

На правах рукописи



ПОЛОСКОВ Станислав Сергеевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ДВУХДУГОВОЙ НАПЛАВКИ
КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НЕФТЕГАЗОВОГО
ОБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ДУГОВОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

Специальность 2.5.8 - Сварка, родственные процессы и технологии
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в обществе с ограниченной ответственностью «ШТОРМ»

Научный руководитель: доктор технических наук
ШОЛОХОВ Михаил Александрович
ООО «Шторм», директор

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
ЗОРИН Илья Васильевич
ФГБОУ ВО ВолгГТУ, профессор

кандидат технических наук, доцент
ОРЛИК Антон Геннадьевич
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, доцент

Ведущая организация: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина,
г. Москва

Защита состоится «02» июля 2025 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.20 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: +7 (499) 267-66-33, доб. 4057

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «____» 2025 г.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета, к.т.н.,



Панкратов А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Среди разнообразных методов интенсификации добычи трудно извлекаемых запасов углеводородов следует отметить возможность создания условий поддержания их избыточного давления путем закачки в пласт воды либо специальных химических реагентов. Такая интенсификация обеспечивается кустовыми насосными станциями, в виде разветвленной сети насосов с запорно-регулирующей арматурой, нагнетающих и перераспределяющих закачиваемые потоки. В процессе эксплуатации ступенчатые контактные поверхности стальных деталей данного оборудования подвергаются неблагоприятным механическим и химическим воздействиям. Из-за высокой стоимости деталей, полностью изготовленных из сталей типа 12Х18Н10Т, используют более дешевые нелегированные стали 15, 20 и 25Л, 09Г2С, а требуемые свойства обеспечивают наплавкой сплавов с высоким содержанием хрома и никеля.

Большой вклад в развитие теории и практики процессов наплавки внесли *Б.Е. Патон, Н.А. Соснин, С.Ф. Гюсов, И.А. Рябцев, В.А. Лебедев, Г.Н. Соколов и В.И. Лысак, Г.Г. Чернышов и Н.В. Коберник, M Zhang, B. Ma и многие другие исследователи.* Известной проблемой наплавки является поступление в наплавляемый металл металла подложки, для уменьшения содержания которого наплавку осуществляют в несколько слоёв, что увеличивает длительность процесса наплавки. В связи с тем, что современные способы однодуговой наплавки плавящимся электродом практически исчерпали свои возможности по производительности, без увеличения глубины проплавления, то для ее повышения используют многоэлектродные и многодуговые способы.

Значительный вклад в развитие многоэлектродных способов наплавки внесли *И.В. Зорин и С.К. Елсуков, В.И. Столбов и В.П. Сидоров, В.В. Ельцов, D.N. Wu, S. Dong, Q. Gao и др.* Среди многодуговых способов наплавки, которыми активно занимались *С.Л. Мандельберг, Ю.А. Стеренбоген, В.А. Ленивкин, В.Ю. Мастенко, М.А. Шолохов, С.Н. Гончаров, К.Н. Li, Y.M Zhang и др.*, следует выделить tandem наплавку последовательно расположенными дугами в раздельные ванны и двухдуговую наплавку в общую ванну.

Перспективным путем повышения производительности является процесс двухдуговой наплавки, при котором основная дуга горит между плавящимся электродом и наплавляемой поверхностью, а вторая дуга горит между электродной и присадочной проволокой. Главным препятствием к использованию такого варианта наплавки является отсутствие данных об условиях обеспечения устойчивости дугового взаимодействия разнополярных дуг, что является актуальной задачей. Разумеется такая задача должна решаться с использованием современных методов исследования.

Цель работы - повышение производительности наплавки контактных поверхностей нефтегазового оборудования на основе разработки технологии двухдуговой наплавки плавящимися электродами в газовой смеси.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих

задач:

1. Разработать динамическую физико-математическую модель дугового взаимодействия основной и дополнительной дуг в газовой среде.
2. Исследовать методом инженерного компьютерного анализа режим и границы области устойчивого взаимодействия разнополярных дуг.
3. Сформировать технологические требования к процессу двухдуговой наплавки и необходимому для его реализации оборудованию.
4. Оценить влияние разнополярных дуг на формирование наплавляемых слоев и разработать технологию двухдуговой наплавки контактных поверхностей при соблюдении ограничений на их устойчивое взаимодействие.
5. Осуществить опытно-промышленное внедрение исследуемой технологии наплавки на контактные поверхности нефтегазового оборудования.

Методы исследований. При проведении исследований выполнили теоретический анализ и тестовые наплавки. При теоретическом анализе выполняли компьютерное моделирование процесса двухдуговой наплавки. При выполнении тестовых наплавок использовали сварочную проволоку марки ER 308SLi, газовую смесь 97,5% Ar+2,5% CO₂. Регистрацию параметров осуществляли регистратором AWR-725. Для видеосъемки дуг использовали цифровую камеру Nikon 1 J3 с соответствующим набором светофильтров. При изучении формообразования валиков использовали микроскоп AXIOVERT 25CA. При изучении микроструктуры металла данные с микроскопа обрабатывали в программном обеспечении SIAMS 800. Химический анализ металла проводили на оптико-эмиссионном анализаторе PMI-Master Pro.

Научная новизна.

1. Разработана динамическая физико-математическая модель двухдуговой наплавки, основой которой являются соотношения между токами и напряжениями в двухконтурной электрической цепи питания основной и дополнительной дуг. Модель включает ряд ранее не учтенных явлений: нелинейность вольт-амперных характеристик дуг переменной длины; скачкообразное изменение длин дуг при отрыве капель, размер которых также нелинейно зависит от токов дуг; геометрические параметры расположения присадочной проволоки относительно электродной.

2. Показано, что причинами нарушения устойчивости двухдугового процесса являются колебания электрических параметров системы «источники питания- основная и дополнительная дуги», связанные с замыканиями дугового промежутка и смещением рабочей точки на падающий участок вольт-амперной характеристики дополнительной дуги.

3. Определено, что при установлении границ области устойчивого дугового взаимодействия, в качестве критерия устойчивости процесса к возмущениям целесообразно выбирать диапазон колебаний длины дополнительной дуги, исключающий возможность шунтирования дугового промежутка каплями расплавленного металла.

4. Установлено, что при определении требований к условиям формирования наплавленного металла на ступенчатых контактных

поверхностях нефтегазового оборудования в условиях ограничений по устойчивому взаимодействию разнополярных дуг, рационально использование значений минимального разброса их мощности.

