

На правах рукописи

ХРИСТОФИС Борис Олегович

**СОЗДАНИЕ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ УГЛЕРОДИСТЫХ
СТАЛЕЙ ДЛЯ ГИБКИХ МОДУЛЕЙ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ**

Специальность 05.03.06. – Технологии и машины сварочного производства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2003

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
"Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Научный руководитель: д.т.н., профессор, Соснин Николай Алексеевич

**Официальные
оппоненты:** д.т.н., профессор, Суздаев Игорь Владимирович
к.т.н., Бобров Максим Юрьевич

Ведущая организация: Обуховский завод

Защита состоится 14 ноября 2003 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.03 в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу: Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, химический корпус, ауд. 51.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан " ____ " _____ 2003 года.

Ученый секретарь диссертационного Совета

д.т.н., профессор



Кархин В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Современные тенденции создания автоматизированного и интеллектуального оборудования для сварки и родственных технологий подразумевают создание алгоритмического сопровождения для выбора оптимальных технологических процессов и режимов обработки и для управления технологическими процессами в реальном времени.

Современное состояние плазменных сварочных технологий характеризуется высокой технологической гибкостью и универсальностью технологий и оборудования. С помощью универсальной плазменной установки можно реализовать до 4–5 плазменных технологий: сварку, наплавку, нанесение покрытий, упрочнение поверхности и др., однако эффективная эксплуатация такого оборудования требует проведения соответствующих технологических исследований, направленных на создание алгоритмов выбора оптимальных технологий и режимов обработки и управления технологическими процессами.

В последнее время на практике находит все большее применение процесс плазменной поверхностной закалки. Этот процесс является недостаточно изученным, в частности, – в силу своей гибкости (широкими возможностями управления практически всеми электрогазодинамическими параметрами сжатой дуги, определяющими результаты технологического процесса).

Цель работы. Создание алгоритмического сопровождения технологии поверхностной закалки для гибких модулей плазменной обработки.

Основные задачи работы. Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Исследование и моделирование технологии плазменной поверхностной закалки;
2. Выбор методологии определения оптимальных технологических процессов и режимов плазменной обработки, разработка структуры и алгоритмов функционирования автоматизированной компьютерной системы плазменной обработки;
3. Разработка комплекса компьютерных программ диалоговой системы сопровождения интеллектуального плазменного оборудования.

Работа выполнялась в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете на кафедре теории и технологии сварки и включает в себя комплекс экспериментальных и теоретических исследований.

В работе применены методы математического моделирования тепловых процессов, детерминированные, статистические и эвристические методы реше-

ния технических проблем, использован аппарат теории дифференциальных уравнений, математические методы планирования экспериментов, современные методы оптимизации. Все расчеты и обработка данных велись с применением вычислительной техники и использованием методов прикладной математики.

Экспериментальные исследования проводились на отечественных технологических плазменных установках – УПС-301, УПНС-304 и др., а также – используя экспериментальные стенды плазменной обработки кафедры теории и технологии сварки СПбГПУ.

Проводилась экспериментальная проверка используемых моделей, используя как стандартные, так и оригинальные методики исследований, в том числе – изучение локальных энергетических параметров сжатой дуги методом плоскостного зондирования, металлографические исследования зоны закалки и другие современные методы изучения материалов.

Научная новизна. В работе теоретически и экспериментально исследованы особенности и закономерности технологического процесса плазменной поверхностной закалки, и на основе их анализа, моделирования и развития технологии разработаны принципы, методы и алгоритмы оптимизации и автоматизации технологии, которые могут быть применены для гибких модулей плазменной обработки. Получен ряд новых научных результатов, среди которых наиболее важными можно назвать следующие.

1. Установлено, что характерные для плазменной закалки параметры режима по мере ослабления их влияния располагаются в следующем порядке: для эффективной мощности Q_3 – ток сжатой дуги, диаметр плазмообразующего сопла, расход плазмообразующего газа и расстояние между соплом и изделием, для эффективного радиуса пятна нагрева R_3 – расстояние между соплом и изделием, ток сжатой дуги и диаметр плазмообразующего сопла, для напряжения сжатой дуги U – диаметр плазмообразующего сопла, ток сжатой дуги, расстояние между соплом и изделием и расход плазмообразующего газа, для глубины и ширины зоны закалки – ток сжатой дуги, расстояние между соплом и изделием, расход плазмообразующего газа. Полученные закономерности могут использоваться в алгоритмах выбора режимов закалки и управления процессом в реальном времени.
2. Разработанная методика пересчета опытных данных плоскостного зондирования сжатой дуги в функцию радиального распределения плотности теплового потока упрощает обработку экспериментальных данных, что облегчает автоматизацию этой обработки.

