

На правах рукописи

УДК 621.791.72

Лебедев Виктор Сергеевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИМПУЛЬСНОЙ АРГОНОДУГОВОЙ
СВАРКИ СТЫКОВЫХ ШВОВ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК
ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ**

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2015

Работа выполнена на кафедре технологий сварки и покрытий
ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
БАБКИН Александр Сергеевич,
профессор кафедры технологий сварки
и покрытий ЛГТУ

Официальные оппоненты: доктор технических наук
ДОРОНИН Юрий Викторович,
АЦГХ, начальник лаборатории

172 кандидат технических наук
КОБЕРНИК Николай Владимирович,
МГТУ им. Н.Э.Баумана, доцент

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО «Донской государственный
технический университет»**

Защита диссертации состоится «30» апреля 2015 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

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



А.В. Коновалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время высокопрочный чугу́н с шаровидным графитом (ВЧШГ) из-за своего комплекса свойств все шире используется в промышленности, в том числе при прокладке систем водоснабжения, водоотведения, нефтедобычи.

Даже при сварке поворотных стыков в условиях цеха не всегда удается достичь требуемого качества сварных швов. Это связано с повышенной жидкотекучестью чугуна, в результате чего на готовом изделии при достаточных механических свойствах возникают дефекты искажения формы шва. Производитель работ вынужден привлекать и для изготовления фасонных частей, и для монтажа трубопроводов сварщиков очень высокой квалификации.

Развитие импульсных технологий сварки и появление импульсных источников питания позволяет улучшить качество сварной продукции из ВЧШГ при снижении требований к мастерству и квалификации сварщика и тем самым дает возможность повысить эксплуатационную надежность конструкций и минимизировать издержки.

Анализ литературных источников и практической деятельности предприятий выявил отсутствие сведений о влиянии параметров режима импульсной аргонодуговой сварки ВЧШГ на геометрические размеры получаемых швов при сварке во всех пространственных положениях.

При разработке технологий сварки как трубных заготовок, так и труб из ВЧШГ важно определять размеры швов, однако комплекс исследований методики расчета геометрических размеров сварного шва по заданным основным параметрам режима импульсной аргонодуговой сварки отсутствует.

Таким образом, решение задач, связанных с изучением особенностей и разработкой технологии импульсной аргонодуговой сварки стыковых швов трубных заготовок из ВЧШГ, является актуальным и своевременным.

Целью диссертационной работы является обеспечение качества сварки стыковых швов трубных заготовок из ВЧШГ за счет внедрения импульсной аргонодуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Проанализировать причины образования дефектов и определить методы обеспечения стабильно высокого качества сварных однопроходных соединений неповоротных стыков трубных заготовок из ВЧШГ.
2. Изучить закономерности формирования сварного шва в различных пространственных положениях, характерных для неповоротных стыков трубных заготовок из ВЧШГ при аргонодуговой импульсной сварке неплавящимся вольфрамовым электродом без и с присадкой.
3. Разработать экспериментально-статистические модели формирования стыковых односторонних швов типа С2 трубных заготовок из ВЧШГ при

аргонодуговой импульсной сварке неплавящимся вольфрамовым электродом.

4. Определить рациональные соотношения между параметрами режима, разработать карты качественного формирования швов аргонодуговой импульсной сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом стыковых односторонних швов типа С2 трубных заготовок из ВЧШГ.
5. Разработать и внедрить технологию аргонодуговой импульсной сварки трубных заготовок из ВЧШГ неплавящимся вольфрамовым электродом с присадкой.

Научная новизна

1. Разработаны новые математические модели формирования стыковых швов трубных заготовок из ВЧШГ при импульсной аргонодуговой сварке в основных пространственных положениях, связывающие геометрические размеры шва с параметрами режима сварки через безразмерные комплексы.
2. Установлены закономерности формирования сварных соединений при импульсной аргонодуговой сварке ВЧШГ в основных пространственных положениях, позволяющие рассчитывать основные геометрические размеры швов в зависимости от параметров режима сварки.
3. Установлено, что ширина зоны сплавления со стороны основного металла, обладающая повышенной твердостью и хрупкостью, при импульсной сварке уменьшается в среднем на 10...15% за счет дозированного прерывистого тепловложения.
4. Установлено, что для моделирования процесса импульсной аргонодуговой сварке ВЧШГ использование критериального метода обеспечивает высокое, достаточное для практического применения, совпадение расчетных и экспериментальных значений геометрических размеров сварных соединений.
5. Установлено, что при разработке математической модели формирования усиления шва необходимо применение критерия Бонда как инструмента, позволяющего учитывать влияние сил тяжести и поверхностного натяжения на геометрические размеры сварного шва.
6. Определен полный тепловой к.п.д. процесса импульсной аргонодуговой сварки ВЧШГ в нижнем положении без присадки, составляющий 18%.

Практическая ценность

1. Получены уравнения, позволяющие рассчитать геометрические размеры сварных швов в зависимости от основных параметров режима импульсной аргонодуговой сварки ВЧШГ для основных пространственных положений;
2. Установлены диапазоны допустимых значений коэффициентов жесткости режима и асимметрии сварочного тока, обеспечивающие качественное формирование сварного шва;

3. Технологические процессы импульсной аргонодуговой сварки продукции из ВЧШГ внедрены на предприятиях ООО НПП «Валок-Чугун», ООО «ЧугунСпецСтрой» и др. Экономический эффект от внедрения новых разработок составил 150 тысяч рублей в год. Доля автора во внедренных разработках – 2/3.

