

С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин, А. В. Матушкин



**ПЛАЗМЕННЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ
В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ**



Екатеринбург
РГПУ
2023

Министерство просвещения Российской Федерации
ФГАОУ ВО «Российский государственный
профессионально-педагогический университет»

С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин, А. В. Матушкин

**ПЛАЗМЕННЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ
В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ**

Монография

Екатеринбург
РГППУ
2023

УДК 621.7-29:533.9-11

ББК К500.57-5

А 64

Авторы: С. В. Анахов (гл. 1, 2, 4), Ю. А. Пыкин (введение, гл. 5),
А. В. Матушкин (заключение, гл. 3)

Анахов, Сергей Вадимович.

А 64 Плазменные инструменты в машиностроительных технологиях: монография / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин, А. В. Матушкин. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2023. 189 с. Текст: непосредственный
ISBN 978-5-8050-0742-3

Рассматриваются области применения и перспективы использования плазмотронов в различных электроплазменных технологиях. Освещены вопросы проектирования современных металлорежущих плазмотронов. Представлены критерии эффективности проектирования и применения плазмотронов в машиностроительных технологиях резки, сварки, поверхностной модификации и термообработки. Дано обоснование комплексного подхода к проблеме безопасности, в рамках которого плазмотрон является не только эффективным технологическим инструментом, но и источником вредного и опасного воздействия, а также инструментом создания экологически безопасной среды.

Предназначена преподавателям университетов и колледжей, а также широкому кругу специалистов, заинтересованных в развитии и совершенствовании системы профессионально-педагогического образования.

УДК 621.7-29:533.9-11

ББК К500.57-5

Рецензенты: д-р техн. наук Б. А. Потехин (ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»); д-р техн. наук Б. Н. Гузанов (ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет»)

*Исследование выполнено
при поддержке гранта РФФИ 23-29-00111*

ISBN 978-5-8050-07-0742-3

© ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», 2023

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Электроплазменные технологии: общие сведения	8
1.1. Принципы классификации электроплазменного оборудо- вания	8
1.2. Принципы и методы проектирования инструментальных плазмотронов	15
Глава 2. Плазменно-дуговая резка металлов	22
2.1. Тенденции развития термических способов резки	22
2.2. Показатели эффективности и качества термических спо- собов резки металла.....	34
2.3. Принципы проектирования систем газодинамической стабилизации в плазмотронах для резки	44
2.4. Новые методы проектирования систем газовихревой ста- билизации в плазмотронах для резки.....	69
2.5. Плазменная утилизация техногенных металлосодержа- щих отходов	91
Глава 3. Плазменная сварка.....	98
3.1. Физические основы плазменной и микроплазменной сва- рок	98
3.2. Принципы и методы проектирования сварочных плазмо- тронов	100
3.3. Разработка новых сварочных плазмотронов.....	110
Глава 4. Плазменная поверхностная модификация и термоупроч- нение	119
4.1. Технологии плазменной закалки.....	119
4.2. Влияние активных газовых компонент на эффект плаз- менного поверхностного упрочнения.....	134

Глава 5. Основы безопасности электроплазменных процессов	152
5.1. Вредные и опасные факторы плазменных технологий	152
5.2. Анализ факторов оптического излучения технологий плаз- менной резки	160
5.3. Причины возникновения и методы борьбы с шумовым фак- тором плазменных технологий	165
Заключение	179
Библиографический список	181

Введение

В широком ряду современных методов высокоэнергетического воздействия на материалы (лазерных, электронно-лучевых, электрофизических) особое место занимают электроплазменные технологии. Основным отличием плазменных технологий от других методов воздействия на материалы является использование *генератора плазмы* – устройства, создающего из нейтральных веществ потоки низкотемпературной плазмы, т. е. плазмы с кинетической энергией частиц, практически равной их энергии ионизации. Генераторы плазмы, работающие на газах при давлениях, сравнимых с атмосферным, называют *плазмотронами*. Аппарат был изобретен в начале XX в. наряду с первыми открытиями в физике плазмы и технологии ее генерации. Тем не менее активное внедрение плазменных процессов в промышленность началось только во второй половине XX в. после решения материаловедческих проблем эрозии электродов при большой плотности тока плазменной дуги ($j \sim 10^5$ А/см²) за счет использования тугоплавких (как правило, вольфрамовых и гафниевых) катодных вставок и газодинамической стабилизации дуги в межэлектродном пространстве. Мощность современных плазмотронов составляет от единиц до тысяч киловатт. Сегодня плазмотронная техника и технология являются отраслью, охватывающей плазменную резку и плавку металлов, наплавку, напыление покрытий, плазмохимию, спецметаллургию, утилизацию и обезвреживание отходов, получение новых чистых материалов, ультрадисперсных и специальных порошков, нанесение пленок и покрытий вакуумно-плазменным методом и т. д. [1]. Разработано большое количество плазмотронов для самых разных целей: они применяются для нагревания газа в аэродинамических трубах и плазмохимических реакторах, при прямом восстановлении металлов из руд, интенсификации доменных и мартеновских процессов. Плазмотроны используются как инструмент для термического бурения горных пород, при спектрометрических исследованиях, для получения стабильного эталона излучения, в качестве реактивных двигателей малой тяги для космических аппаратов и т. д. [2].

В настоящее время существует целый ряд государственных промышленных приоритетов, в реализации которых плазменные технологии могут сыграть существенную роль. Как известно, первым и наиболее распространенным направлением использования плазмотронов явля-

ется их применение в процессах разделки металла и металлолома. Для этих целей предлагается большое число металлорежущих плазмотронов различного функционального назначения и конструктивного исполнения как отечественных, так и зарубежных производителей. Однако существенная часть плазмотронов и самих технологий их применения является лишь незначительной модификацией разработок, выполненных еще в XX в., из-за чего их ключевые характеристики (скорость, производительность и качество резки, материало- и энергопотребление, себестоимость, безопасность, степень автоматизации и даже дизайн устройств и установок) оказываются сопоставимы либо незначительно превышают параметры, достигнутые более 20 лет назад. По этой причине возникают как конкурентные, так и технологические ограничения, связанные с невысоким качеством и меньшей производительностью при резке металлов малых толщин (по сравнению с лазерными и гидроабразивными технологиями) и необходимостью дополнительной обработки поверхности разделочных швов при производстве сварных соединений. Среди разработок отечественного электроплазменного оборудования практически отсутствуют инструментальные плазмотроны для прецизионной резки (технология сжатой, или узкоструйной, плазмы), обеспечивающие повышенную точность и качество реза кромок, высокую материальную и энергетическую эффективность, а также безопасность процесса. С подобными проблемами потребитель может столкнуться и при выборе плазменных инструментов для других технологий машиностроительного производства – сварки, напыления, термообработки и т. д.

Отдельного внимания при исследовании плазменных технологий заслуживает сфера их безопасного применения [3]. Использование плазмотронов в большинстве случаев требует контроля и обеспечения безопасного уровня по шумоизлучению [4], загрязнению газовыми аэрозолями, тепловой, световой и электромагнитной нагрузке. В соответствии с современными принципами и методами обеспечения безопасности жизнедеятельности, помимо традиционных мер защиты и регламентации трудовой деятельности, возникают задачи проектирования плазмотронов с пониженным уровнем негативного воздействия на рабочий персонал и их внедрения в состав автоматизированных комплексов плазменной обработки с минимальным влиянием человеческого фактора на рабочий процесс.

Не менее значимы научно-образовательные аспекты внедрения и использования электроплазменных технологий. Разработка новых плазменных технологий должна основываться на применении современных цифровых методов проектирования и анализа широкого числа процессов (газодинамических, тепло- и электрофизических и т. д.), обеспечивающих эффективную работу плазменного оборудования, на использовании большого арсенала средств экспериментальных исследований и опираться на знание массива теоретической и практической информации, накопленной за более чем 50-летнюю историю развития плазмотронной отрасли. Очевидно, что на реализацию этих целей должны быть направлены и образовательные программы инженерной подготовки по технологическим направлениям высокоэнергетического воздействия на материалы. В подобных программах необходимо сочетать фундаментальную и специализированную подготовки, с тем чтобы выпускники в рамках трансдисциплинарной деятельности могли работать научными работниками, конструкторами, технологами, операторами и наладчиками электроплазменных устройств и т. д. Надеемся, что данная книга поможет ученым, преподавателям и студентам сделать плазменные технологии одним из наиболее эффективных инструментов в современном машиностроении.

Глава 1. ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Принципы классификации электроплазменного оборудования

При проектировании плазмотронов необходимо учитывать особенности, характерные для каждой из технологий их применения. К настоящему времени разработано большое количество плазмотронов, классифицировать которые можно по целому ряду признаков: функциональных, конструктивных и параметрических. Как уже было сказано, современные плазмотроны способны работать на мощностях энергопотребления от единиц до тысяч киловатт, обеспечивая (с разным термическим коэффициентом полезного действия) преобразование электрической энергии в тепловую и кинетическую и производя тем самым термокинетическое воздействие на материалы, обладающие различной структурой и свойствами. Представленная на рис. 1 (здесь и далее рисунки даны в редакции авторов – *примеч. ред.*) классификация плазмотронов является обобщающей [2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17], типы плазмотронов по назначению даны в соответствии с классификацией Г. К. Клименко [6].

Большинство плазмотронов, применяемых в настоящее время для сварки, резки, напыления, следует отнести к категории *плазменного инструмента*. Мощность таких устройств – от единиц до сотен киловатт [7].

Более мощные (до тысяч киловатт) *плазмохимические реакторы* осуществляют процесс химических превращений в плазменной среде (получение ацетилена и этилена [1], восстановление чистых веществ из их окислов или хлоридов). *Металлургические плазмотроны* средней и большой мощности используются для переплава тугоплавких (например, циркония [1]) и особо чистых материалов, восстановления чистых материалов, рафинирования, получения монокристаллов и дисперсных материалов. Также средней (от десятков до сотен киловатт) мощностью обладают *плазменные нагреватели*, предназначенные для обезвреживания и утилизации отходов, розжига топок котлов и т. д. Отдельный класс составляют *научно-исследовательские плазмотроны*, применяемые для изучения и моделирования физико-технических процессов в аэродинамике, теплофизике, высокотемпературных технологиях и имеющие мощность от единиц до десятков киловатт.



Рис. 1. Признаки классификации плазмотронов и их классификация

Тенденцией последних лет можно назвать появление большого числа плазмохимических и научно-исследовательских плазмотронов различных модификаций, а среди инструментальных аппаратов следует выделить те, что предназначены для реализации недавно появившейся технологии узкоструйной, или сжатой, плазменной резки.

Широта номенклатуры выпускаемых плазмогенераторов и технологий их применения заставляет искать общие принципы, лежащие в основе их функционального использования и обуславливающие их классификацию по конструктивным признакам и параметрам. Взаимосвязь процессов, обеспечивающих стабильное выполнение соответствующей технологической процедуры, удобно рассмотреть, прибегнув к структурно-функциональному методу изучения технических объектов и исследований [18, 19]. Согласно данному методу, технологическая структура представляет собой иерархическую последовательность взаимосвязанных информационных устройств, что позволяет рассматривать различные технологии как эквивалентные в информационном смысле и оптимизировать их, используя принципы кибернетического управления. Разделение материи на объекты воздействия (массу, энергию и информацию) и средства воздействия (материально-энергетические комплексы) позволяет выделить процессы, обеспечивающие движение материи между средствами воздействия. Применительно к технологиям плазменной обработки материалов данная схема приобретает вид, представленный на рис. 2.

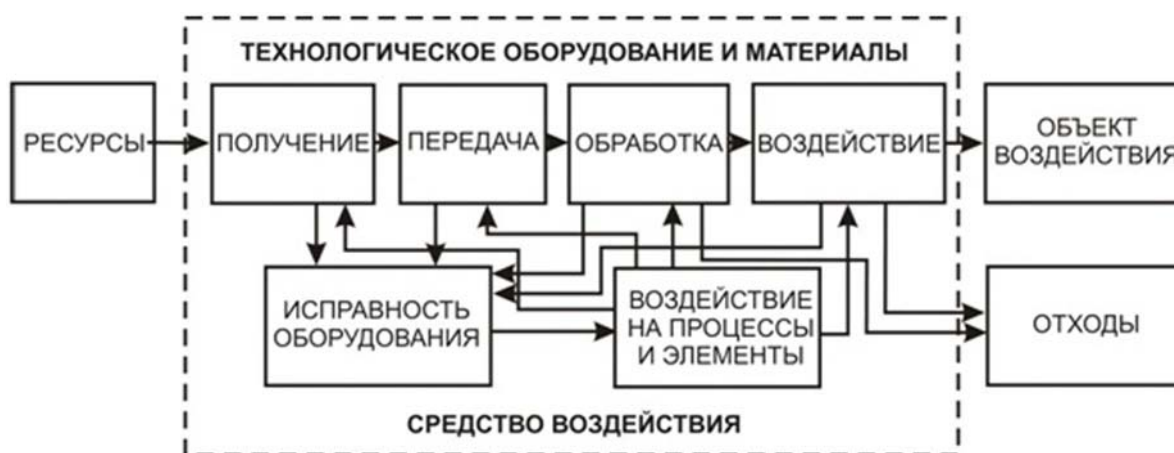


Рис. 2. Материально-энергетическая структура электроплазменных технологий

Получение и передача материалов и энергии происходят по технологическим каналам от соответствующих систем, включенных в общую функциональную схему, в плазмотрон. На рис. 3 представлена материально-энергетическая схема плазменной резки металла.

В качестве *ресурсов* в любой низкотемпературной плазменной технологии выступают электроэнергия и вещество, подаваемые в плазмотрон в различных фазовых состояниях (плазмообразующий газ (ПОГ), охлаждающая вода, порошок, парогазовая смесь) и с разной, но не нулевой, энергией (под давлением). В технологиях плазменной резки, сварки, наплавки объектом внешнего воздействия являются твердотельные материалы. Данный признак позволяет классифицировать плазмтроны как по функциональному назначению (инструментальные и металлургические, плазменные нагреватели, плазмохимические реакторы и научно-исследовательские генераторы), так и по виду и свойствам веществ, применяемых в технологических схемах обслуживания соответствующего электроплазменного процесса (см. рис. 3).



Рис. 3. Материально-энергетическая схема плазменной разделки металлов

Плазмотрон как элемент, выполняющий главную роль во всей технологической цепочке, представлен на рис. 4. Стандартными элементами такой схемы являются источник питания, обеспечивающий

горение электрической дуги между катодом и анодом в сопловом узле плазмотрона, система подготовки плазмообразующего газа, замкнутая система водяного охлаждения соплового узла и сам плазмотрон, преобразующий материальные и энергетические потоки в энергию низкотемпературной плазменной струи, воздействующей на металл.

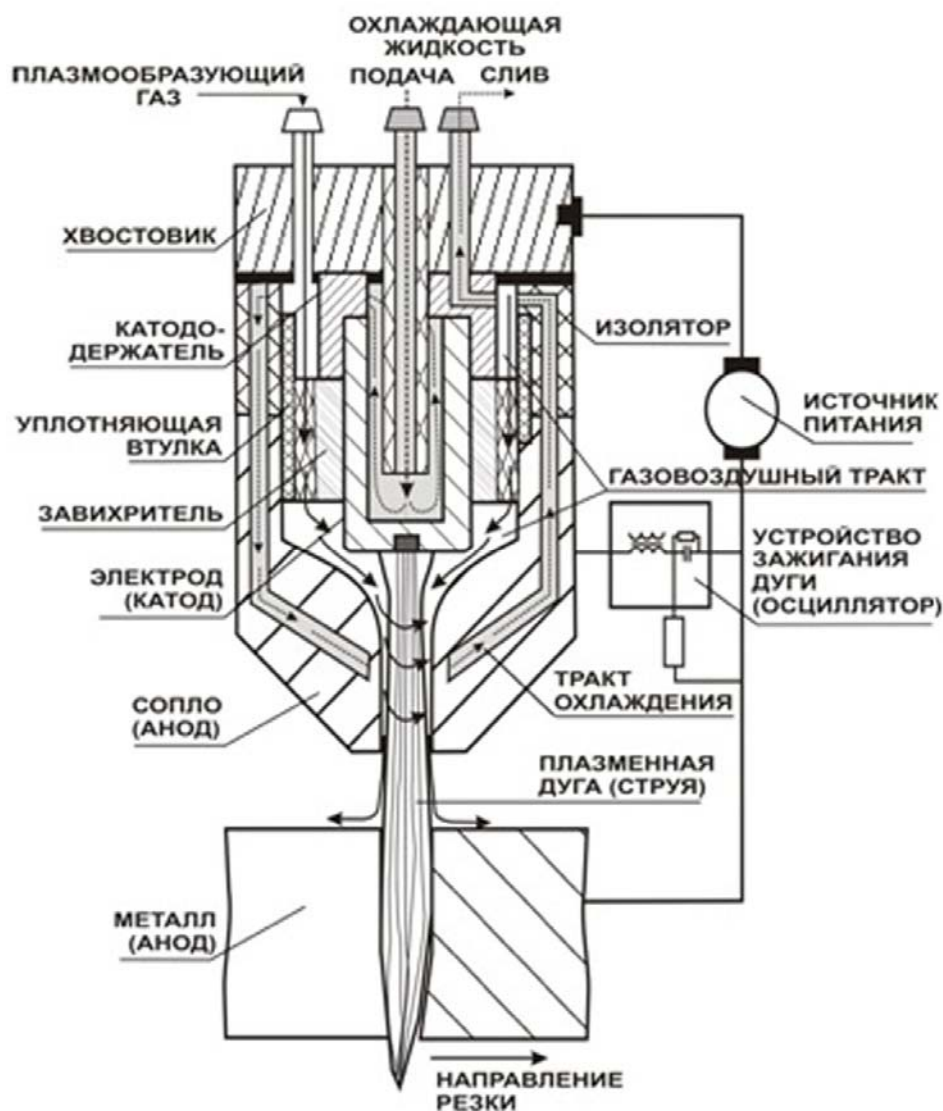


Рис. 4. Конструктивная схема плазмотрона для резки металла (прямая полярность)

В случае использования других технологий в схеме могут появиться дополнительные элементы, обеспечивающие поступление в плазмотрон веществ различного фазового состава (порошков, парогазовых смесей, обезвреживаемых газов и т. д.), отбор продуктов переработки, управление работой устройств и т. д.

При такой схеме должен осуществляться ручной или автоматический контроль параметров процесса – тока дуги I , напряжения на дуге U , расхода охлаждающей жидкости и плазмообразующего газа Q , температуры T и давления P газа на входе, а иногда и на выходе из системы.

В плазмотроне (см. рис. 4) осуществляются процессы *обработки и взаимного превращения материалов и энергии*. Газовоздушный тракт (ГВТ) плазмотрона проектируется с учетом требований минимизации аэрогидродинамических потерь плазмообразующего газа, а также обеспечения условий стабилизации горения дуги в межэлектродном пространстве. Способ подачи ПОГ в формирующей плазменной дуге (струе) сопловой узел существенным образом сказывается на эффективности всего процесса. Кинетическая энергия газового потока при его прохождении через завихритель (в плазменных резаках линейной схемы) частично преобразуется в энергию упорядоченного вращательного движения, стабилизирующего дугу, и частично – в энергию турбулентных пульсаций потока (среднее значение числа Рейнольдса по тракту $Re \sim 10^4$). Возбуждение газового разряда в межэлектродном пространстве, а затем передача электрической энергии в дугу низкотемпературной плазмы при условии стабильной подачи ПОГ обеспечивают генерацию плазменной струи на выходе из сопла плазмотрона. Наличие разных способов организации разряда обуславливает большое число конструктивных решений по форме и взаимному расположению электродов, а также дополнительных систем стабилизации дуги. Эти решения, в свою очередь, определяют условия энергетического баланса. При рассмотрении данного вопроса полезно обратить внимание не только на термические потери [2], но и на переход определенной части энергии в энергию акустических колебаний и радиационного излучения, что оказывает негативное воздействие на рабочий персонал (*энергетические отходы*). Учет происходящих на этой стадии фазовых превращений (ПОГ – в низкотемпературную плазму, физико-химические трансформации вещества при его подаче – в плазменную дугу) также позволяет классифицировать плазмотроны по функциональной направленности. Появление на этой стадии плазменного состояния вещества дает возможности для рассмотрения его свойств на примере анализа плазменной дуги (струи) как на качественном уровне, так и на примерах конкретных расчетов (степени ионизации, температур, скоростей, компонентного состава и т. д.) [20].

Детальное понимание происходящих на этой стадии процессов является важнейшим фактором, обуславливающим эффективность проектирования плазменных генераторов.

Влияние на внешний объект в большинстве плазменных технологий оказывается путем высокоэнергетического термокинетического *воздействия* на обрабатываемый материал. Эффективность данного процесса в соответствии с заданными параметрами качества – главный критерий выбора потребителем соответствующего устройства или технологии, а, следовательно, и результативности их проектирования. Однако помимо условий, которые обеспечивают соответствующий каждой из технологий эффект (разделка, плавление или модификация поверхности при определенных температурах и скоростях перемещения плазменной струи, а также частиц напыляемых или имплантируемых материалов [21, 22, 23, 24, 25]), следует обратить внимание на негативные факторы, возникающие при работе плазмотрона: высокий уровень шума (до 120–130 дБ), радиационное излучение и присутствие вредных аэрозолей и газовых компонент (при работе с легированными сталями и токсичными газовыми смесями) [26, 27, 28, 29, 30]. В процессе обработки объекта воздействия образуются также *материальные отходы* (шлаки, неизрасходованные ресурсы, требующие дальнейшей обработки материалы поверхностных слоев реза и т. д.). К ним же можно отнести и конструктивные элементы плазмотронов (сопла, электроды), подлежащие замене по технологическому регламенту эксплуатации. Учет материально-энергетических отходов в электроплазменных технологиях (ЭПТ) – также существенный элемент при определении эффективности их применения. Вместе с тем необходимо отметить, что понятие «отходы» применительно к ЭПТ может иметь и иной смысл, связанный с процедурами высокотемпературного обезвреживания широкого класса вредных и опасных веществ. Вопросы защиты от вышеуказанных вредных факторов, а также применения плазмотронов в природоохранных технологиях чрезвычайно важны для специалистов сфер экологии и обеспечения безопасной жизнедеятельности человека [31].

Устойчивая работа всей технологической схемы невозможна без соответствующего *воздействия на ее отдельные элементы*, обеспечивающего контроль и оптимизацию технологических и физических параметров процессов, а также *исправность используемого оборудования*. Такое воздействие должно осуществляться как в процессе ра-

боты (ручное или автоматическое управление), так и на стадии предварительного теоретического анализа и проектирования технологии.

Упомянутые критерии являются одними из функционально значимых признаков эффективности проектирования соответствующей электроплазменной технологии.

1.2. Принципы и методы проектирования инструментальных плазмотронов

Перед разработчиками плазменной техники неизбежно встают вопросы, связанные с четкой формулировкой критериев, на которые они должны ориентироваться в процессе проектирования оборудования, а перед потребителями – проблема поиска методик, позволяющих им сделать оптимальный выбор, соответствующий их потребностям и возможностям. Все это создает необходимость уделить особое внимание формулировке общих подходов, лежащих в основе проектирования плазменного оборудования.

Задача проектирования плазмотронов должна решаться с учетом целого ряда принципов (рис. 5), которые можно разделить на три основные группы. В первую очередь, это принцип функциональности, подразумевающий достижение определенных показателей назначения объекта в результате проектирования. Применительно к электроплазменным технологиям это означает ориентацию на характерные для большинства промышленных устройств показатели производительности, надежности и качества. Интегральными показателями производительности для плазменной разделительной резки являются удельная производительность (т/(чел. · мес.)), удельные затраты (р./т), а также скорость резки металла при заданной толщине. Критерии надежности для плазмотрона должны, очевидно, подразумевать длительность безотказной работы его основных систем, из которых наименее стойким является сопловой узел, имеющий ограниченный ресурс работы. Качество обработки при электроплазменном воздействии на материал, как правило, имеет большое число показателей, специфичных для конкретной технологии, и регламентируется соответствующими стандартами. В связи с тем, что применение плазменных технологий характеризуется целым набором опасных и вредных факторов, при разработке такого оборудования необходимо закладывать установленные ГОСТами и СНиПами параметры безопасного функционирования (нормы по акустическому, тепловому и электромагнитному излуче-

нию, выделению аэрозолей) и методы защиты от электрических, газовых, механических и других видов опасных воздействий.



Рис. 5. Принципы и факторы проектирования в электроплазменных технологиях

Поскольку плазмотрон по своему конструктивному и технологическому исполнению является сложным многокомпонентным устройством, процесс его проектирования должен опираться на системный принцип, который подразумевает разработку не отдельных узлов плазмотрона, а всей его конструкции, функционирующей в единстве ее отдельных элементов, и учитывает накопленный к данному моменту исторический опыт проектирования.

Ввиду того, что применение принципов функциональности и системности при проектировании означает одновременный учет большого числа иногда взаимно противоречивых (конфликтных) критериев, еще одним важным принципом становится оптимизация параметров объекта проектирования. Относительно электроплазменных технологий речь, на наш взгляд, должна идти об оптимизации по критериям эф-

фективности, стоимости и безопасности. Эффективность предполагает достижение максимальных показателей производительности процесса с наименьшими материальными и социально-экономическими затратами.

Среди факторов, которые необходимо учитывать при проектировании плазменного оборудования, отдельного внимания заслуживает газодинамический фактор (см. рис. 5). Анализ газодинамических процессов в ГВТ плазмотрона должен лежать в основе понимания конструкторских задач, направленных на повышение функциональных параметров и безопасности работы плазменных технологий.

Фактический материал, касающийся конструктивных и технологических особенностей плазменного оборудования, чаще всего представляет собой разработки в виде готового к применению испытанного образца и не имеет описаний процедур и методов самого проектирования. Для восполнения данного пробела авторы систематизировали и представили классификацию методов проектирования электроплазменного оборудования (рис. 6).

