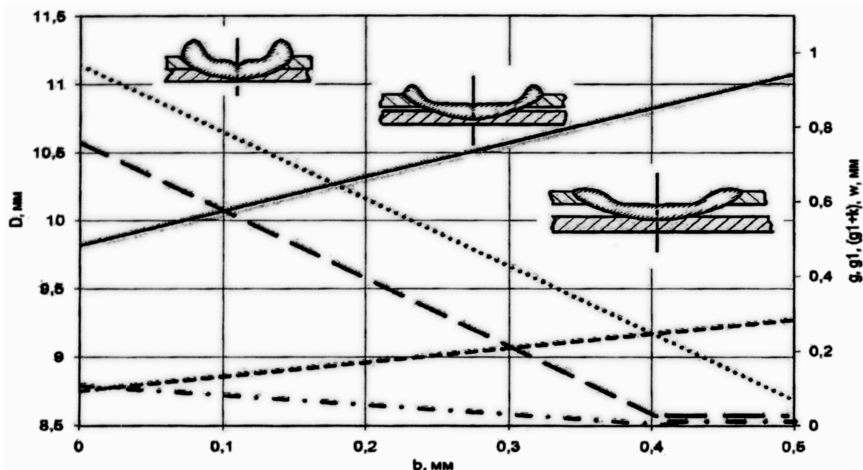


Рис. 7. Зависимости изменения геометрии сварной точки от зазора

Экспериментально установлено, что при увеличении зазора наружный диаметр возрастает, что вызвано увеличением тепловложения в верхнюю деталь; усиление уменьшается, а ослабление увеличивается, что вызвано перемещением расплавленного металла в пространство между заготовками; лунка исчезает, что объяснимо большим прогибанием сварочной ванны (рис. 7).

При взаимодействии тока с собственным магнитным полем в соответствии с законом Ампера возникает электромагнитная сила:

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B},$$

где $\vec{j}$ – плотность тока, $\vec{B}$ – магнитная индукция, $\vec{F}$ – сила, действующая на элементарный объем расплавленного металла в сварочной ванне.

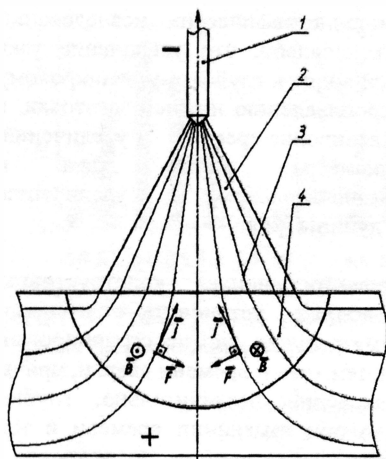


Рис. 8. Схема распределения электромагнитных сил в сварочной ванне: 1 – электрод; 2 – дуга; 3 – линия тока; 4 – сварочная ванна

Как следует из рис. 8, электромагнитные силы $\vec{F}$ лишены тангенциальной составляющей (направлены к центру шва) и поэтому не могут являться причиной образования характерного профиля PSW-соединения. Таким образом, причинами образования усиления по краям и лунки в центре являются сила давления дуги и сопутствующих разогретых до высоких температур сварочных газов.

В третьей главе рассмотрены свойства PSW-соединения.

Установлено, что прочность сварных плазменных точек, полученная экспериментально, хорошо соотносится с прочностью точечного соединения, полученной теоретически (таблица 3).

Таблица 3.

Прочность при нагружении на срез для PSW-соединений при различных условиях: на весу (В); на медной подкладке (М); автоматическая (А); ручная (Р)

Сочетание толщин, мм	Условия сварки	Диаметр литого ядра	Прочность при срезе, кН	
			Эксперимент	Расчет
2,5+2	М/Р	5,5...6,5	8...16	12,0
2,5+1	В/Р	5,5...6,5	6...13	9,4
2,5+1,5	М/Р	5,5...6,5	7...15	10,3
1,5+2,0	М/А	5,0...6,0	7,5...14	7,4
1,0+1,5	М/А	5,5...6,5	7...13	6,3
2,0+1,5	М/А	5,5...6,5	9,5...15	10,3
2,5+1,5	М/А	5,5...6,5	9,5...15	10,3