3. Полученные уравнения регрессии, связывающие глубину и ширину зоны закалки с параметрами режима, позволяют определить требования к оборудованию по необходимой точности поддержания параметров режима; так, для поддержания глубины и ширины зоны закалки с точностью не хуже $\pm 10\%$ необходима точность поддержания параметров: тока сжатой дуги $\Delta I / I \approx \pm 1\%$, расстояния между соплом и изделием $\Delta l_{\text{си}} / l_{\text{си}} \approx \pm 1,4\%$, расхода плазмообразующего газа $\Delta G_{\text{пр}} / G_{\text{пр}} \approx \pm 2,8\%$, скорости процесса закалки $\pm 6\%$.
4. Возможные режимы плазменной закалки можно условно разделить на две области: жесткие режимы и мягкие режимы, при этом максимум глубины закалки располагается на границе между ними.
5. При заданном диаметре сопла и ограничении температуры на поверхности возможная глубина закалки имеет максимум, а ширина закаленной зоны при тех же параметрах режима имеет локальный максимум; при увеличении тока дуги и скорости ее движения наблюдается рост ширины, а наибольшая скорость охлаждения находится в области жестких режимов и минимума погонной энергии.
6. В области жестких режимов, при увеличении тока до критического с соответствующим изменением скорости закалки для данного диаметра сопла наблюдается рост ширины при очень малом изменении глубины зоны закалки, обеспечивающей отсутствие оплавления поверхности и скорости охлаждения – не ниже критической.

Практическая значимость работы. В результате проведения комплекса теоретических и экспериментальных исследований разработаны методы, алгоритмы и программы расчета, оптимизации и регулирования технологических параметров поверхностной закалки для гибких модулей плазменной обработки с применением современной компьютерной техники.

Определены требования к технологическому оборудованию, реализующему процесс плазменной поверхностной закалки.

Материалы данной работы используются в учебном процессе Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, при подготовке студентов сварочных специальностей и в системе НАКС при аттестации специалистов сварочного производства.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались, начиная с 1996 года, на межвузовских, и международных научных конференциях и семинарах (сделан 21 доклад):

1. Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов. "Поли-технический симпозиум: Молодые ученые – промышленности и хозяйству Северо-Западного региона", 1999, 2000, 2002.
2. Научно-техническая конференция "Неделя науки СПбГТУ", 1996, 1998-2001.
3. Итоговый семинар по физике и астрономии по результатам конкурса грантов 1999 г. для молодых ученых Санкт-Петербурга. Санкт-Петербургский физико-технический институте им. Иоффе, 2000.
4. Научно-техническая конференция "Конструктивно-технологическое проектирование и производство сварных конструкций", 2000.
5. Всероссийская практическая конференция "Технолог по сварочному производству промышленных предприятий, объектов энергетики и строительства", 2000, 2001.
6. Международная практическая конференция-выставка "Технологии ремонта, восстановления и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций", 2000, 2001.
7. Международный семинар "Инструмент и технологическая оснастка: методы повышения эффективности", 2002.
8. Ежегодная научно-техническая конференция сварщиков "Сварочные чтения. Теория и практика", 2003.

По теме диссертации автор:

1. удостоен стипендии Президента Российской Федерации среди аспирантов 2002 – 2003 г.;
2. удостоен 6-и персональных грантов мэрии Санкт-Петербурга и Министерства образования РФ за 1998 – 2003 г.;
3. удостоен гранта среди молодых преподавателей, ученых и аспирантов факультета технологии и исследования материалов Санкт-Петербургского государственного технического университета 2001 г.;
4. награжден 5-ю дипломами Государственного комитета РФ по высшему образованию, комитетом РФ по металлургии, ассоциацией металлургических Вузов, московского института стали и сплавов и Санкт-Петербургского государственного технического университета за научные достижения.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 26 работ. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Объем работы. Диссертация содержит 174 страницы, включая текст, 89 рисунков и 18 таблиц, а также приложение на компакт-диске с разработанным программным обеспечением.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность темы, сформулирована цель и основные задачи работы, кратко перечислены методы исследований, научная новизна, практическая значимость и апробация работы.

Глава 1. Определение состава алгоритмической части гибких модулей плазменной обработки (ГМПО), реализующих концепцию "Открытой технологии".

Среди технологий, использующих высококонцентрированные источники энергии, плазменно-дуговые процессы отличаются высокими эффективностью, потенциально большой универсальностью и гибкостью, маневренностью, экономичностью и экологической чистотой. Всё это определяет перспективность создания и широкого использования в различных отраслях нового поколения интеллектуального технологического оборудования - гибких модулей плазменной обработки - сварки, нанесения покрытий, поверхностного упрочнения.

Гибкие модули плазменной обработки (ГМПО) в полном виде состоят из производственной части, реализующей технологический процесс, и интеллектуальной части, включающей в общем случае автоматизированные системы: научных исследований (АСНИ), проектирования (САПР), технологической подготовки производства (АСТПП) и управления технологическим процессом в реальном времени (АСУТП) (Рис. 1).



Рис. 1. Структура гибких модулей плазменной обработки (ГМПО).