Методы исследования. Поставленные задачи решались с применением экспериментальных и теоретических методов исследования. Математические модели разработаны с использованием теории подобия и критериальных методов. Расчеты проводились с применением программного обеспечения MathCad и Statistica.

Доверенность научных положений, выводов и практических рекомендаций подтверждается систематическим характером экспериментальных исследований, применением стандартных и современных методов исследований, использованием методов математической статистики при обработке результатов экспериментов, а также практическим использованием полученных результатов.

Личный вклад автора. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, которые выносятся на защиту, получены автором лично. В печатных трудах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежат: анализ состояния вопроса и постановка задач исследований, разработка методик проведения экспериментов, практическое выполнение экспериментов, обработка и анализ результатов экспериментов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на Международной научно-технической конференции «Славяновские чтения» (Липецк, 2009), на областных научно-технических конференциях «Повышение эффективности металлургического производства», «Актуальные проблемы технических наук», «Современная металлургия начала нового тысячелетия» (Липецк, 2007-2013, ежегодно), на областном конкурсе «Инженер года-2011» (автор – лауреат этого конкурса), на научных семинарах кафедр технологий сварки и покрытий ЛГТУ (Липецк, 2013), технологий сварки и диагностики МГТУ им.Н.Э.Баумана (Москва, 2014), и кафедры оборудования и технологии сварочного производства ВолгГТУ (Волгоград, 2014).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, из них 3 – в изданиях из Перечня ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, и списка использованной литературы, изложена на 128 листах машинописного текста, содержит 36 рисунков и 13 таблиц. Список литературы включает 121 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведены сведения о высокопрочных чугунах с шаровидным графитом (ВЧШГ), основных марках и их механических свойствах, проанализирована их свариваемость, указаны характерные структуры и режимы термической обработки.

Впервые проблемы создания сварных изделий из чугуна, в том числе ВЧШГ, были обобщены в работах российских и зарубежных ученых: Т. Асида, Г.А. Асиновской, А.Е. Асниса, А.А. Бабанова, В.В. Ветра, К.П. Вошанова, Ю.Я. Грецкого, Ю.И. Журавицкого, В.Н. Лихоносова, К.В. Любавского, В.А. Метлицкого, М. Номияма, В.А. Носова и некоторых других. Трудности сварки ВЧШГ в основном обусловлены повышенной жидкотекучестью сварочной ванны и склонностью к образованию цементита и ледебурита при кристаллизации. Образующаяся зона пониженной пластичности, ширину которой во всех случаях желательно минимизировать, значительно усложняет подходы к процессу сварки высокопрочного чугуна.

Одной из основных технологий сварки труб из чугуна с шаровидным графитом является технология, которая включает в себя предварительный подогрев изделия до 250...350 °С и сварку в среде аргона неплавящимся электродом с высоконикелевой присадкой. После сварки проводится изотермический отжиг готовых изделий при температуре 950...970 °С. Из-за повышенной жидкотекучести чугуна по сравнению со сталью увеличивается вероятность образования таких дефектов, как наплавы, превышения проплава (провисы), натеки (утяжины), подрезы.

При переходе к процессу на импульсных режимах появляется возможность управления скоростью кристаллизации сварочной ванны, что позволит в определенных пределах скомпенсировать негативное влияние повышенной жидкотекучести высокопрочного чугуна.

Учитывая тот факт, что значительная доля сварных узлов для трубопроводов из ВЧШГ и их монтаж приходится на тонкостенные заготовки и трубы диаметром 100...600 мм, стыковые соединения типа С2, использование импульсной аргонодуговой сварки весьма актуально.

В литературе и источниках Интернета нет методик расчета геометрических размеров сварного шва по заданным основным параметрам режима импульсной аргонодуговой сварки.

Во второй главе представлена методика проведения экспериментов, описана модернизация исследовательской установки, приведены сведения об использованном оборудовании, приборах и программных продуктах.

Все представленные в работе эксперименты проведены на модернизированной нами установке АДСВ-5 с отечественным источником питания "Форсаж-160АД".

Для сварки вертикальных швов нами была разработана и использована отдельная конструкция, в основу которой положен специальный механизм перемещения сварочной головки с основной и вспомогательной направляющими и встроенным противовесом. Для ведения сварки на спуск и на подъем при различных углах наклона оси шва к горизонту использовали устройства, приподнимающие край рабочего или дополнительного стола на заданный угол.

Исходя из литературных источников и полученного опыта сварки ВЧШГ, оптимальная длина дугового промежутка 4 мм, угол заточки вольфрамового электрода – 15 градусов при его вылете 7 ± 1 мм.

Для исследования процессов и построения математических моделей формирования, связывающих параметры режима и размеры шва, опирались на положения теории подобия и применяли критерии подобия, использование которых в ряде работ выявило определенные преимущества и получение устойчивых положительных результатов:

$$\text{критерий Пекле } Pe = \frac{LV_{cs}}{a}, \text{ критерий Пекле по высоте } Pe_{(h)} = \frac{hV_{cs}}{a}, \quad (1, 2)$$

$$\text{критерии Пекле по ширине и площади } Pe_{(e_w)} = \frac{e_w V_{cs}}{a}, \quad Pe_{(F_{np})} = \frac{\sqrt{F_{np}} V_{cs}}{a}, \quad (3, 4)$$

$$\text{критерий Кристенсена } \pi_{(cr)} = \frac{qV_{cs}}{T\lambda a}, \text{ критерий Кирпичева } \pi_{(k)} = \frac{q}{T\lambda d_s}, \quad (5, 6)$$

$$\text{критерий давления дуги } \pi_{23} = \frac{q^2 V_{cs}}{(T\lambda)^2 aL}. \quad (7)$$

Критерий Пекле связывает характерный линейный размер процесса L , скорость сварки V_{cs} , и температуропроводность a . В качестве линейного размера применяли размеры сварочной ванны: глубину проплавления сварного шва h , ширину шва e_w , а также площадь проплавления F_{np} .