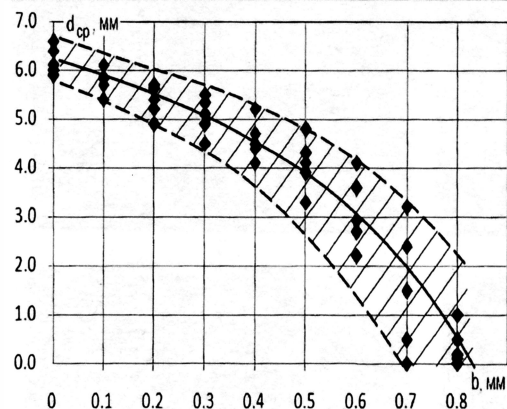


Рис. 9. Зависимость диаметра литого ядра от зазора при PSW-сварке

Кроме того, поскольку технология PSW-сварки осуществляется без использования присадочного или электродного металла, существенное влияние на прочность сварной точки оказывает зазор. Экспериментально найдено, что при критической величине зазора образования литого ядра плазменной сварной точки не происходит, а разброс значений диаметра литого ядра плазменной точки увеличивается при увеличении значений зазора (рис.9).

Критичность такого фактора, как зазор, проявляется не только в возможности получения дефектной сварной точки с непроваром или повышенным ослаблением, но и в повышенных значениях напряжений в месте сопряжения заготовок и литого ядра. Была смоделирована плазменная сварная точка с характерной геометрией, разбита на конечные элементы, и далее были приложены срезающие усилия (рис. 10).

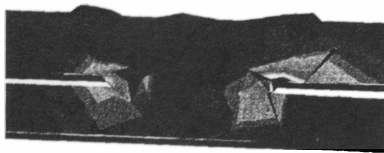


Рис. 10. Напряженное состояние PSW-соединения при нагружении срезающим усилием

Из рисунка 10 видно, что наиболее нагруженные места сварного соединения расположены в месте сопряжений свариваемых деталей, и для их уменьшения необходимо стремиться к минимизации зазора.

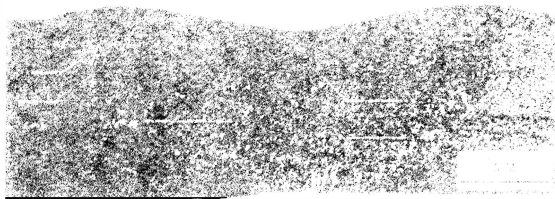


Рис. 11. Макроструктура PSW-соединения

На шлифах, вырезанных перпендикулярно поверхности по центру плазменной сварной точки, были произведены макро- и микроисследования (рис. 11, 12).

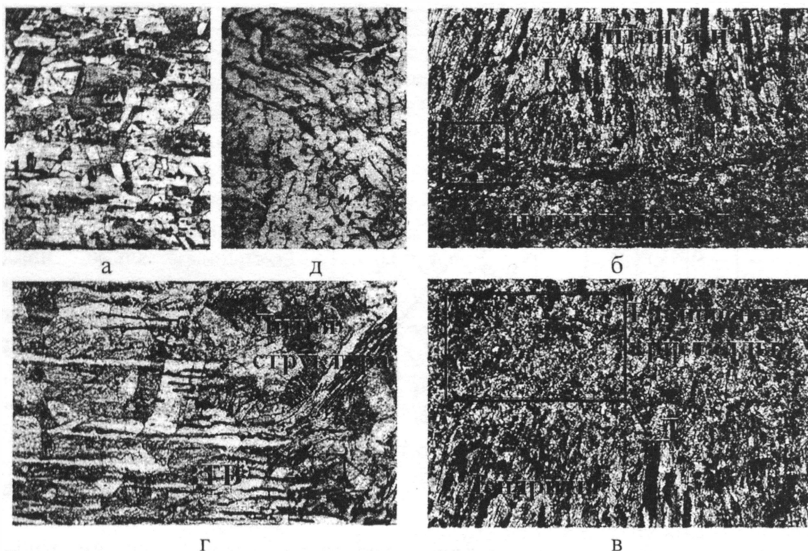


Рис. 12. Микроструктура плазменной сварной точки: а - основного металла, $\times 200$; б - зоны сплавления сварного соединения, $\times 40$; в - литой зоны в центре сварной точки за столбчатыми кристаллами, $\times 100$; г - ЗТВ, $\times 300$; д - зоны равноосных кристаллов, $\times 400$

Анализ проведенных исследований показал, что структура плазменной точки двухфазная аустенитно-ферритная, по краям имеется дендритное строение с ориентированием кристаллитов в сторону теплоотвода, а в центре – мелкозернистая структура. Крупные неметаллические включения, трещины, непровар, газовые пузыри отсутствуют. Микротвердость литой зоны, ЗТВ и основного металла образцов не имеет существенных различий и составляет 211...222 HV0,1.

