

УДК 621.791.75.03-52

Юшин Алексей Александрович

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ СВАРОЧНЫХ СВОЙСТВ
УСТАНОВОК ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ
С УПРАВЛЯЕМЫМ КАПЛЕПЕРЕНОСОМ

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, профессор
ГЛАДКОВ Эдуард Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ЯМПОЛЬСКИЙ Виктор Модестович
кандидат технических наук, доцент
ХАВАНОВ Владимир Александрович

Ведущее предприятие: ЗАО «Научно-производственная фирма «ИТС»

Защита диссертации состоится «15» марта 2012г. в 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

Телефон для справок (499) 267-09-63

Автореферат разослан «07» февраля 2012 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.141.01,
доктор технических наук, доцент

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1997129

Юшин А.А. Разработка критер

А.В. Коновалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время рядом российских и зарубежных фирм – производителей сварочного оборудования выпускаются установки, реализующие различные алгоритмы управления переносом электродного металла при сварке плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG), такие как CMT (Fronius, Австрия), STT (Lincoln Electric, США), ColdArc (EWM, Германия), УКП (Технотрон, Россия), ВКЗ (ИТС, Россия) и т.д. Как правило, данные установки включают в себя быстродействующие инверторные источники питания, способные с частотой, достигающей сотен Гц, управлять параметрами режима сварки (время короткого замыкания, скорость нарастания тока во время короткого замыкания и др.). Однако, на данный момент не существует комплексной методики, которая могла бы объективно оценивать сварочные свойства оборудования, реализующего управляемый перенос электродного металла. В этой связи разработка критериев объективной оценки, а также методики оперативной оценки сварочных свойств таких установок являются актуальными задачами.

Цель работы. Повышение объективности оценки сварочных свойств установок на базе инверторных источников питания, реализующих управляемый перенос электродного металла.

Объект исследования – технологический процесс сварки с управляемым каплепереносом электродного металла. Предмет исследований – сварочное оборудование на базе инверторных источников питания, реализующее управляемый перенос электродного металла при механизированной сварке плавящимся электродом в защитных газах.

Для достижения поставленной цели в процессе выполнения работы необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести анализ сварочных процессов, технологических возможностей, а также методов оценки сварочных свойств современного оборудования для механизированной сварки сплошной электродной проволокой в защитных газах.

2. Разработать методику и критерии объективной оценки сварочных свойств установок на базе инверторных источников питания, реализующих управляемый перенос электродного металла.

3. Разработать алгоритм и программные средства для оперативной статистической обработки осциллограмм тока и напряжения при сварке.

4. Выполнить исследования по оценке сварочно-технологических свойств оборудования на основе инверторных источников питания с применением предлагаемой методики.

Метод исследований. Решение задач осуществляли на основе аналитических и численных расчетов, экспериментальных исследований, анализа результатов экспериментов с применением стандартных пакетов прикладных программ (MatLab, SignalExpress и т.д.).

Для проведения исследований был разработан экспериментальный стенд, оснащенный 2-х канальным регистратором сварочных параметров AWR-224, цифровым запоминающим осциллографом DPO 3014, лазерным

профилометром поверхности РИФТЭК РФ 620, микрофоном, а также датчиком с фотодиодом.

Качество сварных соединений оценивали на основании металлографических исследований.

Научная новизна работы.

1. Установлено, что для объективной оценки сварочных свойств оборудования на базе инверторных источников питания, реализующего управляемый перенос электродного металла, необходимо использовать комплексный критерий оценки сварочных свойств $\gamma_{\text{су}}^{\text{CC}}$, представляющий собой аддитивную свертку с учетом весовых показателей частных критериев, состоящих из линейных комбинаций коэффициентов вариации основных энергетических и технологических параметров процесса сварки.

2. Частные критерии, входящие в состав $\gamma_{\text{су}}^{\text{CC}}$, рассчитываются в 3-х информативных частотных диапазонах (низком – от 0 до 10 Гц, среднем – от 0 до 500 Гц, высоком – от 500 до 5000 Гц), отражающих динамику физических процессов в элементах сварочного контура источник питания – дуга – сварочная ванна.

3. На базе разработанных критериев предложена методика оперативной дифференцированной оценки сварочных свойств установок с инверторными источниками питания, которая содержит перечень основных информативных параметров режима сварки, обеспечивающий ее инвариантность к различным алгоритмам управления процессом сварки с короткими замыканиями и импульсной сварки.

Практическая значимость работы. Заключается в разработке методики и программного продукта для оперативных расчетов и объективной оценки сварочных свойств оборудования, реализующего управляемый перенос электродного металла, которые можно применять как при оценке сварочных свойств существующего оборудования, так и при разработке и производстве нового оборудования.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждены на Всероссийской конференции «Будущее машиностроения России» (Москва, 2010, 2011); на научных семинарах кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2010), кафедры «Сварка и мониторинг нефтегазовых сооружений» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина (Москва, 2011), кафедры «Оборудование и технологии сварочного производства» Московского государственного индустриального университета (Москва, 2011).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 6 статьях, из них 4 статьи в научных журналах, входящих в перечень утвержденных ВАК РФ; получено положительное решение о выдаче патента на изобретение «Способ тестирования установки для электродуговой сварки» (заявка № 2010125763 от 24.06.2010).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка использованных источников из

122 наименований; содержит 143 страницы машинописного текста, 47 рисунков, 16 таблиц, 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, поставлена цель исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, а также сформулирована научная новизна.