Критерии режима сварки, связывающие среднюю мощность сварочной дуги q , скорость сварки, характерный линейный размер процесса и теплофизические свойства свариваемого металла (коэффициенты температуропроводности a , теплопроводности λ и температуру плавления T), представлены в виде критерия давления дуги, критерия Кристенсена и критерия Кирпичева.

Для исследования формирования шва учитывалось влияние десяти параметров режима. Это: I_u – сила сварочного тока в период импульса; I_n – сила сварочного тока в период паузы; τ_u – время импульса; τ_n – время паузы; U_u – напряжение на дуге в период импульса; U_n – напряжение на дуге в период паузы; V_{cs} – скорость сварки; V_{nn} – скорость подачи присадочной проволоки; положение шва в пространстве; T_n – температура подогрева.

В экспериментах по сварке в нижнем положении с присадкой присадочная проволока диаметром 1,2 мм подавалась в головную часть сварочной ванны под углом 85° к вертикали.

В третьей главе представлены результаты исследований влияния параметров режима сварки на основные геометрические размеры сварного шва.

Влияние коэффициента жесткости режима $K_{ж} = \tau_u / \tau_n$ и коэффициента асимметрии сварочного тока $K_{ат} = I_u / I_n$ на формирование шва приведено на Рис. 1, 2 и 3.

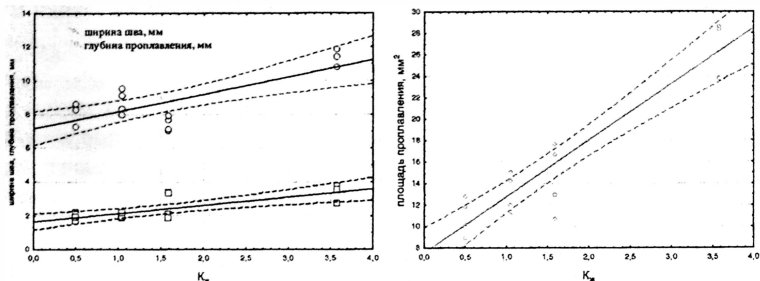


Рис. 1. Влияние коэффициента жесткости на ширину шва, глубину проплавления и площадь проплавления: $K_{AT} = 1,6 \dots 1,76$; $V_{св} = 0,23$ см/с; $d_s = 3$ мм; $La = 4$ мм

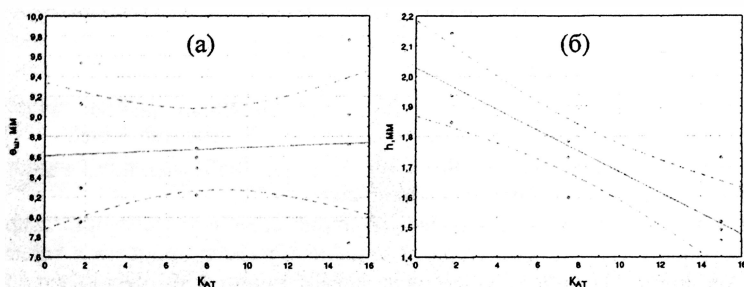
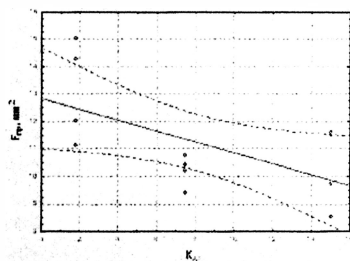


Рис. 2. Влияние коэффициента асимметрии сварочного тока на ширину шва (а) и глубину проплавления (б): $K_{ж} = 0,727$; $d_s = 3$ мм; $La = 4$ мм



Анализ полученных данных показывает, что увеличение коэффициента жесткости приводит к возрастанию всех исследованных размеров шва. Все изменения указанных геометрических параметров сварного шва в положительную сторону вызваны увеличением средней тепловой мощности сварочной дуги, связанным с увеличением $K_{ж}$.

Рис. 3. Влияние коэффициента асимметрии сварочного тока на площадь проплавления шва: $K_{ж} = 0,727$; $d_s = 3$ мм; $La = 4$ мм

Ширина шва практически не меняется при росте K_{AT} от 1,75 до 15. Глубина проплавления при этом уменьшается в среднем от 2,0 до 1,5 мм, площадь проплавления также уменьшается от 12,5 до 10,2 мм². Уменьшение этих размеров также связано с уменьшением средней тепловой мощности дуги импульс-

ного режима при росте коэффициента асимметрии. Полученные закономерности согласуются с теорией теплопередачи при сварке с достаточно высокой степенью корреляции, равной 0,95.

При разработке технологии сварки используется коэффициент полноты проплавления $\mu = F_{пр} / h \cdot e_w$. На основании полученных результатов, рис. 3, рассчитана величина этого коэффициента и получено его значение 0,77, что близко к его известным величинам. Важно отметить, что этот коэффициент не зависит как от коэффициента асимметрии тока, так и от коэффициента жесткости режима.

Применение критериального подхода требует установления уровня связи между соответствующими критериями.