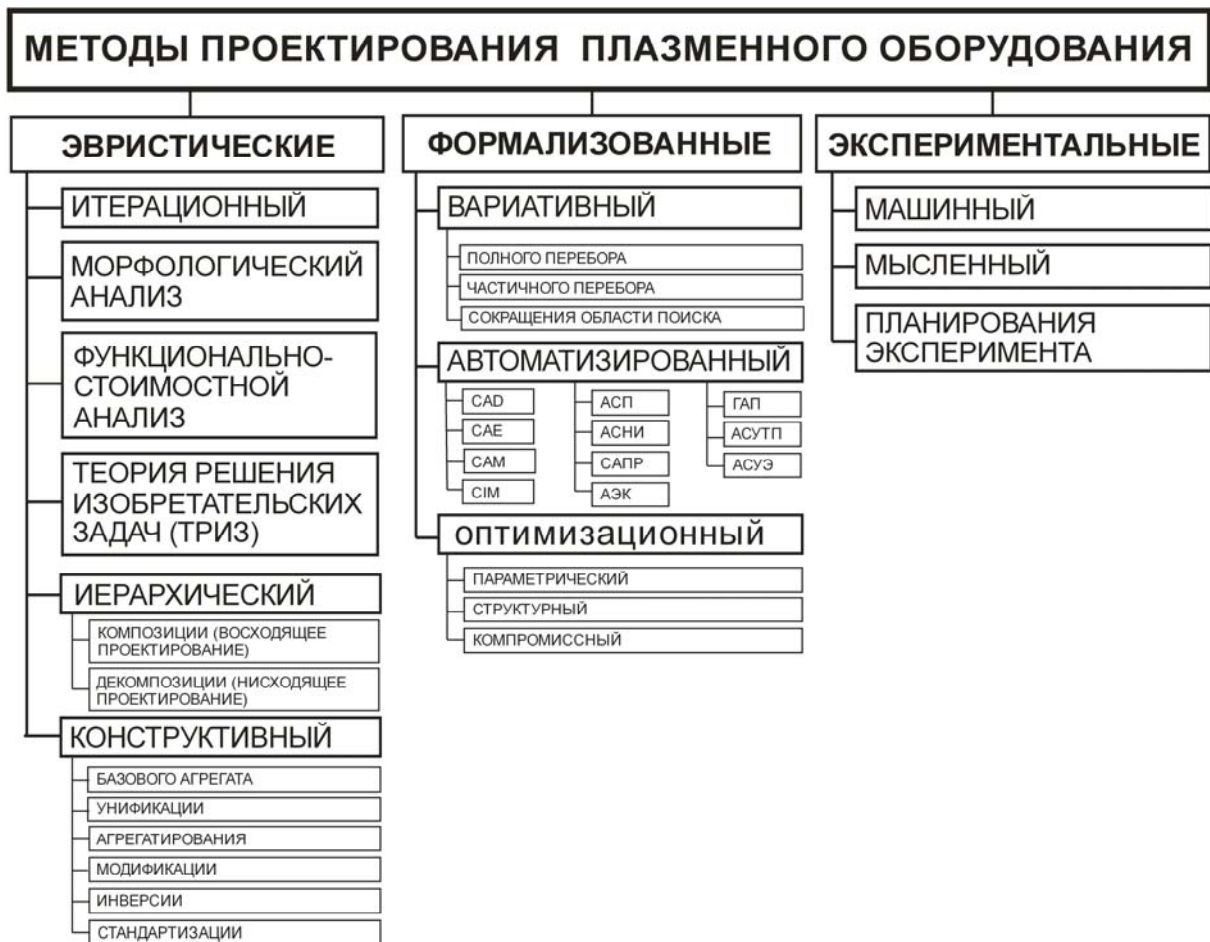


Рис. 6. Методы проектирования электроплазменных технологий и оборудования

Результатом проектирования на уровне отдельного элемента плазмотрона являются конструкции его соплового (электродного) узла. Основные эксплуатационные характеристики плазмотрона определяются конструкцией и материалом трех основных элементов: электрода (при прямой полярности – катода), сопла и изолятора. При этом максимальная эффективность и качество достигаются лишь в том случае, когда конструктивные и технологические параметры перечисленных элементов, специфичные для каждой конструкции плазмотрона, образуют систему, называемую дуговой камерой. Детальное рассмотрение взаимосвязи конструктивных и технологических параметров требует учета газодинамических параметров потока ПОГ в сопловом узле (массового расхода G и давления P). Так, значение критического тока (выше которого начинается интенсивное разрушение катода) $I_{кр} = f(G, P, d)$, а в качестве условий длительного ресурса работы катода в воздушной среде:

$$G/Pd \geq 2 \cdot 10^{-6}; \quad I < I_{кр} = 1,6 \cdot 10^6 \sqrt{G/P}. \quad (1)$$

В настоящее время отмечается возрастание роли формализованных методов проектирования. В работе С. В. Анахова «Принципы и методы проектирования в электроплазменных и сварочных технологиях» представлены варианты алгоритмизации процедуры проектирования на основе схем, функциональных и параметрических зависимостей, формально-логических отношений для их последующего использования в человеко-машинной системе, включая известные примеры информационно-справочных моделей (классификации плазмотронов и их элементов) К. В. Васильева (1974), В. А. Малаховского (1988) и А. А. Кайдалова (2007) [32]. В качестве иллюстрации применимости таких методов к проектированию электроплазменных технологий можно упомянуть процедуру определения критериальных параметрических соотношений, разработанную в 1970–80-е гг. в Сибирском отделении Академии наук СССР (СО АН СССР). Однако сегодня данная процедура имеет ограниченное применение, обусловленное как расширением номенклатуры современных конструкций плазмотронов, так и неопределенностью ряда конструктивно зависимых газодинамических критериев (например, давления в сопловом узле), а также существенной методической погрешностью.

Эффективность проектирования должна оцениваться различными методами автоматизированного и экспериментального анализа. Для

сравнения различных конструкций плазмотронов нужна универсальная методика определения особенностей течения ПОГ по каналам плазмотрона с целью определения наилучших и нахождения новых проектных решений на каждом участке ГВТ. Ряд экспериментальных методов, особенно при анализе факторов безопасности, требует разработки специфичных для плазменных технологий методик измерения.

Структура необходимой для проектирования плазмотронов информации (экспериментальных данных и параметров испытаний), а также применяемые для ее сбора методы представлены на рис. 7. Более подробное описание перечисленных методов экспериментальных исследований плазменной техники можно найти в работе С. В. Анахова «Принципы и методы проектирования плазмотронов» [33]. Среди испытательных процедур следует отметить методы измерения параметров, обеспечивающих функционирование устройства или технологии по критериям надежности, качества и безопасности. Как уже отмечалось ранее, надежность работы плазмотрона тесно связана с ресурсом его электро- и теплонагруженных элементов – электродов и соплового узла. Как правило, исследуются эмиссионные и эрозионные свойства этих элементов с использованием методов неразрушающего контроля (поверхностная микроскопия, пирометрия и т. д.) и металлографического анализа. Эти же методы, дополненные газоаналитическими исследованиями, чаще всего применяют и для измерений регламентируемых стандартами параметров качества работы плазменных резаков.

При наличии большого числа характеристик электроплазменных процессов необходима как детализация ряда определяющих факторов, так и систематизация параметров, определяющих качество и эффективность плазменного процесса, большая часть которых регламентируются стандартами. Применительно к технологии плазменной резки должны быть определены и детализированы параметры функциональности, качества и безопасности. В частности, качество реза регламентируется сочетанием трех показателей: отклонением поверхности реза от перпендикулярности, шероховатостью поверхности реза и величиной зоны термического влияния. Таким образом, ряд заявленных критериев (энергопотребление или вольтамперные характеристики (ВАХ), коэффициент полезного действия (КПД), параметры плазменной струи, определяющие скорость, толщину и ширину реза) могут быть оценены в процессе проектирования плазменного оборудования. Подробнее о параметрах функциональности и качества, достигнутых на современном

этапе проектирования отечественными и зарубежными производителями, изложено в следующей главе. Отмечено также, что одним из универсальных решений проблем эффективности, качества и безопасности является применение технологии сжатой, или узкоструйной, плазмы, использующей двухконтурный принцип формирования плазменной струи с ее стабилизацией потоком дополнительно закрученного газа, поступающего из второго контура.



Рис. 7. Методы экспериментальных исследований функциональных параметров плазмотрона

Процесс проектирования электроплазменного оборудования должен включать в себя важную задачу учета фактора безопасности его

применения. Исходя из объективных показателей, можно утверждать, что персонал работает в экстремальных условиях, а профессию оператора (плазморезчика) следует отнести к особо опасной. С точки зрения обеспечения безопасности в рабочей зоне плазменного воздействия соответствующая технология и в первую очередь сам плазмотрон рассматриваются как объекты регулирования по критериям производственной безопасности. Большое количество вредных и опасных производственных факторов данной технологии были выявлены в 70–80-х гг. XX в. (ВНИИ охраны труда ВЦСПС (Ленинград), НИИ охраны труда (Свердловск), НИГИ им. Ф. Ф. Эрисмана (Москва)). В те же годы были разработаны и нормативные акты, регламентирующие требования по безопасности таких процессов. В главе, посвященной основам безопасности электроплазменных процессов, рассмотрены нормы и степень влияния большинства вредных и опасных факторов технологии плазменной резки. По результатам этих исследований была получена подробная информация о характерных для электроплазменных технологий акустических полях, обращено внимание на ультразвуковое воздействие, на наличие тональных составляющих в звуковой части спектра, пространственную направленность излучения, предложены способы снижения шума.

Глава 2. ПЛАЗМЕННО-ДУГОВАЯ РЕЗКА МЕТАЛЛОВ

2.1. Тенденции развития термических способов резки

Рост объемов промышленного производства, сопровождаемый развитием автоматизированных систем управления технологическими процессами, обуславливает значимость технологий термической дистанционной резки конструкционных материалов. К таким технологиям относят газовую, лазерную, плазменную, электронно-лучевую, адиабатную и солнечно-лучевую резки, в которых процесс удаления материала из зоны реза связан с внешним термокинетическим воздействием. Помимо термических существует большое количество и нетермических технологий резки (механическая, водоструйная, абразивно-струйная), которые иногда также выступают в качестве конкурентных технологий. Внедрение машин с числовым программным управлением (ЧПУ) существенно упростило технологии фигурной вырезки деталей и заготовок, облегчило труд резчика, повысило производительность труда и качество резки [34]. В результате технологии резки металлов заняли важное место в заготовительном производстве.

Операции подготовки кромок соединительных деталей для сварки играют заметную роль в заготовительных технологиях. Применение термических дистанционных способов резки при разделке (скашивании) стыков позволяет значительно снизить трудоемкость этих процедур, уменьшить в десятки раз, а иногда и исключить объемы механической обработки, на 20–30 % сократить себестоимость и время изготовления сложных деталей и сварных металлоконструкций.

В настоящее время на машиностроительных и металлургических предприятиях России используется несколько тысяч машин термической резки (МТР), многие из которых физически и морально устарели и требуют замены. Как правило, российским предприятиям нужны технологии и оборудование, обеспечивающие высокое качество кромок реза при небольших эксплуатационных расходах и стоимости. В итоге перед потребителем встает непростой вопрос выбора технологии, оптимальной по показателям эффективности ее применения.

При резке очень толстых листов конструкционной стали (до 500 мм) по-прежнему вне конкуренции стоит резка газовой горелкой, или автогенная [35]. В основе данного способа лежит процесс сгора-

ния металла в струе технически чистого кислорода после его нагрева пламенем, который, в свою очередь, образуется при сгорании смеси горючего газа с кислородом, выходящей из подогреваемого сопла резака. В настоящее время совершенствование технологии идет как по линии оптимизации процессов применительно к определенным сортам и толщинам разрезаемых материалов, так и в направлении повышения эффективности за счет внедрения новых видов материалов и операций в технологический процесс. Здесь следует упомянуть кислородно-флюсовую резку (КФР), при которой в зону реза вдувается порошкообразный флюс на основе железного порошка. За счет флюса расплавляются тугоплавкие оксиды, образующиеся при резке высоколегированных сталей, чугуна и цветных металлов, что делает такую резку конкурентоспособной с плазменно-дуговой для разделки металлов больших толщин. Стоит также отметить кислородно-копьевой и порошково-копьевой способы резки, применяемые для прожигания отверстий в толстостенных конструкциях (бетонах). В этих методах применяют трубку-копье, по которой после нагрева поступает кислород или смесь кислорода с порошком под давлением в область прожигания отверстия. Установки для кислородно-флюсовой и копьевой резки производятся, в частности, на заводе автогенного оборудования «ДОНМЕТ» (Краматорск, Донецкая область).

В последнее время получил распространение еще один метод газовой резки – воздушно-дуговая резка, основанная на расплавлении металла в месте реза дугой постоянного тока, горящей между угольным электродом и металлом, с последующим удалением расплава струей сжатого воздуха. Данный метод позволяет резать различные металлы толщиной до 20–25 мм. Вместе с тем для раскроя углеродистой стали используется кислородно-дуговая резка с применением струи кислорода для сжигания металла и выдувания шлаков. В качестве электродов в этом случае выступают стальные или керамические (с металлическим покрытием) трубки. Следует упомянуть также и способ высокочастотно-кислородной резки, когда подогревающее пламя заменяется на локальный индукционный нагрев. Данная технология предложена Г. Ф. Игнатьевым (Красноярск, РФ) и позволяет резать сталь толщиной до 50 мм [34].

Большое количество фирм из разных стран производят резаки для газовой резки – Messer Griesheim (ФРГ), SAF (Франция), ASHNM (США), Wescol (Великобритания) и др. Для управления резаками выпускаются

переносные и порталные машины. Среди первых, предназначенных для установки на разрезаемый металл, широко распространены отечественные «Гугарк», «Комета», «Спутник-3», «Орбита-2», «Радуга», «Смена-Эффект» и зарубежные TAGLIATUBI, PYROTOME SE (Франция), IMP (ФРГ) и т. д. Портально-консольные и порталные машины предназначены для работы в стационарных условиях, имеют большие габариты и стоимость, но обеспечивают более высокое качество и производительность реза. На российских предприятиях можно встретить газорезательные машины «Кристалл МППлК», «Рит ППлКП», «Комета М», АСШ («Огонек»), ряд из которых могут использовать плазменные резаки и быть оборудованы шарнирными механизмами для поворота режущих блоков, а также резаками зарубежных производителей.

Разделку кромок под сварку при использовании кислородной резки осуществляют одним, двумя или тремя резаками, представленными на рис. 8 [34]. В целях повышения качества реза процесс ведут при пониженных скоростях на резательных машинах. При углах скоса кромки более 15° необходим дополнительный подогрев металла и увеличение концентрации кислорода в горючем газе, из-за чего более универсальной считается многорезаковая разделка кромок. Современные газорезательные машины имеют в своем составе трехрезаковые блоки для разделки кромок различной конфигурации. Приоритетным становится также использование специализированных установок (ИБС, ФРГ), в которых сочетаются технологии кислородной и плазменной резки с лазерной калибровкой точности разделки. В результате появляется возможность разделки кромок с заданным контуром и любым углом раскрытия на металлах больших толщин.

При разделке металлов небольших толщин эффективным способом является лазерная резка, осуществляемая под действием высококонцентрированного лазерного излучения и режущего газа. Лазерный луч выполняет функцию нагрева, плавления и выноса металла из зоны реза, а режущий газ, подаваемый соосно с лучом, способствует увеличению поглощательной способности поверхности, уменьшению поверхностного натяжения расплава и удалению жидкой фазы из зоны реза газовой струей. Рекордные толщины реза лазерным лучом составляют 100 мм, однако на практике раскраивают конструкционные материалы толщиной не более 20 мм (рис. 9) [34].

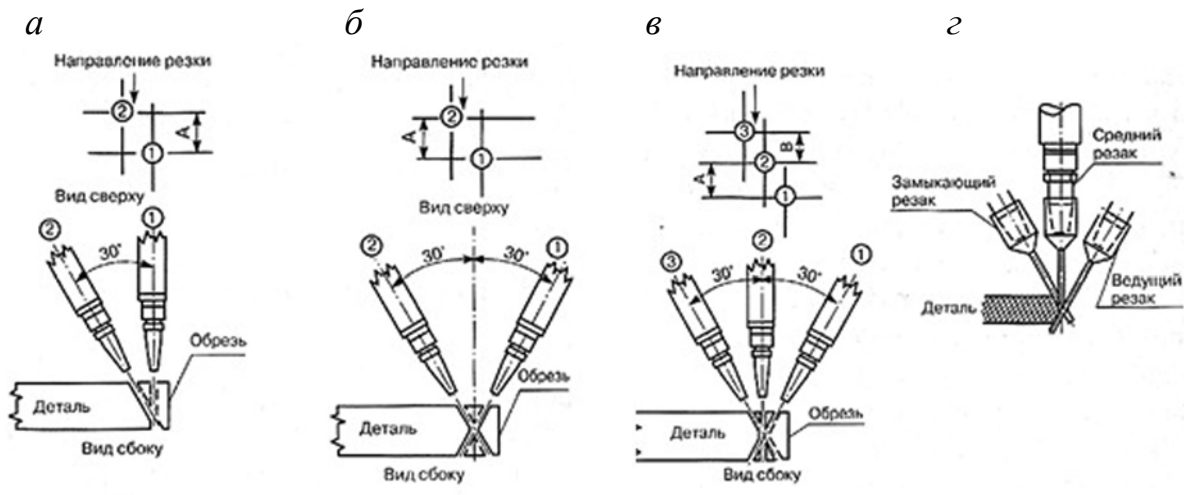


Рис. 8. Схема выполнения разделки кромок под сварку:
а, б – двумя кислородными резаками; *в, г* – тремя кислородными резаками;
1, 2, 3 – номера резаков; *A, B* – расстояния между резаками вдоль направления резки

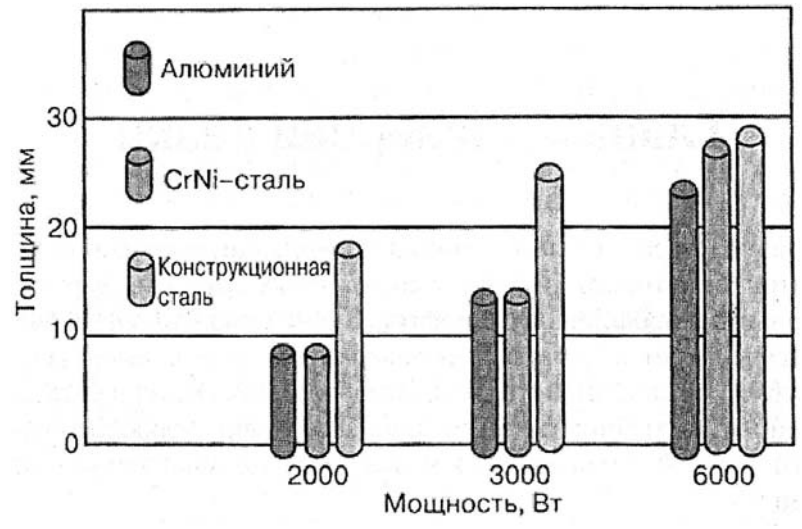


Рис. 9. Зависимость толщины резки различных металлов от мощности лазерного луча

Программное управление лазерным лучом с помощью сканирующего устройства позволяет существенно расширить области использования лазеров (поверхностный нагрев, модификация и упрочнение, гравировка, маркировка и т. д.), однако основным направлением их применения остается прецизионная резка материалов. В зависимости от интенсивности излучения, вида материала, состава и давления режущего газа лазерная резка подразделяется на следующие виды [34]:

- газолазерная;
- кислородно-лазерная – с лазерным лучом для нагрева металла до температуры горения и последующим окислением и удалением рас-

плавленого металла сверхзвуковой струей кислорода (технология LASOX, изобретенная компанией BOC Gases (Великобритания) и введенная Bender Shipbuilding (США));

- лазерная в инертном газе – для предотвращения окисления кромок металла (нержавеющей стали, титана, алюминиевых сплавов);
- лазерное термораскалывание – для резки хрупкого материала (стекла, кварца, керамики и т. д.) за счет формирования термонапряжений при неоднородном нагреве;
- сублимационная лазерная – для вырезки деталей из неметаллических материалов (дерева, пластмассы, ткани и т. д.) в режиме коротких импульсов большой интенсивности без поддува газа.

Как отмечают Н. Н. Евтихийев, О. Ф. Очин и И. А. Бегунов, лазерная резка, применяемая в промышленности на протяжении последних 20 лет, подверглась за это время значительным усовершенствованиям в части увеличения толщины разрезаемого материала и скорости его разрезания [36]. В производственных условиях используются в основном лазеры двух типов – газовые (CO_2), работающие на смеси углекислого газа, азота и гелия при мощности от 50 Вт до 45 кВт и КПД порядка 10 %, и твердотельные (марки Nd: YAG). Из-за различий поглощательной способности лазерного излучения первые предпочтительнее при резке неметаллов, а вторые – металлических материалов. Мощность лазеров у типовых установок не превышает 3 кВт, но и этого достаточно, чтобы стабильно резать стальные листы толщиной до 20–25 мм. Для лазерной резки пластин толщиной до 13 мм из коррозионно-стойкой стали применяют закачиваемый под высоким давлением азот. В последнее время чаще стали использоваться мощные (до 6 кВт) твердотельные лазеры с диодной накачкой и КПД до 50 %. Ввиду их высокой стоимости данные лазеры применяют чаще всего при резке металлов толщиной до 5 мм.

Постепенно повышаются и скорости резки. Если на типовых лазерных установках оцинкованную листовую низкоуглеродистую сталь толщиной 1,63 мм режут со скоростью 12,7 м/мин, то на лазерных установках последних выпусков эту сталь толщиной уже 2 мм режут со скоростью свыше 20 м/мин при такой же скорости перемещений рабочих органов. В результате производительность подобных установок при лазерном сверлении листов толщиной 2 мм может достигать 3–4 отверстий в секунду [36].

Еще одной тенденцией развития лазерных установок является их автоматизация. Почти треть лазерных установок была автоматизирована в той или иной форме. Управление установками осуществляется обычно от ЧПУ типа CNC, в том числе на базе персональных компьютеров. Среди используемого в настоящее время оборудования можно упомянуть машины для лазерной резки Trumatic (фирма TRUMPF, ФРГ), Alpha и Quattro (AMADA, Япония), MultiLas, EcoLas, EasyLas (Messer Cutting & Welding, ФРГ), LT и Jumbo (ADIGE, Италия). Есть и мультитехнологические машины для лазерной резки и разделки кромок типа LaserMat (Messer Cutting & Welding, ФРГ), преодолевающие недостатки лазерной резки при разделке металлов толщиной более 10 мм за счет совмещения двух методов резки – лазерного и плазменного.

При изготовлении сварных конструкций высокого качества (например, резонаторов сверхпроводящих материалов в системах ускорения элементарных частиц [37]), а также для резки в труднодоступных местах и при разделке тугоплавких и химически активных материалов часто применяют электронно-лучевую резку. В этой технологии используются высококонцентрированные аксиально-симметричные электронные пучки, ускоряемые электронной пушкой ($U_{\text{уск}}$ до 100 кВ, ток электронного пучка – до 500 мА). Процесс выполняется в вакуумной камере, что обеспечивает его чистоту, но требует расхода дорогостоящих газов. Удаление расплавляемого электронным лучом металла производится методом «принудительного» переноса в диапазоне частот капельного течения, что обеспечивает минимальную ширину и высокое качество поверхности реза [38]. Технология позволяет вести резку высокопрочной стали, меди, титановых и никелевых сплавов толщиной до 60 мм на скорости до 20 мм/с при ширине реза до 2 мм. Для резки может использоваться оборудование для электронно-лучевой сварки при условии замены катодного и анодного узлов в электронной пушке, установки высокоскоростного вращателя (для центробежной резки), применения специальной системы управления электронным лучом (для линейной резки).

Универсальным способом термической резки, позволяющим в большинстве случаев преодолеть ограничения описанных выше методов, является плазменная резка [39, 40]. Как уже было отмечено, электроплазменные технологии основаны на применении низкотемпературного (до

20–30 тысяч градусов) плазменного воздействия, осуществляемого плазмотроном. Разработанные к настоящему времени плазмотроны классифицированы по различным признакам [2, 8, 41]. На рис. 10 представлена одна из классификаций, предложенная К. В. Васильевым [12].