Информационная структура гибких модулей плазменной обработки и ее содержание поднимают на качественно новый уровень создаваемое интеллектуальное технологическое оборудование плазменной обработки, которое в полной мере может реализовать концепцию "открытой технологии", ориентированную в первую очередь на гибкое интегрированное производство, на исследовательские центры, на опытное и мелкосерийное производство, на предприятия обслуживания и ремонта. "Открытая технология" подразумевает создание условий для эффективного использования технологическими ресурсами интеллектуальных ресурсов, заложенных в алгоритмическом сопровождении ГМПО для выбора оптимальных техпроцессов и режимов обработки, для развития и совершенствования плазменных технологий.

Правильно систематизированные знания позволяют сформировать общее видение тактических и стратегических задач промышленного предприятия, стимулировать его развитие и построить более эффективные производственные, коммерческие схемы, а также разработать, а в дальнейшем совершенствовать выпуск новой продукции и сопутствующих процессов и технологий.

Анализ функциональной, технологической и информационной структуры дает возможность целенаправленной и планомерной реализации работ по созданию нового поколения интеллектуального технологического оборудования плазменной обработки, являющегося не только универсальным производственным инструментом для сварки, нанесения покрытий и упрочнения, но обеспечивающего также: накопление данных, формирование базы знаний, уточнение моделей и алгоритмов, оптимальный выбор и интеграцию техпроцессов, их контроль, адаптацию и автоматизацию, и, наконец, – развитие кадров, технологий и гибких технологических модулей.

Предлагаемые принципы построения ГМПО, сохраняя все возможности жестко запрограммированного алгоритмического сопровождения технологического оборудования, в то же время, открывают путь создания саморазвивающихся систем, синтезирующих математические и эвристические методы, объединяющих потенциал компьютера и человека.

Принимая во внимание, что гибкие модули плазменной обработки должны строиться на базе высокоэффективных и надежных унифицированных элементов, составляющих их аппаратное обеспечение, разработка этих элементов требует привлечения различных методов оптимизации технологических процессов не только по диапазонам параметров режимов обработки, но и по необходимой точности поддержания значений этих параметров.

Глава 2. Сравнительный анализ методов поверхностной закалки сталей.

Глава посвящена анализу технологических особенностей современных технологий поверхностной закалки; выделены их основные преимущества, определяемые производственно-технологическими условиями.

Исследования, проведенные Линник В.А., Огениной А.К., Самотугиным С.С., Лещинским Л.К. и др. показали, что плазменная поверхностная закалка является одним из наиболее рациональных методов изменения структуры и свойств поверхностных слоев вследствие достаточной простоты, большой гибкости и невысокой стоимости данного процесса по сравнению с другими. При упрочнении сталей методом плазменной закалки обеспечивается получение закаленных слоев, которые по твердости, толщине и износостойкости удовлетво-

ряют требованиям, предъявляемым к упрочненным поверхностям многих деталей машин различного назначения, включая весьма ответственные.

Метод плазменной закалки целесообразно использовать в основном для локального упрочнения поверхностей деталей металлообрабатывающего, горнодобывающего и другого оборудования, в том числе крупногабаритных деталей и труднодоступных поверхностей, которые нерационально или невозможно упрочнить традиционными методами. В то же время применение плазменной закалки может быть перспективно и для получения сплошных и регулированных упрочненных слоев на сравнительно больших поверхностях деталей.

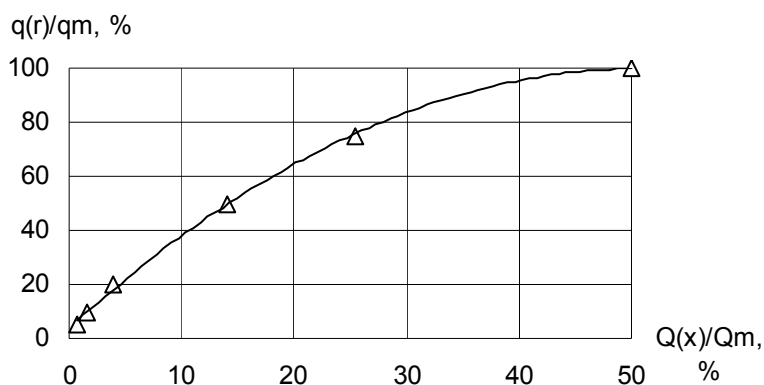
На основании анализа литературы можно сделать вывод, что остаются недостаточно изученными:

- локальные энергетические характеристики сжатой дуги в процессах плазменной закалки поверхности;
- параметры режимов закалки и рекомендации по выбору оптимальных режимов плазменной закалки.

Глава 3. Исследование энергетических характеристик сжатой дуги при плазменной поверхностной закалке.

Среди известных методик изучения локальных энергетических параметров источников тепла (распределение плотности теплового потока и плотности тока по пятну нагрева сварочной дуги) весьма эффективно применение метода плоскостного зондирования, однако этот метод требует весьма сложной обработки экспериментальных результатов, снижающей их точность.