В первой главе приведен анализ рынка сварочного оборудования для дуговой сварки и особенности его развития, классификация оборудования по технологическому применению, а также особенности работы оборудования с управляемым переносом электродного металла.

Показано, что в России спрос на специализированное оборудование мировых лидеров производства сварочной техники (Lincoln Electric, Fronius, Esab, Kemppi, Thermadyne и т.д.) стабильно высок, так как удовлетворяется основное требование потребителя к данному оборудованию – обеспечение стабильности качества сварных соединений при выполнении ответственных работ, в частности, на опасных производственных объектах, подконтрольных Ростехнадзору. Специализированные сварочные установки (СУ – комплект оборудования, необходимый для реализации конкретного метода сварки – STT, CMT, ВКЗ и т.д., включающий в себя источник питания, механизм подачи проволоки (СО) и т.д.) комплектуются в основном инверторными источниками питания, реализующими различные алгоритмы управления переносом расплавленного электродного металла через дуговой промежуток (методы сварки). В последние годы появился целый ряд таких методов: хорошо известный STT фирмы Lincoln Electric (США), FastROOT – сварка модифицированной короткой дугой фирмы KEMPPi (Финляндия), «холодный» каплеперенос CMT (Cold Metal Transfer) фирмы Fronius International GmbH (Австрия), Force Arc фирмы EWM (Германия) и др.

Одновременно с распространением и широким применением данного типа оборудования на предприятиях, возникает необходимость оценки сварочных свойств данных СУ. Используемая в настоящее время экспертами методика (РД-03-614-03) субъективна. Оценку сварочных свойств осуществляют с применением показателей из ГОСТ 25616-83, который разрабатывался, когда в промышленности широко применяли источники питания, работающие на частоте 50 Гц; заложенные в нем критерии оценки сварочных свойств не способны объективно оценить сварочные свойства современных СУ.

В России и за рубежом проводились и проводятся работы в направлении объективной оценки сварочных свойств СУ (В.С. Милютин, М.В. Карасев, В.В. Кривин, В.А. Букаров, Ю.Н. Ланкин, В.Е. Пономарев, Ю.Н. Сараев, И.И. Заруба, А.Г. Потапьевский, Н.Г. Дюргеров, Д.Х. Сагиров, D. Yarr, и др.), однако авторы данных работ не ставили перед собой задачу разделения параметров режима по частотным диапазонам, определяющим разбрызгивание металла, стабильность горения дуги, а также формирования сварного соединения. Поэтому необходимо было разработать комплексную методику

оперативной и объективной дифференциальной оценки сварочных свойств современного оборудования, реализующего управляемый каплеперенос, перечень которых дан в ГОСТ 25616 и РД 03-614-03 для механизированной сварки.

Значения косвенных показателей сварочных свойств могут быть получены из осциллограмм тока и напряжения, записанных при сварке контрольных сварных соединений. Необходимо только правильно разработать алгоритм их статистической обработки.

Вторая глава посвящена определению частных критериев и обобщенного показателя объективной оценки сварочно-технологических свойств СУ ($\gamma_{\text{СУ}}^{\text{CC}}$), а также разработке методики объективной оценки сварочных свойств.

Рассмотрена оценка сварочных свойств оборудования, в котором выполняется условие принципиальной устойчивости контура источник питания – дуга. Система источник питания – дуга принципиально устойчива, если при воздействии на нее малых возмущений по окончании переходного процесса она приходит в установившееся состояние, характеризующееся равенством подаваемой и потребляемой энергии и малыми отклонениями тока и напряжения от исходных значений. Математически данное условие выражается неравенством $k_y = \rho_d - \rho_n > 0$, где $\rho_d = dU_d/dI_d$ и $\rho_n = dU_n/dI_n$ – дифференциальные сопротивления дуги и источника питания соответственно.

Под стабильностью всего процесса сварки (в соответствии с таблицей 12 РД 03-614-03) понимают стабильность следующих параметров: горения дуги (п. 2 табл. 12), переноса электродного металла в сварочную ванну, напрямую характеризующего разбрызгивание металла (п. 3 табл. 12) и геометрических размеров сварного соединения (п. 4 табл. 12). Для характеристики стабильности процесса сварки можно использовать определенный набор технологических параметров в цикле и микроциклах (образование капли, перенос капли в сварочную ванну) процесса сварки (время короткого замыкания и горения дуги, максимальный ток короткого замыкания и др.), которые зависят от способа сварки и характера переноса расплавленного электродного металла в дуговом промежутке (с короткими замыканиями или без коротких замыканий).

Для реализации управляемого каплепереноса электродного металла необходимо управление силами, действующими на каплю, которое производят при помощи высокоскоростных (измеряемых миллисекундами) изменений параметров режима сварки (резкое снижение тока или напряжения, возвратное движение электродной проволоки и т.д.).