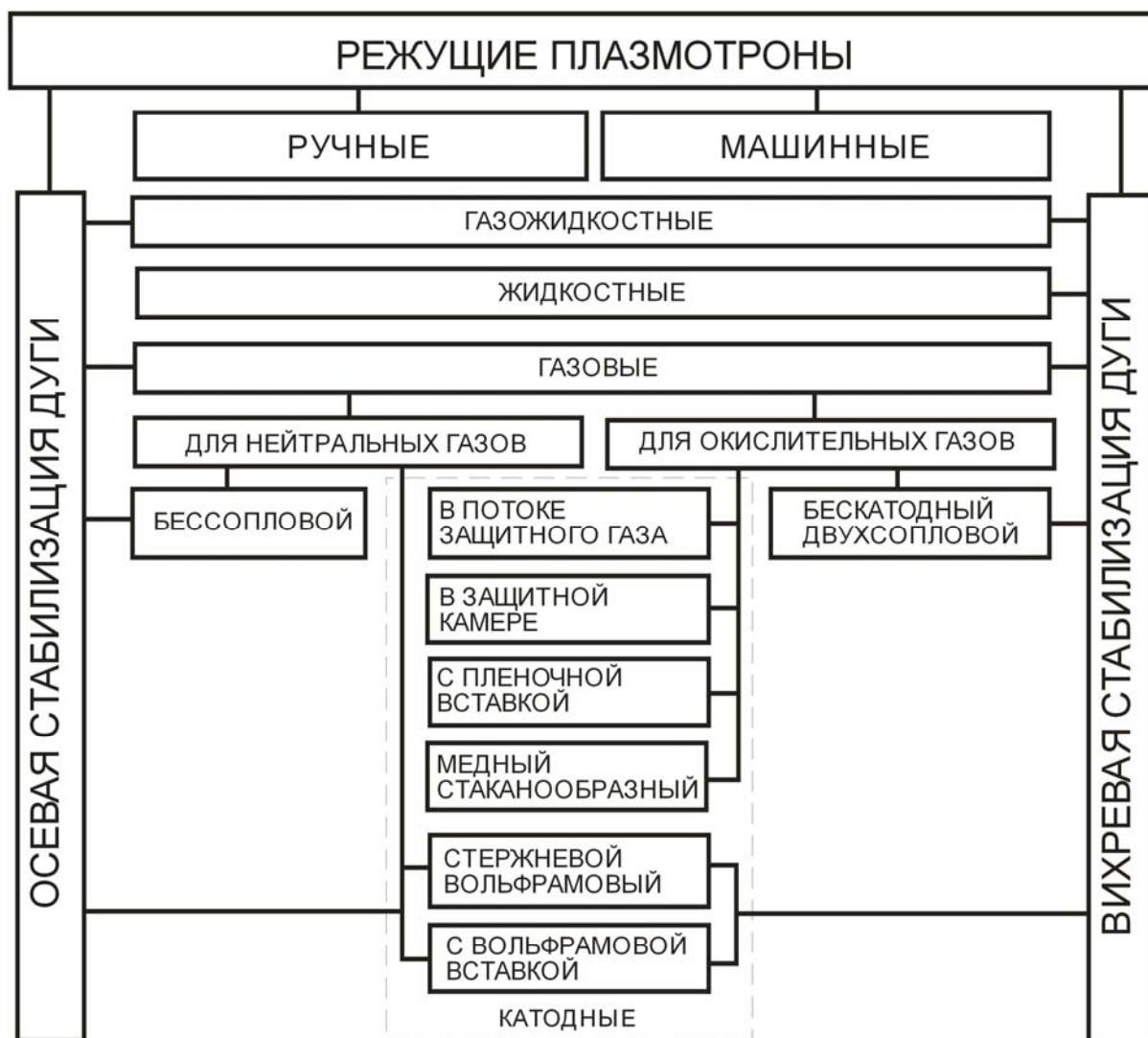


Рис. 10. Классификация плазмотронов для резки

Как правило, в данной технологии используются так называемые плавильные плазмотроны, в которых полезная теплота выделяется на одном из опорных пятен дуги, вынесенном на нагреваемое и включенное в электрическую цепь изделие. Помимо тепловыделения в этом случае полезной оказывается и высокая кинетическая энергия плазменной дуги (струи), обжатой потоком воздуха или какого-либо другого газа, проходящего на высокой скорости через сопло плазмотрона. За счет высокой температуры и кинетической энергии

электрическая дуга и ионизированный газ способны разрезать любой электропроводный материал быстро и точно. В отдельных случаях (при разделке неэлектропроводных материалов) применяются струйные плазмотроны, в которых дуга горит внутри плазмотрона. При традиционной плазменной резке дуга ограничена только соплом с подачей плазменного газа, который поступает в V-образные канавки со вписанными углами приблизительно от 6 до 10° . В большинстве случаев резка осуществляется в атмосфере. Различают плазменную резку дугой прямого действия, когда разрезаемая деталь включена в электрическую цепь дуги, и косвенного, при котором воздействие на материал осуществляется независимой плазменной струей (рис. 11) [13]. Второй процесс осуществляется практически всегда вручную применительно к тонким листам или непроводящим материалам.

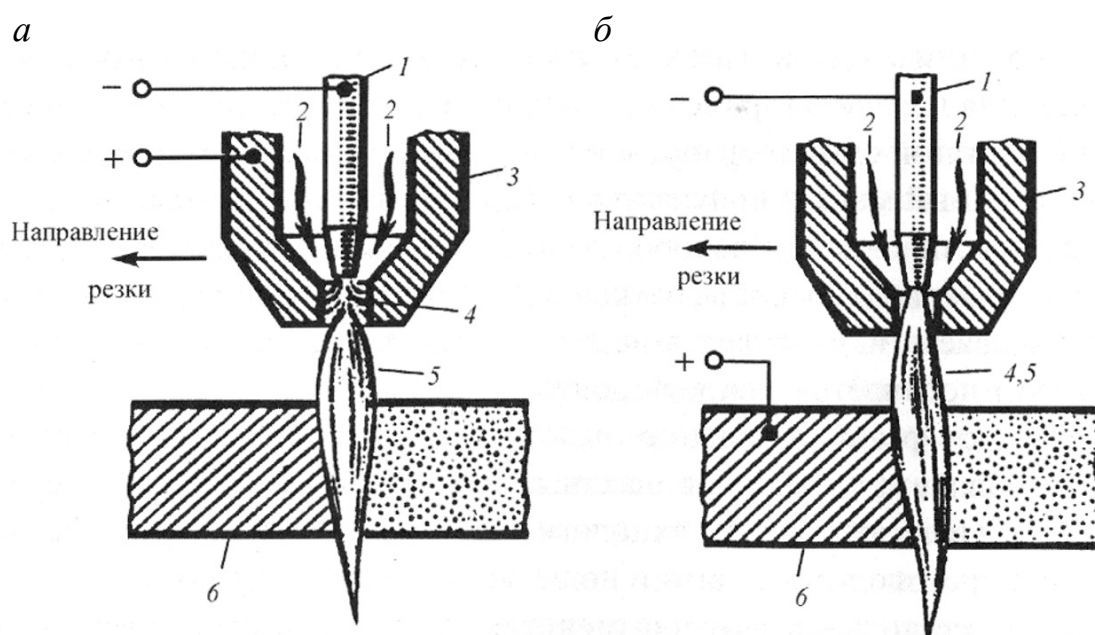


Рис. 11. Схемы плазменной резки:
а – плазменной струей; *б* – дугой прямого действия; 1 – электрод, 2 – газ, 3 – сопло плазмотрона, 4 – электрическая дуга, 5 – плазменная струя, 6 – разрезаемый металл

Применение электродуговых плазмотронов для резки металлов характеризуется очень высокой скоростью (в 8–10 раз большей, чем автогенная), высокой размерной точностью, особенно при повторных резах, а также во много раз меньшей зоной нагрева разрезаемого материала, хорошей возможностью автоматизации процесса резки и, наконец, высокой экономичностью. Поскольку с помощью плазменной

резки и особенно тонкой плазменной резки можно разрезать различные металлические материалы (от конструкционной стали, чугуна, высоколегированной стали до алюминия, меди и специальных материалов) толщиной от 5 до 180 мм, то речь идет о фактически универсальном способе резки всех металлов. К отрицательным сторонам можно отнести небольшие отклонения от перпендикулярности и вертикальности реза (в зависимости от толщины разрезаемого листа угол отклонения составляет от 1 до 5°), что выражается в некотором увеличении ширины реза, а также затраты на замену изношенных деталей и необходимость применения охлаждения при работе на больших токах.

Усовершенствования технологии плазменной резки, произошедшие за последние годы, касались не только увеличения срока службы электродов, но и существенного повышения скорости, точности и безопасности резки. К традиционной плазменной резке добавилась резка при использовании дополнительной среды, ограничивающей длину плазменной дуги, что обеспечивает параллельность обработанных поверхностей при небольших толщинах. Вода, подаваемая между плазмой и экранирующим соплом, может также использоваться в качестве дополнительной среды (рис. 12) [34]. Тангенциальная инжекция воды образует водяной колокол, и давление пара служит дополнительным ограничением плазменной дуги, как и при использовании дополнительного газа. Такой способ предпочтителен в случае резки высоколегированных сталей и алюминия, при обработке мягких и низколегированных сталей.

Если говорить о выборе режущего газа, то, как правило, при плазменной резке мягких и низколегированных сталей используется кислород, понижающий вязкость расплавленного железа, благодаря чему разжиженный материал легче удаляется из прорези и кромки образуются почти без заусенцев. Кроме того, в обработанных кромках снижается содержание азота. Применение азота в качестве режущего газа позволяет выполнять резку при меньшей силе электрического тока, что увеличивает срок службы электрода, но может отрицательно сказаться при выполнении последующей обработки материала. В качестве дешевого плазменного газа широко используется воздух, но в этом случае показатели срока службы электродов и сопел могут оказаться ниже, а содержание азота на обработанных кромках – наоборот, выше по сравнению с кислородной резкой. Как показывает

практика, износ и сопел, и электродов в основном определяется числом резов и потребляемой мощностью. Сопло при нормальной работе требует замены после примерно 400–600 резов, а срок службы электродов, используемых в настоящее время, вдвое превышает срок службы сопел.

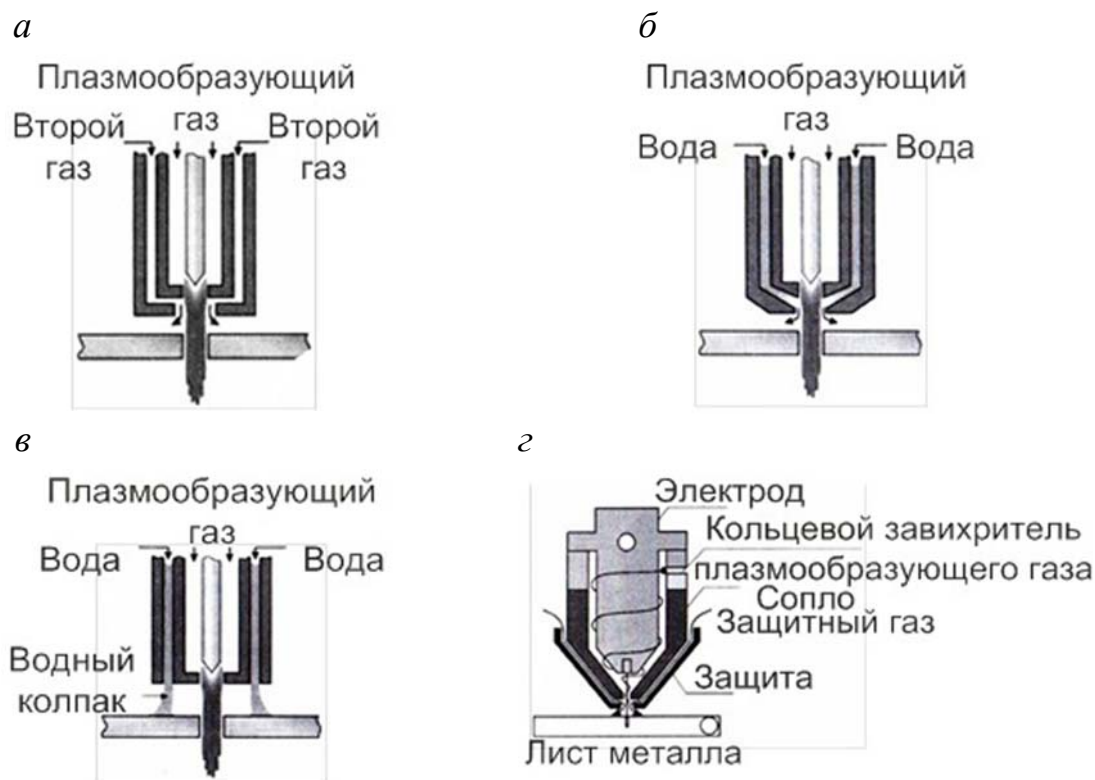


Рис. 12. Способы плазменно-дуговой резки с улучшенным качеством реза:

- а* – плазменно-дуговая резка с двойным газом; *б* – плазменно-дуговая водоинъекционная резка; *в* – плазменно-дуговая резка в водяном колпаке; *г* – резка сжатой плазмой

Существенным шагом в совершенствовании плазменной резки стало появление и внедрение в производственные процессы технологии так называемой точной, сжатой, или прецизионной, плазменной резки. Технология обеспечивает дополнительное ограничение (сжатие) плазменной дуги и увеличение плотности тока при использовании специальных резаков за счет оптимизации конструкции сопла и катодной системы в сочетании с применением дополнительного завихряющего газа, подаваемого из вторичного контура. Данный принцип был известен достаточно давно, однако промышленно используемые плазмотроны появились только в середине 2000-х гг. в продукции фирм Kjellberg Finsterwalde (ФРГ) (рис. 13) и Hypertherm (США) [39]. Принцип вращения

газа и применение многоступенчатых резаков при парциальном нагнетании газа оказались эффективными при резке листов примерно до 30 мм. В этом случае одна обработанная поверхность почти отвечает требованиям перпендикулярности относительно другой (как при лазерной резке) без необходимости поворота режущей головки.

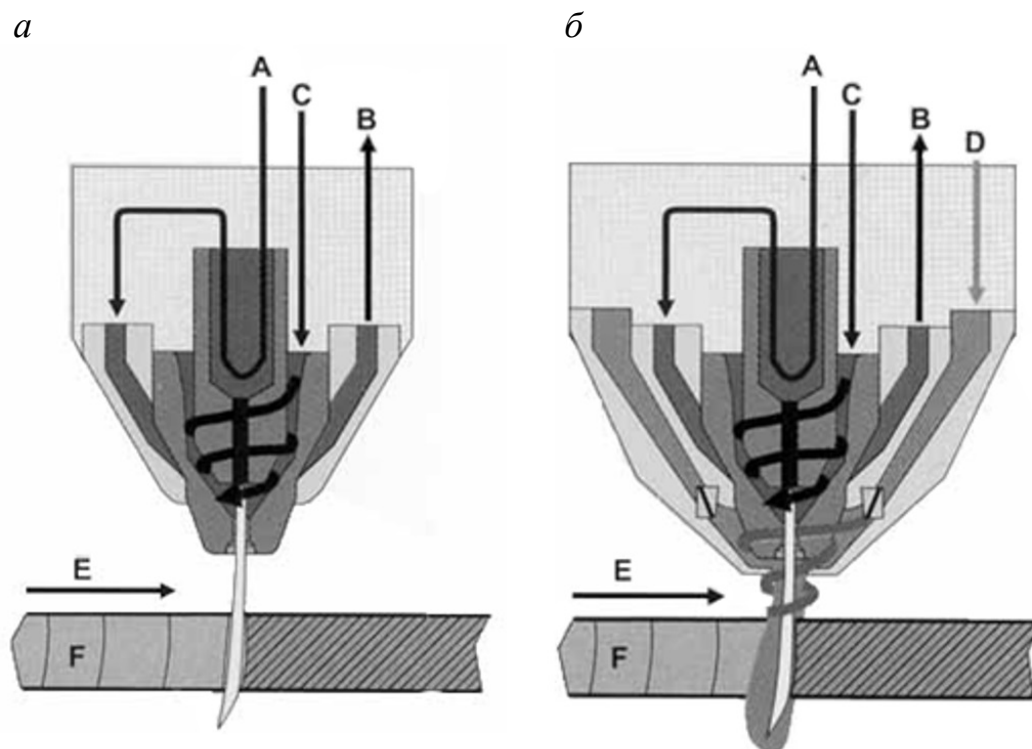


Рис. 13. Схемы процессов плазменной резки:
а – обычная плазма; *б* – точная, или узкоструйная, плазма; *A* – система охлаждения (вход); *B* – система охлаждения (выход); *C* – контур основного потока ПОГ; *D* – контур вторичного (стабилизирующего) потока газа; *E* – направление резки; *F* – разрезаемый металл

На рынке электроплазменных установок в настоящее время можно встретить продукцию как отечественных, так и зарубежных производителей. Среди оборудования российского производства есть аппараты, сравнимые по характеристикам с зарубежными аналогами, но встречаются и слегка модернизированные аналоги разработок 1970–80-х гг. Наиболее известные производители электродуговых плазмотронов – ООО «Мультиплаз» (Москва), ООО ПКФ «Кристалл» (Санкт-Петербург), группа компаний ПУРМ, ООО «КСТ-Авиа» (Москва), ООО НПО «Полигон» (Екатеринбург). Они предлагают плазменные резаки и аппараты для механизированной и ручной плазменной резки с широкими функциональными возможностями. Среди зарубежной продукции можно

назвать плазмотрон ПВР-402У4, серийно выпускаемый с 80-х гг. XX в. в г. Степанаван (Армения), а также разработки Института электросварки (ИЭС) им. Е. О. Патона (Киев, Украина), теперь предлагаемые Опытным заводом электросварочного оборудования (резак ВПР-9, 10, 11) и НПП «Плазмотрон» (ВПР-5, 6, 7). Особое место занимает отмеченная выше технология точной, или сжатой, плазмы, представленная в серии аппаратов плазменной резки HiFocus/HiFinox (Kjellberg, Германия), EasyTherm (Messer Griesheim, Германия), HyPerformance (Hypertherm, США), Suprarex (ESAB, Германия, Швеция). Следует сказать, что отечественных аналогов данной технологии практически нет, а в проводимых исследованиях используется продукция указанных выше производителей [42]. Мировой рынок плазменной резки ориентирован на широкий спектр потребностей и возможностей потребителей. Среди производителей из ФРГ заслуживают внимания технологии FineFocus и аппараты серий PA-S, CutFire и CUTi (Kjellberg), а также TSP 60 и 120 AUT, TBI PLC 250W AUT (ABICOR BINZEL и TBi), Швеции – PowerCut (ESAB) и UPPERCUT, SPEEDFIRE (SPT Plasmatechnik AB), из США – Powermax, HySpeed и MAX (Hypertherm), Ultra-Cut, Auto-Cut (O₂), Cut Master A, Drag-Gun Plus (Thermal Dynamics) и т. д. Присутствуют на российском рынке и электроплазменные установки из Китая (Tianjin Coorig Technology Co. Ltd) и Японии (Koike Aronson), оборудованные плазмотронами европейского и американского производства. В ряду вспомогательного оборудования можно упомянуть порталные машины Eckert Cutting (Германия), источники питания ITW (США) и защитные средства ELECTROCOSTA (Франция). Если такие технические характеристики отечественного электроплазменного оборудования, как скорость, себестоимость и безопасность, сопоставимы с зарубежными аналогами, то сравнение по материалу и энергопотреблению, качеству реза, степени автоматизации, простоте управления и даже дизайну установок дает результаты не в пользу отечественных аппаратов (значения некоторых параметров ниже на 20–30 %).

Одной из технологий, обеспечивающих значительную экономию материала, является адиабатная резка материалов (*adiabatic cutting*), выполняемая на прессах без использования охлаждающей среды. С ее помощью можно разрезать разнообразные материалы: от подшипниковых и быстрорежущих сталей до термически упрочненных алюминия, латуни и меди. При адиабатной резке используются механические, гидравлические или пневматические прессы, которые путем пре-

образования кинетической энергии в тепловую разрезают материал при минимальной нагартовке. Полученные заготовки имеют точно заданную длину, перпендикулярные торцы и не имеют заусенцев. На гидравлическом прессе Hydropulsor, который изготавливает фирма DeKalb (штат Иллинойс, США), используются закрытые матрицы (одна стационарная, другая подвижная). Перпендикулярность торцов заготовок достигается подбором соответствующих углов в матрицах [2].

2.2. Показатели эффективности и качества термических способов резки металла

Как отмечает А. В. Матушкин, правильный выбор способа резки зависит от следующих характеристик [35]:

- вид разрезаемого материала – обычная конструкционная сталь, качественная легированная сталь, цветные металлы, пластмассы или композиты;
- толщина разрезаемого материала и соответствующие этому параметру критерии;
- желаемое качество пропила, возможность исключения последующих операций обработки и экономичность данного способа резки.

По сути, показатели эффективности и качества являются ключевыми при выборе потребителем технологии и оборудования для термической резки материалов. Под эффективностью процесса следует понимать совокупность факторов, среди которых наиболее значимые – это скорость резки, производительность и удельная себестоимость. Качество реза определяется также совокупностью нормируемых показателей, таких как точность и ширина реза, перпендикулярность кромок и шероховатость поверхности реза, величина зоны термического воздействия и т. д. Помимо этих факторов следует учитывать и ряд других моментов, связанных с наличием дополнительных операций для запуска технологии, сложностью монтажа и обслуживания оборудования и т. д.

Как уже отмечалось, в настоящее время резка металлов осуществляется преимущественно газовым, плазменным, лазерным, струйно-водяным (гидроабразивным) и механическим методами. В табл. 1, 2 представлено качественное сравнение этих способов резки, из которого можно заключить, что наиболее эффективными, а, следовательно, конкурирующими технологиями следует признать лазерную и плазменную резки [35].

Таблица 1

Сравнительная характеристика способов резки металла

Критерий	Способ резки								
	Лазерная	Плазменная		Газовая	Нетермические способы резки			Вырубка и высечка	
		узкоструйная	прецизионная		Гидроабразивная	Механическая	Упрочняющая		Упрочняющая
1	2	3	4	5	6	7	8		
Подготовка	Требуется удаление окалины и ржавчины			Не требуется					
Основной процесс	Очень высокая концентрация энергии	Очень высокая концентрация энергии	Высокая концентрация энергии	Большой тепловод	Теплоделение отсутствует	Упрочняющая	Упрочняющая	Упрочняющая	
Последующая обработка	Не требуется при толщине до 12 мм	Не требуется при толщине до 30 мм (до 160 А)	Не требуется при толщине до 25 мм (до 250 А)	Требуется рихтовка и удаление заусенцев	Не требуется	Не требуется	Не требуется	Необходимо удаление заусенцев	
Точность	Очень высокая	От очень высокой до высокой	Высокая / средняя	Достаточная	Очень высокая	Высокая	Средняя / высокая		
Тепловая деформация	Малая	Малая	Малая	Большая	Без коробления	Без коробления	Без коробления	Без коробления	

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
Материал	Конструкционная и высоколегированная сталь, алюминий (тонколистовой), цветные металлы	Конструкционная и высоколегированная сталь, алюминий, медь, чунгун, плакированные и специальный материал	Конструкционная и высоколегированная сталь, алюминий, медь, чунгун, плакированные и специальный материал	Конструкционная сталь	Конструкционная и высоколегированная сталь, алюминий, медь, чунгун	Любые виды металлов	Конструкционная и высоколегированная сталь (тонкая), алюминий, медь
Толщина листа (в стандартном диапазоне), мм	0,5...12,0	0,5...30,0	5...60 (160)	10...500	0,5...12,0	До 100	Менее 8
Экономическая эффективность	Высокая	Очень высокая	Высокая	Средняя (только для конструкционной стали)	Малая	Средняя	Средняя (высокая стоимость инструмента)

Таблица 2

Преимущества и недостатки различных методов разделки металла

Технология	Преимущество	Недостаток
Газовая (кислородная)	<p>Может резать стали толщиной до 500 мм</p> <p>Использует легкозаменяемые горелки разных типов и недорогие запчасти</p> <p>Не требует больших инвестиций для внедрения</p>	<p>Пригодна только для низкоуглеродистых сталей</p> <p>Дает плохие результаты при резке на толщинах менее 5 мм</p> <p>Невозможна при резке ламинированных стальных листов</p> <p>Дает широкую зону теплового влияния, вследствие чего не может обеспечить высокую точность реза</p>
Плазменная	<p>Высокая скорость резки (в 8–10 раз более высокая, чем кислородно-дуговая)</p> <p>Способность резать любые металлы</p> <p>Малая зона термического влияния, обеспечивающая высокую точность реза</p>	<p>Ограничена толщиной до 180 мм (в зависимости от материала)</p> <p>Угол резки в пределах 1–5° зависит от толщины материала</p> <p>Более высокая, чем для газовых горелок, стоимость запасных частей и водоохлаждаемых сопел</p>
Лазерная	<p>Абсолютно прямой рез</p> <p>Высокая скорость на толщинах до 3 мм</p> <p>Отсутствие деформации (коробления)</p>	<p>Ограничена толщиной металла</p> <p>Низкая скорость на толщинах более 10 мм</p> <p>Требует больших инвестиций и текущих затрат</p>
Струйно-водяная	<p>Большой диапазон толщин резки и типов материалов</p> <p>Отсутствие термических деформаций</p> <p>Не требует последующей обработки</p>	<p>Очень низкая скорость</p> <p>Сопровождается шумом и брызгами</p> <p>Требует больших инвестиций и текущих затрат</p>
Механическая	<p>Возможность работы с любыми материалами</p> <p>Высокое качество края реза</p> <p>Отсутствие термических деформаций</p> <p>Толщина резки до 100 мм</p>	<p>Ограничена толщиной металла (для вырубки и высечки)</p> <p>Высокая стоимость инструмента и расходных материалов</p> <p>Низкая скорость резки</p>

Как можно заключить, анализируя табл. 1, 2, на малых толщинах металла (до 15 мм) предпочтительнее использовать плазменную

и лазерную резки. На толщинах металла до 100 мм плазменная резка является приоритетной, так как по сравнению с газовой она дает лучшее качество вырезаемых заготовок в совокупности с высокой производительностью.

В табл. 3 и на рис. 14 показано сравнение плазменного, лазерного и газового способов резки по скорости. Данный показатель в общем случае зависит от вида материала, его толщины, энергетической мощности установки и требований, предъявляемых к качеству реза. Обобщая приведенные данные, можно утверждать, что, как правило, чем тоньше разрезаемый материал, тем выше скорость лазерной резки по сравнению с плазменной, и наоборот. В то же время газовая резка, проигрывая по скорости в наиболее распространенном диапазоне толщин (до 30 мм), имеет преимущества по максимальным значениям толщин разрезаемого металла (свыше 100 мм). Как отмечает В. А. Малаховский, по своим техническим характеристикам и достижимым скоростям плазменная резка более эффективна, чем лазерная, в особенности для прямых резов (например, для зачистки кромок и разрезания листов на мерные отрезки по длине) [43].