На защиту выносятся:

1. Физико-математическая модель для анализа устойчивости взаимодействия разнополярных основной и дополнительной дуг.
2. Результаты исследования влияния параметров режима на устойчивость горения дуг и определения их оптимальных соотношений.
3. Результаты опытно промышленного опробования разработанной технологии наплавки контактных поверхностей нефтегазового оборудования.

Практическая значимость работы. Разработаны последовательность и методология определения границ области устойчивого взаимодействия дуг, с использованием в качестве критерия устойчивости процесса к возмущениям диапазон колебаний длины дополнительной дуги, исключающий возможность шунтирования дугового промежутка каплями расплавленного металла. Установлены диапазоны и соотношения основных параметров схемы расположения электродной и присадочной проволок и режима наплавки, обеспечивающие устойчивый к возмущениям двухдуговой процесс наплавки. Опытно-промышленное опробование разработанной технологии наплавки при восстановлении контактных поверхностей нефтегазового оборудования на ООО «Завод нефтехимического оборудования» и ООО «Промгазинжиниринг» показало возможность увеличения производительности в 1,8...2,0 раза. Ожидаемый экономический эффект от внедрения разработки составит не менее 27,1 млн руб. в год.

Достоверность результатов и выводов подтверждается использованием апробированных методов исследования, компьютерного инженерного анализа, результатами опытной верификации полученных теоретических результатов, реализацией предлагаемого процесса наплавки в производственных условиях.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждены на научно-практической конференции «Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство» (Казань, 2019); IV Международной научно-практической конференции «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте» (Кемерово, 2020); V международной конференции «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (Казань, 2020); 15th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy (Nizhny Tagil, 2020); I Международной научно-практической конференции молодых учёных «Актуальные проблемы информационно-телекоммуникационных технологий и математического моделирования в современной науке и промышленности» (Комсомольск-на-Амуре, 2021); семинаре кафедры «Сварки, диагностики и специальной робототехники» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2021, 2025).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано 11 печатных работах в журналах, рекомендованных ВАК. Еще одна публикация

индексирована в базе данных Scopus. Получен 1 патент РФ на изобретение.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и заключения, списка литературы и 3 приложений. Диссертация изложена на 194 страницах машинописного текста и содержит 50 формул, 108 рисунков и 27 таблиц. Список литературы состоит из 146 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность работы, сформулированы научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 приведены данные о значимости насосов и трубопроводной арматуры для интенсификации добычи углеводородного сырья. Показано, что перспективным путем повышения производительности наплавки является вариант двухдуговой наплавки разнополярными дугами, однако основным препятствием использования данного процесса является недостаточная устойчивость горения дуг, которая сильно зависит от режима, Рисунок 1.



Рисунок 1.
Последствия блуждания дуг

На основе проведенного литературного обзора сформулированы цель и задачи исследования.

В главе 2 представлены результаты разработки инструментов для исследования особенностей взаимодействия разнополярных дуг. Отмечено, что к настоящему времени накоплен определенный опыт по разработке моделей однодуговых процессов сварки и наплавки (В.А. Ерофеев, А.С. Куркин, А.В. Коновалов, С.А. Королев, И.В. Пентегов, В.Н. Сидорец, Yi Lu, J. Huang и др.). Однако в отличие от известных, представленная физико-математической модель взаимодействии двух разнополярных дуг при наплавке, учитывает значительно большее число как геометрических (Рисунок 2), так и электрических параметров при совместном горении дуг (Рисунок 3).



Рисунок 2.
Параметры двухдуговой
наплавки: диаметры, скорости
подачи и вылеты электродной
 d_e, v_e, z_e и присадочной d_f, v_f, z_f
проводок;
 α, Z_0 – угол и точка пересечения
проводок, l_e, l_f – длины дуг.

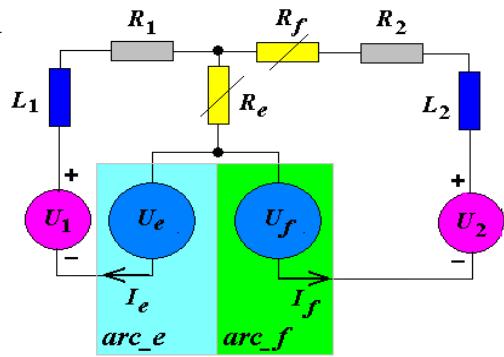


Рисунок 3.
Электрическая схема питания
разнополярных дуг

Заданы напряжения питания U_1 и U_2 , электрические сопротивления источников R_1 и R_2 (наклоны вольтамперных характеристик), L_e, L_f – индуктивности источников питания.

В свою очередь, токи основной I_e и дополнительной I_f дуг, их длины l_e, l_f и напряжения U_e, U_f , а также сопротивления вылетов электродной R_e и присадочной R_f проволок определяются при моделировании.

Основой модели являются традиционные соотношения, описывающие токи и напряжения в двухконтурной электрической цепи питания основной и дополнительной дуг. Модель учитывает мощности тепловыделения в дугах, нагрев вылетов проволок, температуру капель, а также геометрическое положение электродной и присадочной проволок.

Топологическая схема взаимосвязей в теоретической модели совместного горения основной arc_e и дополнительной arc_f дуг показана на Рисунке 4.

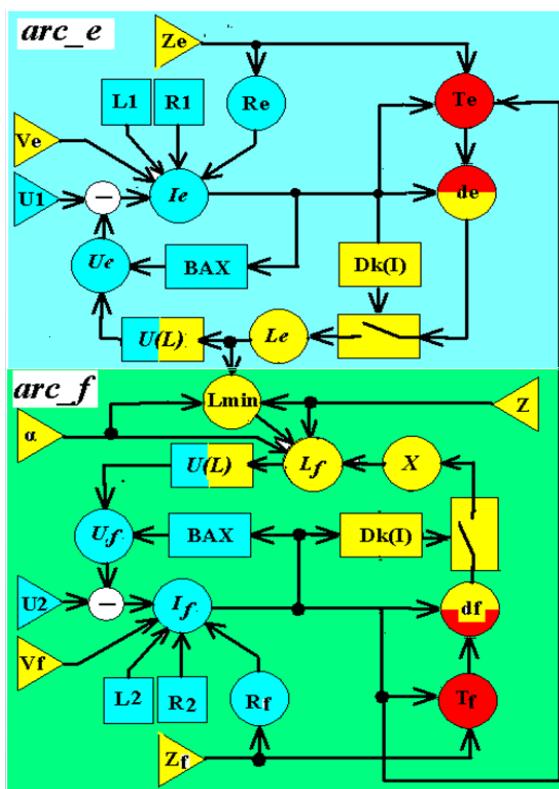


Рисунок 4.
Топологическая схема связей между
параметрами дуг

Взаимозависимость скоростей плавления, длин L_e, L_f , напряжений U_e, U_f и токов I_e, I_f дуг формируют два контура саморегулирования основной и дополнительной дуг. Особенностью данной модели является учёт нелинейности вольт-амперной характеристики (ВАХ) обеих дуг с переменной длиной и скачкообразным изменением их длины при отрыве капель. Рост капель на проволоках описали в зависимости от тока, анодного и катодного падений напряжений, подогрева вылетов проволок.