При этом геометрия проплавления и форма сварочной ванны из-за инерционности физических процессов в них за один цикл сварки с короткими замыканиями (импульсами) практически не изменяется. Например, глубина проплавления изменяется только при отклонениях среднего тока длительностью в десятки доли секунды (в зависимости от режима сварки).

Комплексное влияние контролируемых и неконтролируемых возмущений на характер переноса электродного металла через дуговой промежуток в сварочную ванну при механизированной сварке можно оценить

через набор параметров (частота, максимальный ток и время КЗ; время и средний ток горения дуги и т.д.), полученных при анализе энергетических характеристик процесса по осциллограммам тока и напряжения на дуге.

В основу разработанной методики был заложен следующий подход. Известно, что используя осциллограммы тока и напряжения, записанные при сварке, можно выделить в них отдельные информативные частотные диапазоны, отражающие различия динамики физических процессов, протекающих в элементах сварочного контура источник питания – дуга – сварочная ванна.

Каждый из выделенных диапазонов, подлежащих анализу, характеризуется следующим образом.

Первый диапазон (ВЧ) – высокочастотный, частоты 500 – 5000 Гц, характеризует пространственную устойчивость дуги, физически связанную с динамикой перемещения анодного и катодного пятен при горении дуги (времена менее 0,001 с).

От пространственной устойчивости дуги зависит направление перехода капли с поверхности электрода в сторону сварочной ванны, что, в свою очередь, влияет на разбрызгивание электродного металла и появлению флуктуаций на поверхности сварочной ванны.

Второй диапазон (СЧ) – среднечастотный, частоты 0 – 500 Гц, характеризует физику процессов каплеобразования и частоту переноса капель электродного металла в дуговом промежутке (времена менее 0,01 с).

Третий диапазон (НЧ) – низкочастотный, частоты 0 – 10,0 Гц, отражает влияние длительных отклонений основных параметров режима сварки (тока, напряжения, скорости подачи электродной проволоки, вылета электрода и т.д.) от номинального значения на изменение геометрических размеров и формы сварочной ванны (шва) с учетом инерционности тепловых процессов при сварке. Данный диапазон характеризует частоту колебания размеров сварочной ванны (времена менее 0,1 с).

В настоящей работе частные критерии Θ^I , Θ^{II} , Θ^{III} , по которым можно дать количественную оценку сварочных свойств оборудования (перечень сварочных свойств в соответствии с РД 03-614-03: стабильность процесса сварки (Θ^I), разбрызгивание металла (Θ^{II}), качество формирования шва (Θ^{III})) с учетом нестабильности параметров режима при сварке предлагается вычислять в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 1.

Вычисление абсолютного значения соответствующего показателя сварочных свойств выполняется по регрессионной модели (1), которая учитывает корреляционную связь между абсолютным показателем сварочных свойств и коэффициентами вариации параметров режима сварки в соответствующем частотном диапазоне:

$$g_M^j = g_0^j + A^j \sum_{i=1}^n K_{Vi}^j, \quad (1)$$



где $\mathcal{G}_M^j$ – модельная оценка значения абсолютного показателя j -го сварочного свойства, $\mathcal{G}_0^j$ – пороговое (минимальное) значение j -го показателя сварочного свойства, определяемое конкретным методом сварки; A^j – коэффициент пропорциональности, учитывающий суммарный вклад коэффициентов вариации в изменение параметра $\mathcal{G}_M^j$; $K_{v_i}^j$ – коэффициент вариации i -го параметра режима сварки j -го сварочного свойства. $i=1...n$ (n – количество параметров для оценки j -го сварочного свойства), $j=1...N$ (N – количество оцениваемых сварочных свойств по РД 03-614-03, в данной работе $N=3$).

Из формулы 1, получим следующее выражение для вычисления значений частных критериев Θ^j .

$$\Theta^j = \frac{\mathcal{G}_M^j - \mathcal{G}_0^j}{\mathcal{G}_0^j} = \frac{A^j \sum_{i=1}^n K_{v_i}^j}{\mathcal{G}_0^j}, \quad (2)$$

где $(\mathcal{G}_M^j - \mathcal{G}_0^j)$ – отклонение расчетного j -го модельного значения показателя сварочных свойств от минимально возможного.

Формула (2) удобна для расчета показателя сварочных свойств по осциллограммам тока и напряжения при сварке. Параметр A^j – рассчитывается с применением метода наименьших квадратов по экспериментальным данным при проведении тестовых испытаний соответствующей марки сварочного оборудования и метода сварки. Отношение $A^j / \mathcal{G}_0^j$ является константой для конкретного метода сварки (СМТ, СТТ, ВКЗ и т.д.), коэффициенты вариации рассчитываются по информации, полученной из осциллограмм.