Таблица 3

Скорость резки стали
при использовании различных технологий

Толщина материала, мм	Скорость резки в зависимости от технологии, м/мин		
	Плазменная (ток 250 А)	Лазерная (2,5 кВт)	Газовая (кислородная)
3,00	> 8,00	> 5,00	1,00
5,00	> 6,00	3,00	0,90
8,00	4,50	1,80	0,80
10,00	4,00	1,50	0,75
12,00	3,70	1,20	0,70
15,00	2,80	1,00	0,60
20,00	1,80	0,80	0,55
25,00	1,20	–	0,50
30,00	0,80	–	0,50

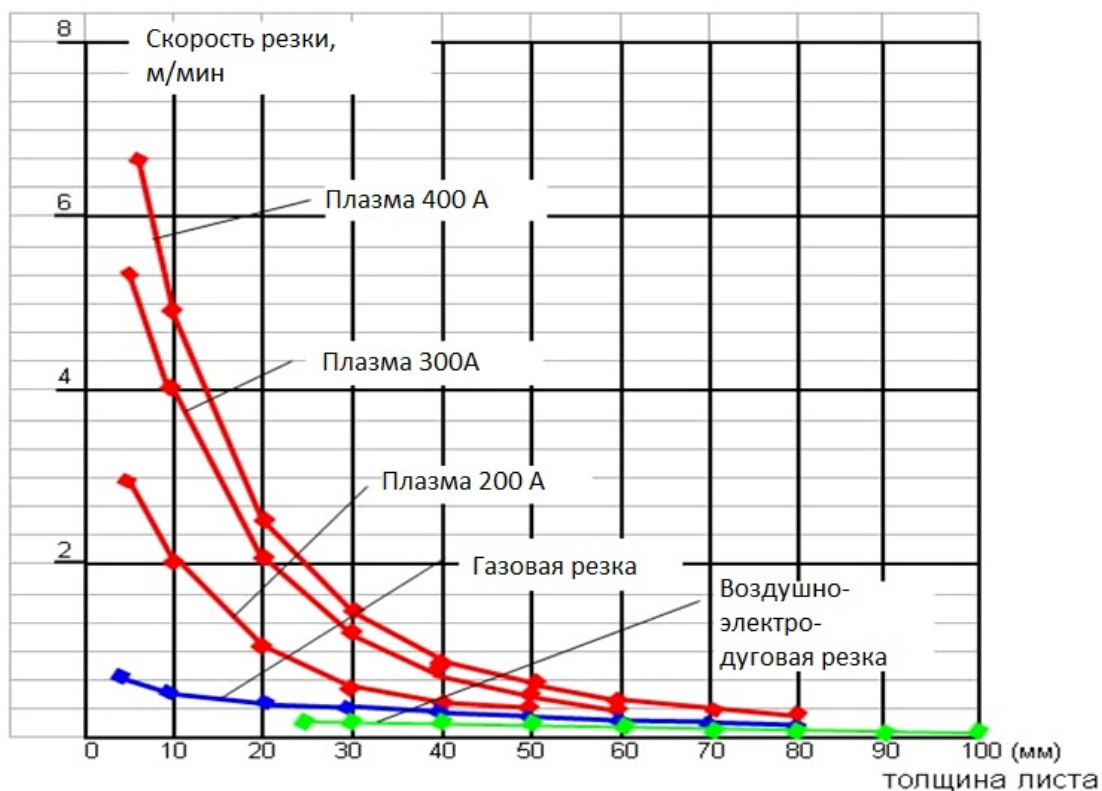


Рис. 14. Сравнение технологий термической резки металлов по скорости

Результаты, представленные в табл. 4, показывают, что внедрение новых технологий прецизионной (точной, или сжатой) плазменной резки фактически делает их конкурентоспособными с лазерными по показателям скорости резки металлов малых толщин [35].

Таблица 4

Сравнительные скорости лазерной и плазменной резки

Разрезаемый материал	Толщина, мм	Скорость резки, м/мин	
		Лазерная резка	Прецизионная плазменная резка
1	2	3	4
Холоднокатаная сталь	0,90	10,00	3,50 (30 А)
	1,52	7,50	5,00
	3,10	4,20	3,20
	4,70	3,20	2,00
Горячекатаная сталь	6,25	2,50	3,50
	9,40	1,60	2,50
	12,70	1,20	2,00
	15,90	0,90	1,50
	19,10	0,75	1,12

Окончание табл. 4

1	2	3	4
Коррозионно-стойкая сталь	0,90	10,00	3,00
	1,50	7,50	2,50
	3,40	3,75	2,25
	4,70	2,25	2,00
	6,25	1,40	15,00
	9,40	0,50	1,12
	12,70	0,25	1,00
Алюминий	0,90	8,75	3,00
	1,50	6,25	2,50
	3,40	2,40	2,25
	4,70	1,40	2,00
	6,25	0,90	1,50
	9,40	0,45	1,12
	12,70	–	1,00

Приведенные сравнительные данные свидетельствуют о преимуществах плазменной технологии по сравнению с другими видами термической резки, которые проявляются и при более углубленном анализе. Такой анализ прежде всего связан с многофакторным исследованием качества реза и эффективности процесса, подтверждающим достоинства плазменной резки в сравнении с газовой: уменьшение зоны термического влияния, отсутствие необходимости предварительного нагрева и существенной последующей обработки зоны реза, большой ресурс работы (срок службы одной плазменной головки в 3 раза дольше газовой). Сравнение с лазерной резкой показывает небольшое преимущество последней по качеству реза при разделке металлов малых толщин (табл. 5), которое становится фактически сопоставимым при использовании технологий прецизионной плазменной резки, большую гибкость технологии (возможность применения как механизированных, так и ручных процессов), а также более высокую экономичность процесса (с учетом капитальных затрат на оборудование и эксплуатационных расходов) [34, 36].

Таблица 5

Сравнительная характеристика лазерной и плазменной резок

Параметр	Резка	
	Лазерная	Плазменная
Окалина	Отсутствует	Имеется (небольшая)
Конусность	Менее 1°	Около 3°
Получаемые отверстия	Круглые и чистые	Круглые при толщине материала до 6,25 мм, но эллиптические в более толстых материалах
Размеры деталей	Возможно получение совсем небольших деталей	Лучше всего подходит для деталей средних размеров
Ширина реза	0,200–0,375 мм	0,500–0,750 мм
Коррозионно-стойкая сталь	Окалина и окислы не образуются при использовании азота	Незначительная окалина образуется при использовании азота, метана или пропана
Алюминий	Окалина незначительна или отсутствует	Имеется небольшая окалина
Прижоги	Незаметны	Присутствуют на острых наружных кромках деталей
Тепловое воздействие	Очень мало	Немного больше, чем при лазерной резке
Возможность резки неметаллических материалов	Имеется	Отсутствует

Представленные на рис. 15 сравнительные графики себестоимости резки в расчете на метр длины реза показывают, что плазменная резка имеет экономические преимущества по сравнению с газовой [6, 43]. Высокие расходы на газовую (кислородно-ацетиленовую) резку связаны с ее существенно более низкой скоростью по сравнению с другими процессами, а также необходимостью последующей обработки и могут быть снижены за счет одновременного применения нескольких резаков. Согласно табл. 6, в которой приведены результаты сравнения стоимости плазменной и лазерной резок [34, 36], дороже всего обходится лазерная резка горячекатаной стали толщиной 6,52 мм в одну смену, а дешевле всего – односменная плазменная резка холоднокатаной стали толщиной 1,52 мм, так как стоимость лазерных установок

выше стоимости плазменных при любом количестве смен. По данным, представленным В. А. Малаховским, экономически эффективной является плазменная резка мягких и низколегированных сталей, а также обработка профилей, при которой обрабатываемая сторона листа фиксируется, а противоположная сторона располагается на отходах металлов [43].

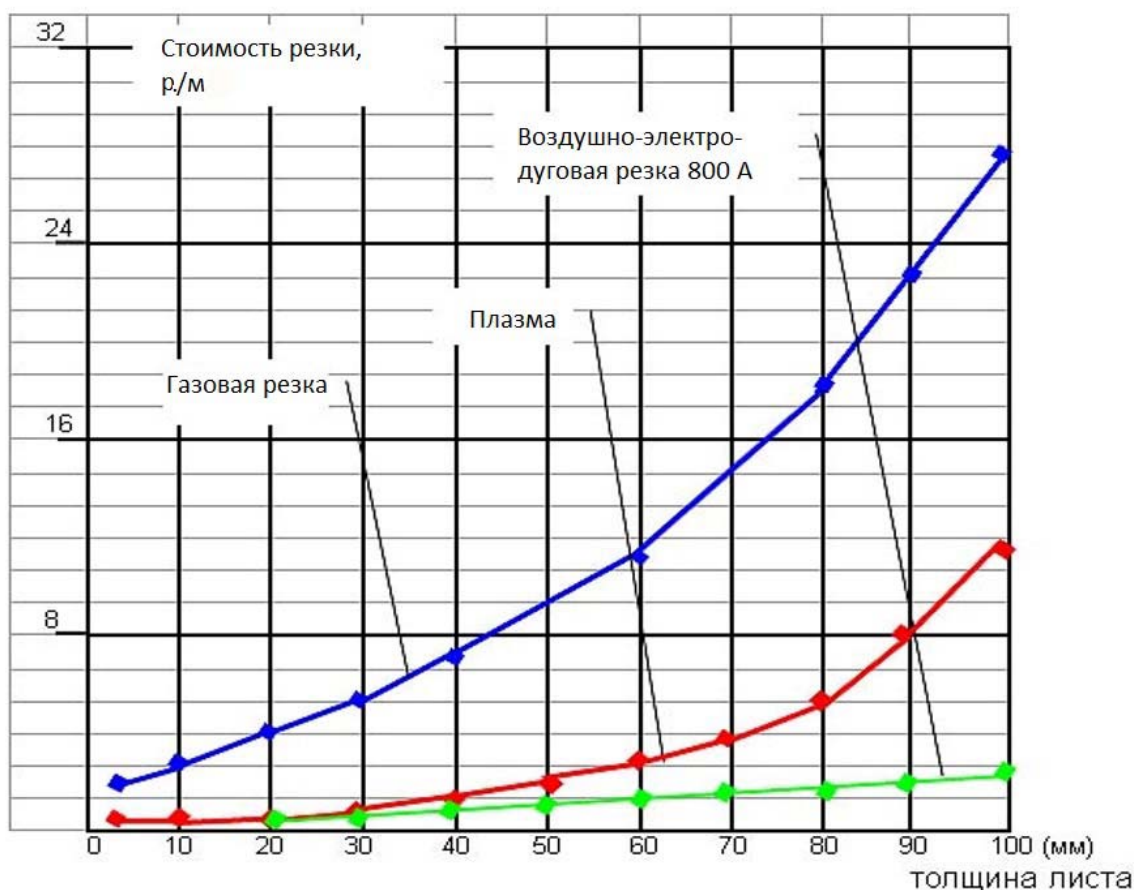


Рис. 15. Сравнение технологий термической резки металлов по затратам энергоносителей на метр реза

На примере участка по разделке трубы диаметром 1420 мм с толщиной стенки 18,7 мм на сутунки 308 × 1010 мм для последующей прокатки в лист видно, что при использовании автоматической плазменной резки трубного проката также достигается наилучший результат по сравнению с традиционными методами (табл. 7).

Особым преимуществом плазменной резки по сравнению с лазерной является возможность резать листы под углом для последующей сварки путем установки соответствующего сопла. При этом повышенные требования к качеству реза и производительности, как от-

мечают Н. Н. Евтихийев и соавторы, обеспечиваются в настоящее время производителями для прецизионных плазменных установок, рассчитанных на ток 100–120 А и позволяющих разрезать листы из низкоуглеродистой стали толщиной свыше 19 мм со скоростью 1,12 м/мин [36]. Качество настройки параметров газового потока и позиционирования плазмотрона обеспечивается системами контроля, связанными с ЧПУ, что позволяет обеспечить точность и стабильность резки, близкие к лазерной. Как правило, более низкая точность и качество реза плазменной резки по сравнению с лазерной связаны с износом сменных деталей плазмотронов – сопел, электродов и т. д. В связи с этим одной из актуальных задач применительно к плазморезательным технологиям является повышение срока службы и стабильности работы этих деталей, а, следовательно, и качества реза.

Таблица 6

Расчет стоимости лазерной и плазменной резок 1 м листовой стали

Параметр	Резка							
	Холоднокатаная сталь толщиной 1,52 мм				Горячекатаная сталь толщиной 6,52 мм			
	Лазерная		Плазменная		Лазерная		Плазменная	
	Режим работы (количество смен)							
	1	3	1	3	1	3	1	3
Стоимость установки, долл./ч	56,98	18,96	22,75	7,58	56,98	18,96	22,75	7,58
Стоимость расходных компонентов, долл./ч	8,19	8,19	20,51	20,51	7,55	7,55	23,21	23,21
Накладные расходы (рента, зарплата оператора, вспомогательных рабочих), долл./ч	35,00	30,00	35,00	30,00	35,00	30,00	35,00	30,00
Общие затраты, долл./ч	100,17	57,15	78,26	58,09	99,53	56,51	80,96	60,79
Общая длина резки, выполненной в течение часа (при рабочем цикле 66 %), м	300,00	200,00	300,00	200,00	200,00	100,00	154,00	154,00
Стоимость 1 м резки, долл.	0,33	0,39	0,19	0,28	0,98	0,55	0,57	0,43

Таблица 7

Сравнительные характеристики способов резки трубного проката

Технология резки трубы	Удельная производительность, т/(чел. · мес.)	Удельные затраты, р./т
Ручная газовая	75,0	86,7
Ручная плазменная	120,0	18,5
Механизированная плазменная	140,0	18,5
Полуавтоматическая	195,0	18,5

Отмеченное выше одновременное использование плазменной и лазерной резок на комбинированной установке позволяет использовать на практике преимущества обеих технологий. В этом случае контурная резка с жесткими требованиями по точности и резка для получения кромок под прямыми углами выполняются лазером, а плазменная резка, характеризующаяся высокой скоростью, используется при разрезании листов и получении мерных по длине листовых отрезков при менее строгих требованиях по точности. Разумеется, необходимость применения подобных установок требует соответствующего анализа экономической эффективности, связанной с повышенными капитальными затратами на оборудование.

2.3. Принципы проектирования систем газодинамической стабилизации в плазмотронах для резки

Указанные преимущества воздушно-плазменной резки металлов в сравнении с другими термическими способами разделки обусловлены применением относительно простых, но эффективных плазмотронов, проектирование которых началось в 60-х гг. XX в. и продолжается до сих пор. В основе их работы лежит принцип создания плазменной дуги с высокой энтальпией и кинетической энергией за счет сжатия и стабилизации потока плазмообразующего газа в сопловом узле плазмотрона с помощью системы газодинамической стабилизации (ГДС). В качестве плазмообразующей среды, как правило, применяется воздух. Это позволяет, с одной стороны, удешевить процесс резки (по сравнению с применением кислорода или азота), но с другой стороны, вынуждает использовать газодинамическую систему газовихревой

стабилизации (ГВС) плазмообразующего газа для обеспечения стабильности и устойчивости горения дуги. Организация подачи системы вихревого потока газа в сопловой узел плазмотрона для резки оказывает сильное влияние на напряженность электрического поля в дуге, ее напряжение, тепловой КПД плазмотрона [10, 11, 44]. Совершенствование системы газовихревой стабилизации позволяет улучшить газодинамические, теплофизические и электроэнергетические параметры плазмотрона, а, следовательно, и показатели производительности, эффективности, качества и безопасности технологии плазменной резки.

Существуют различные ГВС, в которых подача газа в зону электрода (рис. 16) может осуществляться с использованием либо одного, либо двух потоков газа (рабочего тела) по каналам, расположенным по касательной к стенкам дуговой камеры, с применением разных вариантов специальных устройств – завихрителей (вихревых камер). В завихрителе создается спиралевидный вихревой поток, сжимающий столб дуги и изолирующий его от стенок как в открытой части соплового узла, так и в дуговом канале сопла. Вихревой поток интенсифицирует плазмообразование за счет перемешивания газа в столбе дуги, увеличивает напряжение плазменного столба, обеспечивает фиксацию катодного пятна в пределах термохимической катодной вставки.

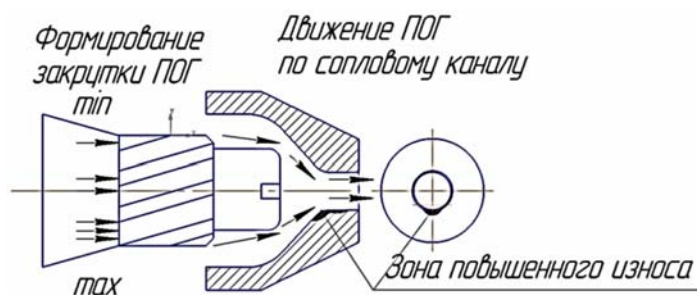


Рис. 16. Схема работы системы газовихревой стабилизации плазмотрона

Разработка плазмотронов для воздушно-плазменной резки была осуществлена в 1960-х гг. в СССР (ВНИИавтогенмаш под руководством К. В. Васильева, ИЭС им. Е. О. Патона, ВНИИ электросварочного оборудования (ВНИИЭСО)), США, Японии, ГДР и Франции [1, 2, 12]. Тогда же были определены и основные параметры качества резки металлов – точность размеров, отклонение реза от перпендикулярности, шероховатость поверхности реза и глубина зоны термического влияния, составившие позднее отечественный ГОСТ 14792–80. К середине

1970-х гг. были сформулированы основные принципы проектирования плазменных резаков и созданы первые классификации, включающие в том числе различные способы стабилизации дугового разряда (рис. 17) [43].

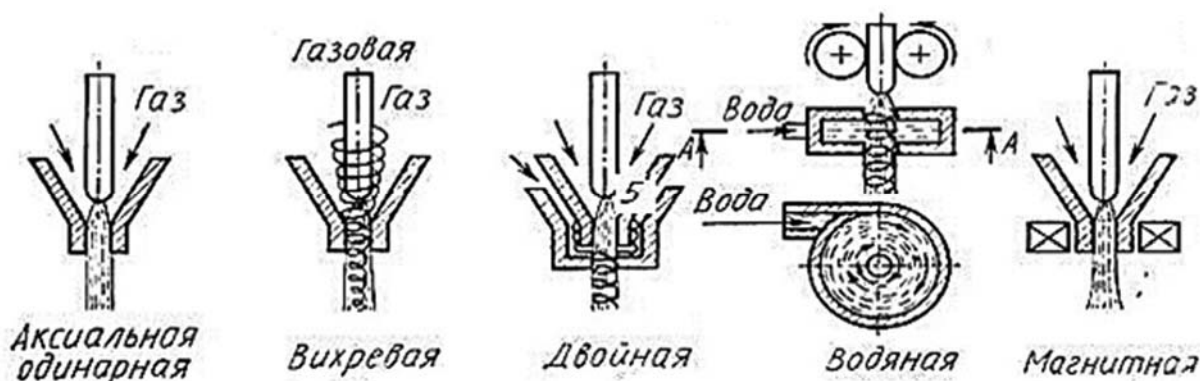


Рис.17. Классификация систем стабилизации плазменной дуги

Несмотря на увеличение номенклатуры плазмотронов и способов стабилизации дуги к настоящему времени (рис. 18), следует отметить, что в технологиях плазменной резки применяются в основном две системы, отличающиеся способами ввода рабочего газа в дуговую камеру плазмотрона [5].

При осевой стабилизации плазмообразующий газ подается в виде струй или потоков соосно или параллельно оси стержневого электрода, обеспечивая спокойные плазменные потоки. Положение катодного пятна, определяющее устойчивость горения дуги и надежность работы плазмотрона, зависит от формы острия катода и равномерности распределения потока газа по сечению сопла. Подобный характер стабилизации более присущ сварочным плазмотронам, к которым не применяются требования сильного кинетического воздействия на расплавляемый объем металла, и в настоящее время используется только для микроплазменной резки и резки в азотсодержащих средах [17].

В случае газовихревой стабилизации дуги газ вводится в зону электрода по каналам, расположенным по касательной к стенкам дуговой камеры (рис. 19). За счет этого в завихрителе создается спиралевидный вихревой поток, сжимающий столб дуги в открытой части соплового узла и в дуговом канале и изолирующий его от стенок. Применение вихревого потока обеспечивает перемешивание газа в столбе дуги, интенсифицирует плазмообразование, увеличивает напряжение плазменного столба. Дополнительно обеспечивается фиксация катод-

ного пятна в точке пересечения столба с поверхностью катода (рис. 20), что позволяет использовать катоды различной формы в виде сменных гильз. Таким образом, по мнению А. М. Костылева, система стабилизации должна быть связана с формой электрода [45]. Как показали более поздние исследования, стойкость катодов, применяемых для воздушно-плазменной резки, в большей степени зависит от создаваемого вихревой системой эффекта стабилизации катодного пятна в пределах термохимической катодной вставки [1, 2].

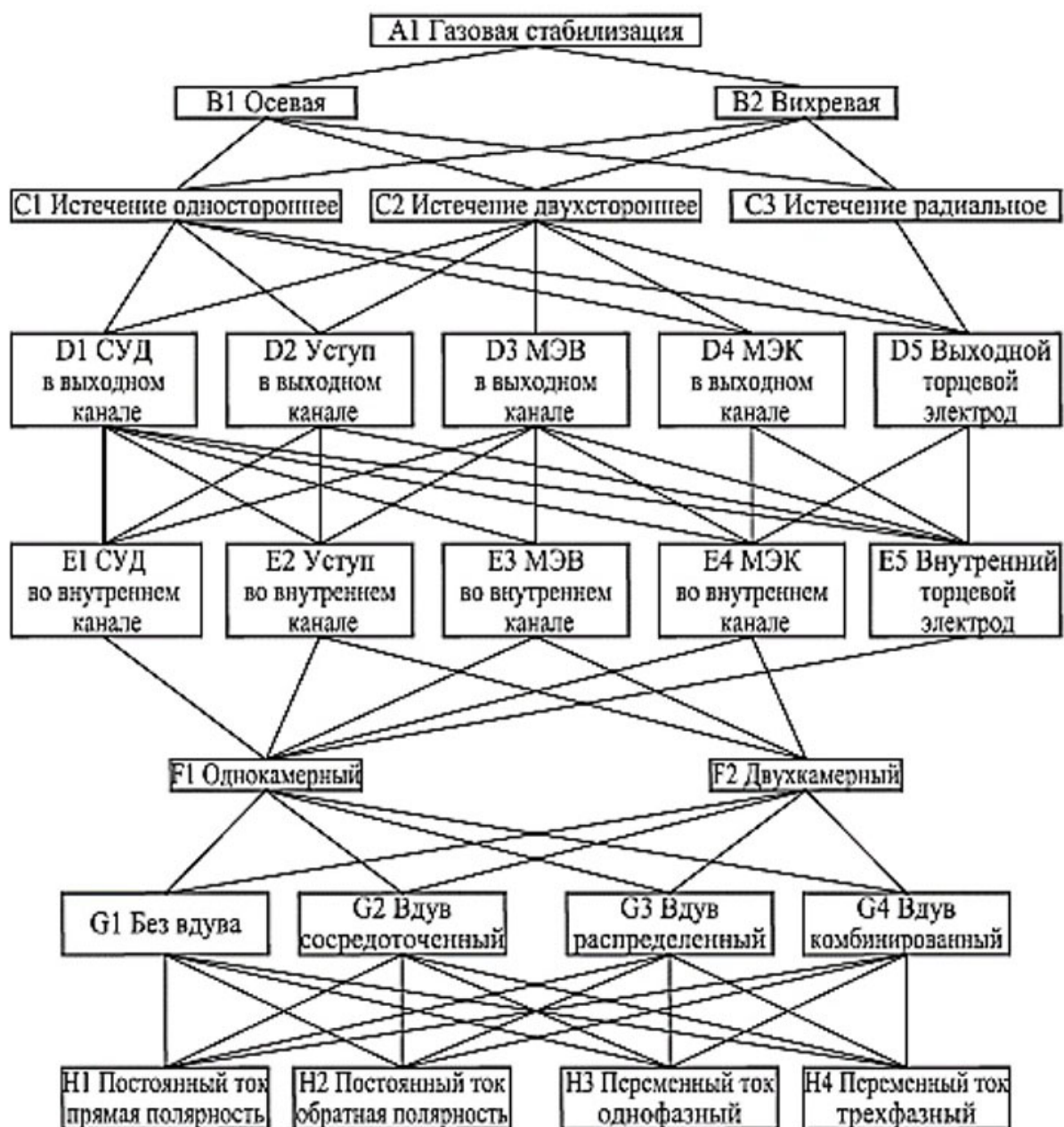


Рис. 18. Граф классификации плазматронов с газовой стабилизацией дуги

В системах с газовихревой стабилизацией, как правило, применяют гильзовые катоды с плоским торцом. Для формирования вихря в дуговой камере используют завихряющие системы различных конструкций. Это могут быть цилиндрические втулки, охватывающие катод с нарезанными винтовыми каналами или шайбы с отверстием, диаметр которого близок к диаметру формирующего канала сопла, с пазами, направляющими поток газа по касательной к окружности канала (рис. 21) [12, 43]. По результатам экспериментов, проведенных в конце 1960-х гг., отмечалось, что для обеспечения долговечности работы электродов и устойчивости работы дуги отношение тангенциальной составляющей газа V_t к осевой V_o должно находиться в пределах $V_t/V_o = 7...12$, а при $V_t/V_o < 5$ электрод быстро выгорает из-за эффектов шунтирования (замыкания) дуги на поверхность электрода [45]. Однако многие вопросы, связанные с зависимостью движения опорного пятна дуги от скорости завихренного потока газа, в те годы были еще недостаточно изучены.