Параметры дополнительной дуги связаны соотношениями:

$$I_f = \frac{1}{L_2} \int_0^t (U_2 - U_f - I_f(R_2 + R_f) - (I_f + I_e)R_e) dt ; \quad \frac{dV_f}{dt} = \frac{U_k I_e}{c\rho(T_L - T_e) + H_{LS}} ; \quad D_{e,f} = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} V_{e,f}} ,$$

где V_f - объём капли; U_k - катодное напряжение; $c\rho$ - объёмная теплоёмкость; H_{SL} - теплота плавления; D - диаметр капель.

Принципиально новым в модели является учет взаимодействия дуг, которое определяется зависимостями размеров L_z , L_f , L_{min} , и углов α , β , (Рисунок.1), которые рассчитываются решением уравнений:

$$L_z = \begin{cases} L_z - d_f - v_f t & \text{при } d_f < D_k(I_f) \\ L_z + d_f; d_f = 0 & \text{при } d_f = D_k(I_f) \end{cases} \quad \beta = \arcsin\left(\frac{L_e - Z_0}{L_f} \sin \alpha\right) \quad L_f = \frac{L_z - (L_e - Z_0) \cos \alpha}{\cos \beta} \quad L_{f,min} = (L_e - Z_0) \sin \alpha$$

Напряжение дуги определяется её длиной: $U_f = L_f \text{grad} U + U_a + U_k$
Параметры основной дуги связаны аналогичными соотношениями.

Существенными факторами эффективности саморегулирования, которые выравнивают скорости плавления и подачи проволок v_e, v_f , является изменение наклонов ВАХ, Рисунок 5 а.

Учитывалось также влияние тока дуг на объём капель, Рисунок 5 б.

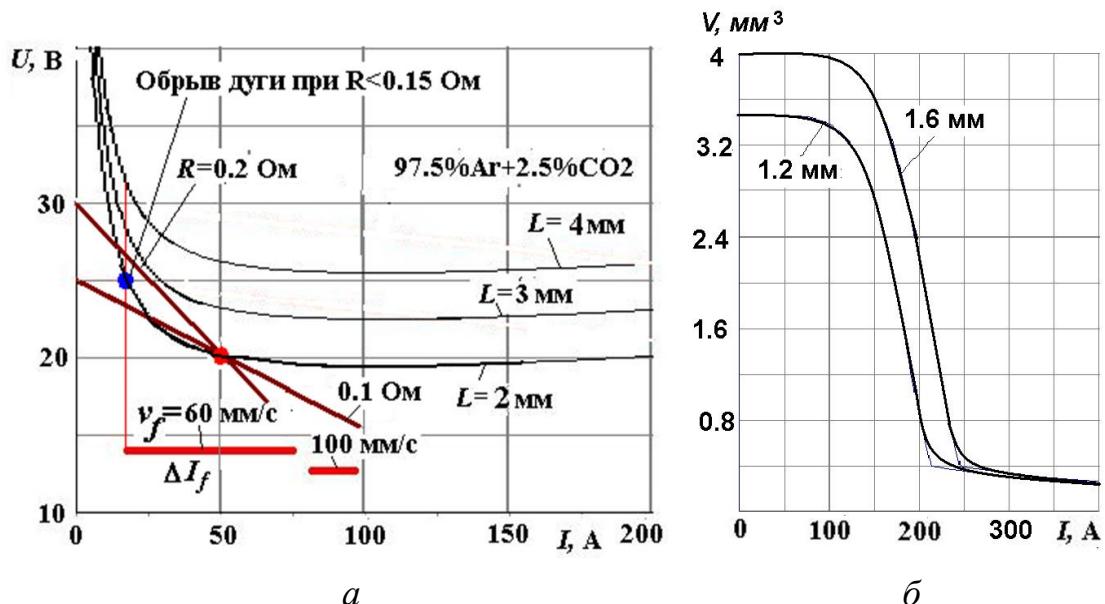


Рисунок 5.
ВАХ $U(I)$ дуг разной длины (а) и зависимость объёма V капель от тока I дуг (б)

Выполнена оценка адекватности моделирования горения дуг и показано, что модель воспроизводит процессы дугового взаимодействия при значениях анодного напряжения на электроде 5,4 В и катодного на присадке 12,1 В, а также длины дуг при градиенте потенциала в дугах 1,5 В/мм. Численное решение уравнений модели позволяет представить результаты моделирования в виде виртуальных осциллограмм и графических схем пространственного расположения дуг.

В главе 3 приведены результаты теоретического исследования условий устойчивого взаимодействия дуг методом моделирования процесса.

На Рисунке 6 показано влияние скорости подачи присадочной проволоки

на характер изменения параметров горения дуг.

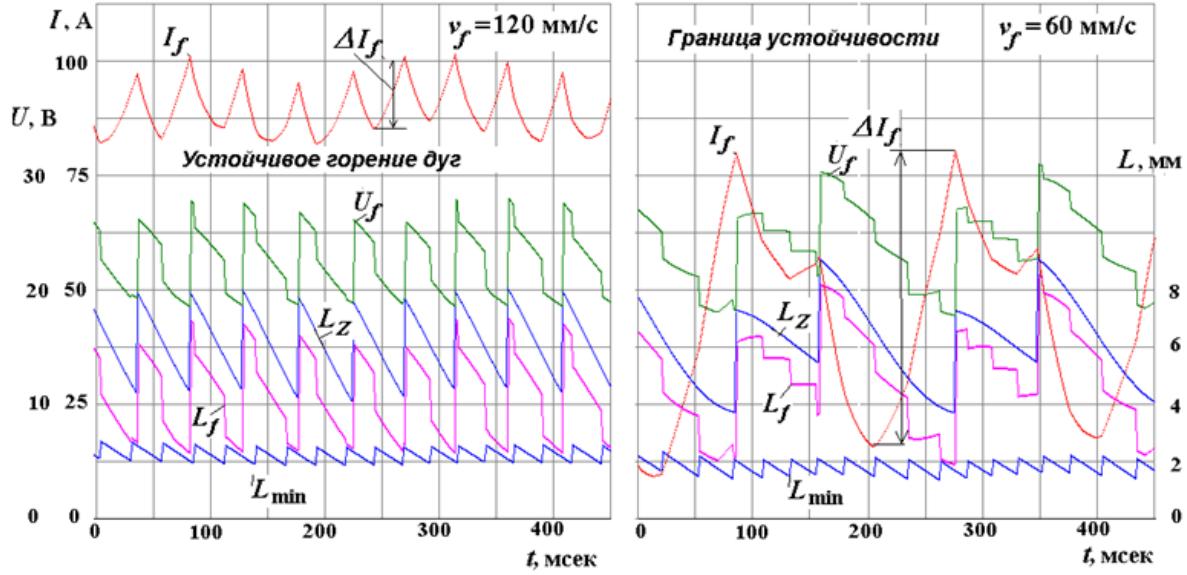


Рисунок 6.