Микроструктура основного металла (рис. 12, а) – аустенитная с наличием ферритной фазы в виде отдельных строчек в количестве ~5%, ориентированной по направлению прокатки, что обуславливает некоторую анизотропию свойств. Величина зерна аустенита соответствует баллу 7 по ГОСТ 5639-82. В литой зоне у линии сплавления фиксируется характерная столбчатость (рис.12, б). В центре точки наблюдается зона разориентированных равноосных кристаллов получаемая в результате более медленного охлаждения (рис. 12, в, д). Рост аустенитного зерна в ЗТВ отсутствует (рис.12, г). Микродефектов (мелких трещин, пористости) в различных зонах сварного соединения не выявлено.

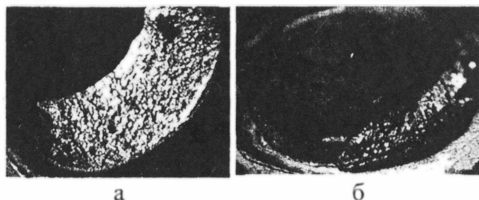


Рис. 13. Излом плазменной точки: а – по ЗТВ; б - по ЗТВ и по литой зоне, х8

Фрактографические исследования производились на образцах, полученных после проведения испытаний на отрыв (рис. 13). В большинстве случаев разрушение происходило по ЗТВ, где макрорельеф излома отличается однородностью, с мелко-шероховатой матовой поверхностью (рис. 13, а).

Реже встречались случаи неоднородного излома с разрушением не только по ЗТВ, но и по литой зоне точки, где макрорельеф излома серого цвета, сглаженный, характерный для литой стали (рис. 13, б). Дефекты в изломах не выявлены.

Также был изучен вопрос обеспечения стабильной работы неплавящегося электрода при PSW-сварке: была произведена оценка его стойкости, исследован механизм разрушения, а также изменения геометрии сварной точки при различных углах заточки и материалах электрода.

Эксперименты показали высокие сварочно-технологические свойства вольфрамового электрода марки WS-2 DIN EN 26848, легированного 1,3...1,7% безториевой смесью оксидов лантаноидов. При исследовании геометрии рабочего торца электрода рассматривалась заточка на конус с притуплением до диаметра 0,5...0,8 мм с различными углами заточки α ($15^\circ \dots 40^\circ$). Притупление с одной стороны увеличивает стойкость вольфрамового электрода, с другой – увеличивает диаметр литого ядра сварной точки при некотором уменьшении глубины проплавления за счет расфокусировки дуги. Диаметр электрода принят равным 3,2 мм исходя из конструкции сварочной горелки.

Влияние угла заточки на геометрию сварной точки определялось с помощью макрошлифов после приработки ($N \geq 50$ циклов сварки). Увеличение угла заточки благотворно сказывается на прочностных характеристиках сварной точки – увеличивается диаметр литого ядра, однако несколько увеличивается наружный диаметр, что отрицательно сказывается на качестве сварной конструкции. Отмечено относительно малое снижение глубины проплавления, что выгодно отличает PSW-сварку от сварки свободной дугой.

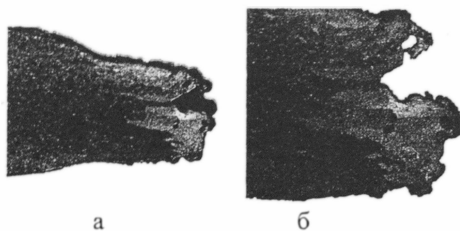


Рис. 14. Обеднение редкоземельными металлами венчика, $N=500$ св. точек:

а – общий вид;