Подставив в уравнение (2) значение коэффициентов вариации параметров режима получим следующие выражения для значений относительных показателей сварочных свойств по частным критериям Θ^j :

- стабильность процесса сварки (горение дуги)

$$\Theta^I = \frac{A^I}{\mathcal{G}_0^I} K_{v_i}^I, i=1 (K_{v_{U_d}}^I \text{ или } K_{v_{3\phi}}^I) \quad (3)$$

- разбрызгивание металла

$$\Theta^{II} = \frac{A^{II}}{\mathcal{G}_0^{II}} \sum_{i=1}^n K_{v_i}^{II}, i=1...n \quad (4)$$

- качество формирования шва:

1) анализ относительных отклонений геометрических размеров шва;

$$\Theta_p^{III} = \varepsilon_\Gamma \Theta_\Gamma^{III} + \varepsilon_{III} \Theta_{III}^{III}, \text{ где} \quad (5)$$

Θ_Γ^{III} – относительное отклонение глубины проплавления;

Θ_{III}^{III} – относительное отклонение ширины шва;

$\varepsilon_\Gamma, \varepsilon_{III}$ – весовые (экспертные) коэффициенты ($\varepsilon_\Gamma + \varepsilon_{III} = 1$).

$$\Theta_{\Gamma}^{\text{III}} = \frac{A_{\Gamma}^{\text{III}}}{g_{\Gamma 0}^{\text{III}}} \sum_{i=1}^n K_{\Gamma V_i}^{\text{III}}, i = 1 \dots n; \quad (6)$$

$$\Theta_{\text{ш}}^{\text{III}} = \frac{A_{\text{ш}}^{\text{III}}}{g_{\text{ш}0}^{\text{III}}} \sum_{j=1}^k K_{\text{ш} V_j}^{\text{III}}, j = 1 \dots k; \quad (7)$$

2) анализ относительных отклонений геометрических размеров формы шва по отношению $\frac{H}{B}$ (H – глубина проплавления, B – ширина шва);

$$\Theta_c^{\text{III}} = \frac{A_c^{\text{III}}}{g_{c0}^{\text{III}}} \sum_{i=1}^n K_{c V_i}^{\text{III}}, i = 1 \dots n, \quad (8)$$

n и k – количество параметров режима сварки для расчета коэффициентов вариации, принятых для модельной оценки сварочных свойств по частным критериям.

Далее вычисляется обобщенный показатель сварочных свойств:

$$\gamma_{\text{сy}}^{\text{cc}} = \sum_{j=1}^n \varepsilon^j \Theta^j, \quad (9)$$

где ε^j – весовой (экспертный) коэффициент j-го сварочного свойства ($\sum \varepsilon^j = 1$).

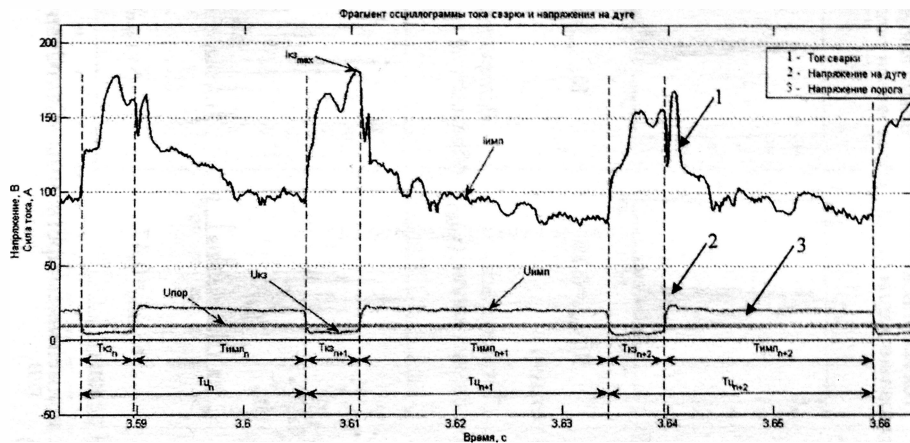
Таким образом, в зависимости от технологических задач, оценка сварочных свойств может выполняться как по обобщенному показателю ($\gamma_{\text{сy}}^{\text{cc}}$), с учетом экспертных коэффициентов (ε^j), так и дифференцированно по каждому сварочному свойству (Θ^j), с применением формул (3...8).

Третья глава посвящена экспериментальной проверке методики объективной оценки сварочных свойств установок, реализующих управляемый каплеперенос электродного металла.

С целью выполнения оперативной оценки сварочных свойств была разработана программа «СтатСвар 1.0», позволяющая выполнять вычисление коэффициентов вариаций параметров режима в различных частотных диапазонах, определять показатели сварочных свойств по частным критериям (Θ^I , Θ^{II} , Θ^{III}), а также выполнять расчет $\gamma_{\text{сy}}^{\text{cc}}$. Данная программа оптимизирована для работы практически с любыми форматами представления данных и может обрабатывать информацию непосредственно из файла записанного специализированным регистратором или осциллографом.

Для статистической обработки осциллограмм в различных частотных диапазонах программа разбивает осциллограмму на отдельные стадии процесса (микроциклы). Длительность этих стадий определяется задаваемым уровнем порога напряжения. На рисунке 2 показан пример осциллограммы тока (1) и напряжения (2), а также отмечено пороговое значение напряжения (3). По окончании вычислений программа выводит на экран монитора гистограммы параметров режима сварки, по которым можно определить разницу между качественным и некачественным процессами. На рисунке 3, в качестве

примера, приведены гистограммы, построенные для параметров режима сварки методом СМТ (для среднего частотного диапазона). Также программой создается текстовый файл, содержащий все рассчитанные параметры, который в дальнейшем может использоваться в качестве паспорта на СУ.