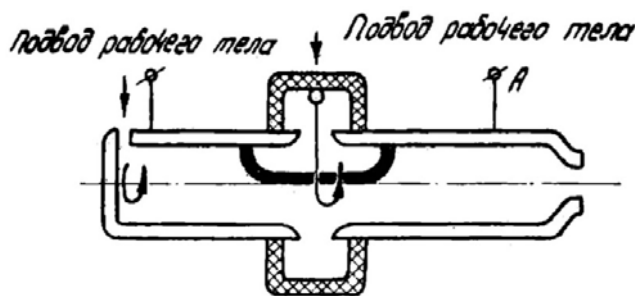


Рис. 19. Схема плазмотрона с газовым вращением дуги

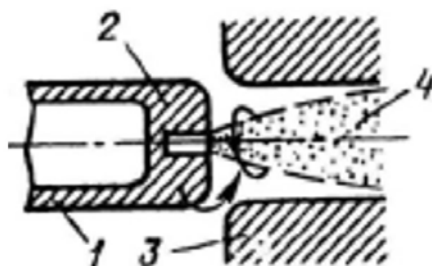


Рис. 20. Схема стабилизации приэлектродного участка дуги газовым вихрем:

1 – электрод, 2 – поток газа, 3 – канал (сопло), 4 – дуга

Следует также отметить применение системы магнитной стабилизации дуги, которая может использоваться как помимо газовихревой

(в высокочастотных нагревательных плазмотронах [8]), так и в дополнение к ней. Применение последней схемы позволяет получать менее жесткие зависимости электрических параметров плазмотрона от режима подвода газа, а также незакрученную плазменную струю в сравнении с системой газовихревой стабилизации без магнитной системы. Однако использование дополнительной магнитной системы увеличивает размеры плазменного резака, усложняет процесс управления и саму технологию резки. По этим причинам в плазморезательных технологиях системы магнитной стабилизации применяются достаточно редко.

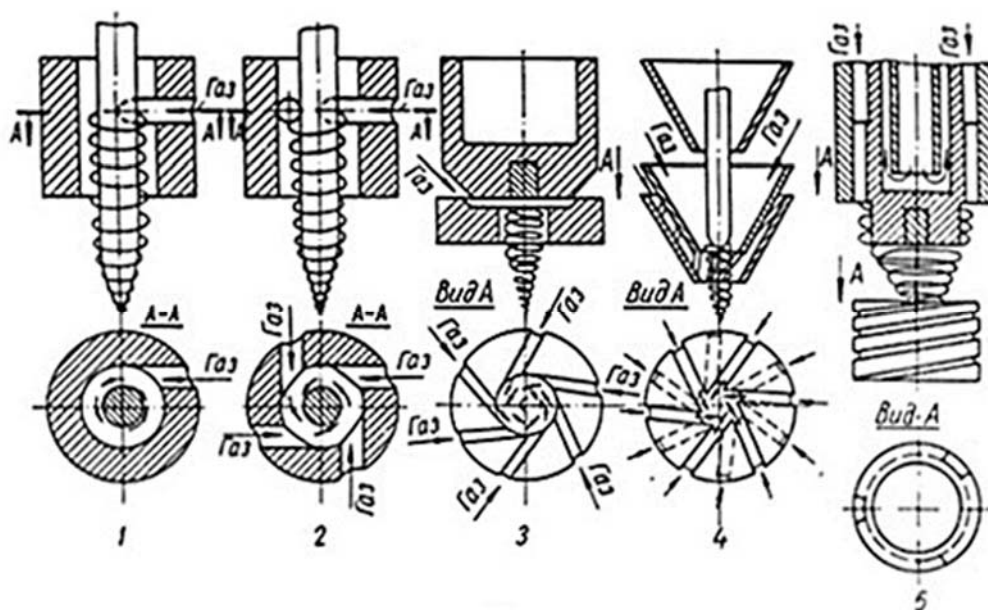


Рис. 21. Завихрители режущих плазмотронов:

- 1, 2 – подача газа в дуговую камеру по каналам, расположенным по касательной;
 3 – завихрительная шайба из жаростойкой керамики; 4 – составное сопло-завихритель (три плотно вложенных друг в друга конуса с завихрительными каналами); 5 – резьбовой завихритель

Использование воздуха в качестве рабочего газа с системой завихрения позволило повысить надежность и стабильность работы плазмотронов, стойкость электродов и сопла, а также качество кромок реза (безгратовая резка). Возможность применения воздуха появилась после разработки катодов со вставками из циркония и гафния, которые предохраняют катод от разрушения за счет образования окисной пленки. Теплосодержание, более высокое, чем у азота, позволило повысить проникающую способность плазменной струи, а система газовихревой стабилизации способствовала повышению расхода газа, и, следовательно,

производительности резки. Повышение расхода газа достигалось за счет увеличения давления, которое, в свою очередь, зависит от конструкции завихрителя. Так, например, увеличение скорости истечения газа достигалось за счет уменьшения канавок завихрителя при одновременном увеличении давления. В табл. 8 приведены конструктивные размеры различных завихрителей (по данным работы «Основы расчета плазмотронов линейной схемы» [44]). Характерной особенностью завихрителей является использование шести спирально расположенных каналов с правой нарезкой. Завихрители № 1–5 предназначены для сопел с диаметром менее 3 мм, № 6–9 – для сопел с диаметром сопла не менее 3,5 мм. Общее сечение каналов меньше сечения канала сопла. В обратном случае (плазмотрон ПВР-402) возникает ослабление вихря за счет подпора газа в полости сопла и ухудшение качества реза (рост грата). При использовании завихрителей с малым сечением (№ 4 и 5) и большой скоростью истечения было отмечено понижение напряжения на дуге, увеличение объема столба дуги, а, следовательно, увеличение ширины и скоса реза (рис. 22) [44]. Для уменьшения ширины реза применялось сжатие дуги за счет уменьшения диаметра сопла. В целом, как отмечали И. Р. Ширшов и В. Н. Котиков, на процесс плазменной резки влияет большое количество технологических и конструктивных параметров, и повышение эффективности и качества резки требует нахождения оптимальных соотношений между ними [44].

Таблица 8

Конструктивные размеры завихрителей газа

Номер завихрителя	Угол винтовой нарезки α , °	Площадь одной канавки, мм ²	Общая площадь 6 канавок, мм ²	Номер завихрителя	Угол винтовой нарезки α , °	Площадь одной канавки, мм ²	Общая площадь 6 канавок, мм ²
1	9	0,819	4,920	6	15	1,200	7,200
2*		0,390	2,160	7	32		
3		0,277	1,660	8	58		
4		0,216	0,700	9	90		
5		0,050	0,300				

* Стандартный завихритель, применяемый в плазмотроне ПМР-74.

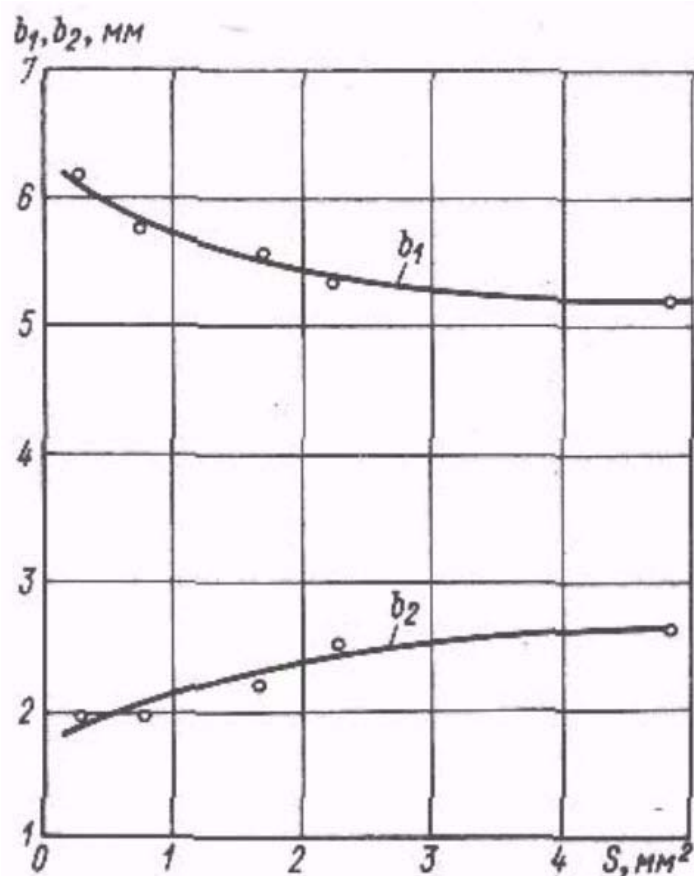


Рис. 22. Зависимость ширины реза по верхней b_1 и нижней b_2 плоскостям листа от общего сечения каналов завихрителей газа (сталь толщиной 7 мм, сила тока 280 А, расход воздуха 1,33 л/с)

Как отмечается в современных исследованиях, выбор оптимальных технологических режимов (расход газа, скорость реза, факельный зазор, сила тока), значение которых во многом связано с работой вихревой системы плазмотрона и его конструктивными особенностями, является определяющим фактором качества реза [34]. В частности, угол наклона кромок реза – это параметр качества, зависящий от работы системы завихрения. При тангенциальной подаче плазмообразующего газа правая и левая кромки реза имеют различный угол наклона. При закручивании потока газа по часовой стрелке угол правой кромки, если смотреть по ходу движения плазмотрона, равен $1-3^\circ$, а левой – $3-8^\circ$. Угол кромки, превышающий 5° , свидетельствует о нарушении оптимальных параметров при резке. Отметим также, что применение эффективной системы газовихревой стабилизации способствует повышению плотности тока, динамического напора, уменьшению диаметра дуги и энергопотребления плазмотрона. В результате, кроме уменьшения ширины реза и радиуса скругления его верхних кромок, снижается и глубина зоны

термического воздействия в приповерхностном слое реза, а, следовательно, улучшается качество реза и появляется возможность сварки разделанных кромок без дополнительного удаления зон структурных превращений металла.

Большой объем экспериментальных данных по исследованию режимов работы различных конструкций плазмотронов был обобщен и оптимизирован к концу 1970-х гг. в Институте теплофизики СО АН СССР под руководством академика М. Ф. Жукова [1, 10, 11, 20, 44]. Для плазмотронов линейной схемы с газовихревой стабилизацией были предложены две конструктивные схемы – одно- и двухкамерные (рис. 23, 24) [44]. Было отмечено существование в электродуговой камере радиального градиента плотности газа, приводящего к появлению архимедовой силы, выталкивающей столб дуги в осевую зону канала при его отклонении от оси под действием возмущающих сил. Газовихревой поток стабилизирует дугу до тех пор, пока пристенный турбулентный слой не проникнет в осевую зону камеры. Применение двух вихревых камер (см. рис. 24) – центральной *I* (основной) и торцевой *I'* (дополнительной) позволяет избежать свойственных для однокамерного плазмотрона ограничений по роду газа и тока за счет варьирования расходов газа, подаваемого через две камеры. Также был отмечен эффект демпфирования газодинамического вращения потока газа за счет подвода тепла и возникновения турбулентности в зоне шунтирования, требующий зачастую применения соленоида для дополнительной электродинамической стабилизации дуги.

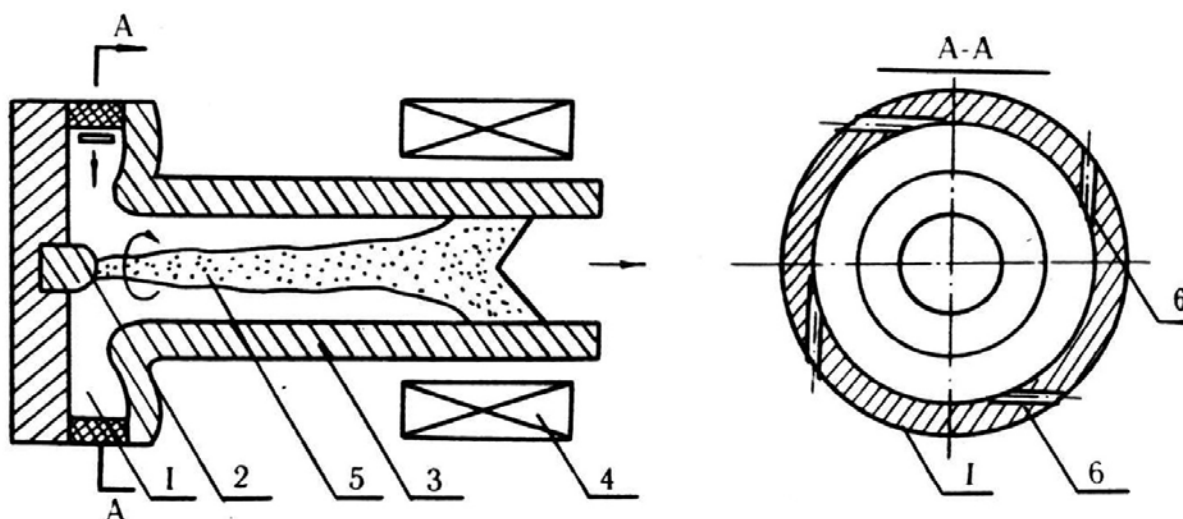


Рис. 23. Однокамерный плазмотрон с газовихревой стабилизацией дуги:

1 – вихревая камера, 2 – внутренний электрод, 3 – выходной электрод, 4 – соленоид, 5 – столб дуги, 6 – тангенциальные каналы завихрителя

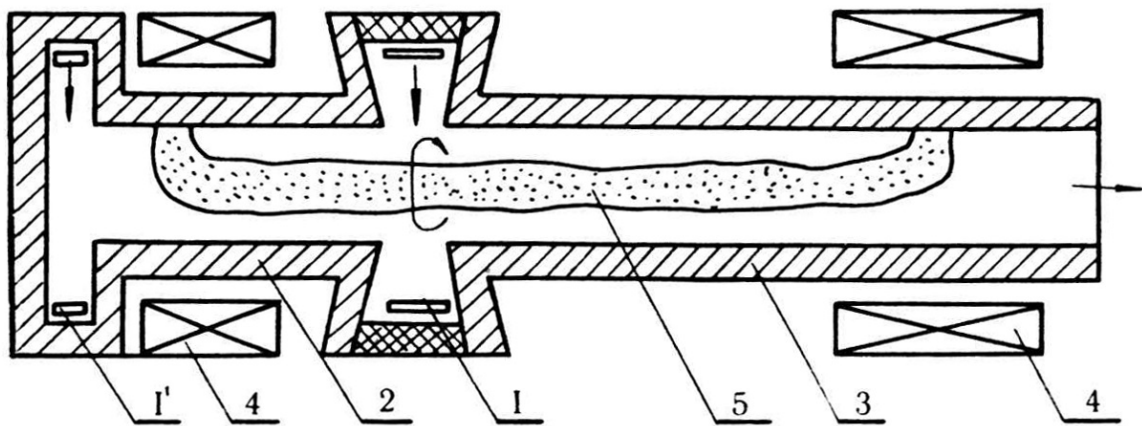


Рис. 24. Двухкамерный плазмотрон с газовой вихревой стабилизацией дуги:

1 и *1'* – вихревые камеры, *2* – внутренний электрод, *3* – выходной электрод,
4 – соленоид, *5* – столб дуги

Обобщение экспериментальных данных по эрозии катодов позволило определить оптимальные значения окружной скорости газа на входе в вихревую камеру в 150–200 м/с. Дополнительную подкрутку газа можно обеспечить за счет наложения на радиальный участок дуги осевого магнитного поля в 0,03–0,05 Тл. При соблюдении обоих условий обеспечивается равномерная эрозия медных электродов [44].

В этих же работах был представлен газодинамический расчет электродуговой камеры плазмотрона, позволяющий определить геометрию проточной части и параметров потока, обеспечивающих надежный поджиг и стабильность горения электрической дуги, исключение возможности теплового запираания канала при работе плазмотрона [1, 10, 11, 20, 44]. По результатам большого числа исследований аэродинамики вихревой камеры, проведенных в широком диапазоне изменения определяющих параметров, были разработаны следующие рекомендации по части проектирования плазмотрона:

1. Отношение диаметра кольца закрутки к диаметру выходного электрода должно составлять $3,5 \div 5,0$.

2. В кольце закрутки должно быть не менее четырех отверстий с равномерным расположением по окружности. Суммарная площадь проходных сечений должна быть такова, чтобы при заданном полном давлении и температуре подаваемого газа его скорость истечения была бы порядка $0,3 \div 0,5$ скорости звука.

3. Протяженность тангенциальных каналов в кольце закрутки (для получения остронаправленной струи газа) надо выбирать не менее $3 \div 4$ калибров.

4. Величина межэлектродного зазора выбирается, исходя из возможности его пробоя напряжением осциллятора, гарантированной электрической прочности при наложении максимального рабочего напряжения дуги с учетом ее воздействия на межэлектродный промежуток, отсутствия газодинамического запираания потока газа в сечении зазора. Как правило, величина межэлектродного зазора в плазмотронах с самоустанавливающейся длиной дуги при работе на воздухе в зависимости от мощности плазмотрона и расхода газа составляет $2 \div 5$ мм.

Выполнение указанных требований обеспечивает хорошую газовихревую стабилизацию электрической дуги на оси разрядной камеры и надежный осцилляторный запуск устройства. Следует заметить, что приведенные рекомендации остаются в качестве основных принципов проектирования газовихревых систем и в современных изданиях [6], однако требуют, на наш взгляд, анализа на предмет потери давления в системе и равномерности распределения газодинамических параметров в вихревом потоке на выходе из нее с последующими конструктивными коррекциями. В качестве иллюстрации обратим внимание на схему плазмотрона для воздушно-плазменной резки, в котором роль вихревого аппарата выполняет втулка с трехзаходной резьбой [2].

Газодинамический анализ показал, что электродуговую камеру плазмотрона можно рассматривать как тепловое сопло, в котором рабочий газ нагревается за счет тепла, выделяемого дуговым разрядом. В таком сопле дозвуковой поток (число Маха $M < 1$) при подводе к нему тепла T ускоряется: $M \sim T^{0,5}/P$, т. е. число M растет с увеличением температуры газового потока (давление P вниз по потоку уменьшается). Однако перевести поток в сверхзвуковую область за счет подвода тепла нельзя [46]. Если по достижении скорости звука ($M = 1$) продолжать нагрев газа, то величина критической скорости $a_{кр}$ будет возрастать, а скорость V в начале камеры и расход газа – уменьшаться. В результате при нагреве газа происходит тепловое запираание канала, приводящее к уменьшению массового расхода газа G :

$$G = \rho VF \sim P/T^{0,5}. \quad (2)$$

где ρ – плотность рабочего газа.

По результатам приведенных рассуждений был сделан вывод, что сечение F цилиндрической электродуговой камеры должно быть не меньше того значения, при котором в конце нее устанавливается скорость звука при заданных расходе и температуре подогрева газа, т. е.

$$F > G/(\rho_{\text{кр}} \cdot a_{\text{кр}}), \quad (3)$$

где $\rho_{\text{кр}}$ – плотность рабочего газа в критическом сечении электродуговой камеры;

$a_{\text{кр}}$ – скорость звука в критическом сечении электродуговой камеры.

Из этого условия вытекает, что диаметр электродуговой камеры d должен быть следующим:

$$d \geq 2 \left[G / \pi \rho_{\text{кр}} \cdot a_{\text{кр}} \right]. \quad (4)$$

Во избежание теплового кризиса диаметр канала следует принимать большим $d_{\text{кр}}$. Однако с чрезмерным увеличением проходного сечения уменьшается расходная составляющая скорости, что приводит к уменьшению частоты крупномасштабного шунтирования и росту эрозии электродного материала для плазмотронов с самоустанавливающейся длиной дуги. При этом возрастают длина пути частиц закрученного потока рабочего газа в камере плазмотрона и общие потери на трение о стенки, что ведет к затуханию величины тангенциальной составляющей скорости V_{ϕ} по длине канала и ухудшению стабилизирующего действия вихревого потока. Чтобы избежать указанных воздействий, необходимо иметь величину расходной составляющей скорости потока, определенной по холодному газу, не менее 30 м/с. В результате для расчета диаметра электродуговой камеры было рекомендовано соотношение $d = (1,2 \div 2,0)d_{\text{кр}}$, в котором нижнее значение коэффициента следует выбирать при работе на малых давлениях, а верхнее – в области высоких давлений ($P > 30$ атм). Этим обеспечивается пониженное давление у внутреннего электрода и создаются более благоприятные условия его работы.

Аэродинамический анализ течения газа в простейшем случае вихревой камеры с пристыкованным к ней трубчатым выходным электродом представлен также в работе М. Ф. Жукова, В. Я. Смолякова и Б. А. Урюкова. Отмечено, что в вихревой камере по мере движения

газа от периферии к оси происходит выравнивание поля скорости газа (после его сосредоточенного ввода через тангенциальные отверстия) и увеличение окружной скорости (рис. 25, *a*) [47]. Закрутка газа обеспечивает изменение статического давления газа по радиусу камеры за счет центробежного эффекта, причем минимум давления находится на оси камеры и электродов. При достаточной величине окружной скорости дуга, обладающая меньшей по отношению к окружающему газу плотностью вследствие высокой температуры в столбе, надежно удерживается (стабилизируется) в приосевой зоне минимального давления, даже если оси электродов изогнуты. Кроме пространственной стабилизации дуги, закрутка газа обеспечивает также вращение радиальных участков дуги, а вместе с ним и перемещение опорных пятен дуги по поверхности электродов, распределяя тепловой поток и эрозию равномерно по окружности. Ослабление закрутки приводит к дестабилизации дуги и снижению напряжения дуги с самоустанавливающейся длиной.

Вместе с тем было выявлено существование в вихре двух зон, отличающихся законом изменения окружной скорости V_φ по радиусу r . Распределение скорости и статического давления по радиусу вихревой камеры представлено на рис. 25 [48]. С приближением газа к оси вихревой камеры происходит увеличение его окружной скорости, а в приосевой зоне (так называемой зоне квазитвердого вращения) – наоборот, уменьшение окружной скорости вплоть до нулевого значения на оси (см. рис. 25, *a*). Для турбулентного течения газа в вихревой камере характер изменения окружной скорости по радиусу камеры не зависит от расхода газа и является только функцией геометрических характеристик камеры (радиусов и суммарной площади входных отверстий (см. рис. 25, *b*) [47]). Увеличение площади входа при фиксированной геометрии камеры и постоянном расходе снижает абсолютное значение максимальной окружной скорости, поэтому входную скорость газа в вихревых камерах плазмотрона обычно принимают по величине не меньше 30–40 м/с. В то же время V_φ не следует выбирать существенно больше 100 м/с, так как в случае, когда скорость ввода газа приближается к звуковой или режим течения переходит на сверхкритическое истечение, наблюдаются значительные потери скоростного напора и полного давления в вихревой камере, а рост мак-

симальной окружной скорости не следует за ростом V_φ . Более того, начиная с некоторого значения V_φ , максимальная окружная скорость имеет тенденцию к снижению (рис. 26) [47].

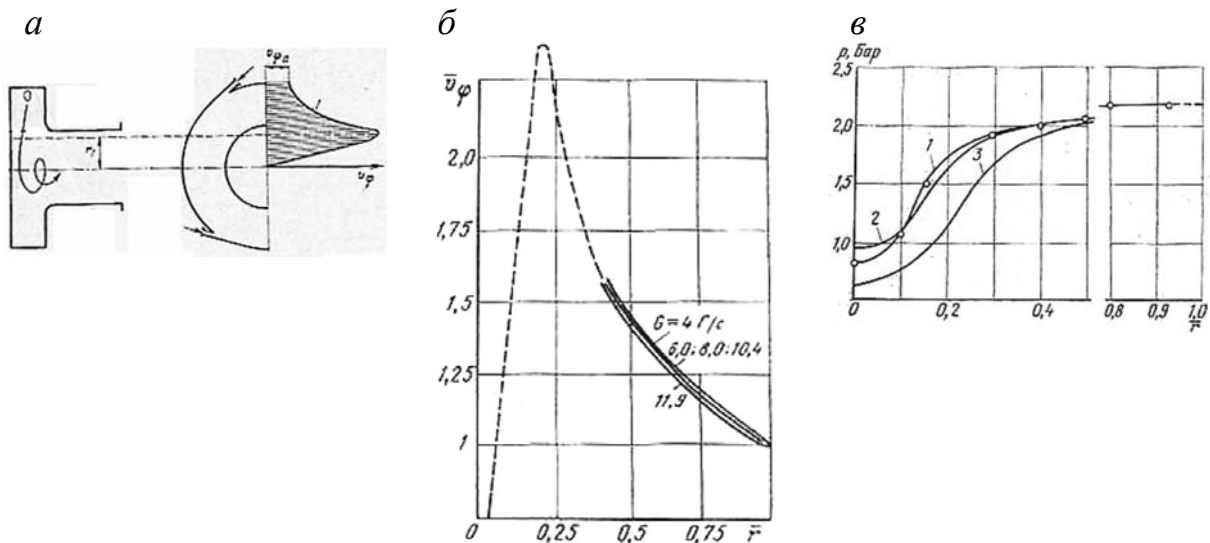


Рис. 25. Распределение скорости и статического давления по радиусу вихревой камеры:

a – схема вихревой камеры с характерным профилем окружной скорости газа \bar{V}_φ ,
б – зависимость окружной скорости течения газа от радиуса r ($F_{\text{вх}} = 75 \text{ мм}^2$),
 – – эксперимент, ——— ожидаемый вид кривой; *в* – кривые распределения статического давления по радиусу вихревой камеры: 1 – экспериментальная; 2 – расчетная, для вязкого газа; 3 – расчетная, для идеального газа

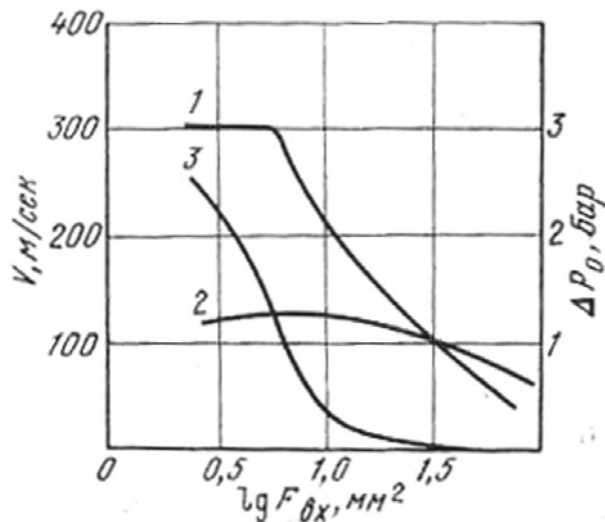


Рис. 26. Изменение характеристик потока газа в вихревой камере в зависимости от площади каналов завихрителя $F_{\text{вх}}$:

1 – скорость газа во входных отверстиях; 2 – окружная скорость на радиусе $r = 0,4$; 3 – потери полного давления

Распределение статического давления по радиусу камеры определяет степень стабилизации столба дуги на оси электродов плазмотрона. На рис. 25, в приведено экспериментальное распределение статического давления по радиусу и результаты расчетов, полученных методом последовательных приближений, исходя из расхода газа и потери полного давления в тракте за вихревой камерой и внутри самой камеры. Опыт и теория показывают слабое изменение статического давления в некоторой зоне вблизи оси. Наличие практически безградиентной приосевой зоны давления ухудшает стабилизацию дуги в пределах этой зоны. Заметим, что увеличение V_ϕ (путем увеличения расхода G или при $G = \text{const}$ путем уменьшения площади входа $F_{\text{вх}}$) сужает размер зоны малых градиентов давления $\partial p/\partial r$.