Многочисленные исследования показали, что сварочные источники тепла могут быть адекватно аппроксимированы законом нормального распределения Гаусса. Это дает возможность применить разработанную простую и надежную инженерную методику обработки данных плоскостного зондирования сварочных источников тепла, основанную на использовании относительных значений $Q(x) / Q_m$ и $q(r) / q_m$ (Рис. 2).



Проверка разработанной методики показала ее соответствие результатам расчета функций радиального распределения использующего всю экспериментальную кривую $Q(x)$. Предла-

гаемая методика фактически может использовать одно значение $Q(x) / Q_m$, что существенно упрощает обработку данных плоскостного зондирования при высокой точности.

Установлено, что характерные для плазменной закалки параметры режима по мере ослабления их влияния располагаются в следующем порядке: для эффективной мощности Q_3 – ток сжатой дуги, диаметр плазмообразующего сопла, расход плазмообразующего газа и расстояние между соплом и изделием, для эффективного радиуса пятна нагрева R_3 – расстояние между соплом и изделием, ток сжатой дуги и диаметр плазмообразующего сопла, для напряжения сжатой дуги U – диаметр плазмообразующего сопла, ток сжатой дуги, расстояние между соплом и изделием и расход плазмообразующего газа (Рис. 3).



Рис. 3. Связь эффективной мощности и эффективного радиуса сжатой дуги с параметрами режима плазменной закалки.

Полученные по результатам плоскостного зондирования сжатой дуги уравнения регрессии для эффективной мощности и эффективного радиуса, приведенные к относительному виду могут использоваться для определения требований к технологическому оборудованию и в гибких модулях плазменной обработки (ГМПО) для управления технологическим процессом в реальном времени (АСУТП) (Рис. 1).

Полученные регрессионные уравнения эффективной мощности, эффективного радиуса и напряжения сжатой дуги достоверно описывают реальный процесс обработки материала, средняя погрешность для эффективной мощности составила 2,5 %, для эффективного радиуса – 8 %, и для напряжения 3,3%.

В результате проведенных экспериментов по изучению процесса плазменной закалки поверхности установлено:

- a. с увеличением тока эффективный КПД сжатой дуги уменьшается;
- b. по мере увеличения тока влияние расстояния между соплом и изделием на эффективный КПД сжатой дуги уменьшается;
- c. с увеличением расхода плазмообразующего газа растет эффективный КПД сжатой дуги, причем отмечается нелинейный характер зависимости.

Глава 4. Моделирование, экспериментальная проверка и оптимизация плазменной поверхностной закалки.

Для описания температурной обстановки в металле при плазменной обработке материала целесообразно выбрать предложенную профессором Кархиным В.А. схему подвижного источника, распределенного по поверхности плоского слоя и нормально в плоскости слоя.

$$\Delta T(x, y, z, t_m) = \frac{Q_э}{4\pi\lambda s} \int_0^{t_m} \frac{1}{t+t_0} \exp\left[-\frac{(x+vt)^2 + y^2}{4a(t+t_0)}\right] \cdot \left[1 + 2 \sum_{i=1}^{\infty} \cos\frac{\pi iz}{s} \exp\left(-\pi^2 i^2 \frac{at}{s^2}\right)\right] dt$$

Усовершенствованный алгоритм решения тепловой задачи с переменным шагом интегрирования (Рис. 4) дал возможность существенно (на несколько порядков) повысить скорость расчета без потери точности.

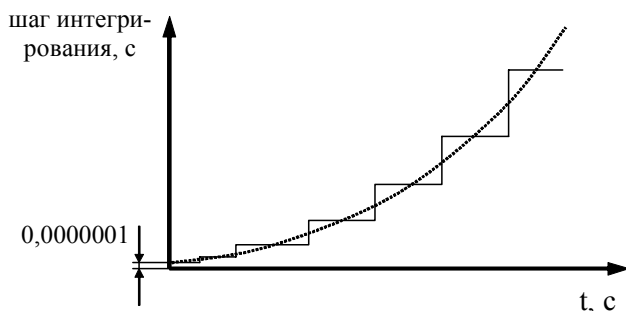


Рис. 4. Зависимость изменения шага интегрирования от времени (на начальном этапе интегрирования шаг принимается равным 0,0000001 с).

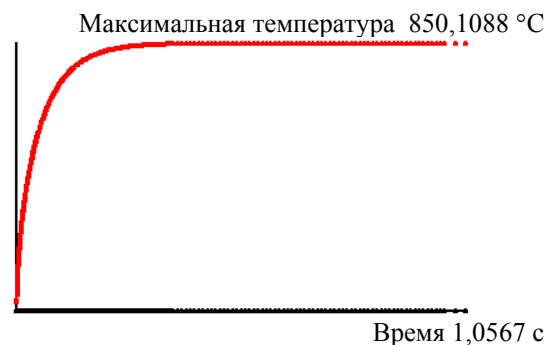


Рис. 5. Характерная для плазменной закалки зависимость изменения температуры во времени до выхода в квазистационарный режим.