$T_{ц}$ – время полного цикла образования и переноса капли, $T_{имп}$ – время образования капли, $T_{кз}$ – время короткого замыкания дугового промежутка, $I_{кз\max}$ – максимальные значения тока короткого замыкания, $I_{имп}$ – средний ток образования капли, $U_{кз}$ – среднее напряжение при коротком замыкании, $U_{имп}$ – среднее напряжение при горении дуги (образовании капли)

Рис. 2. Пример определения стадий процесса дуговой сварки с короткими замыканиями

Проверочные эксперименты выполнялись на СУ TransPulsSynergic 3200 СМТ. После их выполнения с целью определения коэффициентов A^{II} , $A_{с0}^{III}$, по методу наименьших квадратов, были построены графики (рис. 4) аппроксимации линейной зависимостью связи показателей сварочных свойств с соответствующими коэффициентами вариаций для различных режимов сварки.

Далее была выполнена оценка сварочных свойств СУ фирм ИТС и Lincoln Electric, реализующих методы ВКЗ и STT, а также установки TransPulsSynergic 3200 СМТ, работающей в режиме импульсной сварки («один импульс – одна капля»).

Полученные на основе вычисленных в работе коэффициентов вариаций параметров режима сварки (K_{Vi}) значения показателей сварочных свойств, а также обобщенного показателя $\gamma_{СУ}^{CC}$: 2,07 для STT; 1,77 для СМТ; 1,47 для ВКЗ; 1,43 для «1 импульс – 1 капля» предлагается принять за эталонные и применять их в дальнейшем для оценки сварочных свойств оборудования различных марок, реализующих исследованные выше алгоритмы переноса электродного металла.

На основе обобщения полученных результатов была разработана методика оценки сварочных свойств установок АЗ+А8, АЗ+А5