Для сварки в нижнем положении без присадки наиболее сильная корреляционная связь, Таблица 1, имеет место между критериями давления дуги и Пекле для площади проплавления ($R = 0,86$), между критериями Кристенсена и Пекле для ширины шва ($R = 0,84$), а также критериями давления дуги и Пекле для глубины проплавления ($R = 0,79$), Рис. 4 и 5.

Таблица 1.

		Логарифмы критерия Пекле			Логарифмы критериев режима		
		h	e _ш	F _{пр}	π_{23}	π_{Cr}	π_k
Логарифмы критерия Пекле	h	1,00	0,65	0,91	0,79	0,65	0,78
	e _ш	0,65	1,00	0,90	0,80	0,84	0,55
	F _{пр}	0,91	0,90	1,00	0,86	0,81	0,75
Логарифмы критериев режима	π_{23}	0,79	0,80	0,86	1,00	0,95	0,86
	π_{Cr}	0,65	0,84	0,81	0,95	1,00	0,64
	π_k	0,78	0,55	0,75	0,86	0,64	1,00

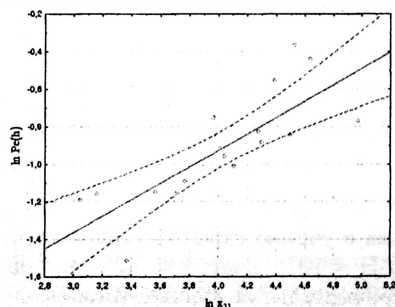
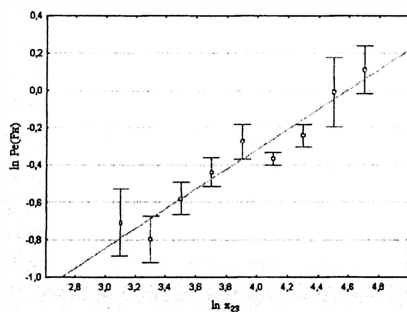


Рис. 4. Связь между критериями Пекле $Re_{(F_{пр})}$, $Re_{(h)}$ и давления дуги π_{23}

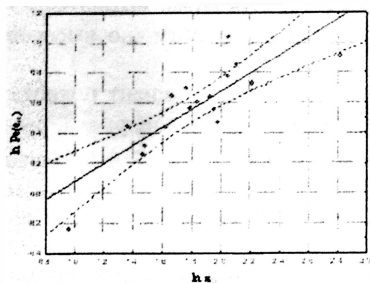


Рис. 5. Связь между критериями Пекле $Pe_{(e_{ш})}$ и Кристенсена K_{Cr}

Аналогично с доверительной вероятностью 0,95 получены критериальные зависимости между соответствующими критериями для глубины проплавления (10) и ширины шва (11).

$$\ln\left(\frac{hV_{cs}}{a}\right) = -2,673 + 0,473 \ln\left(\frac{q^2 V_{cs}}{(T\lambda)^2 ad_s}\right), \quad (10)$$

$$\ln\left(\frac{e_{ш} V_{cs}}{a}\right) = -0,519 + 0,598 \ln\left(\frac{q V_{cs}}{T\lambda a}\right). \quad (11)$$

Проверка адекватности полученных выражений по критерию Фишера показала, что уравнения статистически значимы для доверительной вероятности 0,95. Из выражений 10, 11 получили зависимости для расчета глубины проплавления и ширины шва, (12) и (13) соответственно:

$$h = e^{-2,673} \left(\frac{q}{T\lambda}\right)^{0,874} \left(\frac{a}{V_{cs}}\right)^{0,563} \frac{1}{d_s^{0,427}}, \quad (12)$$

$$e_{ш} = e^{-0,519} \left(\frac{q}{T\lambda}\right)^{0,598} \left(\frac{a}{V_{cs}}\right)^{0,402}. \quad (13)$$

Известно, что площадь проплавления основного металла может быть определена как функция параметров режима, теплофизических свойств свариваемого металла с учетом полного теплового к.п.д. процесса расплавления η_{np} по выражению $F_{np} = \eta_{np} \cdot I_{cs} U_d / H \gamma W_{cs}$, где ΔH – энтальпия (теплосодержание) жидкого металла с учетом скрытой теплоты плавления. Приняв по усредненным данным $\Delta H = 1075$ Дж/г, $\gamma = 7,25$ г/см³ для высокопрочного чугуна, обработкой экспериментальных данных установлено, что при доверительной вероятности 0,95 полный тепловой к.п.д. процесса расплавления высокопрочного чугуна при сварке неплавящимся электродом импульсной дугой в нижнем положении составляет 18%.

Исследованиями установлено (Рис. 6), что с ростом скорости подачи присадки от 0,66 до 1,36 см/с увеличивается ширина шва на 1...1,5 мм, высота вы-

После преобразования критериальной зависимости

$$\ln\left(\frac{\sqrt{F_{np}} V_{cs}}{a}\right) = -2,37 + 0,51 \ln\left(\frac{q^2 V_{cs}}{(T\lambda)^2 ad_s}\right), \quad (8)$$

получили выражение для расчета F_{np}

$$F_{np} = e^{-4,67} \left(\frac{q}{T\lambda}\right)^{2,04} \frac{a}{V_{cs} d_s}, \quad (9)$$

обеспечивающее среднюю относительную ошибку расчета 12%.

пуклости растет незначительно, а глубина проплавления остается примерно постоянной.