Установлено, что характерные для плазменной закалки параметры режима по мере ослабления их влияния на размеры зоны закалки располагаются в следующем порядке: для глубины закалки z – ток сжатой дуги, расстояние между соплом и изделием, расход плазмообразующего газа, для ширины зоны закалки y – ток сжатой дуги, расстояние между соплом и изделием, расход плазмообразующего газа (Рис. 6).

Полученные по результатам плоскостного зондирования сжатой дуги и проведенных расчетов уравнения регрессии для глубины и ширины зоны закалки могут использоваться в гибких модулях плазменной обработки (ГМПО) в составе автоматизированной системы управления технологическим процессом в реальном времени (АСУТП), т.е. эти уравнения могут быть использованы в автоматизированном оборудовании, включая распределенные микропроцессорные системы.

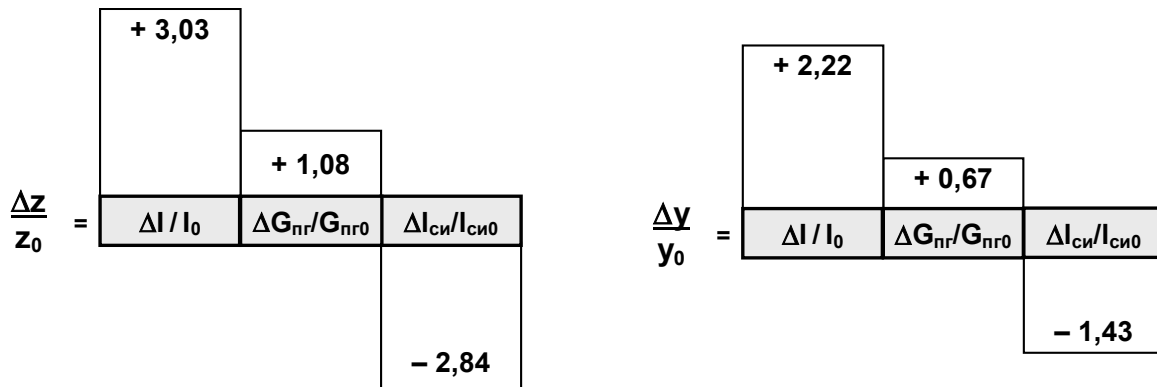


Рис. 6. Влияние параметров режима на глубину и ширину зоны закалки.

Разработанная и реализованная в программе Plasmnet методика расчета максимальной глубины и ширины зоны закалки (Рис. 7), позволяет получать результаты, согласующиеся с экспериментальными данными.

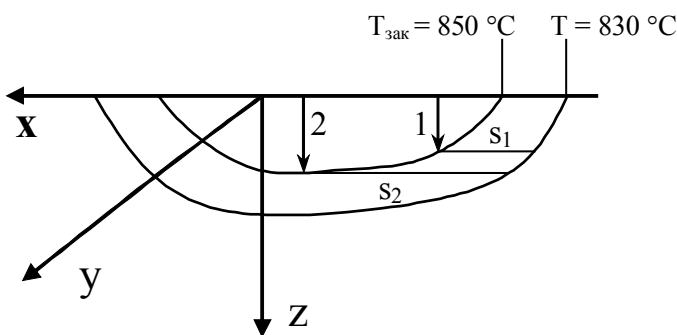


Рис. 7. Схема расчета максимальной глубины закалки.

Программа Plasmnet, позволяет прогнозировать параметры зоны плазменной закалки и может быть использована при выборе режима плазменной поверхностной обработки по требуемой глубине и/или ширине зоны закалки.

Средняя погрешность расчетного определения размеров зоны закалки на режимах плазменной обработки не превышает 9 %.

Полученные уравнения регрессии, связывающие глубину и ширину зоны закалки с параметрами режима, позволяют определить требования к оборудованию по необходимой точности поддержания параметров режима; так, для поддержания глубины и ширины зоны закалки с точностью $\pm 10\%$ необходима точность поддержания параметров: тока сжатой дуги $\Delta I / I \approx \pm 1\%$, расстояния между соплом и изделием $\Delta l_{\text{си}} / l_{\text{си}} \approx \pm 1,4\%$, расхода плазмообразующего газа $\Delta G_{\text{пр}} / G_{\text{пр}} \approx \pm 2,8\%$, скорости процесса закалки $\pm 6\%$.

Возможные режимы плазменной закалки можно условно разделить на две области: область жестких режимов и область мягких режимов (Рис. 8). В области жестких режимов на поверхности достигается максимально допустимая температура без оплавления металла (для стали 45 $T_{\text{пов}} = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$), а скорости охлаждения зоны закалки – существенно выше критической. Мягкие режимы лимитируются скоростью охлаждения закаливаемого слоя, нагретого до температуры выше A_{c3} (для стали 45 $T_{\text{зак}} = 850 \text{ }^\circ\text{C}$) которая должна быть больше кри-

тической (для стали 45 $v \geq 100$ К/с). Максимум глубины зоны закалки располагается на границе между областями жестких и мягких режимов.