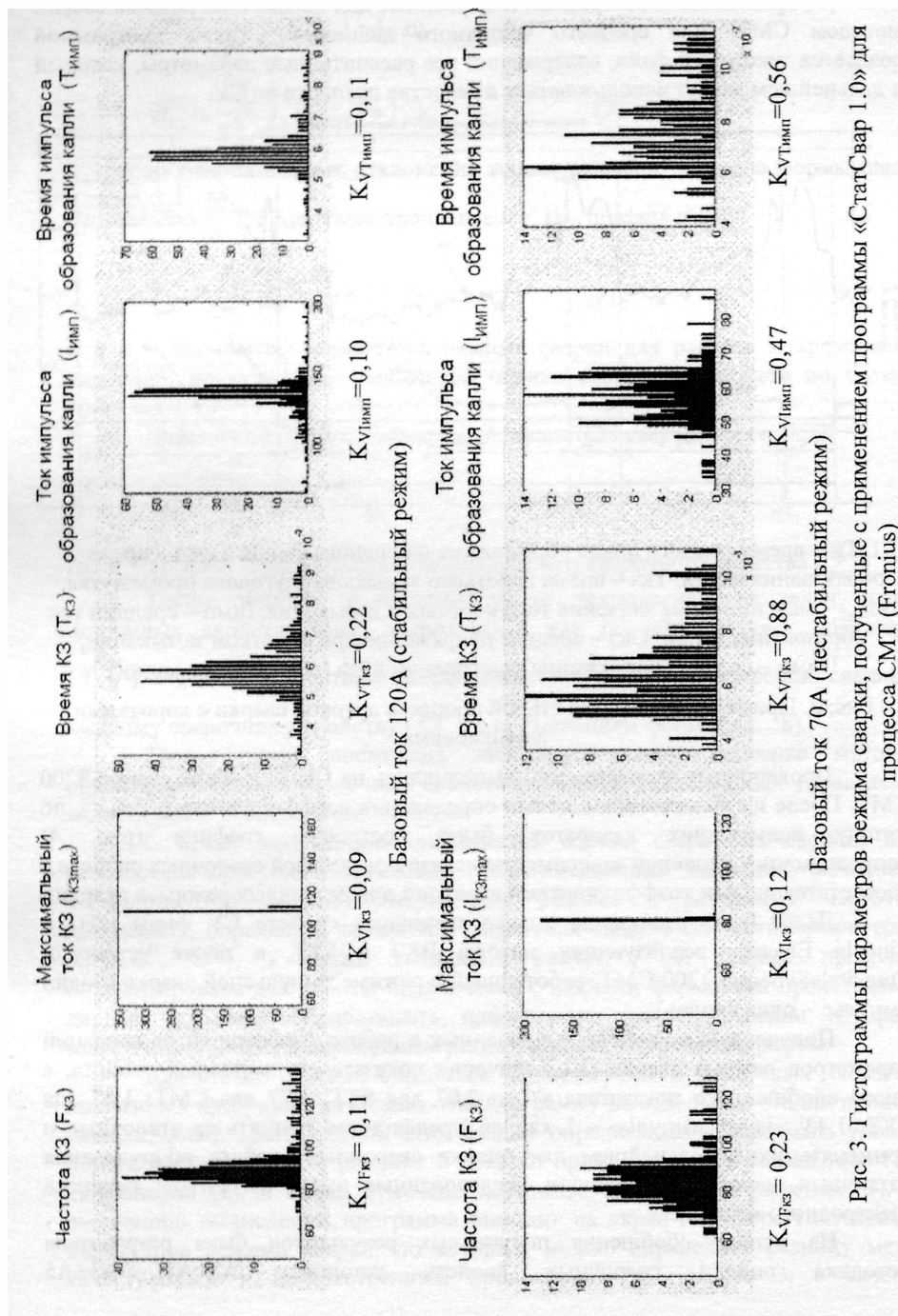


Рис. 3. Гистограммы параметров режима сварки, полученные с применением программы «СтатСвар 1.0» для процесса СМТ (Fronius)

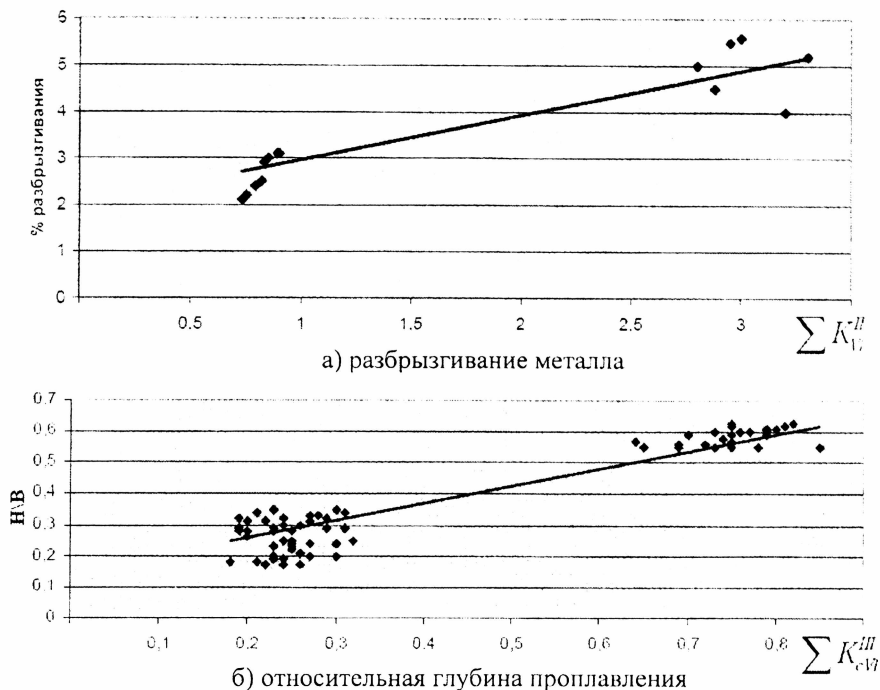


Рис. 4. Аппроксимация линейной зависимостью связи показателей сварочных свойств с соответствующими коэффициентами вариаций для различных режимов сварки

(классификация по РД 03-614-03) для механизированной сварки с управляемым каплепереносом в защитных газах и смесях сплошным плавящимся электродом.

Учитывая, что предложенный способ оценки сварочных свойств установок для электродуговой сварки соответствует критерию «промышленная применимость» (в соответствии с действующим законодательством РФ) была подана заявка на патент (№ 2010125763 от 24.06.2010) и получено положительное решение о выдаче патента на изобретение:

Четвертая глава посвящена отдельным примерам практической реализации разработанной методики для оценки стабильности сварочно-технологических свойств специализированных отечественных СУ, реализующих управляемый каплеперенос, и предназначенных для выполнения расширенных требований заказчиков к качеству сварки. Рассмотрена оценка сварочных свойств по предложенной методике новой СУ для механизированной сварки и наплавки плавящимся электродом в защитных газах и смесях с применением сетевой модульной структуры

управления с помехоустойчивым кодированием передаваемой информации – ПАРС Н-511 (рис. 5).

В настоящее время на территории РФ имеется большое количество

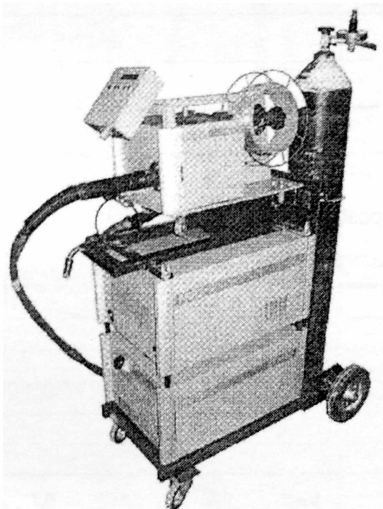


Рис. 5. Внешний вид установки ПАРС Н 511

магистральных трубопроводов нефти и газа выработавших свой ресурс на 60-70%, а это значит, что для поддержания их работоспособности требуется выполнение ремонта различных дефектов, возникающих при их эксплуатации.