Изменение тока I_f , напряжения U_f , длин L_f , L_z дополнительной дуги при разной скорости v_f подачи присадочной проволоки

Установлено, что при уменьшении скорости подачи присадочной проволоки ток дополнительной дуги снижается, что приводит к увеличению капель, отрывающихся от присадочной проволоки. Амплитуда колебаний возрастает, что приводит к обрывам дуги. Устойчивость процесса зависит от постоянства диаметра капель, что обеспечивается в диапазоне токов 40...150А. Это показывает, что потеря устойчивости процесса, приводящая к коротким замыканиям и обрывам дуги, вызывается уменьшением тока дополнительной дуги до значений, при которых ВАХ дуги имеет отрицательный наклон, на которой система «источник питания-дуга» неустойчива.

На Рисунке 7 показано влияние напряжения питания дополнительной дуги, которое изменяет её расположение относительно электрода.

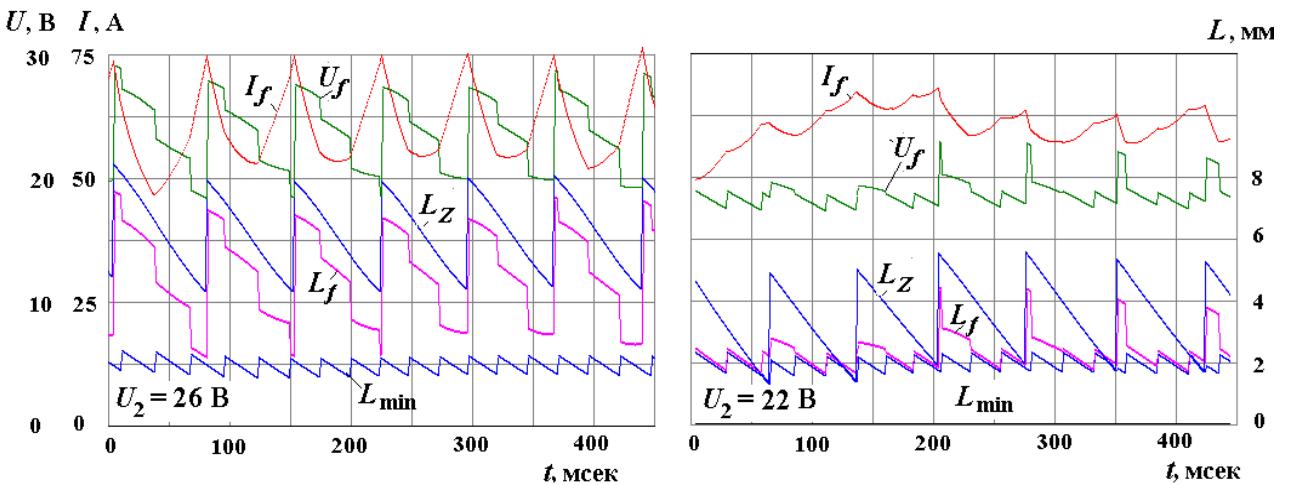


Рисунок 7.

Изменение тока I_f , напряжения U_f , длин L_f , L_z дополнительной дуги при разном напряжении питания. При $U_2=22$ В – граница устойчивости

Установлено, что при снижении напряжения дуга укорачивается, но это укорочение ограничено кратчайшим расстоянием $L_{f,\min}$ от присадочной проволоки до электродной. При уменьшении напряжения до $U_2=22$ В длина $L_f = L_{f,\min}$. При дальнейшем снижение U_2 даже небольшое повышение скорости подачи v_f не компенсируется скоростью плавления, т.е. исчезает саморегулирование дополнительной дуги. Это приводит к короткому замыканию присадки на наплавочную ванну

На Рисунке 8 показано расположение дополнительной дуги при малом (a) и большом (\bar{b}) угле между проволоками.

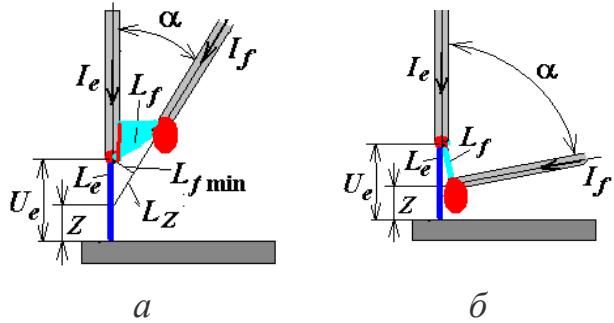


Рисунок 8.
Расположение дополнительной дуги L_f и присадки при угле между проволоками $\alpha=30^\circ$ (a) и $\alpha=80^\circ$ (\bar{b})

При малом угле между проволоками дополнительная дуга горит на вылете электродной проволоки (Рисунок 8, a), и при определенных условиях процесс может перейти в наплавку косвенной дугой. В свою очередь, при коротком замыкании дополнительной дуги каплями присадочной проволоки (Рисунок 8, \bar{b}), на неё перераспределяется ток основной дуги L_e , который ее быстро плавит, вызывая обрыв дополнительной дуги, т.е. нарушается устойчивость горения. Таким образом, при малом угле между проволоками дополнительная дуга горит на вылете электродной проволоки, при большом – между каплями электродной и присадочной проволок.

Исследование влияния расположения точки Z пересечения проволок показало, что при значительном Z точки горят стабильно. При малом Z капля присадки может касаться ванны и основная дуга переходит на присадочную проволоку.

Это укорачивает основную дугу и вызывает рост тока основной дуги, ускоренное плавление электродной и присадочной проволок. Возникают колебания всех параметров дуг с большой амплитудой. Для устойчивого горения точку пересечения проволок нужно удалить на расстояние, превышающее диаметр капель присадочной проволоки.

Расположение дуг определяется как углом α между проволоками и точки h их пересечения, так и длинами дуг L_e , L_f , задаваемыми напряжениями питания. Дополнительная дуга может не возбуждаться, если минимальное расстояние между проволоками превышает длину дополнительной дуги, и может перераспределиться с торца на вылет электродной проволоки, что вызывает неустойчивость.