При невысоких температурах подогрева газа ($T \leq 5000$ К) в плазмотронах с вихревой газовой стабилизацией дуга занимает малую часть поперечного сечения электрода, и ее размер может быть меньше размера зоны малых градиентов давления. Опыты показали, что дуга в полости цилиндрического электрода расположена не на оси, а на некоторой цилиндрической поверхности и имеет вид винтовой линии с шагом, превышающим размер внутреннего диаметра электрода. Вероятной причиной этих отклонений может быть винтообразный характер линии наименьшего давления в вихревом потоке, по которой располагается дуга. Можно предположить, что радиальные отклонения этой линии не превышают размера зоны малых градиентов $\partial p/\partial r$.

Следует обратить внимание и на особенности течения реального газа в выходном электроде. Сформировавшийся в вихревой камере профиль скорости $V_\phi = f(r)$ при входе газа в электрод претерпевает изменения. Окружная скорость у стенки электрода равняется нулю, в то время как в вихревой камере на том же радиусе она близка к максимальной. Зона возрастания окружной скорости от стенки электрода до радиуса, соответствующего максимуму V_ϕ в электроде, располагается в пограничном слое, для которого характерны большие градиенты dV_ϕ/dr , что в вязком газе приводит к значительным потерям момента импульса вследствие трения. В зоне квазитвердого вращения, несмотря на наличие также больших градиентов dV_ϕ/dr , потери на трение гораздо меньше, так как относительное движение слоев газа мало. Потеря момента импульса вызывает ослабление закрутки газа и ухудшение стабилизации дуги. Эффект ослабления закрутки увеличивается

при уменьшении диаметра выходного электрода из-за возрастания градиента dV_{ϕ}/dr и при уменьшении осевой скорости газа в электроде вследствие удлинения пути движущихся частиц газа. Отмечается дестабилизация дуги в плазмотроне высокого давления при малых диаметрах выходного электрода (3–6 мм) и малых осевых скоростях (10–15 м/с). Следствием этого является раннее шунтирование и снижение напряжения на дуге по сравнению с хорошо стабилизированной дугой.

Закрутка газа сказывается и на характере распределения осевых скоростей газа по радиусу и длине выходного электрода. Так, отмечается образование обратного приосевого течения газа в выходном электроде как при «холодных» продувках, так и при горении дуги [48]. В подобных случаях основная масса газа в электроде протекает вблизи стенок, не реагируя непосредственно с дугой, расположенной на оси, что снижает теплоотвод от дуги. В свою очередь уменьшение теплоотвода от дуги в вихревых схемах (по сравнению с горением дуги в незакрученном потоке) отражается на напряженности электрического поля в столбе дуги и является, по-видимому, одним из главных факторов ее уменьшения по сравнению с продольным обдувом, что замечается в некоторых опытах [49]. С ростом вязкости газа, обусловленным увеличением давления или температуры, обратные приосевые течения могут исчезать. Однако и в этом случае возможно различное распределение расхода газа по сечению трубчатого электрода в закрученном и незакрученном потоках.

Отметим также влияние геометрии разрядной камеры на процессы газовихревой стабилизации. В работе Б. И. Михайлова приводятся результаты экспериментальных исследований радиального распределения статического давления и градиента давления в вихревой камере в зависимости от степени ее конфузурности и режимных параметров [50]. Показано, что поджатие, свойственное конфигурации соплового узла плазмотронов для резки, существенно перестраивает течение вихревого потока в камере и положительно влияет на осевую стабилизацию дуги и фокусировку катодного пятна. Для оценки качества стабилизации и фокусировки можно использовать критерий, составленный из определяющих режимных параметров: расход газа, степень конфузурности вихревой камеры, ее диаметр и т. д. Экспериментально найдено критическое значение этого комплекса параметров, ниже которого осевая стабилизация столба дуги становится неэффективной.

Следует также обратить внимание на выявленную в работах Института теплофизики СО АН СССР взаимосвязь газовихревой стабилизации с эффектом возникновения мелко- и крупномасштабных турбулентных пульсаций потока газа, во многом определяющих вероятность шунтирования дуги и стабильность работы плазмотрона. Было определено, что в области вдува вихревого потока в дуговую камеру преобладают низкочастотные пульсации с большой амплитудой, а по мере удаления от катода степень турбулентности снижается, но начинают зарождаться высокочастотные (порядка 20 кГц) пульсации, способствующие перемешиванию стабилизирующего и плазмообразующего потоков и снижению эффективности тепловой защиты [44]. В связи с этим следует отметить эффект высокочастотного акустического излучения [4], вероятно обусловленный появлением пульсаций подобного типа. На появлении резкого звука при увеличении расхода газа, вызывающего превращение струи в турбулизированный сгусток, и на возможность определения режима течения по уровню шума сделали акцент авторы работы «Физика и техника низкотемпературной плазмы» [9]. Было обнаружено, что наличие во внешнем вихревом потоке положительного радиального градиента плотности способствует подавлению турбулентного перемешивания потоков, причем этот эффект усиливается при увеличении температуры газа центральной струи. Низкочастотные пульсации с большим размером турбулентности большинство исследователей связывают с макроскопическими процессами, происходящими в канале плазмотрона (перемещение анодного пятна в канале, периодическое испарение материала анода, несглаженные пульсации тока и т. д.) [9]. Высокочастотные пульсации имеют более сложную природу и связаны, по-видимому, с взаимодействием холодного газа, текущего вдоль стенки, и самого столба дуги, что приводит к возбуждению колебаний столба дуги по типу натянутой струны. В качестве стабилизирующего фактора, снижающего амплитуду колебаний дуги и потери тепла, выступает расход газа. При малых расходах газа флуктуации столба дуги и миграция катодного пятна вызывают немонотонность тепловых потерь. При его увеличении изменяется соотношение газа, поступающего в область дуги и протекающего на периферии дуговой камеры, тем самым повышая стабильность горения дуги и ее тепловые потери [51].

Приведенные рассуждения и рекомендации по проектированию были сформулированы в результате обобщения экспериментальных исследований плазмотронов. При этом в вышеупомянутых работах отмечалось отсутствие строгой теории вихревого течения в электродуговой камере плазмотрона. Однако появление к концу 90-х гг. XX в. возможностей по автоматизации численных решений сложных газодинамических задач позволило провести ряд подобных разработок и обобщить полученные результаты [52, 53, 54, 55]. В этих работах был подтвержден эффект энергоразделения в вихревой трубе, обусловленный высоко- и низкочастотными неустойчивостями, связанными с образованием в трубе крупномасштабных когерентных вихревых структур сдвигового характера. Такие структуры рождаются периодически в области соплового ввода и образуют спиралевидные жгуты, укрупняющиеся по мере удаления от области зарождения. Было отмечено также, что в плазмотронах с газовихревой стабилизацией (вихревых энергоразделителях Ранка) среднеинтегральная температура струи возрастает с увеличением степени закрутки $S = V_0 / V_t$ [52].

В работе «Математическое моделирование течения газа в вихревых камерах с тангенциальным вдувом» авторы, используя методы численного анализа, изучили влияние отношения диаметра входного отверстия к диаметру вихревой форсунки на течение в канале плазмотрона и определили оптимальные размеры входных отверстий при их различном количестве (6 и 8) [53]. Сравнив форсунки с различными размерами, числом отверстий и при различных числах Маха поступающего потока, авторы предложили наиболее подходящие варианты этих деталей. Решения были получены с помощью разработанного программного комплекса, предназначенного для нахождения распределения основных параметров газа (плотность, давление, поле скоростей, температура) в двумерном приближении для широкого класса геометрий форсунок с учетом эффектов вязкости и теплопроводности.

Описанное выше влияние закрутки газа на вероятность эффекта шунтирования дуги обсуждается также в работе А. С. Коротеева, В. М. Миронова, Ю. С. Свирчука [14]. Вихревое движение газа выполняет еще одну стабилизирующую функцию: обеспечивает вращение радиальных участков («ножек») дуги (рис. 27). При этом опорные пятна дуги b перемещаются по поверхностям электродов, что создает благоприятные условия для их охлаждения [14].

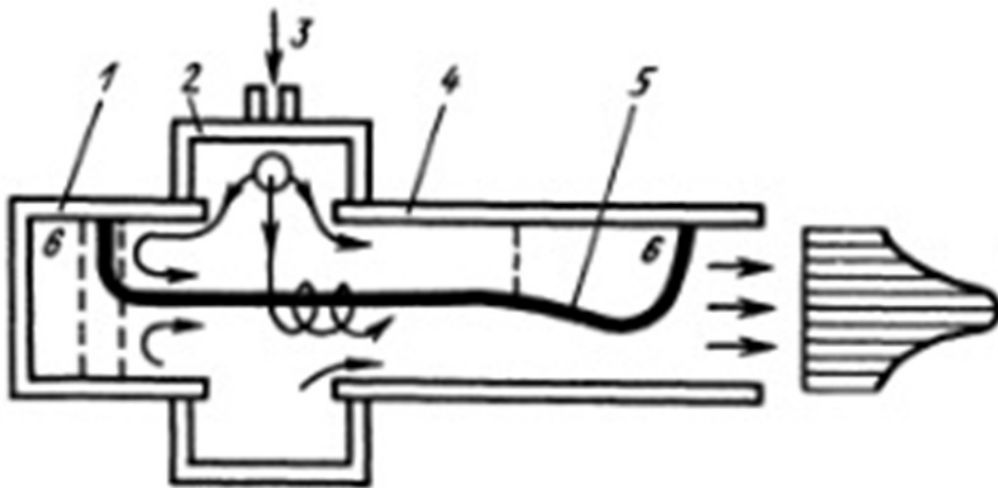


Рис. 27. Схема плазмотрона:

1, 4 – электроды; 2 – вихревая камера; 3 – подача рабочего газа;
5 – дуга; 6 – опорное пятно дуги

Авторы отмечают следующие особенности течения газа в плазмотроне с вихревой стабилизацией разряда [14]:

а) прохождение некоторой части рабочего тела через приосевую зону и, следовательно, через зону дугового разряда;

б) неоднородность профиля температур в выходной струе (холодный газ, который течет вдоль стенки, эффективно защищает электрод от непосредственного воздействия горячей дуги). Для получения однородного профиля температур плазмотрон должен быть снабжен специальной выравнивающей камерой;

в) затекание газа в полость катода позволяет стабилизировать плоскость вращения «ножки» дуги. Однако положение этой плоскости внутри катода (расстояние от его торца) меняется в зависимости от режима работы плазмотрона (давления и расхода газа). Если изменение положения плоскости вращения «ножки» дуги нежелательно, то слева от катода помещают вторую вихревую камеру, через которую подают такую часть общего расхода газа, которая обеспечивает приблизительно стационарное положение плоскости вращения;

г) в полости анода наблюдается явление шунтирования дуги, которое имеет важное значение для понимания физических процессов в плазмотронах. На «ножку» дуги в анодной полости действует поток газа, имеющий окружную и осевую составляющие скорости. Окружная составляющая вызывает вращение «ножки», а осевая – ее движе-

ние по потоку, т. е. увеличение длины дуги. Образовавшаяся «ножка» дуги сносится потоком, дуга удлиняется и процесс повторяется. Влияние вихревой подачи газа сказывается на том, что вдоль стенки анода образуется пелена холодного газа, пробивная прочность которой достаточно велика. По мере движения по каналу газ нагревается, диаметр дуги увеличивается, поэтому пробивная прочность промежутка «дуга – стенка» снижается и в некоторой точке происходит пробой. При уменьшении внутреннего диаметра анода пробивная прочность промежутка «дуга – стенка» снизится и точка пробоя сместится ближе к вихревой камере.

Помимо эффекта шунтирования следует обратить внимание и на аварийный режим работы плазмотрона, так называемое двойное дугообразование [2, 13, 23]: появление двух дуг, горящих между катодом и соплом и между соплом и разрезаемой деталью (рис. 28). В результате происходит оплавление сопла и выход плазмотрона из строя [23].

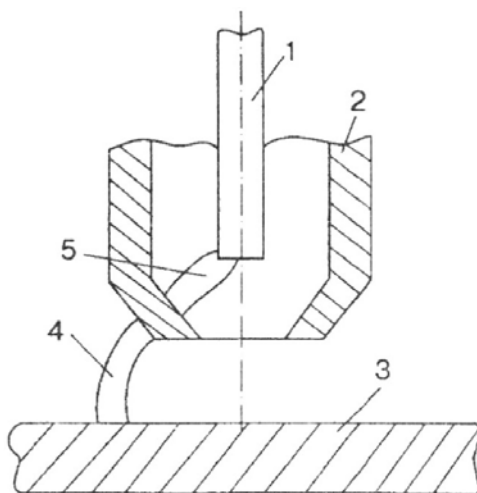


Рис. 28. Схема двойного дугообразования:
1 – электрод; 2 – сопло; 3 – деталь; 4 – дуга «сопло – лист»;
5 – дуга «электрод – сопло»

Причиной такого явления помимо превышения штатных параметров процесса (максимального тока $I_{кр}$, минимального расстояния до детали, скорости резки) могут быть как недостатки в организации процесса газовихревой стабилизации (радиальная неравномерность потока, пульсации скорости, давления P , недостаточный расход газа G), так и конструктивные недоработки (например, большая длина соплового канала). Результаты измерений окружной скорости газа V_{ϕ} вблизи стенки электрода (вне пограничного слоя) показывают, что при $I < I_{кр}$

с ростом тока наблюдается незначительное снижение V_ϕ (рис. 29) [2]. При $I < I_{кр}$ скорость вращения газа резко падает, поток в полости электрода теряет устойчивость. При этом V_ϕ становится неравномерной и неопределенной, наблюдаются уменьшение скорости перемещения катодного пятна и его периодические остановки, что приводит к росту удельной эрозии электрода. Это позволяет сделать вывод, что потеря пространственной устойчивости потока в полости электрода и увеличение его эрозии взаимосвязаны и при заданном токе определяются аэродинамикой закрученного потока газа и его устойчивостью. Кроме того, чем больше V_ϕ , тем больше стабилизирующий эффект вращающегося потока. Так как $V_\phi \sim G/pd$, то данное соотношение можно считать одним из параметров, определяющих эффект стабилизации дугового разряда. В свою очередь, значение критического тока $I_{кр}$ тем больше, чем больше V_ϕ . Таким образом, $I_{кр} = f(G, p, d)$ [2]. На рис. 30 представлены диаграммы критических режимов работы плазмотрона [8]. Для большинства плазмотронов для резки в качестве оценки ресурса непрерывной работы электрода можно использовать соотношение:

$$G/pd \geq 2 \cdot 10^{-6}; \quad I < I_{кр} = 1,6 \cdot 10^6. \quad (5)$$

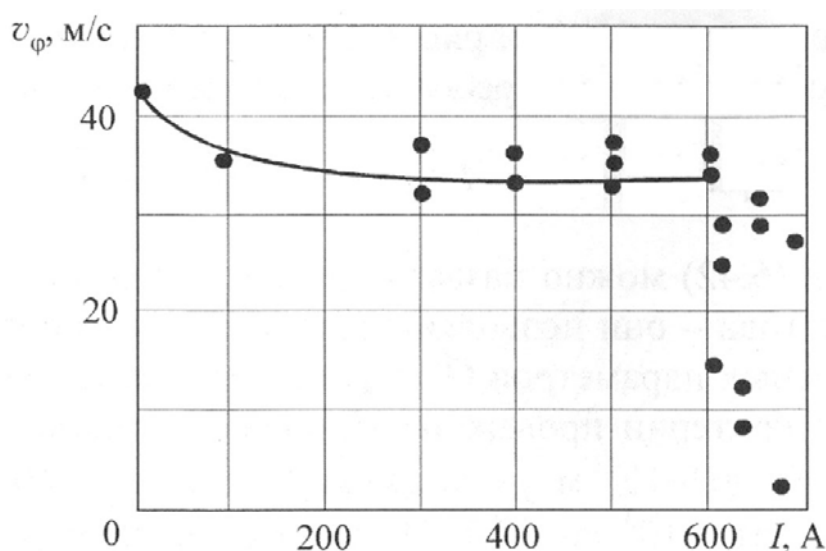


Рис. 29. Изменение окружной составляющей скорости газа вблизи стенки электрода в зависимости от тока дуги: диаметр электрода $d = 50$ мм, расход газа $G = 5$ г/с

Помимо упомянутых выше плазмотронов для воздушно-плазменной резки металлов, обратим внимание еще на несколько конструкций, имеющих патентную защиту. Результатом применения обсуждаемых принципов проектирования можно назвать приведенный на рис. 31 плазмотрон, заявленный еще в 1977 г. [56] и в основных своих чертах разработанный в 1980-е гг. [2]. Данный плазмотрон состоит из стационарной части с каналами для подачи плазмообразующего газа и охлаждающей среды и сменной части, содержащей водоохлаждаемый электрододержатель с завихрителем и размещенным в нем электродом, изолирующий корпус и водоохлаждаемое сопло. Внутри электрододержателя имеется газоподводящий канал (ГПК) для подачи ПОГ через выходное отверстие в газораспределительную камеру (ГРК), которая расположена перед завихрителем и через его канавки сообщается с сопловой камерой, образованной внешней поверхностью электрода и внутренней поверхностью сопла с выходным цилиндрическим каналом.

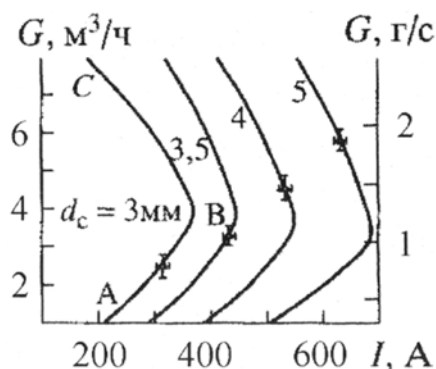


Рис. 30. Диаграммы критических режимов работы плазмотрона РПМ-6 при плазменно-дуговой резке с соплами различного диаметра

На наш взгляд, данная конструкция газозвушного тракта плазмотрона не является оптимальной с точки зрения газодинамики, так как ПОГ подается из одного канала в объем ГРК, где неравномерно распределяется по периметру ГРК, канавкам завихрителя и сопловой камеры, а далее на фиксации катодного пятна и стабилизации плазменной дуги по оси цилиндрического канала и на выходе плазменной дуги из сопла плазмотрона. Неравномерная подача потока ПОГ в канавки завихрителя приводит к неустойчивому вихревому потоку ПОГ в сопловой камере, вследствие чего не обеспечивает изоляцию плазменной дуги от стенок сопла и шунтирует дугу на внутреннюю поверхность сопла и выходного цилиндрического канала. В свою оче-

редь, шунтирование дуги в выходном цилиндрическом канале сопла и колебание катодного пятна вызывают неравномерный преждевременный износ сменных деталей плазмотрона (сопла и электрода), уменьшают срок службы и надежность работы устройства в целом. В дополнение можно отметить, что пульсации потока ПОГ в ГРК сопровождаются образованием звуковых колебаний, которые распространяются по канавкам завихрителя в сопловой узел и через выходное отверстие цилиндрического канала сопла излучаются в окружающее пространство в виде интенсивных звуковых колебаний широкого диапазона частот [4].

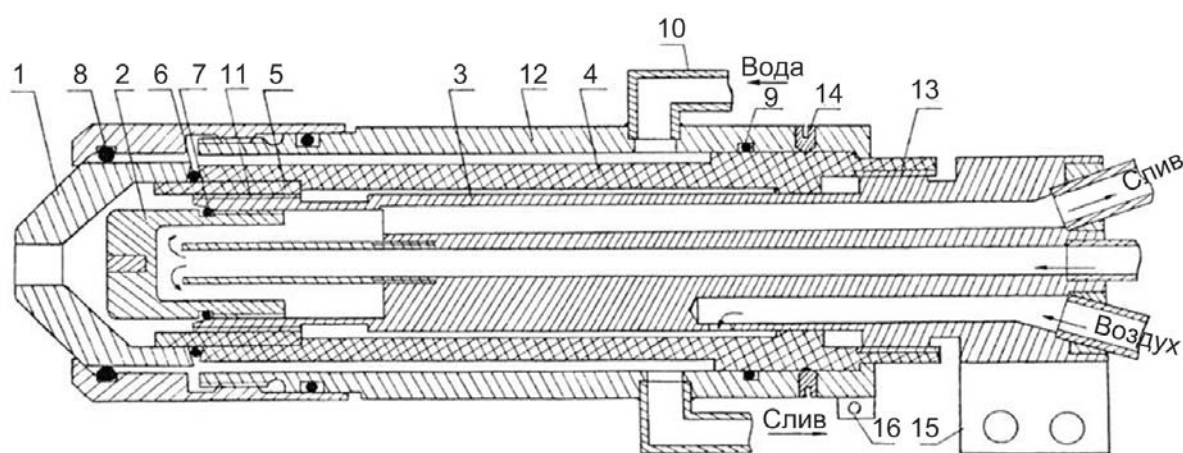


Рис. 31. Плазмотрон для воздушно-плазменной резки металлов:
 1 – сопло; 2 – катод; 3 – катододержатель; 4 – изолятор; 5 – промежуточный изолятор; 6–9 – уплотнения; 10 – штуцер для подвода воды; 11 – закручивающий аппарат (завихритель); 12 – рубашка охлаждения; 13 – резьба; 14 – штифт; 15, 16 – клеммы

Таким образом, газодинамические пульсации потока ПОГ, возникающие в ГРК описываемого плазмотрона, в конечном итоге негативно влияют не только на сроки эксплуатации и надежность работы плазмотрона, но и на нормируемые параметры качества резки – ширину, шероховатость и перпендикулярность кромок реза, а также на условия труда по акустическому фактору, что характеризует конструкцию как малоэффективную и несоответствующую современным требованиям.

Подобными недостатками обладает и другая конструкция плазмотрона, в которой сменная часть содержит сопло, водоохлаждаемый электрододержатель с электродом, изоляционную втулку с винтовыми канавками завихрителя, газоподводящий канал, расположенный тангенциально к винтовой линии канавок и соединенный с кольцевой

конусообразной полостью, сужающейся в направлении к торцу электрода [57]. Очевидно, что в данном плазмотроне также не в полной мере обеспечивается равномерное распределение потока ПОГ, подаваемого из одного выходного отверстия газоподводящего канала и далее в канавки завихрителя. В сопловой камере, расположенной после канавок завихрителя, этот вихревой поток можно характеризовать как слабый и неравномерный по периметру завихрителя и на выходе из его канавок, что вызывает нарушение стабилизации плазменной дуги в цилиндрическом канале по оси сопла и фиксацию катодного пятна по центру электрода.

В конструкции системы «Сдвоенное плазменное устройство», разработанной В. В. Белашенко, О. П. Солоненко и А. В. Смирновым, вспомогательный газ подается в плазменный канал 32 через четыре прорези или отверстия 77, находящиеся в расположенной впереди по потоку секции 39 (рис. 32) [58]. Как показано, прорези 77 могут быть выполнены так, чтобы обеспечить введение вспомогательного плазмообразующего газа по существу по касательной в плазменный канал через 32. Недостатком данной конструкции является использование вспомогательного канала для организации вихревой стабилизации основного потока газа и подача дополнительного газа в систему по патрубку, расположенному диаметрально к корпусу соплового узла плазмотрона. Все это сильно усложняет конструкцию и делает ее мало пригодной для резки металлов.

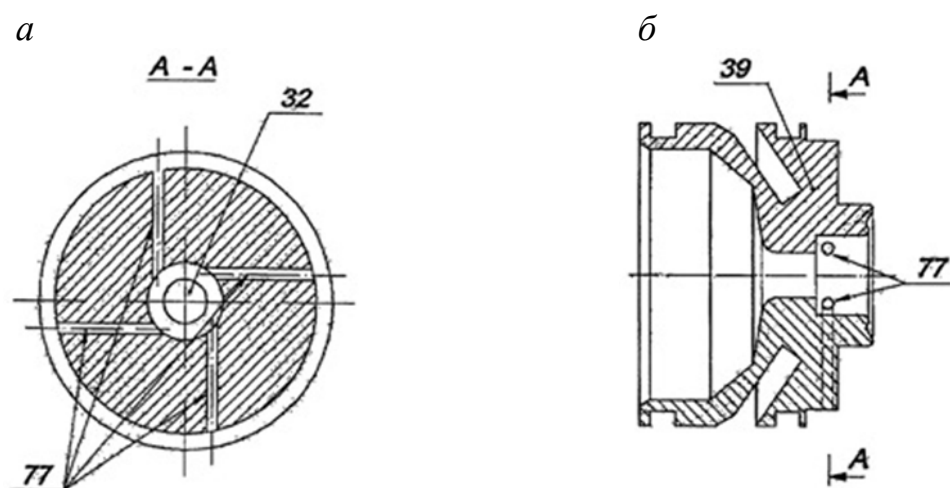


Рис. 32. Радиальное и аксиальное сечения устройства для введения вспомогательного плазмообразующего газа

Среди других патентозащищенных конструкций отметим плазмотрон для резки Н. М. Камышного и соавторов [59], в котором входной канал, сопло и конструктивные элементы выполнены с концентрично расположенными цилиндрическими участками, образующими центральную, среднюю и периферийную кольцевые полости, соединенные между собой каналами. Средняя кольцевая полость соединена с атмосферой через внутренний завихритель и сопло, а также через каналы, периферийную кольцевую полость и мундштук сопла. Плазмотрон снабжен установленным в дополнительной кольцевой полости дефлектором, разделяющим ее на две кольцевые щели, сообщенные между собой каналами со стороны обращенного к соплу торца дефлектора. Техническим результатом является увеличение ресурса, снижение массогабаритных характеристик и увеличение глубины реза путем повышения эффективности распределения и использования плазмообразующего и охлаждающего воздуха. Недостатком данного изобретения является техническая сложность конструкции и крупные потери динамического напора плазмообразующего газа, обусловленные наличием большого числа камер и каналов, соединяющих кольцевые полости между собой. Потери динамического напора газа по ГВТ плазмотрона снижают величину давления газа в сопловой камере, отрицательно влияют на эффективность стабилизации плазменной дуги, снижают тепловой КПД плазмотрона.