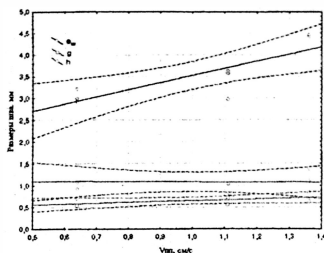


Рис. 6. Влияние скорости подачи присадочной проволоки $V_{пр}$ на размеры сварного шва: ширину шва, высоту усиления и глубину проплавления ($d_n = 1,2$ мм, $I_n = 80 \dots 90$ А, $I_u = 140 \dots 150$ А, $U_{cp} = 13$ В, $V_{ca} = 0,33$ см/с, $d_s = 3$ мм, $La = 4$ мм).

Таблица 2.

Формулы для расчета основных геометрических размеров шва по заданным параметрам режима импульсной сварки с присадкой

Нижнее положение	Потолочное положение
$h = \frac{a}{V_{ca}} e^{-3,0715 \left(\frac{q^2 V_{ca}}{(T\lambda)^2 ad_s} \right)^{0,4719}}$	$h = \frac{a}{V_{ca}} e^{-5,123 \left(\frac{q^2 V_{ca}}{(T\lambda)^2 ad_s} \right)^{0,81}}$
$e_n = \frac{a}{V_{ca}} e^{-0,6404 \left(\frac{q^2 V_{ca}}{(T\lambda)^2 ad_s} \right)^{0,2066}}$	$e_n = \frac{a}{V_{ca}} e^{-3,63 \left(\frac{q^2 V_{ca}}{(T\lambda)^2 ad_s} \right)^{0,84}}$
$F_{ш} = \left(\frac{a}{V_{ca}} e^{-2,3235 \left(\frac{q^2 V_{ca}}{(T\lambda)^2 ad_s} \right)^{0,3926}} \right)^{0,5}$	$F_{ш} = \left(\frac{a}{V_{ca}} e^{-4,13 \left(\frac{q^2 V_{ca}}{(T\lambda)^2 ad_s} \right)^{0,77}} \right)^{0,5}$
Вертикальное положение	Нижнее положение, 30град. на подъем
$h = \frac{a}{V_{ca}} e^{-2,673 \left(\frac{q^2 V_{ca}}{(T\lambda)^2 ad_s} \right)^{1,127}}$	$h = \frac{a}{V_{ca}} e^{-2,39 \left(\frac{q^2 V_{ca}}{(T\lambda)^2 ad_s} \right)^{0,654}}$
$e_n = \frac{a}{V_{ca}} e^{-1,6 \left(\frac{q^2 V_{ca}}{(T\lambda)^2 ad_s} \right)^{0,982}}$	$e_n = \frac{a}{V_{ca}} e^{-1,31 \left(\frac{q^2 V_{ca}}{(T\lambda)^2 ad_s} \right)^{0,661}}$
$F_{ш} = \left(\frac{a}{V_{ca}} e^{-2,5 \left(\frac{q^2 V_{ca}}{(T\lambda)^2 ad_s} \right)^{1,01}} \right)^{0,5}$	$F_{ш} = \left(\frac{a}{V_{ca}} e^{-1,77 \left(\frac{q^2 V_{ca}}{(T\lambda)^2 ad_s} \right)^{0,63}} \right)^{0,5}$

Вывод формул для расчета высоты усиления (выпуклости) шва при сварке в вертикальном и потолочном положениях проводили, используя критерий Бонда $\pi_b = g, L^2 \Delta p / \sigma$. После статистической обработки экспериментальных данных получили коэффициенты зависимостей между соответствующими критериями и после раскрытия выражений получили следующее, Таблица 3. Случайную ошибку при использовании полученных выражений определяли по «пра-

вину трех сигм» с учетом максимальных отклонений по сварочному току в 5 А, по напряжению на дуге в 0,5 В, по скорости сварки в 0,01 см/с.

Таблица 3.

Формулы для расчета высоты усиления (выпуклости) шва по заданным параметрам режима импульсной сварки с присадкой

Потолочное положение	Вертикальное положение
$g = 0,1 \frac{a}{V_{\text{св}}} \left(\frac{g, E^2 \rho}{\sigma} \right)^{-0,123} \left(\frac{q^2 V_{\text{св}}}{(T\lambda)^2 ad} \right)^{0,6}$	$g = 0,155 \frac{a}{V_{\text{св}}} \left(\frac{g, E^2 \rho}{\sigma} \right)^{-0,137} \left(\frac{q^2 V_{\text{св}}}{(T\lambda)^2 a} \right)^{1,186}$

Полученные значения доверительных интервалов позволяют считать, что рассчитывать основные геометрические размеры шва по предложенным выражениям возможно с достаточной для практического применения точностью при случайных отклонениях параметров режима.

Полученные зависимости между размерами сварного шва и параметрами режима сварки использованы для построения карт качества и выбора по ним рациональных параметров режима сварки.

Как пример, на Рис. 7 приведена карта качества сварного соединения из ВЧШГ типа С2 толщиной $s = 4$ мм. На карте область формирования шва соединений в координатах $I_{\text{св}}(A) - V_{\text{св}}$ (см/с) оценивается по области рациональных соотношений «глубина проплавления» с 95%-ной доверительной вероятностью.

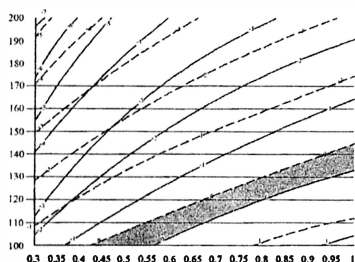
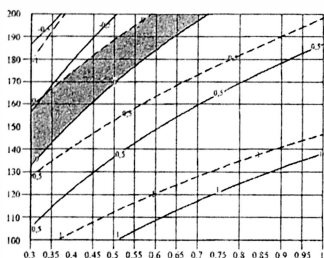
Прожоги отражаются отрицательными значениями Δh , непровар – положительными Δh , а качественное соединение С2 по области рациональных соотношений «глубина проплавления» будет формироваться в диапазоне режимов, ограниченных значениями $h = 0$.