Одним из распространенных дефектов является поверхностное поражение металла труб (коррозионное, механическое повреждение и т.д.). Традиционный метод ремонта – заварка повреждения (наплавка)

с применением ручной дуговой или механизированной сварки без остановки перекачки продукта. Основным ограничением сдерживающим более широкое распространение данного метода ремонта, является безопасность сварочных работ при ремонте трубопровода, работающего под давлением. Согласно нормативной документации максимально допустимое значение давления продукта при ремонте не должно превышать 2,5 МПа. Однако на практике большинство ремонтных работ проводится при давлении не более 1,5 МПа. Данное обстоятельство, прежде всего, связано с вероятностью возникновения прожогов, а также со значительной потерей прочности в области, ослабленной локальным воздействием дуги.

В момент выполнения ремонта, выборку (ослабленное место в стенке трубы) необходимо рассматривать как жестко закрепленную по контуру тонкостенную мембрану, т.е. технология наплавки должна обеспечивать следующие основные требования:

- минимальную глубину проплавления основного металла трубы в ослабленном месте и его минимальное перемешивание с присадочным металлом;

- недопустимость увеличения глубины проплавления свыше нормативного значения (стабильность глубины проплавления во время сварки);

- минимальные усадочные усилия при многослойной наплавке для исключения потери пространственной устойчивости восстанавливаемого участка (выборки) трубы;

- формирование поверхностного слоя с минимальными остаточными напряжениями для сохранения геометрического размера внутреннего диаметра трубы в поле ее допуска.

Применяя существующие методики оценки сварочных свойств, не возможно оценить стабильность глубины проплавления и тепловложения (а следовательно и усадочных усилий) на всем временном интервале выполнения сварного соединения.

Таким образом, основными актуальными проблемами при выполнении ремонтно-восстановительных наплавов в различных пространственных положениях являются создание СУ, позволяющих реализовывать управляемый каплеперенос с регулируемым тепловложением, а также объективная оценка стабильности геометрических размеров сварного шва и тепловложения во время сварки.

Для создания СУ, полностью удовлетворяющей приведенным выше требованиям, совместно со специалистами ООО АПС «РАДИС», была разработана установка ПАРС Н-511. При разработке были заложены следующие основные принципы:

- блочно-модульное построение с применением сетевой модульной структуры управления с помехоустойчивым кодированием передаваемой информации;

- возможность быстрого перепрограммирования элементов оборудования с единого пульта управления;

- использование различных высокоскоростных алгоритмов управления отдельными микроциклами и стадиями процесса с целью реализации цифрового управления капельным переносом с возможностью регулирования тепловложения;

- открытое технологическое программирование для пользователя.

Особое внимание при разработке установки было уделено программному обеспечению. Был выполнен анализ имеющихся на рынке и наиболее востребованных на производстве алгоритмов переноса электродного металла. Анализ показал, что не существует универсального алгоритма способного решать различные технологические задачи - сварка корневого прохода «на весу», сварка потолочного шва с гарантированным формированием обратного валика и т.д. Поэтому было принято решение разработать набор специализированных программ для реализации капельного переноса, позволяющих решать различные технологические задачи на одной установке. При необходимости потребитель всегда имеет возможность приобрести или же разработать собственный компонент программы.

Полученные при разработке различных алгоритмов управляемого каплепереноса коэффициенты вариации параметров режима сварки легли в

основу вычисления эталонных значений показателей сварочных свойств (стабильность горения дуги, разбрызгивание металла, качество формирования сварного шва).

При производстве первой партии установок (10 шт.) выполнялась оценка сварочных свойств по осциллограммам процесса, рассчитывался процент разбрызгивания металла и изготавливались макрошлифы сварных соединений с целью анализа стабильности геометрии проплавления, а также проверки адекватности предложенной методики.

Таблица 1. Оценка сварочных свойств СУ ПАРС H511 при различных видах управляемого переноса электродного металла

Показатель сварочных свойств	Вид управляемого каплепереноса	
	С короткими замыканиями	Без коротких замыканий
Стабильность процесса сварки (горения дуги) Θ^I	Значения коэффициентов вариации	
	$K_{VUD}=0,40$	$K_{VUD}=0,30$
Разбрызгивание металла Θ^{II}	Значения коэффициентов вариации	
	$K_{VFkz}=0,12$ $K_{Vlkz}=0,12$ $K_{VTkz}=0,20$ $K_{VS}=0,14$ $K_{Vlrop}=0,14$ $K_{VTrop}=0,13$	$K_{VFimp}=0,12$ $K_{VTimp}=0,15$ $K_{Vlimp}=0,11$ $K_{VSimp}=0,12$
	$g_0^{II} = 3$	$g_0^{II} = 2$
	$A^{II} = 1,458$	$A^{II} = 1,538$
	$\Theta^{II}=0,41$	$\Theta^{II}=0,38$
	Значения коэффициентов вариации	
	$K_{Vlcp}=0,13$ $K_{VP}=0,15$	$K_{Vlcp}=0,13$ $K_{VP}=0,13$
Качество формирования шва Θ^{III}	$g_{c0}^{III} = 0,19$	$g_{c0}^{III} = 0,5$
	$A_c^{III} = 0,791$	$A_c^{III} = 1,123$
	$\Theta^{III}=1,17$	$\Theta^{III}=0,58$

После этого была проведена оценка значений показателей, сварочных свойств СУ, с учетом возможного разброса характеристик компонентов СУ и отклонений параметров питающей сети. Через вычисленные по предлагаемой методике (табл. 1) значения коэффициентов вариаций K_{Vi} , частные критерии Θ^j были определены требования к допустимым отклонениям параметров режима при сварке по рассмотренной выше технологии ремонта.