Еще одна конструкция представляет собой плазменную горелку для резки и сварки металлов [60], состоящую из корпуса, завихрителя с 4 каналами тангенциального ввода газа, стержневого электрода, диэлектрической трубки, сопловой насадки с открытым центральным каналом, разрядной и вихревой камер. Разрядная камера выполнена в виде цилиндрической полости, которая имеет конфузорное сопряжение с внутренней поверхностью завихрителя (рис. 33). При характерном для режима резки повышенном давлении в разрядной камере воздействие на поток рабочего газа переменной конфузорностью, увеличивающейся вниз по потоку, повышает степень сжатия электрической дуги, улучшает ее осевую стабилизацию, увеличивает длину и газодинамический напор плазменной струи, снижает тепловые потери в стенку центрального канала сопловой насадки. Недостатком данной конструкции, на наш взгляд, является отсутствие в заявленной схеме конструкции газовоздушного тракта плазмотрона, что не позволяет

определить способ подачи газа в завихритель и степень равномерности его распределения по каналам завихрителя.

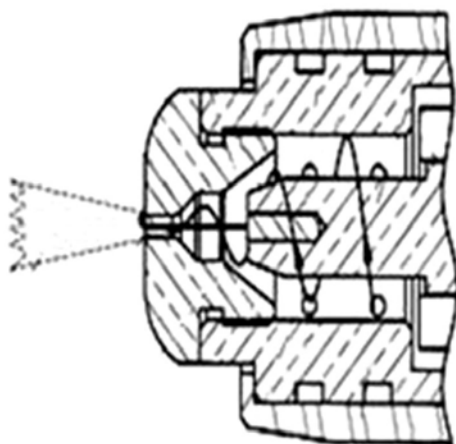


Рис. 33. Конструкция плазмотрона для резки металлов с переменной конфузорностью электродной камеры

Подводя итоги, следует отметить многофакторность проблемы газовихревой стабилизации в плазмотронах для резки металлов. По нашему мнению, несмотря на большое количество проведенных исследований влияния различных факторов на эффективность работы данных плазмотронов, недостаточно изучен фактор равномерности распределения потока газа по сечению плазмотрона как в вихревой, так и в электродуговой камерах, а также конструктивные параметры таких плазмотронов, влияющие на данный фактор. По этой причине необходимо провести газодинамические исследования на всем протяжении ГВТ плазмотрона: в расширительной камере перед завихрителем, в самом завихрителе и в электродуговой камере. В результате возникает задача исследования указанного фактора в плазмотронах стандартного исполнения и поиска новых конструктивных решений, улучшающих работу плазмотрона, эффективность и широту применения плазморезательных технологий.

2.4. Новые методы проектирования систем газовихревой стабилизации в плазмотронах для резки

Основные принципы и методы конструирования плазмотронов для металлорежущих технологий были разработаны при отсутствии строгой теории вихревого течения в электродуговой камере плазмотрона в последней четверти XX в. [2, 34]. Однако и в большинстве по-

следних изданий эти принципы приводятся в качестве базовых положений, применяемых для проектирования ГВС [39]. На взгляд авторов, современные возможности численного моделирования газодинамических процессов (CFD – computational fluid dynamics) позволяют провести их корректировку и сформулировать дополнительные критерии, позволяющие оценить эффективность систем ГВС уже на стадии проектирования. При этом необходимо учесть и предложенное более 30 лет назад, но реализованное только в конце 2000-х гг. применение дополнительного сжатия дуги для улучшения качества реза за счет уменьшения диаметра сопла, а также использование вторичного потока газа, обеспечивающего стабилизацию плазменной дуги (струи) за пределами сопла плазматрона. Последний способ используется в уже упомянутой ранее технологии узкоструйной (точной, сжатой) плазмы, получившей свое воплощение в XXI в. в плазматронах серии NuPerformance (Hypertherm, США), FineCut (Kjellberg, Германия) и др.

В результате газодинамического анализа можно определить критерии эффективности ГВС в области формирования плазменной дуги (сопловом узле) и в зоне воздействия на поверхность металла, которые обеспечивают высокую степень прецизионности плазменной резки. При этом следует обращать внимание на повышение кинетических параметров и степени равномерности распределения газодинамических характеристик газоплазменного вихревого потока, а также формирование геометрии высокоэнергетичного ядра плазменной дуги (струи).

Применение CFD-методов позволило авторам провести газодинамический и теплофизический анализ большого числа систем ГВС металлорежущих плазматронов. На основе полученных результатов были предложены дополнительные критерии эффективности систем ГВС и сформулированы рекомендации по их проектированию [61].

Характерная конструкция газоздушного тракта дугового металлорежущего плазматрона (рис. 34) включает в себя участок подачи газа в плазматрон, успокоительную (расширительную) камеру и систему ГВС, обеспечивающую тангенциальную подачу ПОГ из завихрителя (вихревой камеры) в сопловый узел. Как показал проведенный авторами анализ [61], проблемы производительности и качества плазменной резки во многом обусловлены неравномерностью распределения параметров газового потока по сечению ГВТ, что вызвано применением общепринятого асимметричного способа подачи ПОГ

в расширительную камеру, которая в силу ограниченности своих размеров не успевает сформировать равномерный газовый поток перед его распределением по каналам завихрителя.

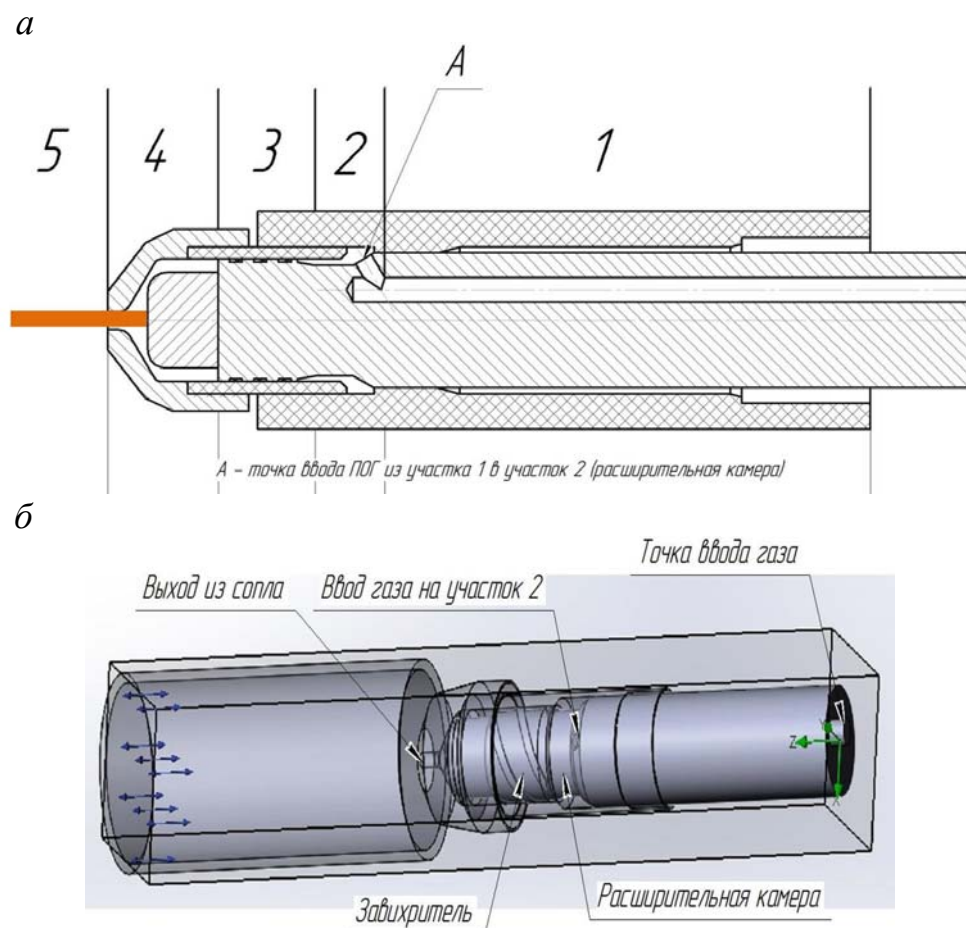


Рис. 34. Газовоздушный тракт металлорежущего плазматрона линейной схемы ПМВР-М с системой ГВС:
 а – конструктивная схема; б – расчетная схема;
 участки ГВТ: 1 – ввод ПОГ в плазматрон; 2 – расширительная камера;
 3 – завихритель; 4 – сопловой узел; 5 – выход плазмы

Подобная асимметрия сохраняется и при прохождении ПОГ через сопловой узел, вызывая упомянутые негативные эффекты. В качестве основных анализируемых параметров при определении критерия эффективности ГВС следует рассмотреть распределение локальных скоростей, удельных массовых расходов и энергий ПОГ. Очевидно, что абсолютно равномерный поток должен характеризоваться равенством параметров во всех симметричных точках, выбранных для сравнительного анализа расчетных траекторий. Для оценки неравномерности распределения газового потока на стадии проектирования авторами были применены программные средства системы автомати-

зирования расчета и конструирования САД или САЕ (со встроенными средствами анализа типа COSMOS/FloWorks или EFD.lab для SolidWorks), позволяющие производить расчетное моделирование параметров движения и теплообмена текучей среды с помощью уравнений Навье – Стокса в программной среде SolidWorks с приложениями Flow Simulation и EFD.lab. Погрешность теоретической оценки газодинамических параметров составила 5–10 %.

При расчетах параметров движения в программной среде SolidWorks использовалась расчетная система уравнений сохранения массы, импульса и энергии нестационарного пространственного течения в рамках подхода Эйлера в декартовой системе координат:

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{d(\rho u_k)}{dx_k} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{d(\rho u_i)}{dt} + \frac{d(\rho u_i u_k - \tau_{ik})}{dx_k} + \frac{dP}{dx_i} = S_i, \quad (7)$$

$$\frac{d(\rho E)}{dt} + \frac{d((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i)}{dx_k} = S_k u_k + Q_H, \quad (8)$$

где ρ – плотность текучей среды, кг/м³;

u – скорость текучей среды, м/с;

t – время, с;

τ_{ik} – тензор вязких сдвиговых напряжений, Н/м²;

P – давление текучей среды, Па;

S_i – внешние массовые силы, действующие на единичную массу текучей среды, Н/м³;

E – полная энергия единичной массы текучей среды, Дж/кг;

q_i – диффузионный тепловой поток, Вт/м²;

Q – мощность тепловыделения теплового источника в единичном объеме текучей среды, Вт/м³.

Нижние индексы означают суммирование по трем координатным направлениям.

При определении параметров ПОГ использовалось уравнение состояния вида:

$$\rho = \rho(P, T, y), \quad (9)$$

где $y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ – вектор концентраций компонентов текучей среды.

В качестве расчетных траекторий прежде всего целесообразно рассмотреть сечения ГВТ плазмотрона. Для выбора оптимальных конструктивных решений отдельных участков ГВТ (расширительной камеры, завихрителей, соплового узла и их сопрягающих элементов) следует начать анализ от точки ввода ПОГ в первую расширительную камеру и далее вести его вплоть до цилиндрического канала соплового узла плазмотрона, определяя наиболее эффективные конструкции при минимальных геометрических размерах отдельных участков ГВТ. Очевидно, что контрольные сечения в этом случае будут иметь кольцевую или круговую форму (за исключением сечений в каналах завихрителей), а в качестве расчетной траектории целесообразно взять окружность с радиусом, равным радиусу средней линии контрольного сечения.

Равномерность распределения динамических характеристик газового потока выявляется в зависимости от аппаратных возможностей применения программного комплекса и требуемой точности вычислений. При ограниченных ресурсах (в том числе временных) достаточно провести расчет параметров потока ПОГ в 4 симметричных точках в выбранных сечениях плазмотрона (рис. 35, вкладка). При этом одна из точек выбирается напротив точки ввода газа в расширительную камеру. Определяющим критерием эффективности ГВС должно стать распределение параметров в цилиндрическом канале соплового узла плазмотрона, в наибольшей степени ответственного за формирование плазменной дуги и газоплазменных потоков струйного истечения за пределами ГВТ (на выходе из плазмотрона).

Степень неравномерности распределения скорости потока по сечению ГВТ плазмотрона в этом случае можно оценить путем нахождения отношения скоростей (см. рис. 35, вкладка) по следующей формуле:

$$K_{Vi} = V_1/V_2 = V_1/V_3 = V_1/V_4, \quad (10)$$

где V_i – локальная скорость, м/с.

Отношение удельных расходов рассчитаем следующим образом:

$$K_{Qi} = Q_1/Q_2 = Q_1/Q_3 = Q_1/Q_4, \quad (11)$$

где Q_i – удельный расход, кг/м²·с.

В свою очередь, удельный расход Q_i вычисляем по формуле

$$Q_i = \rho_i \cdot V_i,$$

где ρ_i – плотность потока ПОГ в i -й контрольной точке, кг/м³.

Анализ неравномерности следует провести по всему ГВТ (начиная с расширительной камеры), так как это позволит выявить участки, требующие конструктивных изменений. Расчет скоростей выполняют по круговым траекториям контрольных сечений ГВТ (см. рис. 35, а, б, вкладка) и по осевым линиям в направлении движения потока газа (см. рис. 35, в, вкладка). Для упрощения расчет можно выполнять на холодной струе газа, так как нагрев ПОГ происходит в сопловом канале ГВТ, а равномерность распределения ПОГ должна быть обеспечена уже на входе в сопловую камеру. Очевидно, что равномерное распределение должно иметь величины K_{Vi} и K_{Qi} равными или близкими к единичному значению.

Представленные на рис. 36 результаты подобного анализа показывают, что полноценного выравнивания потока по сечению ГВТ базового плазмотрона ПМВР-М не происходит ($K_i = 1,00 \div 1,35$). Аналогичные выводы можно сделать и относительно плазмотрона ВПР-410, имеющего сходную с ПРВР-М конструкцию ГВТ, что свидетельствует о недостатках конструкции системы газохвостовой стабилизации электродугowych плазмотронов рассматриваемого однопоточного типа.

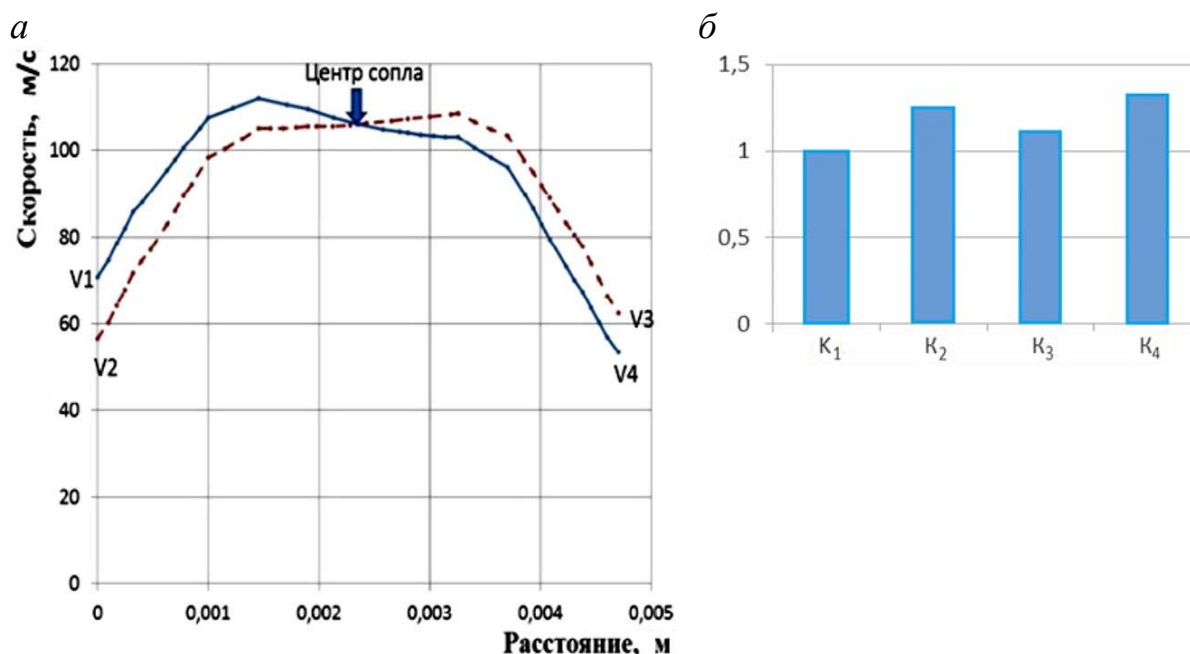


Рис. 36. Неравномерность распределения потока по сечению ГВТ ПМВР-М:

а – скорости по контрольным линиям; б – коэффициент неравномерности распределения потока $K_i = V_i/V_1$ в фиксированных точках; - - - изменение скорости между точками V2 и V3; — — — изменение скорости между точками V1 и V4

Полноценная методика исследования эффективности ГВС плазмотронов проводилась с применением методов численного анализа по трем схемам.

В первом случае проводился анализ изменения газодинамических и термокинетических параметров потока ПОГ на протяжении всего ГВТ плазмотрона: вход ПОГ в расширительную (успокоительную) камеру – вход в вихревую камеру (завихритель) – дуговая камера до соплового канала – сопловой канал плазмотрона. Помимо изменения по ходу ГВТ параметров, усредненных в характерном сечении, анализу подвергалось распределение этих параметров (порядка 200 расчетных значений) по осесимметричным круговым контрольным траекториям в выбранном сечении.

Второй схемой расчета эффективности ГВС был анализ изменения параметров газоплазменного потока вдоль линейных осесимметричных и осепараллельных контрольных траекторий в пределах протяженности горения плазменной дуги (струи), от среза катода до поверхности разрезаемого металла (рис. 37, а, вкладка). Анализ изменения параметров вдоль траекторий и в сечениях на определенном удалении от среза сопла позволяет выявить протяженность газовихревой стабилизации потока и эффективность высокотемпературного газодинамического действия при сравнительном анализе работы плазмотронов.

Третья схема анализа эффективности ГВС предполагает расчет параметров по П-образным траекториям с геометрией, определяемой диаметром сопла, размером зоны плазменной дуги с максимальной температурой и характерным для плазменной резки расстоянием от среза сопла до нижней кромки разрезаемого металла (как правило, в пределах 40 мм) (рис. 37, б, вкладка). Данный анализ позволяет определить характер изменения как абсолютных значений газодинамических и термокинетических параметров, так и равномерности их распределения в области максимального температурного нагрева плазменной струи, а также исследовать характер этих распределений на торце П-образной траектории, определяющей эффективность плазменной резки с точки зрения толщины разрезаемого металла.

Современные возможности численного моделирования позволяют получить массив данных, состоящий из результатов расчета большого числа контрольных точек, взятых по периметру контрольной линии. В этом случае следует воспользоваться статистическими

методами, а в качестве критериев равномерности распределения использовать следующие параметры (формулы приведены на примере анализа массива данных скорости V_i):

1) размах вариации $R = V_{\max} - V_{\min}$;

2) отношение вариации $L = V_{\max} / V_{\min}$;

3) среднее линейное отклонение (СЛО) $a = \sum_{i=1}^n |V_i - \bar{V}| / n$;

4) среднее квадратическое отклонение (СКО) $S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2 / n}$;

5) коэффициент линейных отклонений (КЛО) $Z = a / \bar{V}$.

6) коэффициент вариации $F = S / \bar{V}$. При больших объемах выборки ($n > 40$) $S \approx \sigma$, где σ – дисперсия случайной величины.

Строгий выбор критерия равномерности из представленных выше параметров должен быть основан на предварительном статистическом анализе массива расчетных данных в контрольных точках. Очевидно, что применение для оценки равномерности таких параметров, как R , L , a и Z , может иметь достаточно универсальный характер, в то время как параметры S и F предпочтительно использовать в случае, когда распределение данных подчиняется критериям нормального распределения. Для подобного выбора можно дополнительно использовать ряд известных статистических характеристик, например асимметрию A и эксцесс E кривой распределения, которые рассчитываются по следующим формулам:

$$A = \frac{\sum (V_i - \bar{V})^3}{n \cdot \sigma^3}, \quad (12)$$

$$E = \frac{\sum (V_i - \bar{V})^4}{n \cdot \sigma^4} - 3. \quad (13)$$

Как известно, асимметрия – это показатель симметричности/скошенности кривой распределения, а эксцесс определяет ее островершинность. У всех симметричных распределений (в том числе и у нормального распределения) величина асимметрии A равна нулю. При этом, если в распределении преобладают значения, близкие к среднему арифметическому (ситуация, характерная для равномерного распределения), то формируется островершинное распределение с положительным показателем эксцесса E .

Распределение оценивается как предположительно близкое к нормальному, если:

$$|A| \geq 3 \cdot \sqrt{\frac{6}{n}}, \quad |E| \geq 6 \cdot \sqrt{\frac{6}{n}}. \quad (14)$$

В противном случае распределение не является нормальным.

С учетом данных критериев следует оценивать равномерность распределения по критериям S и F при соблюдении требований (14) к анализируемому массиву данных, обращая дополнительное внимание на величины эксцесса E и асимметрии A (более равномерное распределение является более высоким – островершинным, с большим положительным значением E и наиболее симметричным при $|A| < 0,25$). При несоблюдении критериев (14) для оценки равномерности распределения целесообразно использовать СЛЮ a или коэффициент линейных отклонений Z , обращая внимание на упомянутые выше значения E и A в процессе сравнительного анализа.

В качестве иллюстрации применения представленной методики на рис. 38 и в табл. 9 показано исследование эффективности ГВС с двумя различными вариантами завихрителей в разработанном авторами плазмотроне ПМВР-5.3. Конструктивно завихрители отличаются углом наклона направляющих каналов по отношению к оси ГВТ. По результатам анализа расчетного массива скоростей V_i ($n = 200$ точек) сделан вывод о нормальном характере распределения скоростей ($|A| \geq 0,52$, $|E| \geq 1,04$), а, следовательно, о применении коэффициента вариации F в качестве определяющего параметра. Как видно из сравнения параметров (см. табл. 9) завихритель 1 демонстрирует и большую эффективность ГВС, и более высокие кинетические характеристики потока ПОГ в контрольном сечении соплового узла плазмотрона.

Современные методы численного моделирования газодинамических параметров (CFD) позволяют произвести расчет не только таких существенно важных для технологии плазменной резки характеристик, как скорость, температура, давление, удельный расход и энергия, но и ряда параметров, анализ которых дополняет и облегчает принятие заключения об эффективности работы системы ГВС плазмотрона. Среди таких параметров можно выделить завихренность, интенсивность турбулентности (I) и число Кармана (Ka).

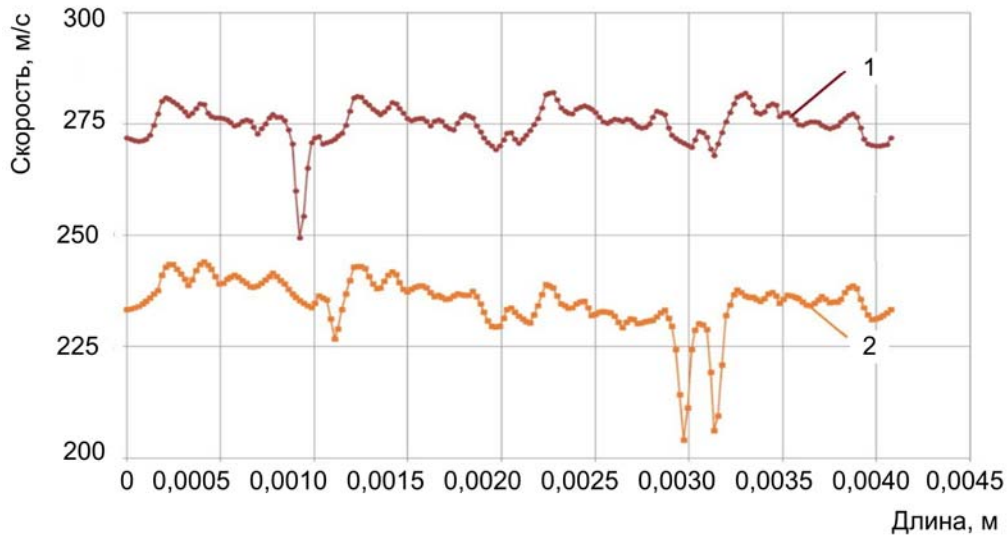


Рис. 38. Распределение скоростей в контрольном сечении на входе в цилиндрический канал соплового узла плазмотрона ПМВР-5.3:
1 – завихритель 1; 2 – завихритель 2

Таблица 9

Параметры распределения скоростей в контрольном сечении на входе в цилиндрический канал соплового узла плазмотрона ПМВР-5.3

Завихритель	$\langle V \rangle$	V_{\max}	V_{\min}	R	L	a	S	Z	F	A	E
1	275	282	249	33	1,13	2,9	4,1	0,015	0,015	-2,1	10,2
2	235	244	204	40	1,20	3,9	5,9	0,017	0,025	-2,3	8,7

Завихренность (ротатор, вихрь, спиннинг движения) – важная характеристика векторного поля скоростей газового потока, вычисляемая посредством определения дифференциального оператора $rot \vec{V}$ и пропорциональная вектору угловой скорости бесконечно малой частицы данного потока (6). Последний вывод можно получить, рассмотрев движение потока вблизи некоторой точки O как сумму поступательного (вектор V_o) и вращательного движений (7).

$$rot \vec{v} = \begin{vmatrix} \vec{i}_o & \vec{j}_o & \vec{k}_o \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ V_x & V_y & V_z \end{vmatrix} = [\nabla, \vec{V}] = 2\vec{\omega}, \quad (15)$$

где

$$\vec{V} = \vec{V}(r) = \vec{V}_o + \vec{\omega} \cdot \vec{r}, \quad (16)$$

где V – скорость точки O газового потока;
 V_o – осевая (поступательная скорость);

ω – угловая скорость;

r – радиус-вектор положения точки O .