Из этого условия определён диапазон изменения угла между проволоками и соотношение длин дуг, Рисунок 9.

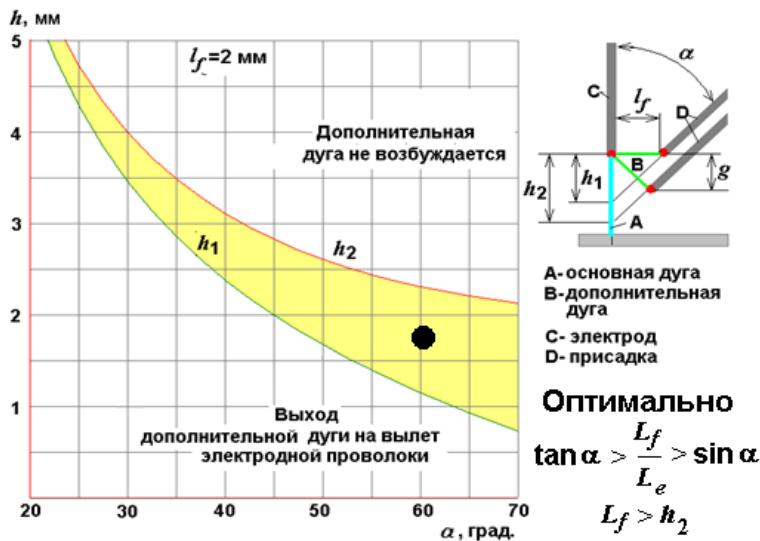


Рисунок 9.
Влияние угла между
проводоками на
расположение
дополнительной дуги.
Точка – оптимальное
положение $h=1,75 \text{ мм}$
капли присадки при угле
 $\alpha=60^\circ$

Моделирование также показало, что вылет электродной проволоки может нагреваться до температур выше 600°C , что изгибает конец вылета и отклоняет основную дугу. Определены допустимые длины вылетов для разных скоростей подачи проволок разного диаметра, Рисунок 10.

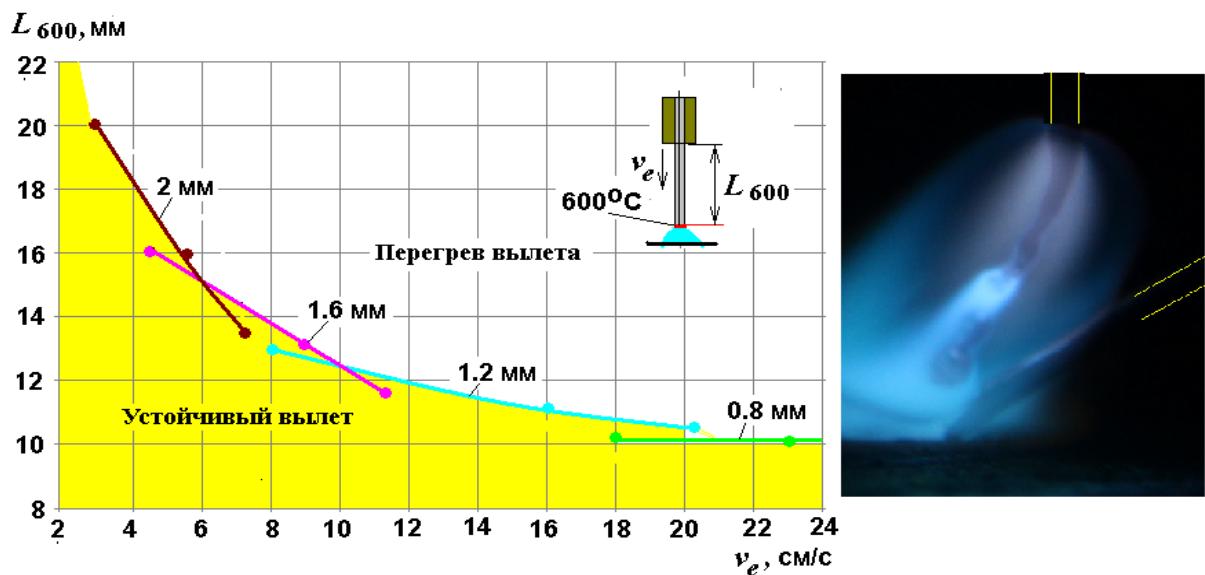


Рисунок 10.
Допустимые длины L_{600} вылета электродной проволоки разного диаметра в
зависимости от скорости её подачи v_e и фотография изгиба вылета

Эти теоретические результаты проверили экспериментально. Исследование выполнили, отклоняя скорости подачи проволок и напряжения питания дуг по плану дробного факторного эксперимента от базового значения: $U_e = U_f = 28 \pm 2 \text{ В}$, $d_e = 1,6 \text{ мм}$, $v_e = 75 \pm 15 \text{ мм/с}$, $d_f = 1,2 \text{ мм}$, $v_f = 80 \pm 20 \text{ мм/с}$.

Устойчивость оценивали среднеквадратичными отклонениями токов S_I и напряжений S_U основной и дополнительной дуг таким образом, чтобы отсутствовала возможность шунтирования дугового промежутка каплями расплавленного металла электрода.

Для этого оценили среднеквадратичное отклонение токов SI и напряжений SU дуг, которое определили по осциллографам.

Данные об отклонениях токов и напряжений обобщили в отклонения мощности дуги и определили регрессионную зависимость среднеквадратичного отклонения S_{Pf} мощности дополнительной дуги от напряжений питания и скоростей подачи:

$$S_{Pf}=21.71-7.71[U_1]+5.58[U_2]+11.18[v_e]-18.05[v_f].$$

На Рисунке 11 показано графическое изображение этой зависимости.