Максимальная скорость охлаждения находится в области минимальной погонной энергии.

Толщина закаливаемого листа мало влияет на глубину и ширину зоны закалки, для жестких режимов начиная с 4 мм, для мягких режимов начиная с 15 мм.

При увеличении тока до критического для данного диаметра сопла (с соответствующим изменением скорости движения, обеспечивающей отсутствие оплавления поверхности и скорости охлаждения не ниже критической) наблюдается рост ширины при очень малом изменении глубины закалки.

Для максимальной глубины закалки наблюдается локальный максимум ширины зоны закалки (Рис. 8).

Выявленная оптимальная область режимов дает возможность проводить оптимизацию плазменной закалки по различным критериям, т.е. вести поиск максимальной производительности (скорости процесса закалки), максимальной глубины и/или максимальной ширины зоны закалки.

Глава 5. Программное обеспечение гибких модулей плазменной обработки.

На основе формируемых баз знаний, выработаны технологические рекомендации и алгоритмы для оптимального выбора и практического использования гибких плазменных технологий сварки, нанесения покрытий и упрочнения поверхностей.

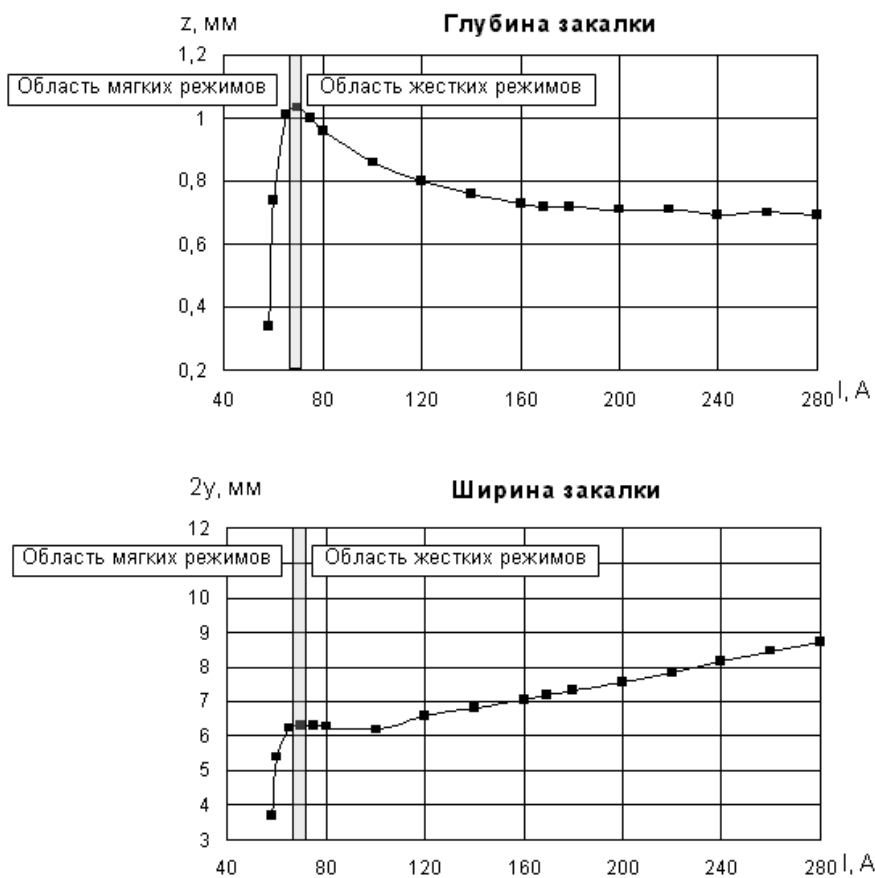


Рис. 8. Зависимость глубины и ширины зоны закалки от тока сжатой дуги: $d_c = 3,8$ мм, $G_{пл} = 2,5$ л/мин, $I_{си} = 7$ мм (сталь 45, $s = 20$ мм).

На основании проведенного анализа плазменных технологий были выявлены отличительные особенности плазменных технологий, а также получены экспертные количественные оценки, которые можно использовать для обоснованного выбора плазменных технологий. По полученным результатам построена программа выбора оптимальных плазменных технологий – Technology.

Для эффективной эксплуатации гибких модулей плазменной обработки разработаны специализированные компьютерные программы:

- "Выбор оптимальных плазменных технологий" (программа Technology).
- "Информационная система обеспечения плазменных технологий" (программа InfoPlas).
- "Проверка знаний основ плазменных технологий" (программа Intellect).
- "Расчет технологических параметров плазменной обработки" (программа Plasmet).

Типичное время расчетов не превышает 10–20 секунд.