б – венчик

Установлено, что при выполнении достаточно большого количества сварных точек возникают две следующие причины потери работоспособности: эрозия с образованием типичного «венчика» на конце конусной части (для углов $\alpha=20^\circ \dots 40^\circ$), либо перегрев конусной части и выгорание образующегося венчика (для углов $\alpha=15^\circ \dots 25^\circ$) (рис. 14)

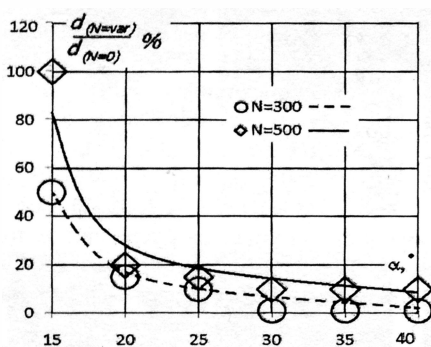


Рис. 15. Уменьшение диаметра литого ядра при изменении угла заточки вольфрамового электрода

Стойкость вольфрамового электрода после ~ 500 циклов сварки оценивалась комплексно: по изменению геометрии, прочности, проценту ложного поджига. Установлено, что угол заточки менее $15 \dots 20^\circ$ приводит к резкой эрозии и разрушению конусной части электрода. С другой стороны, при углах, больших $35 \dots 40^\circ$, ухудшается способность к поджигу. Кроме того, при малых углах заточки ($< 15 \dots 20^\circ$) после $400 \dots 500$ циклов ухудшается качество сварки (рис. 15).

Таким образом, показано, что выгорание, эрозия и обеднение легирующими присадкам рабочего конца электрода с образованием на нем «венчика» приводит к уменьшению величин силовых характеристик и нарушению стабильности потока плазмы, к повышенному «блужданию» катодного пятна, и, как следствие, к уменьшению диаметра литого ядра, увеличению наружного диаметра и уменьшению способности к поджигу.

Четвертая глава посвящена внедрению полученных результатов на производстве при изготовлении боковых стен железнодорожного вагона с оптимизацией процесса по параметрам режима и разработкой НТД.

Боковая стена кузова пассажирского железнодорожного вагона моделей 61-4440, 61-4447 (рис. 16) выполнена из сваренных между собой гладких и гофрированных листов, подкрепленных элементами жесткости. Диапазон толщин составляет от 1+2,5 до 2,5+1мм, сварка части плазменных сварных точек выполняется на весу.

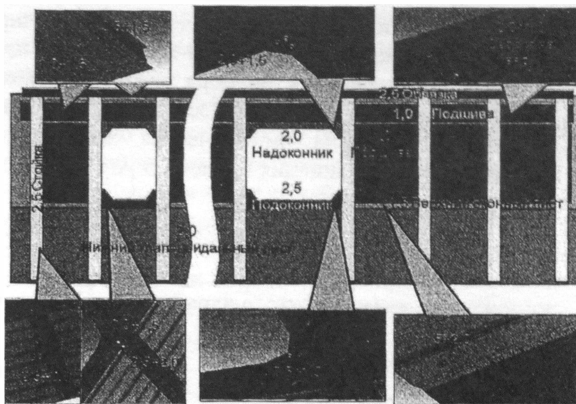


Рис.16. PSW-соединения на боковой стене

Для подбора параметров режима PSW-сварки были разработаны методические рекомендации, приводящие к получению бездефектных сварных соединений при требуемой производительности:

I. выбор плазмообразующего газа и расстояния от торца электрода до верхней детали исходя из толщины верхней заготовки и производительности;

II. определение величины сварочного тока исходя из значения диаметра литого ядра, повышенного в $\sim 1,2..2,0$ раза и проплавления $\sim 50...90\%$ толщины нижней детали при нулевом зазоре;

III. определение времени сварки исходя из равномерности глубины проплавления нижней детали, производительности и уменьшения послесварочных деформаций;

IV. проверка обеспечения диаметра литого ядра, превышающего нормативное в $\sim 1,0...1,5$ раза, прочности и проплавления $\sim 20...70\%$ толщины нижней детали при максимальном зазоре;

V. при невыполнении условий I-IV коррекция сварочного тока, времени сварки, давления и расхода плазмообразующего газа;

VI. принятие мер для устранения характерных дефектов PSW-сварки (лунки и внутренней поры);

VII. коррекция времени и тока сварки при превышении предельных значений размеров конструктивных элементов после статистического исследования (15...51 проб для зазора с нулевым и максимальным значениями).