Прожоги отражаются отрицательными значениями Δh , непровар – положительными Δh , а качественное соединение С2 по области рациональных соотношений «глубина проплавления» будет формироваться в диапазоне режимов, ограниченных значениями $h = 0$.

Рис. 7. Область $I_{\text{св}} - V_{\text{св}}$ формирования соединения С2 по частному критерию «глубина проплавления» при доверительной вероятности 95%; $s = 4$ мм; $b = 1$ мм; $d = 1,2$ мм; --- $\Delta h = s \cdot m - (h + \delta h)$; - - $\Delta h = s \cdot m - (h - \delta h)$

Большой информативностью обладают комплексные критерии качества,

такие, как коэффициенты формы проплавления $\psi_{\text{пр}} = e_{\text{ш}}/h$ и формы выпуклости $\psi_{\text{в}} = e_{\text{ш}}/g$ для С2. Рассчитывая их с применением полученных в работе формул и учетом доверительного интервала при доверительной вероятности 95% по дисперсии, определили область качества, рис. 8. Рис. 8. Область $I_{\text{св}} - V_{\text{св}}$ формирования соединения С2 по критерию «коэффициент формы проплавления» при доверительной



вероятности 95%, где $s = 4$ мм; $b = 1$ мм; $d = 1,2$ мм; $L = 12$ мм; $(\psi_{\pi} + \delta\psi_{\pi})$ – штриховая линия; $(\psi_{\pi} - \delta\psi_{\pi})$ – сплошная линия

В четвертой главе представлены механические характеристики полученных соединений и внедрение результатов исследований в производство.

При переходе на технологию сварки ВЧИГ на импульсных режимах технолог известные ему для изготовления конкретного изделия основные параметры режима – значения сварочного тока, скорости сварки, скорости подачи прищадочной проволоки – вводит в программу. Далее вводятся значения параметров, характерные для импульсной сварки: ток импульса, ток паузы, коэффициент жесткости режима.

Если полученные значения h , e , F_{np} и g не устраивают специалистов, проводится повторный расчет по измененным параметрам режима сварки с учетом их возможных диапазонов варьирования.

В качестве примера сравнение результатов расчета и экспериментальных данных для основных пространственных положений приведено в Таблице 4, внешний вид макрошлифов и расчетные данные основных геометрических размеров швов, сваренных в нижнем, потолочном, вертикальном положениях и в нижнем 30° на подъем, в совмещенном виде показаны на Рис. 9.

Таблица 4.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных геометрических размеров сварного шва.

Нижнее положение				Потолочное положение			
Геометрический размер	Расчетное значение	Экспериментальное значение	Относительная ошибка, %	Геометрический размер	Расчетное значение	Экспериментальное значение	Относительная ошибка, %
Глубина проплавления, мм	3,23	3,33	3,01	Глубина проплавления, мм	3,01	3,12	3,65
Ширина шва, мм	5,17	5,22	0,97	Ширина шва, мм	4,99	4,80	3,80
Площадь проплавления, мм ²	12,69	12,60	0,71	Площадь проплавления, мм ²	11,13	10,87	2,34
Вертикальное положение				Нижнее положение, 30 град. на подъем			
Геометрический размер	Расчетное значение	Экспериментальное значение	Относительная ошибка, %	Геометрический размер	Расчетное значение	Экспериментальное значение	Относительная ошибка, %
Глубина проплавления, мм	2,99	3,03	1,32	Глубина проплавления, мм	3,11	3,04	1,08
Ширина шва, мм	4,81	5,05	4,98	Ширина шва, мм	5,00	5,11	2,15
Площадь проплавления, мм ²	11,77	12,01	2,00	Площадь проплавления, мм ²	12,03	12,21	1,47

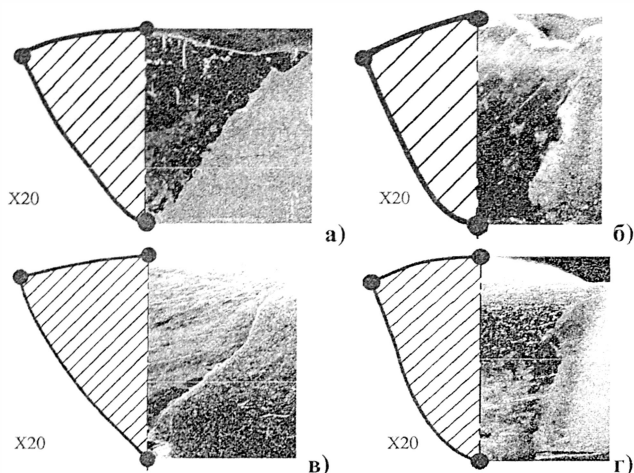


Рис. 9. Сравнение расчетных значений и экспериментальных данных основных геометрических размеров сварных швов: а) нижнее положение, $I_{св} = 160$ А ; $U = 14$ В; $V_{св} = 1,36$ см/с; $V_{np} = 1,36$ см/с; б) потолочное положение, $I_{св} = 150$ А ; $U = 14$ В; $V_{св} = 1,21$ см/с; $V_{np} = 0,66$ см/с; в) вертикальное положение, $I_{св} = 140$ А ; $U = 13$ В; $V_{св} = 1,13$ см/с; $V_{np} = 0,66$ см/с; г) нижнее положение, 30° на подъем, $I_{св} = 160$ А; $U = 14$ В; $V_{св} = 1,30$ см/с; $V_{np} = 0,89$ см/с