Применение разработанных программ в комплексе с технологическим оборудованием даст возможность реализовать концепцию "открытой технологии", осуществлять подготовку кадров непосредственно на предприятии, развивать технологии и адаптировать их под конкретные задачи производства.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. По результатам проведенных исследований разработана методика обоснованного выбора технологий и режимов плазменной закалки в составе интеллектуальной части гибких модулей плазменной обработки.
2. Установлены закономерности изменения глубины и ширины закаленной зоны в зависимости от тепловых параметров сжатой дуги и свойств материала.
3. Установлено, что характерные для плазменной закалки параметры режима по мере ослабления их влияния располагаются в следующем порядке: для эффективной мощности Q_3 – ток сжатой дуги, диаметр плазмообразующего сопла, расход плазмообразующего газа и расстояние между соплом и изделием, для эффективного радиуса пятна нагрева R_3 – расстояние между соплом и изделием, ток сжатой дуги и диаметр плазмообразующего сопла, для напряжения сжатой дуги U – диаметр плазмообразующего сопла, ток сжатой дуги, расстояние между соплом и изделием и расход плазмообра-

зующего газа, для глубины и ширины зоны закалки – ток сжатой дуги, расстояние между соплом и изделием, расход плазмообразующего газа.

4. Полученные уравнения регрессии, связывающие глубину и ширину зоны закалки с параметрами режима, позволяют определить требования к оборудованию по необходимой точности поддержания параметров режима; так, для поддержания глубины и ширины зоны закалки с точностью $\pm 10\%$ необходима точность поддержания параметров: тока сжатой дуги $\Delta I / I \approx \pm 1\%$, расстояния между соплом и изделием $\Delta l_{\text{си}} / l_{\text{си}} \approx \pm 1,4\%$, расхода плазмообразующего газа $\Delta G_{\text{пт}} / G_{\text{пт}} \approx \pm 2,8\%$, скорости процесса закалки $\pm 6\%$.
5. Полученные по результатам плоскостного зондирования сжатой дуги уравнения регрессии (эффективной мощности, эффективного радиуса, глубины закалки и ширины зоны закалки) могут использоваться в гибких модулях плазменной обработки (ГМПО) в составе автоматизированной системы управления технологическим процессом в реальном времени (АСУТП); т.е. эти уравнения могут быть использованы в автоматизированном оборудовании, включая распределенные микропроцессорные системы.
6. Усовершенствованный алгоритм решения тепловой задачи с переменным шагом интегрирования дал возможность существенно повысить скорость расчета без потери точности.
7. Возможные режимы плазменной закалки можно условно разделить на две области: жесткие режимы и мягкие режимы, при этом максимум глубины закалки располагается на границе между ними. Наибольшая скорость охлаждения находится в области жестких режимов и минимума погонной энергии.
8. Как показали расчеты толщина закаливаемого листа мало влияет на глубину и ширину зоны закалки: для жестких режимов начиная с 4 мм для мягких режимов начиная с 15 мм.
9. В области жестких режимов, при увеличении тока до критического для данного диаметра сопла наблюдается рост ширины при очень малом изменении глубины закалки с соответствующим изменением скорости, обеспечивающей отсутствие оплавления поверхности и скорости охлаждения не ниже критической.
10. На основе формируемых баз знаний, выработаны технологические рекомендации и алгоритмы для оптимального выбора и практического использования гибких плазменных технологий сварки, нанесения покрытий и упрочнения поверхностей.

11. Для обоснованного выбора плазменных технологий можно использовать экспертные количественные оценки, полученные в работе.
12. Для эффективной эксплуатации создаваемого оборудования нового поколения – гибких плазменных модулей разработана его интеллектуальная часть, базирующаяся на специализированных компьютерных программах:
 - "Выбор оптимальных плазменных технологий" (программа Technology).
 - "Информационная система обеспечения плазменных технологий" (программа InfoPlas).
 - "Проверка пользователей-технологов на знание основ плазменных технологий" (программа Intellect).
 - "Расчет технологических параметров плазменной обработки" (программа Plasmet).

Применение разработанных программ в комплексе с технологическим оборудованием даст возможность реализовать концепцию "открытой технологии", осуществлять подготовку кадров, развивать технологии и получить в различных отраслях промышленности значительный экономический эффект.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Христофис Б.О. Принципы построения алгоритмического обеспечения гибких модулей плазменных технологий. // В сб. 25-я Неделя науки СПбГТУ. СПб.: СПбГТУ. 1996.
2. Христофис Б.О. Развитие структурных элементов гибкой системы плазменных технологий. // В сб. 27-я Неделя науки СПбГТУ. СПб.: СПбГТУ. 1998.- С.94-95.
3. Христофис Б.О., Ермаков С.А. Расчеты режимов плазменного поверхностного упрочнения. // В сб. 27-я Неделя науки СПбГТУ. СПб.: СПбГТУ. 1998.- С.95-97.
4. Христофис Б.О., Соснин Н.А. Применение экспертных систем в алгоритмическом обеспечении АСНИ плазменной обработки. // В сб. 28-я Неделя науки СПбГТУ. СПб.: СПбГТУ. 1999.- С.77-79.
5. Христофис Б.О., Ермаков С.А. Математические методы планирования и обработки экспериментов в АСНИ плазменной обработки. // В сб. 28-я Неделя науки СПбГТУ. СПб.: СПбГТУ. 1999.- С.79-81.
6. Христофис Б.О. Построение алгоритмов выбора ресурсосберегающих плазменных технологий и оптимальных режимов для оборудования нового