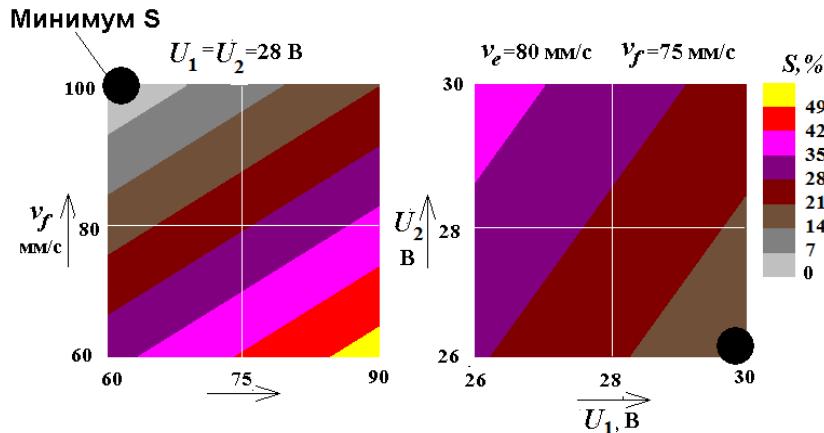


Рисунок 11.
Зависимость
среднеквадратичного
отклонения S_{Pf}
мощности
дополнительной дуги
от напряжений питания
 U_1 , U_2 и скоростей
подачи v_e , v_f . Точка –
оптимальные значения

Комплексный анализ и проведенное экспериментальное исследование показали, что устойчивость дугового взаимодействия обеспечивается внутри узких полей допусков (Таблица 1) на параметры двухдуговой наплавки.

Таблица 1.

Поля допусков на условия устойчивого дугового взаимодействия в процессе двухдуговой наплавки

№	Параметр	Ед. изм.	Значение
1	Ток основной дуги I_e	А	200...250
2	Скорость v_e подачи электродной проволоки диаметром 1,6 мм	мм/с	70...100
3	Ток дуги от присадочной проволоки I_f	А	80...100
4	Скорость v_f подачи присадочной проволоки диаметром 1,2 мм	мм/с	60...80
8	Вылет электродной проволоки (расстояние от мундштука до точки схождения проволок) L_e	мм	12...20
9	Вылет присадочной проволоки (расстояние от мундштука до точки схождения проволок)	мм	28...36
10	Расход газовой смеси 97,5% Ar + 2,5% CO ₂	л/мин	15...20
11	Напряжение питания основной дуги U_e	В	27...29,5
12	Напряжение питания вспомогательной дуги U_f	В	26...28
13	Угол α между проволоками	град	25...45
14	Расстояние от точки схождения проволок до поверхности подложки	мм	3,5...6,0

Именно эти достаточно узкие поля допусков и являются естественными границами области устойчивого дугового взаимодействия, Рисунок 12.



Рисунок 12.
Результаты наплавки
валиков в границах
допусков

К сожалению, из условий обеспечения устойчивого дугового взаимодействия режим наплавки можно корректировать только изменением скорости наплавки.

В главе 4 исследовали формирование покрытия при устойчивом горении дуг при скорости наплавки 4 мм/с. Наплавка из параллельных валиков показала, что слой с толщиной 7 мм формируется при шаге наложения валиков, равном половине ширины отдельного валика. Однако слой с постоянными значениями толщины и проплавления подложки формируется только после третьего валика, Рисунок 13.



Рисунок 13.
Поперечный макрошлиф
слоя параллельных
валиков

Одновременно были проведены сравнительные исследования структуры и химического состава металла выполненного при однодуговой наплавкой в два слоя и двухдуговой наплавкой в один слой, которые показали, что химический состав второго слоя наплавленного металла при однодуговой наплавке мало отличается от содержания элементов в первом слое слое при двухдуговой наплавке.

В главе 5 рассмотрены вопросы разработки и опытно-промышленного опробования предлагаемого процесса наплавки. Для изучения возможности применения двухдуговой наплавки разработали технологию наплавки коррозионностойкого слоя проволокой OK Autrod 308LSi на контактные поверхности всасывающей крышки насоса ЦНС 180 из стали 25Л диаметром 725 мм (без патрубка), Рисунок 14.

Данные насосы являются одними из самых востребованных при первичной добыче углеводородного сырья и обеспечивают подачу жидкости объемом до 180 м³/ч с напором до 1900 м.

Особенностью крышки всасывания центробежного насоса является ступенчатая форма контактной поверхности. Из-за ступенчатой формы контактной поверхности крышки, учли различия условий формирования валиков в углах поверхности, первого и последующих валиков на торцевых и цилиндрических поверхностях, крайних валиков и замыкающих валиков на внешних углах.

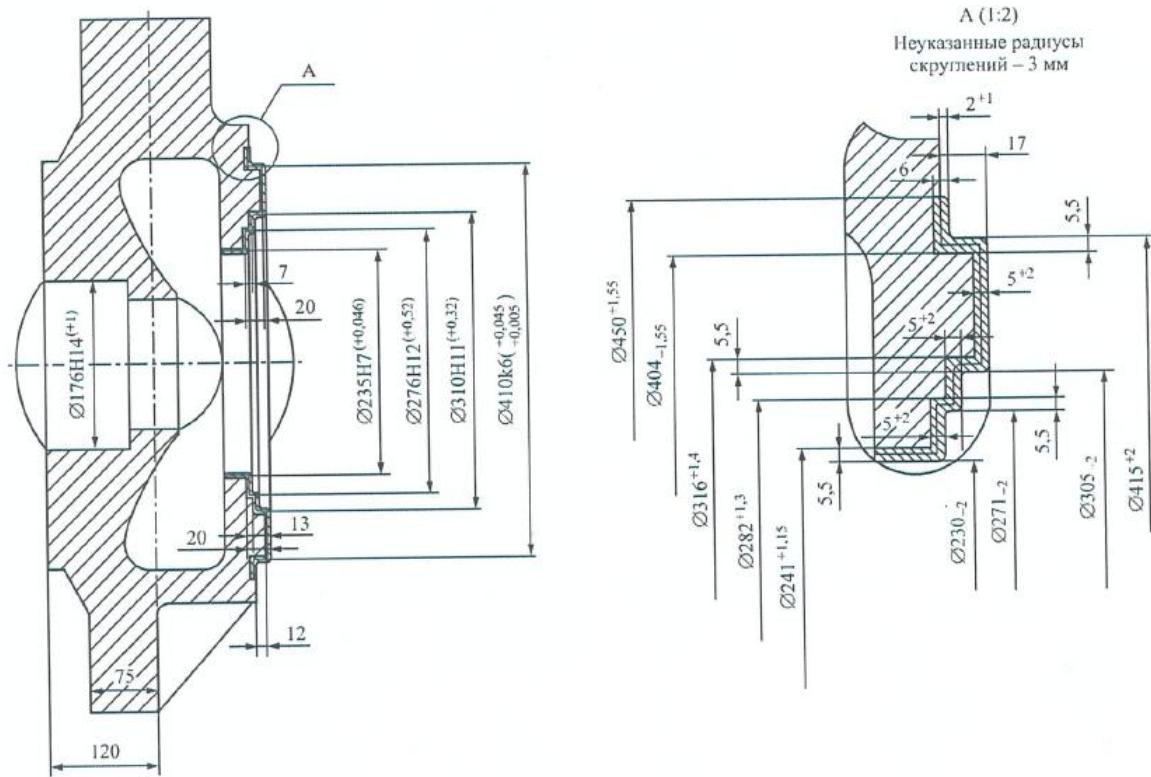


Рисунок 14.
Крышка всасывания центробежного насоса ЦНС 180

Адекватность этой модели проверили, сопоставив расчётный профиль валика с опытным, Рисунок 15.