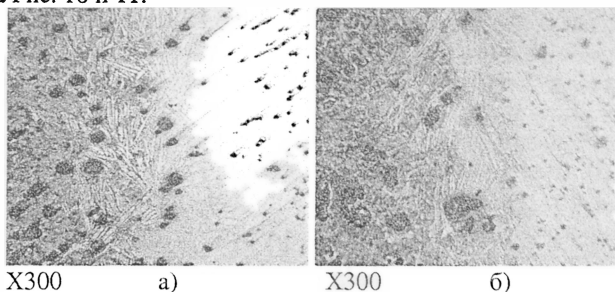
Анализ практической деятельности предприятий, занимающихся сваркой ВЧППГ, позволил установить, что механические характеристики сварных соединений, полученных на импульсных режимах, превышает аналогичные, полученные при сварке токами неизменной величины.

При сварке без предварительного подогрева предел прочности увеличился на 1,1...1,7%, угол загиба на 8,2...9,1%. При сварке с предварительным подогревом 290°C без термообработки предел прочности увеличился на 6...7,9%, угол загиба на 45,5...52,3%. При сварке с предварительным подогревом 290°C с последующей термообработкой предел прочности увеличился на 2,8...3,7%, угол загиба на 21...25%.

Металлографические исследования сварных швов ряда серийных изделий, выпускаемых предприятиями Липецка и Липецкой области с использованием импульсной технологии, не выявили каких-либо отклонений, вызванных особенностями импульсного режима, за исключением явно выраженного уменьшения ширины зоны сплавления «2б» со стороны основного металла.

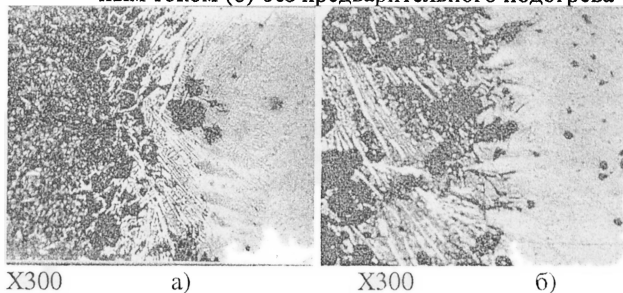
Относительная величина уменьшения ширины зоны «2б» зависит от параметров режима сварки и пространственного положения сварного шва. При этом во всех случаях зафиксировано сужение зоны «2б» в пределах 8...12%. На ряде швов уменьшение ширины зоны «2б» достигало 20%.

Типичные микроструктуры соединений из ВЧШГ, выполненных на обычных ($I_{св} = 160 \text{ А}$; $U = 14 \text{ В}$; $V_{св} = 1,36 \text{ см/с}$; $V_{пр} = 0,66 \text{ см/с}$; $d_n = 1,2 \text{ мм}$; $d_s = 3 \text{ мм}$; $La = 4 \text{ мм}$) и импульсных режимах ($I_n = 90 \text{ А}$; $I_u = 150 \text{ А}$; $U_{ср} = 13 \text{ В}$; $V_{св} = 1,36 \text{ см/с}$; $V_{пр} = 0,66 \text{ см/с}$; $tu/tn = 1,6$; $d_n = 1,2 \text{ мм}$; $d_s = 3 \text{ мм}$; $La = 4 \text{ мм}$), приведены на Рис. 10 и 11.



Ширина зоны ледебурита (а) $66,67 \pm 1,05 \text{ мкм}$, (б) $60,38 \pm 2,42 \text{ мкм}$.

Рис. 10. Структура соединения при сварке непрерывным (а) и импульсным током (б) без предварительного подогрева



Ширина зоны ледебурита (а) $76,60 \pm 1,17 \text{ мкм}$, (б) $69,25 \pm 1,79 \text{ мкм}$.

Рис. 11. Структура соединения при сварке непрерывным (а) и импульсным током (б) с предварительным подогревом 290°C

В результате внедренной технологии количество продукции, возвращаемой на переделку и доработку, сократилось. Сокращение процента брака на упомянутых выше предприятиях без указания их точного названия приведено в Таблице 5.

Таблица 5.

Сокращение процента брака за 1 полугодие 2013 г. на предприятиях, выпускающих продукцию из ВЧШГ

Предприятие	Кол-во изделий, шт	Брак при сварке на токах неизменной величины, шт	Брак при сварке на импульсном токе, шт	Сокращение брака, %
А	1800	90	50	с 5 до 2,77
Б	1100	55	35	с 5 до 3,18
В	800	35	20	с 4,37 до 2,5