Проведенные испытания партии СУ позволили сделать следующие выводы:

- 1) При увеличении суммы коэффициентов вариации, отвечающих

за разбрызгивание металла, на 10% от эталонного значения изменение процента разбрызгивания составляет не более 30%, что является допустимым.

2) При увеличении суммы коэффициентов вариации, отвечающих за качество формирования сварного шва, на 10% относительная глубина проплавления изменялась на 8...12%, что является допустимым.

Разработанная методика также была использована при составлении программы для проведения дополнительной оценки сварочных свойств установок автоматической сварки труб УАСТ-1, разработанных ООО НПП «Технотрон».

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Для объективной оценки стабильности горения дуги, качества переноса электродного металла и формирования сварного шва, как основных показателей сварочных свойств оборудования, реализующего управляемый перенос электродного металла, необходимо использовать частные критерии в 3-х информативных частотных диапазонах (низком – от 0 до 10 Гц, среднем – от 0 до 500 Гц, высоком – от 500 до 5000 Гц), отражающих динамику процессов в основных элементах сварочного контура источник питания – дуга – сварочная ванна.

2. За стабильность геометрических параметров проплавления, при сварке с управляемым каплепереносом, отвечает стабильность поддержания мощности дуги и тока сварки в низком частотном диапазоне; за разбрызгивание металла – стабильность параметров: $F_{кз}$, $I_{кз}$, $T_{кз}$, $T_{имп}$, $I_{имп}$, S (площадь под кривой тока во время КЗ) в среднем частотном диапазоне, что позволяет на основе вычисления коэффициентов вариации этих параметров и их линейной регрессионной свертки получить численные значения частных критериев для оценки сварочных свойств оборудования.

3. Для обобщенной оценки сварочных свойств установок, реализующих управляемый перенос электродного металла, предложен комплексный критерий на основе стабильности параметров режима сварки, в виде аддитивной свертки частных критериев со своими весовыми (экспертными) коэффициентами значимости.

4. Экспериментально установлено, что высокочастотная (до 5000 Гц) составляющая сигнала по напряжению на дуге как и звуковой показатель процесса (спектральная плотность сигнала от микрофона) содержит информацию о стабильности горения дуги.

5. Разработана методика и расчетная программа «СтатСвар 1.0» для оценки сварочных свойств сварочных установок по энергетическим характеристикам процесса (осциллограммам тока и напряжения), инвариантные в применении к различным способам дуговой сварки с управляемым и неуправляемым переносом капель электродного металла. Новизна методики подтверждена положительным решением о выдаче

патента на изобретение «Способ оценки сварочных свойств установки для электродуговой сварки».

6. При использовании методики для конкретной марки сварочной установки возможно определение допустимых пределов изменения параметров режима сварки (тока, напряжения на дуге и т.д.), при которых обеспечивается выполнение требований к основным показателям сварочных свойств в процессе сварки.

7. Методика и программа «СтатСвар 1.0» апробированы при оценке сварочных свойств установок: УАСТ-1 (для орбитальной сварки труб производства НПП «Технотрон», ООО, применяемой при строительстве, ремонте и реконструкции магистральных трубопроводов), ПАРС Н-511 (для механизированной сварки и наплавки в защитных газах производства ООО АПС «РАДИС»). Они могут применяться при создании новых марок сварочных установок, а также при разработке нормативных и методических документов системы аттестации сварочного производства.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Юшин А.А., Гладков Э.А. Разработка критериев оперативной оценки сварочных свойств современного сварочного оборудования // Сварка и диагностика. 2010. № 4. С. 52-55.

2. Юшин А.А. Критерии оперативной оценки сварочных свойств оборудования, реализующего управляемый перенос электродного металла при сварке с короткими замыканиями // Будущее машиностроения России: Сборник трудов третьей всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. Москва, 2010. С. 112.

3. Юшин А.А. Новый метод тестирования современного сварочного оборудования // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 1. С. 18-22.

4. Оценка сварочных свойств оборудования с инверторными источниками питания по энергетическим характеристикам / А. А. Юшин [и др.] // Сварка и диагностика. 2011. № 1. С. 31-35.

5. Трух С.Ф., Юшин А.А. Опытный образец универсальной установки серии ПАРС Н-511 для механизированной сварки и наплавки в защитных газах // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 9. С. 10-14.

6. Юшин А.А. Объективная методика оценки сварочных свойств установок для механизированной сварки на базе инверторных источников питания // Будущее машиностроения России: Сборник трудов четвертой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. Москва, 2011. С. 117-118.