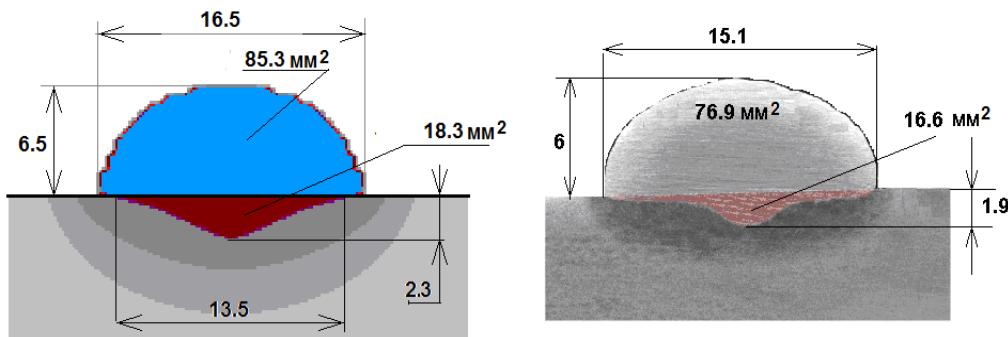


Рисунок 15.

Сопоставление результатов моделирования и опыта наплавки валика проволокой 308LSi диаметром $d_e=1.6$ мм, $d_f=1.2$ мм на сталь 25Л на режиме $\alpha=70^\circ$, $Z=3$ мм, $U_1=30$ В, $U_2=26$ В, $v_e=60$ мм/с, $v_f=100$ мм/с, $I_e=200$ А, $I_f=90$ А со скоростью 4 мм/с

Полученные результаты позволяют утверждать, что процедуры моделирования адекватны опытным данным, а модель может быть использована для корректировки режима отдельных валиков.

При компьютерной имитации процесса подобрали скорость наплавки валиков, обеспечивающие требуемую толщину слоя и допустимую примесь

материала подложки в наплавленном слое, Рисунок 16.

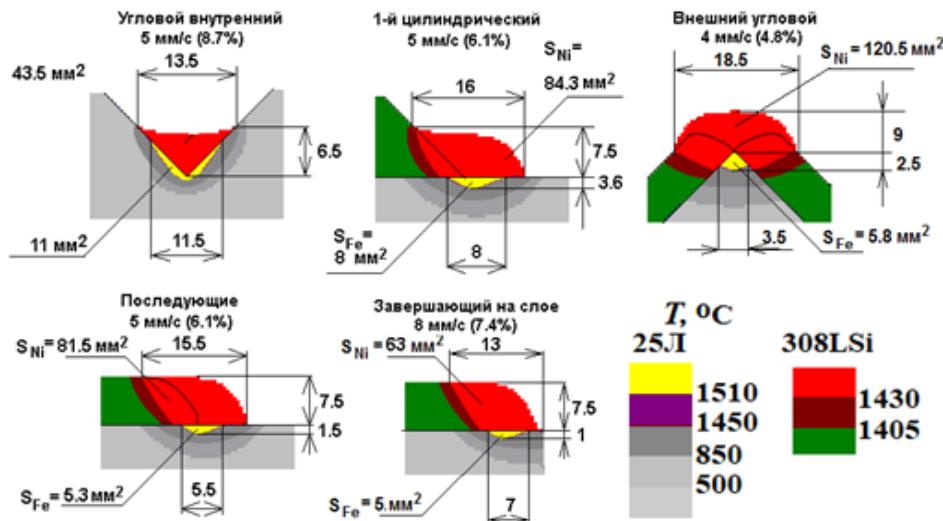


Рисунок 16.

Результаты компьютерной имитации формирования валиков

Результаты подбора скорости наплавки валиков, обеспечивающие требуемую толщину слоя приведены в Таблице 2.

Таблица 2.

Технологические режимы формирования валиков разной конфигурации

Тип валика	Длина слоя, мм	Ширина слоя, мм	Кол-во валиков	Шаг, мм	Скорость наплавки
Угловой внутренний	1276	13,5	1	-	6 мм/с
	974	13,5	1	-	
	867	13,5	1	-	
Торцевые	1416...1276	22	3	7,3	8,1 мм/с
	1276...974	48	6	8	5,4 мм/с
	974...867	17	2	8,5	7,8 мм/с
	867...738	20	3	6,7	5,2 мм/с
Цилиндрические	738	20	3	6,7	5,6 мм/с
	1276	17	2	8,5	4,4 мм/с
Внешний угловой	756	10	1	10	4,8 мм/с

Рассчитанный режим наплавки был реализован РТК, состоящим из робота LR Mate 200 (фирмы FANUC, Япония), со сварочными источниками S5-RoboMIG XT (фирмы Lorch, Германия), двумя сварочными горелками и манипулятором МС 10 на ООО «Завод нефтехимического оборудования». Внешний вид наплавленной поверхности крышки всасывания насоса ЦНС 180 представлены на Рисунке 17. Нашла применение данная разработка и при восстановительной наплавке контактных поверхностей деталей крупногабаритной запорной арматуры в ООО «Промгазинжиниринг».

Опытно-промышленное внедрение разработанного способа двухдуговой наплавки ((Патент № 2831172 (RU) при восстановлении контактных

поверхностей деталей нефтегазового оборудования на ООО «Завод нефтехимического оборудования» и ООО «Промгазинжиниринг» показало возможность увеличения производительности наплавки в 1,8...2,0 раза за счет выполнения наплавки в один слой с обеспечением требований НТД по допустимому содержанию материала подложки в наплавленном слое.



Рисунок 17.
Внешний вид наплавленной
поверхности крышки
всасывания насоса ЦНС 180

Ожидаемый экономический эффект от использования предложенной технологии двухсторонней наплавки и современного роботизированного оборудования составит не менее 27,1 млн. руб. в год.

Общие выводы и заключение

1. Анализ требований, предъявляемых к наплавляемым контактным поверхностям нефтегазового оборудования показал, что производительность процесса их наплавки можно существенно повысить внедрением двухсторонней наплавки, при условии существенного повышения устойчивости разнополярных дуг к характерным возмущениям.