- поколения на основе физического и математического моделирования процессов сварки, нанесения покрытий и упрочнения. // Материалы Четвертой Санкт-Петербургской ассамблеи молодых ученых и специалистов. СПб.: 1999.- С.54-55.
7. Христофис Б.О. Применение принципа минимизации погонного производства энтропии в алгоритмах выбора оптимальных режимов плазменной сварки, нанесения покрытий и упрочнения. // Материалы итогового семинара по физике и астрономии по результатам конкурса грантов 1999 г. для молодых ученых СПб. СПб.: 2000.- С.56-58.
 8. Христофис Б.О. Критериальные модели в автоматизированных компьютерных системах выбора режимов сварки. // В сб. Пятая Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов. СПб.: 2000.- С.47.
 9. Соснин Н.А., Башенко В.В., Ермаков С.А., Христофис Б.О. Новое поколение технологического оборудования прецизионной плазменной сварки, наплавки и упрочнения. // Научно-технические ведомости СПбГТУ. СПб. № 3(21). 2000.- С.34-38.
 10. Христофис Б.О. Информационная база плазменных технологий. // Материалы Научно-технической конференции "Конструктивно-технологическое проектирование и производство сварных конструкций". СПб.: 2000.- С.73-74.
 11. Христофис Б.О., Соснин Н.А. Формирование баз знаний плазменных технологий сварки и обработки материалов. // В сб. 29-я Неделя науки СПбГТУ. СПб.: СПбГТУ. 2001.- С.140-141.
 12. Христофис Б.О., Тополянский П.А. Интернет-технологии – эффективный путь решения производственных проблем ремонта и упрочнения. // Материалы 3-ей Всероссийской практической конференции-выставки "Технологии ремонта, восстановления и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций". СПб.: 2001.- С.102-103.
 13. Христофис Б.О., Соснин Н.А. Информационная система обеспечения плазменных технологий ремонта и упрочнения. // Материалы 3-ей Всероссийской конференции-выставки "Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций". СПб.: 2001.- С.107-109.
 14. Христофис Б.О., Соснин Н.А. Управление знаниями – технология решения производственных задач. // Материалы 2-ой Всероссийской практической конференции "Технолог по сварочному производству промышленных

- предприятий, объектов энергетики и строительства". СПб.: СПбГТУ. 2001.- С.17-21.
15. Христофис Б.О. Применение информационных технологий в системе подготовки специалистов сварочного производства. // В сб. 30-я Неделя науки СПбГТУ. СПб.: СПбГТУ. 2001.- С.64.
 16. Христофис Б.О., Скутин В.С. Алгоритм разрешения технических противоречий при производстве сварных конструкций. // В сб. 30-я Неделя науки СПбГТУ. СПб.: СПбГТУ. 2001. С.65-66.
 17. Христофис Б.О. Эффективность применения плазменных технологий ремонта, восстановления и упрочнения в промышленности. // Материалы Шестой Санкт-Петербургской ассамблеи молодых ученых и специалистов. Политехнический симпозиум "Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона". СПб.: 2002.- С.11.
 18. Христофис Б.О., Соснин Н.А. Плазменная закалка деталей и инструмента. // Материалы международного семинара "Инструмент и технологическая оснастка: методы повышения эффективности". СПб.: СПбГТУ. 2002.- С.81-83.
 19. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Христофис Б.О. Выбор и оптимизация процессов плазменного поверхностного упрочнения. // Материалы 3-ей Всероссийской практической конференции "Технолог по сварочному производству промышленных предприятий, объектов энергетики и строительства". СПб.: СПбГПУ. 2002.- С.113-125.
 20. Христофис Б.О., Ермаков С.А. Исследование тепловых характеристик сжатой дуги в аргоне. // В сб. 31-я Неделя науки СПбГПУ. СПб.: СПбГПУ. 2002.- С.22-23.
 21. Христофис Б.О. Разработка модели, методики и программы расчета оптимальных режимов плазменной поверхностной закалки и упрочнения. // В сб. Седьмая Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов. СПб.: 2002.- С.98.
 22. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А., Христофис Б.О. Выбор оптимальных плазменных технологий ремонта, восстановления и упрочнения. // Материалы 5-ой международной практической конференции – выставки "Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций". СПб.: СПбГПУ. 2003.- С.3-13.

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97.

Подписано к печати _____ Объем в п.л. 1,0

Тираж – 100. _____ Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета
в Издательстве СПбГПУ
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.