Основные выводы и результаты работы

1. Проанализированы причины нестабильного качества сварных швов трубных изделий из ВЧШГ при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом на токах неизменной величины, связанные с повышенной жидкотекучестью чугуна, приводящей к образованию таких дефектов, как наплавы, превышение проплава (провисы), натеки (утяжины), подрезы, появление которых особенно характерно при сварке в потолочном и вертикальном положениях.
2. Изучение современных и прогрессивных технологий сварки показало, что перспективным направлением повышения качества сварных соединений из ВЧШГ является применение импульсной аргонодуговой сварки с использованием современных источников питания, позволяющей регулировать и дозировать тепловложение в сварной шов.
3. На основе литературных данных и проведенного анализа технологической подготовки и выполнения аргонодуговой сварки ВЧШГ на импульсных режимах установлено, что не существует математических моделей для расчета основных геометрических размеров сварных швов по заданным параметрам режима сварки.
4. Статистическим планированием и обработкой экспериментальных данных с использованием теории подобия получены уравнения, позволяющие рассчитывать геометрические размеры сварных швов в зависимости от основных параметров режима сварки при импульсной аргонодуговой сварке ВЧШГ для основных пространственных положений.
5. Изучено влияние коэффициентов жесткости режима и асимметрии сварочного тока при сварке на импульсных режимах на формирование геометрических размеров сварного шва и установлены диапазоны их допустимых значений, обеспечивающие качественное формирование сварного шва.
6. Установлено, что полный тепловой к.п.д. процесса импульсной аргонодуговой сварки ВЧШГ в нижнем положении без присадки составляет 18%.
7. Установлено, что разработанные модели обеспечивают расчет геометрических размеров сварных соединений из ВЧШГ при возможных отклонениях параметров режима сварки с точностью 88...95%, достаточной для практического применения процесса.
8. При разработке математической модели формирования высоты выпуклости в случаях сварки в положениях, отличных от нижнего, использован критерий Бонда, учитывающий силу поверхностного натяжения и силу тяжести металла сварочной ванны, что позволило достичь высокой точности расчетов по полученным уравнениям.
9. На базе полученных математических моделей разработаны карты качественного формирования стыковых сварных соединений типа С2, которые

используются при проектировании технологических процессов сборки и сварки и при изготовлении трубных изделий из ВЧШГ.

10. Результаты работы могут быть использованы при разработке технологий для сварки неповоротных стыков трубопроводов из ВЧШГ в условиях их монтажа.
11. Осуществлено промышленное внедрение разработанных технологий на трех специализированных предприятиях г. Липецка, что позволило повысить качество продукции и снизить количество дефектов в среднем в 2 раза.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Лебедев В.С. Расчет некоторых геометрических характеристик сварного шва при импульсной аргонодуговой сварке высокопрочного чугуна с шаровидным графитом // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2010. №1. С. 64-66. (0,5 п.л.)
2. Лебедев В.С. Исследование влияния основных параметров режима импульсной аргонодуговой сварки высокопрочного чугуна с шаровидным графитом на геометрические размеры шва // Сварка и диагностика. 2011. №5. С. 36-39. (0,5 п.л.)
3. Об опыте использования электротехнической системы TPS 3200 фирмы «FRONIUS» для импульсной сварки высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / В.С.Лебедев [и др.] // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2012. №1. С.53-55. (0,5 п.л.)
4. Возможности использования некоторых аппаратов фирмы КЕМРПИ для импульсной сварки высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / В.С.Лебедев [и др.] // Повышение эффективности металлургического производства: тезисы докладов XVII областной научно-технической конференции. Липецк: ЛГТУ, 2008. С. 10-11.
5. Некоторые проблемы сварки труб из высокопрочного чугуна в различных пространственных положениях / В.С.Лебедев [и др.] // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. Липецк, 2007. С. 13-14.
6. Особенности сварки высокопрочного чугуна с шаровидным графитом при использовании инверторных источников питания сварочной дуги / В.С.Лебедев [и др.] // Повышение эффективности металлургического производства: тезисы докладов XVI областной научно – технической конференции. Липецк, 2007. С. 21-24.
7. Лебедев В.С. Исследование формирования наплавленного валика при аргонодуговой сварке высокопрочного чугуна с шаровидным графитом на им-

пульсных режимах // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сборник научных трудов. Липецк, 2008. С. 31-32.

8. Лебедев В.С., Бабкин А.С., Лебедев С.В. Исследование возможности импульсной аргонодуговой сварки высокопрочного чугуна с шаровидным графитом // Славяновские чтения: сборник научных трудов. Липецк, 2009. С. 12-16.

9. Лебедев В.С. Проблемы изготовления сварных трубопроводов из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом в условиях современного строительства // Эффективные конструкции, материалы и технологии в строительстве и архитектуре: сборник статей международной конференции. Липецк: ЛГТУ, 2009. С. 26-28.

10. Лебедев В.С. Металлургические особенности сварочной ванны на высокопрочном чугуне с шаровидным графитом // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сборник научных трудов. Липецк: ЛГТУ, 2010. С. 29-31.

11. Лебедев В.С., Бабанов А.А., Кашкаров А.Б. Технологические особенности сварки фасонных узлов больших диаметров из высокопрочного чугуна // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сборник научных трудов. Липецк: ЛГТУ, 2010. С. 33-36.

12. Модернизация установки АДСВ-5 для проведения импульсной аргонодуговой сварки высокопрочного чугуна с шаровидным графитом В.С.Лебедев [и др]. // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. Липецк: ЛГТУ, 2010. С. 16-17.

13. Лебедев В.С., Бабанов А.А., Лебедев С.В. Модернизация установки АДСВ-5 для выполнения вертикальных швов аргонодуговой сваркой // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. Липецк: ЛГТУ, 2012. С. 8-9.

14. Лебедев В.С. Исследование возможности определения математическими методами геометрических характеристик сварного шва при импульсной аргонодуговой сварке высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ) Актуальные проблемы технических наук. Материалы областной научно-практической конференции. Липецк: ЛГТУ, 2009. 140 с.

15. Лебедев В.С. Некоторые экологические аспекты сварки высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Экология Центрально-Черноземной области Российской Федерации. Липецк: ЛЭГИ, 2010, №2.