2. Для теоретического анализа причин неустойчивости и нестабильности дугового взаимодействия разработана динамическая физико-математическая модель двухсторонней наплавки плавящимся электродом с подачей дополнительной присадочной проволоки, основой которой являются соотношения между токами и напряжениями в двухконтурной электрической цепи питания основной и дополнительной дуг. Модель включает ряд ранее не учтенных явлений: нелинейность вольтамперных характеристик дуг переменной длины; скачкообразное изменение длии дуг при отрыве капель, размер которых также нелинейно зависит от токов дуг; геометрические параметры расположения присадочной проволоки относительно электродной.

3. Установлено, что причиной неустойчивости при взаимодействии дуг являются изменения в характере капельного переноса, вызывающие колебания электрических параметров и приводящие:

- к исчезновению саморегулирования дополнительной дуги при снижении её длины до минимального расстояния от оси присадочной проволоки до торца электродной, вероятность чего возрастает с увеличением угла между электродной и присадочной проволоками;

- к горению дополнительной дуги на вылете электродной проволоки, приводящему к перегреву ее вылета и потере ею осевой устойчивости, что наиболее вероятно при малом угле между проволоками;

- к уменьшению тока дополнительной дуги до значений, при которых ВАХ дуги имеет отрицательный наклон и потере устойчивости двухконтурной системы «источники питания - основная и дополнительные дуги»;

- к коротким замыканиям вылета присадочной проволоки на наплавочную ванну при недостаточном расстоянии от точки пересечения электродной и присадочной проволок до её поверхности.

4. Разработаны последовательность и методология определения границ области устойчивого дугового взаимодействия дуг, где в качестве критерия устойчивости процесса к возмущениям выбран диапазон колебаний длины дополнительной дуги, исключающий возможность шунтирования дугового промежутка каплями расплавленного металла.

5. Установлено, что при определении требований к условиям формирования наплавленного металла на ступенчатых контактных поверхностях нефтегазового оборудования в условиях ограничений по устойчивому взаимодействию разнополярных дуг, рационально использование значений минимального разброса их мощности.

6. Определено, что угол α между электродной и присадочной проволокой, обеспечивающий стабильность процесса переноса металла и горения дуг в зависимости от соотношения длин дополнительной l_f и основной l_e дуг, должен лежать в диапазоне значений: $\tan \alpha > l_f / l_e > \sin \alpha$.

7. Опытно-промышленное опробование разработанного способа двухдуговой наплавки (Патент № 2831172 (RU) при восстановлении контактных поверхностей деталей нефтегазового оборудования на ООО «Завод нефтехимического оборудования» и ООО «Промгазинжиниринг» показало возможность увеличение производительности наплавки в 1,8...2,0 раза за счет выполнения наплавки в один слой с обеспечением требований НТД по содержанию материала подложки в наплавленном слое.

Ожидаемый экономический эффект от использования предложенной технологии двухдуговой наплавки и современного роботизированного оборудования составит не менее 27,1 млн. руб. в год.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Полосков С.С. Проблемы наплавки уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры и пути их решения // Вестник ДонГТУ. 2019. Т. 19, № 4. С. 349-356 (0,36 п.л. / 0,36 п.л.).

2. Полосков С.С., Ерофеев В.А., Шолохов М.А. Физико-математическая модель дугового взаимодействия при наплавке плавящимся электродом с дополнительной присадочной проволокой // Сварка и диагностика. 2019. № 6. С. 27-31 (0,63 п.л. / 0,21 п.л.).

3. Полосков С.С., Ерофеев В.А., Шолохов М.А. Моделирование формирования ванны расплава и шва при наплавке плавящимся электродом с дополнительной присадочной проволокой // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. Т. 18, № 6. С. 247-255 (1,05 п.л. / 0,35 п.л.).

4. Исследование технологических возможностей процесса двухдуговой наплавки плавящимся электродом с дополнительной токоведущей присадочной

проводкой / С.С. Полосков [и др.] // Сварка и диагностика. 2022. № 2. С. 43-47 (0,63 п.л. / 0,16 п.л.).

5. Особенности сопряжения и перекрытия кромок смежных валиков при наплавке плавящимся электродом с токоведущей присадочной проволокой (DE-GMAW) / С.С. Полосков [и др.] // Сварка и диагностика. 2022. № 4. С. 54-58 (0,56 п.л. / 0,11 п.л.).

6. Полосков С.С. Формирование технологических требований к двухдуговой наплавке с токоведущей присадочной проволокой контактных поверхностей нефтегазового оборудования // Сварка и диагностика. 2023. № 5. С. 44-49 (0,54 п.л. / 0,54 п.л.).

7. Полосков С.С., Ерофеев В.А., Шолохов М.А. Компьютерный инженерный анализ технологических особенностей двухдуговой наплавки с токоведущей присадочной проволокой контактных поверхностей центробежного насоса // Заготовительные производства в машиностроении. 2023. Т. 21, № 11. С. 487-494 (0,93 п.л. / 0,31 п.л.).

8. К вопросу взаимовлияния дуг при двухдуговой наплавке плавящимся электродом с токоведущей присадочной проволокой / С.С. Полосков [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении, 2024. Т. 22, № 6. С. 250-255 (0,7 п.л. / 0,14 п.л.).

9. Инструмент для анализа динамических процессов в системе «источник питания - дуга» при двухдуговой наплавке плавящимся электродом с подачей дополнительной присадочной проволоки / С.С. Полосков [и др.] // Сварка и диагностика. 2024. № 5. С. 21-27 (0,65 п.л. / 0,13 п.л.).

10. Аналитическое исследование условий устойчивого дугового взаимодействия при двухдуговой наплавке плавящимся электродом с токоведущей присадочной проволокой / С.С. Полосков [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении, 2024. Т. 22, № 11. С. 489-499 (1,25 п.л. / 0,25 п.л.).

11. О границах области устойчивого дугового взаимодействия в процессе двухдуговой наплавки плавящимся электродом / С.С. Полосков [и др.] // Сварка и диагностика. 2024. № 6. С. 37-43 (0,65 п.л. / 0,13 п.л.).

12. Патент № 2831172 (RU). МПК B23K 9/04, B23K 9/16, B23K 9/09. Способ двухдуговой наплавки плавящимся электродами: заявл. 30.05.2024: опубл. 02.12.2024. Бюл. 34 / С.С. Полосков [и др.]; ООО «Шторм». 11 с. (0,82 п.л. / 0,14 п.л.).

13. Poloskov S.S., Buzorina D.S., Erofeev V.A. Application of surfacing using consumable electrode with an additional filler wire to ensure the required operational properties of pipeline valves // 15th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy (Nizhny Tagil). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 966 (2020) 012015: doi:10.1088/1757-899X/966/1/012015 (0,33 п.л. / 0,11 п.л.).