Подбор режимов сварки предварительно производится на образцах технологических проб, имитирующих плазменные сварные соединения боковых стен. При необходимости определения диаметра литого ядра, а также наличия дефекта в виде центральной поры (п. II, IV, V, VI и VII) целесообразно производить статические испытания на срез; при определении глубины проплавления (п. II, IV, V и VII) – испытания на отрыв; при учете повышенного перегрева, и, как следствие, деформаций и роста зерна (п. III) – испытания на скручивания, а также фратографический анализ изломов после испытания на

срез и отрыв; по возможности, следует контролировать все вышеприведенные параметры по макрошлифам (п. II-VII).

После проведения подбора режима PSW-сварки на образцах (п. I-VII) выполняется его апробация непосредственно на изделии или макете.

Также найдена эмпирическая зависимость, которую целесообразно применять для сокращения времени и упрощения настройки режимов сварки:

$$d = \{-2 - 2,5 \cdot s + 0,007 \cdot t + 0,028 \cdot I - 2,8 \cdot b\}^{+0,15 \cdot \exp(0,7s)}_{-0,8 \cdot \exp(1,1b) + 0,15 \cdot \exp(0,7s)} \quad (1)$$

где d – диаметр литого ядра, мм;

t – время сварки, мс;

I – сварочный ток, А;

b – зазор, мм;

s – толщина верхней свариваемой детали, мм.

Как было сказано выше, применение НТД на геометрию сварных точек, полученных свободной дугой, к полученным сжатой дугой, недопустимо по причине существенного расхождения по геометрии, дефектам, сочетаниям толщин и т.д. Данное обстоятельство вызывало трудности при проведении контроля качества и оформлении конструкторской документации на боковую стену вагона. Выход был найден в разработке стандарта организации (СТО) «Плазменная точечная сварка. Соединения сварные точечные».

Основой при разработке СТО служили государственные стандарты на дуговую и контактную точечную сварку, отраслевой стандарт на производство вагоностроительных сварных конструкций и экспериментальные исследования.

Определение допуска на размеры конструктивных элементов PSW-соединения производилось по разработанной методике исходя из условий обеспечения прочности сварной точки и диаметра литого ядра. А именно: при постоянных значениях сварочного тока и зазора выполнялось построение зависимостей конструктивного элемента и диаметра литого ядра от времени; графически определялся диапазон значений конструктивных элементов, соответствующих минимально допустимому диаметру; проводились обобщения значений конструктивных элементов для других значений тока сварки и зазоров, приводящих к получению бездефектных точек; принимались крайние значения (наибольшее и наименьшее) с учетом величины стандартной ошибки конструктивного элемента.

Основные выводы и результаты

1. Установлено, что при точечной сварке сжатой дугой электромагнитные силы в сварочной ванне направлены от периферии точки к ее центру и лишены тангенциальной составляющей, что опровергает гипотезу об образовании характерных дефектов типа усиления по краям, лунки в центре и центральной поры в результате интенсивного вращения расплавленного металла.

2. Установлено, что причиной образования указанных дефектов является быстрая кристаллизация деформированной давлением дуги и плазменной струи сварочной ванны при завершении сварки.

3. Экспериментально показано, что эффективным путем устранения характерных дефектов типа усиления по краям, лунки в центре и центральной поры при точечной сварке сжатой дугой является снижение расхода защитного газа и плавное снижение тока на завершающем этапе сварки.

4. Установлены количественные связи между геометрическими параметрами сварных точек деталей из коррозионно-стойкой стали и конструктивно-технологическими параметрами сварки сжатой дугой, на основе которых разработаны методические рекомендации по назначению режимов сварки для получения бездефектных сварных соединений при требуемой производительности.

5. Обоснована целесообразность применения при точечной сварке сжатой дугой вольфрамового электрода, легированного лантаноидами, с углом заточки 20...30° для обеспечения длительной стойкости электрода, стабильного поджига дуги и оптимальной геометрии сварочной точки.

6. Установлено, что качество соединений, выполненных точечной сваркой сжатой дугой, чувствительно к условиям ее выполнения: оптимальна организация сварки на медной подкладке; удовлетворительно выполнение сварки на весу; проведение сварки на повышенных зазорах приводит к резкому снижению прочности и увеличению разброса ее значений.

7. Подобраны режимы точечной сварки сжатой дугой для всех сочетаний толщин, применяемых при изготовлении боковой стены. Экспериментально показано, что показатели прочности, пластичности и геометрические характеристики сварных соединений, выполненных точечной сваркой сжатой дугой, а так же их повторяемость в условиях массового производства, сопоставимы с аналогичными показателями при контактной точечной сварке.

8. На основе проведенных исследований разработан и внедрен стандарт организации «Плазменная точечная сварка. Соединения сварные точечные», гармонизирующий требования к геометрическим характеристикам и показателям качества соединений. Технология точечной сварки сжатой дугой используется при изготовлении боковой стены пассажирского вагона моделей 61-4440, 61-4447 на ОАО «Тверской вагоностроительный завод».

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Разработка стандарта организации на сварные точечные соединения, выполненные плазменной сваркой / И.В. Стрельников [и др.] // Будущее машиностроения России: Сборник материалов II Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов.- Москва, 2009. – С.73-74.

2. Влияние параметров режима на геометрию плазменной сварной точки / И.В. Стрельников [и др.] // Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности: Сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции.- Санкт-Петербург, 2009. – С.158-164.

3. Размеры и дефекты PSW-соединения для различных режимов сварки / И.В. Стрельников [и др.] // Сварка и диагностика.- 2009. – №5. –С.45-49.

4. Лобжа Г.И., Коновалов А.В., Стрельников И.В. Влияние зазора на прочность и диаметр литого ядра плазменной сварной точки для сочетаний толщин 2,5+1 и 2,5+2 мм // Прогрессивные технологии и перспективы развития: Материалы I Всероссийской научно-практической конференции.– Тамбов, 2010. – С.126-129.

5. Коновалов А.В., Стрельников И.В. Плазменная точечная сварка: возможные дефекты и меры по их устранению // Инновации. Интеллект. Культура: Сборник трудов XVII Всероссийской научно-практической конференции. – Тобольск, 2010. – С.57-59.

6. Определение размеров наружного диаметра PSW-соединения / И.В. Стрельников [и др.] // Новые материалы и технологии в машиностроении: 11-я Международная научно-техническая Интернет-конференция. – Брянск, 2010.- URL: http://science-bsea.bgita.ru/2010/mashin_2010/konovarov_opred.htm (дата обращения: 18.04.2012).

7. Стрельников И.В., Коновалов А.В. Разработка технологии PSW-сварки боковин из нержавеющей стали // Будущее машиностроения России: Сборник материалов III Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. – Москва, 2010. – С.110-111.

8. Исследование взаимосвязи наружного диаметра и диаметра литого ядра сварного соединения при плазменной точечной сварке / И.В. Стрельников [и др.] // Вестник ТвГУ. Серия Физика.- 2010.-№25, выпуск 8.– С. 57-63.

9. Коновалов А.В., Стрельников И.В., Штемпфер Ф. Некоторые вопросы качества плазменной точечной сварки: Металлография, фрактография, статистика // Сварка и диагностика.- 2010.- №5 –С. 47-50.

10. Стрельников И.В., Коновалов А.В. Стабильность PSW-сварки в зависимости от параметров вольфрамового электрода // Прогрессивные технологии и перспективы развития: Материалы II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых.– Тамбов, 2010. – С.242.

11. Стрельников И.В., Коновалов А.В. Взаимосвязь зазора и геометрии точки при сварке сжатой дугой // Научный потенциал молодёжи – будущее России: II Всероссийская молодёжная научная конференция.– Муром, 2011 г. – С. 248-249.

12. Коновалов А.В., Стрельников И.В. Определение оптимальной геометрии вольфрамового электрода при точечной сварке сжатой дугой // Известия высших учебных заведений. Машиностроение.-2011.-№ 6.-С. 53-57.

13. Пат. RU 2444424 C1, МПК В 23 К 31/12, В 23 К 10/02. Способ контроля качества плазменной точечной сварки / И.В. Стрельников (RU), Г.И. Лобжа (RU), В.К. Мешков (RU); заявитель и патентообладатель ОАО «ТВЗ» (RU). – №2010126796/02; Заяв. 30.06.2010 // БИ. – 2012. – №7.