Исходя из анализа приведенных определений, можно сделать вывод, что векторное безвихревое (потенциальное) поле будет иметь нулевую завихренность в любой точке, а необходимый для стабилизации плазменной дуги вихревой эффект будет характеризоваться ненулевой величиной (знак будет указывать на направление вращения относительно направления поступательного (осевого) движения потока). Таким образом, при сравнительном определении эффективности ГВС рекомендуется обращать внимание на ненулевое значение завихренности газового (плазменного) потока при наиболее равномерном ее распределении в массиве расчетных точек контрольного сечения.

Еще одним параметром, который можно принимать во внимание при анализе вихревых потоков ПОГ как внутри ГВТ плазмотрона, так и в плазменной струе, является интенсивность турбулентности I (Turbulence intensity), эквивалентная по определению такому физическому понятию, как число Кармана (Ka). Согласно определению, интенсивность турбулентности I определяется как отношение среднеквадратичной пульсации скорости V к ее осредненному значению \bar{V} :

$$I = \frac{V}{\bar{V}} = \frac{1}{\bar{V}} \sqrt{\frac{1}{3}(V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)}. \quad (17)$$

Принято считать, что сильно турбулизованное (вихревое) высокоскоростное течение имеет значения I в пределах 0,05...0,20 (5–20 %), течение со средней турбулентностью – в пределах 0,01...0,05 (1–5 %), низкотурбулентные (ламинарные) течения с невысокой скоростью – менее 0,01 (1 %).

Примеры оценки эффективности ГДС, выполненные по результатам расчета по круговым (в контрольных сечениях ГВТ плазмотронов – см. рис. 35, вкладка) и по линейным траекториям (в пространстве истечения газоплазменной струи – см. рис. 37, а, вкладка) можно найти в ряде опубликованных ранее авторских работ [62, 63]. Расчеты проводились в процессе анализа базовых конструкций ГВТ плазмотронов для резки ПМВР-М, ВПР-410, ПЗ-400ВА как в условиях модельного («холодного») истечения (без плазменно-дугового нагрева),

так и в условиях реального («горячего») режима работы при осевых температурах воздушно-плазменной дуги порядка 7000 К. В качестве характеристик, существенно важных для оценки эффективности работы системы ГВС металлорежущих плазмотронов, анализировались изменение и распределение широкого спектра перечисленных выше газодинамических и термокинетических параметров – скорости, температуры, динамического напора, удельных расходов и энергии, завихренности, интенсивности турбулентности.

В результате газодинамического анализа базовых конструкций были сформулированы основные принципы и методы газодинамического проектирования плазмотронов:

1) обеспечение эффективности выравнивания потока по сечению ГВТ ($K_i < 1,1$; Z или $F < 1$ % в режиме «холодного» истечения, Z или $F < 10$ % при дуговом нагреве);

2) снижение потерь динамического напора за счет профилирования ГВТ ($\Delta P_{\Sigma}/P_{\text{вх}} < 0,25$);

3) оптимизация распределения газового потока по ГВТ и каналам плазмотрона;

4) достижение максимальной эффективности газовихревой стабилизации в сопловом канале плазмотрона и в области газоплазменного струйного истечения за его пределами.

Для отдельных участков ГВТ плазмотронов (см. рис. 34) были определены следующие задачи и методы проектирования:

- участок 1 (область подачи ПОГ в систему газовихревой стабилизации) – снижение газодинамических потерь, осесимметричная подача ПОГ в систему ГВС;

- участок 2 (область выравнивания потока ПОГ по сечению ГВТ) – выравнивание распределения потока газа по сечению ГВТ перед входом в завихритель за счет системы газодинамических фильтров, разработки схем подачи ПОГ и оптимизации геометрии расширительной камеры;

- участок 3 (область формирования вихревого потока газа для сжатия и стабилизации электрической дуги) – снижение газодинамических потерь, оптимизация геометрии завихрителя (длина, количество каналов, площадь сечения, шаг винта, форма входных и выходных сечений каналов), профилирование элементов сопряжения участков ГВТ, уменьшение степени турбулентности;

- участок 4 (область формирования потока плазмы) – сопряженное (катод – сопло – завихритель) профилирование соплового узла для максимального сжатия и стабилизации электрической дуги, создания условий для перемещения приэлектродных участков дуги по поверхности электродов, снижения турбулентных пульсаций (вероятности шунтирования и резонансного акустического излучения), формирования газодинамического и акустического профилей плазменной струи.

С учетом сформулированных принципов газодинамического проектирования была модернизирована конструкция зоны выравнивания потока газа (участок 2 ГВТ, рис. 39). Для этого было предложено и исследовано два способа:

- изменение объема расширительной камеры;
- установка газодинамических фильтров (стенки или стенки с отверстиями) на пути течения потока газа.

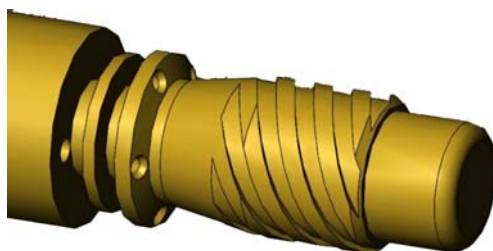


Рис. 39. Участок 2 ГВТ с системой выравнивающих фильтров в расширительной камере

Был проведен анализ различных вариантов конструкции расширительной камеры, позволивший найти оптимальные параметры ее объема, расположения преграды в виде плоской стенки или стенки с фаской, а также перфорированной стенки с точки зрения эффективности выравнивания потока ПОГ. Разработанная конструкция ГВТ была использована при проектировании плазмоторна ПМВР-5.1 (рис. 40). Представленные на рис. 41 и в табл. 10 результаты расчетов свидетельствуют о существенном повышении эффективности выравнивания потока в новом плазмоторне.



Рис. 40. Металлорежущий плазмоторн ПМВР-5.1

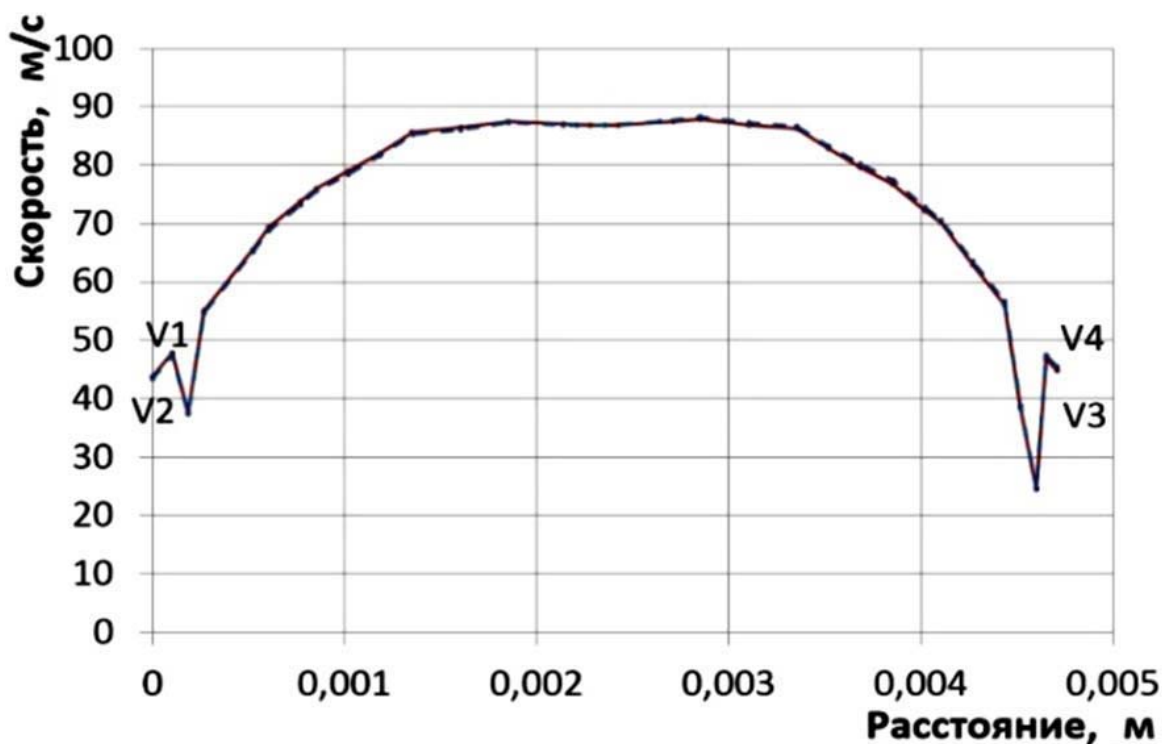


Рис. 41. Распределение скоростей потока в контрольном сечении газового тракта плазмотрона ПМВР-5.1:
V1, V2, V3, V4 – контрольные точки

Таблица 10

Сравнительный анализ эффективности выравнивания скоростей потока ПОГ различных конструкций плазмотронов

Плазмотрон	Отношение скоростей в контрольных точках		
	V1/ V2	V1/ V3	V1/ V4
ВПр-402	1,20	1,24	1,66
ПМВР-М	1,25	1,17	1,33
ПМВР-5.1	1,06	1,05	1,09

Расчетным путем было также определено влияние температуры плазменной дуги на равномерность распределения потока ПОГ, приводящее к снижению эффективности газовихревой стабилизации дуги (рис. 42) при закономерном увеличении скорости потока газа в разогретом дугой сопловом канале плазмотрона.

В процессе поиска нового эффективного способа газовихревой стабилизации были предложены и исследованы конструкции плазмотрона ПМВР-5.2 с симметричной подачей ПОГ в расширительную камеру и ПМВР-5.3 (рис. 43) с модифицированным ГВТ канала фор-

мирования потока ПОГ. На участке I ввода газа в ГВТ плазмотрона ПМВР-5.3 происходит равномерное разделение потока на два центрально-симметрично расположенных цилиндрических канала (участки I и II), обеспечивающих последующий симметричный относительно оси плазмотрона ввод ПОГ в зону подготовки и выравнивания потока ПОГ (участки II–V) перед входом в сопловой узел (участок VI). Данная часть ГВТ включает в себя 1-ю расширительную камеру смешения потоков (КС) на участке II, предварительный (формирующий) завихритель (ФЗ) на участке III, 2-ю расширительную камеру на участке IV и стабилизирующий завихритель (СЗ) на участке V.

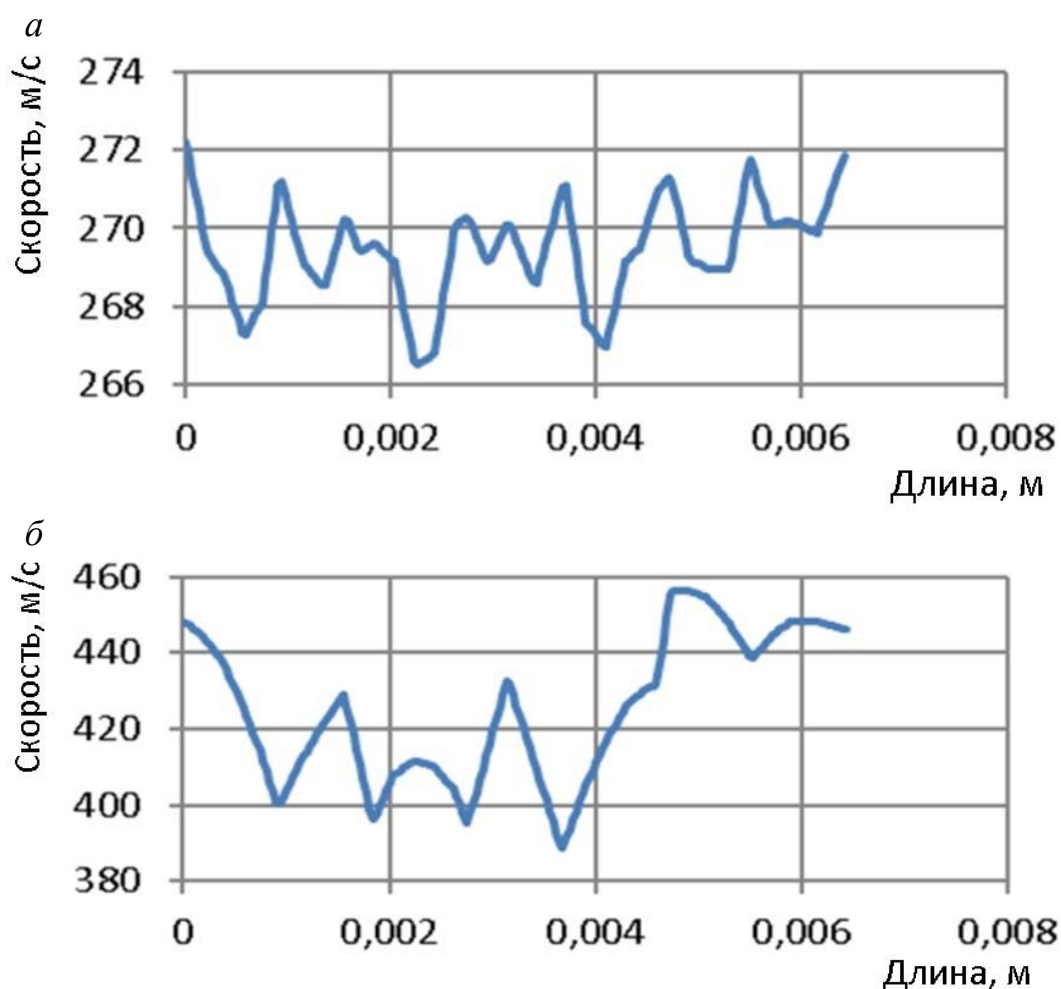


Рис. 42. Распределение скорости ПОГ по сечению ГВТ в контрольной плоскости плазмотрона ПМВР-5.1 (диаметр сопла 3 мм, расстояние от среза сопла 4 мм):
a – в отсутствие плазменной дуги;
б – при плазменной воздушной дуге ($T = 7000 \text{ K}$)

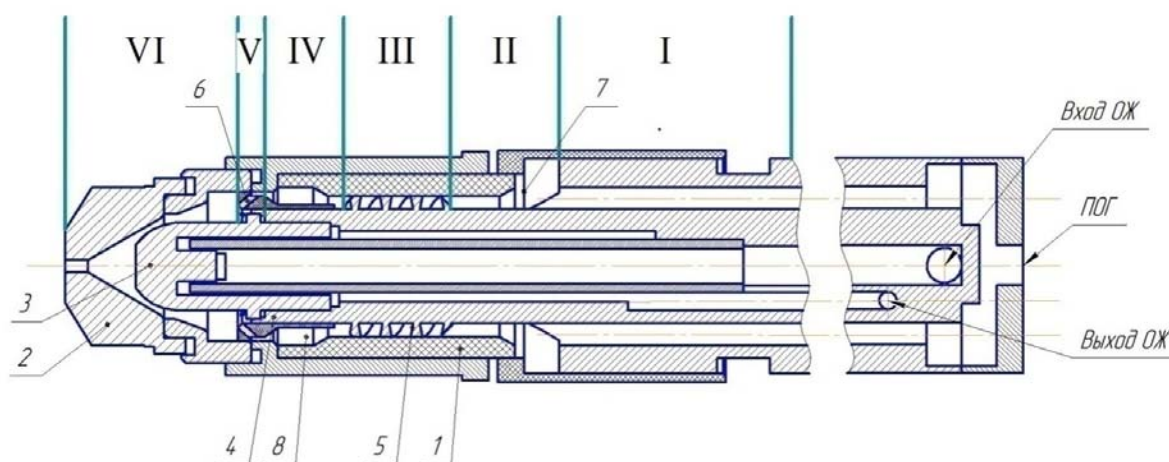


Рис. 43. Конструктивная схема плазмоторна ПМВР-5.3 с двумя завихрителями в системе газовихревой стабилизации:

ОЖ – охлаждающая жидкость; 1 – изолятор; 2 – сопло; 3 – катод; 4 – контур системы охлаждения; 5 – предварительный (формирующий) завихритель; 6 – основной (стабилизирующий) завихритель; 7 – 1-я расширительная камера (камера смешения); 8 – 2-я расширительная камера

Для данной конструкции была проведена оптимизация системы газовихревой стабилизации с точки зрения взаимного расположения предварительного (формирующего) и основного (стабилизирующего) завихрителей (участки III–V). В результате было установлено, что по сравнению с рассмотренной ранее схемой с асимметричной подачей газа по одному каналу (например, для плазмоторна ПМВР-М) использование новой системы газовихревой стабилизации приводит к значительному выравниванию потока ПОГ перед входом в основной (стабилизирующий) завихритель.

В целях улучшения показателей эффективности и безопасности технологии плазменной резки металлов авторами была разработана модель плазмоторна серии ПМВР-9 на основе принципа двойного вихревого сжатия дуги за счет распределения плазмообразующего газа на два потока (формирующий струю и стабилизирующий дугу по принципу двойного сопла). Подобный принцип, как уже отмечалось ранее, использован в технологии точной, или сжатой, плазмы (продукция фирм Kjellberg, Hypertherm и Messer Griesheim), а в отечественном исполнении получил название узкоструйной плазмы. В данной схеме вторичный фокусирующий поток газа подается под углом к оси плазменной горелки, интенсивно охлаждая столб дуги, благодаря чему при удалении от сопла диаметр столба дуги несколько уменьшается. При

этом высокая концентрация плазменного потока достигается при сравнительно малой скорости истечения, позволяя получить остроконечную плазменную дугу при малых токах. На основе газодинамического анализа потоков ПОГ в представленной схеме (рис. 44, вкладка) были уточнены факторы и методы проектирования по газодинамическим, тепло- и электрофизическим критериям, а также была предложена и проанализирована конструкция узкоструйного плазмотрона ПМВР-9.1 с учетом фактора безопасности.

Для иллюстрации применимости новых критериев эффективности приведем результаты сравнительного анализа трех упомянутых выше плазмотронов, в разные годы разработанных авторским коллективом: ПМВР-М (рис. 45) – однопоточный плазмотрон с несимметричной подачей ПОГ и одним завихрителем в ГВС (разработка ООО НПО «Полигон» начала 2000-х гг.); ПМВР-5.2 и ПМВР-5.3 (рис. 46) – однопоточные плазмотроны для прецизионной резки с симметричной подачей ПОГ в ГВТ и двумя завихрителями в системе ГВС [64] (отличие ПМВР-5.3 – в профилировании входных отверстий в 1-ю расширительную камеру и наличии стандартного сопла); ПМВР-9.1 (рис. 47) – двухпоточный плазмотрон для прецизионной резки, работающий по импортозамещающей технологии узкоструйной плазмы.



Рис. 45. Металлорежущий плазмотрон ПМВР-М



Рис. 46. Металлорежущие плазмотроны серии ПМВР-5:
а – ПМВР-5.2; *б* – ПМВР-5.3



Рис. 47. Металлорежущий плазмотрон ПМВР-9.1

На рис. 48 представлены результаты CFD-анализа, проведенного на модельной («холодной») струе, генерируемой плазмотроном ПМВР-5.3, для одного из параметров эффективности ГВС – завихренности газоплазменного потока. Как видно из графика, завихренность уменьшается в сечении струи от оси к периферии, характеризуя тем самым более высокую степень сжатия и стабилизации высокэнергетичного ядра плазменной струи. Связанные с влиянием расширения струи на начальном участке ее истечения значительные колебания степени завихренности стабилизируются на удалении более 20 мм от среза сопла, сохраняя тем не менее вихревой характер течения на всем протяжении расчетных траекторий.

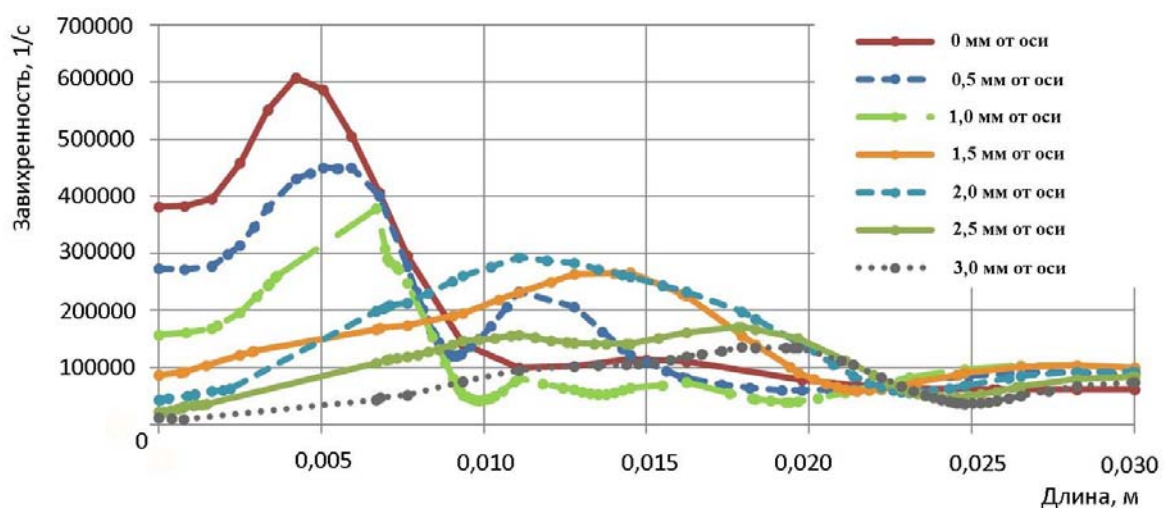


Рис. 48. Распределение завихренности при расчете по линейным траекториям вдоль плазменной струи (рис. 37, а, вкладка) плазмотрона ПМВР-5.3 (режим «холодной» струи)

Согласно расчетам (рис. 49), при использовании нового плазмотрона ПМВР-5.3 средние скорости в зоне разделочного шва (торец П-образной траектории на удалении 40 см от сопла плазмотрона) увеличиваются на 60 %, а максимальные – на 30 % по сравнению с ПМВР-М при сопоставимых входных параметрах. Кроме того, более чем в 2 раза возрастает и эффективность газодинамической стабилизации Z , характеризующая равномерность ненормализованного распределения газодинамических характеристик (для данного расчета – скорости) в контрольной зоне расчетной траектории. Подобные выводы можно сделать по результатам расчета на других участках П-образной траектории, при анализе таких кинетических параметров струи, как удельные расходы и энергии, завихренность, число Кармана, а также условий нагрева струи плазменной дугой.

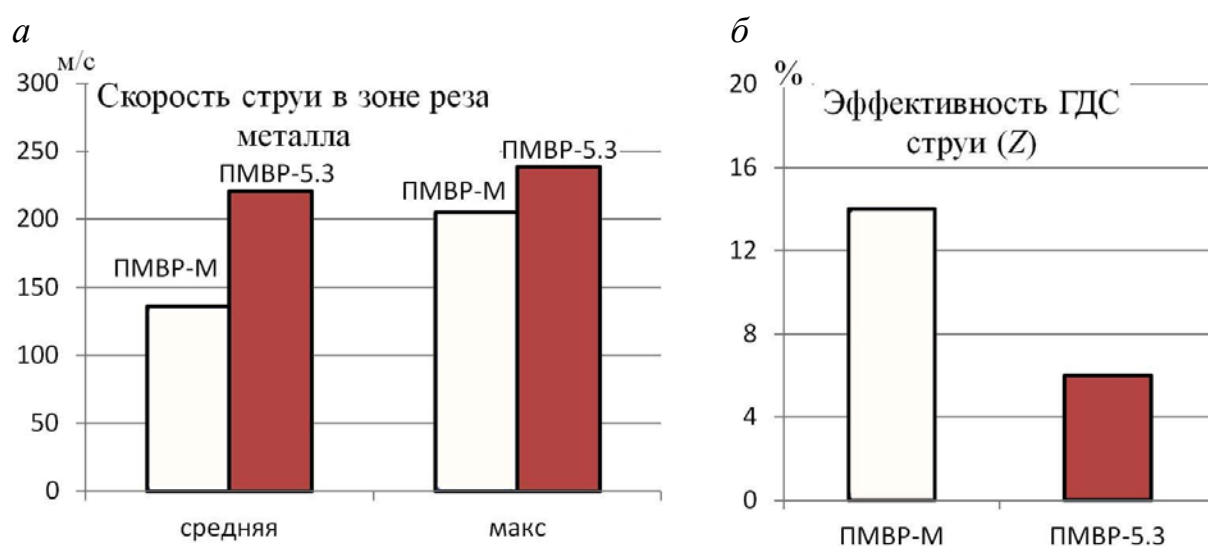


Рис. 49. Сравнительный анализ показателей плазмотронов ПМВР-М и ПМВР-5.3 в зоне воздействия плазменной струи на металл (торец П-образной траектории, «холодная» струя):
а – скорость; *б* – эффективность газодинамической стабилизации Z

Полученные с использованием перечисленных критериев эффективности выводы подтверждаются визуальным (рис. 50, 51, вкладка) и численным (рис. 52, 53) анализом представленных распределений температур и скоростей для плазмотронов ПМВР-5.3 и ПМВР-9.1. Расчеты сделаны при сопоставимых входных параметрах потока плазмообразующего газа и теплофизических свойствах плазменной дуги (струи).

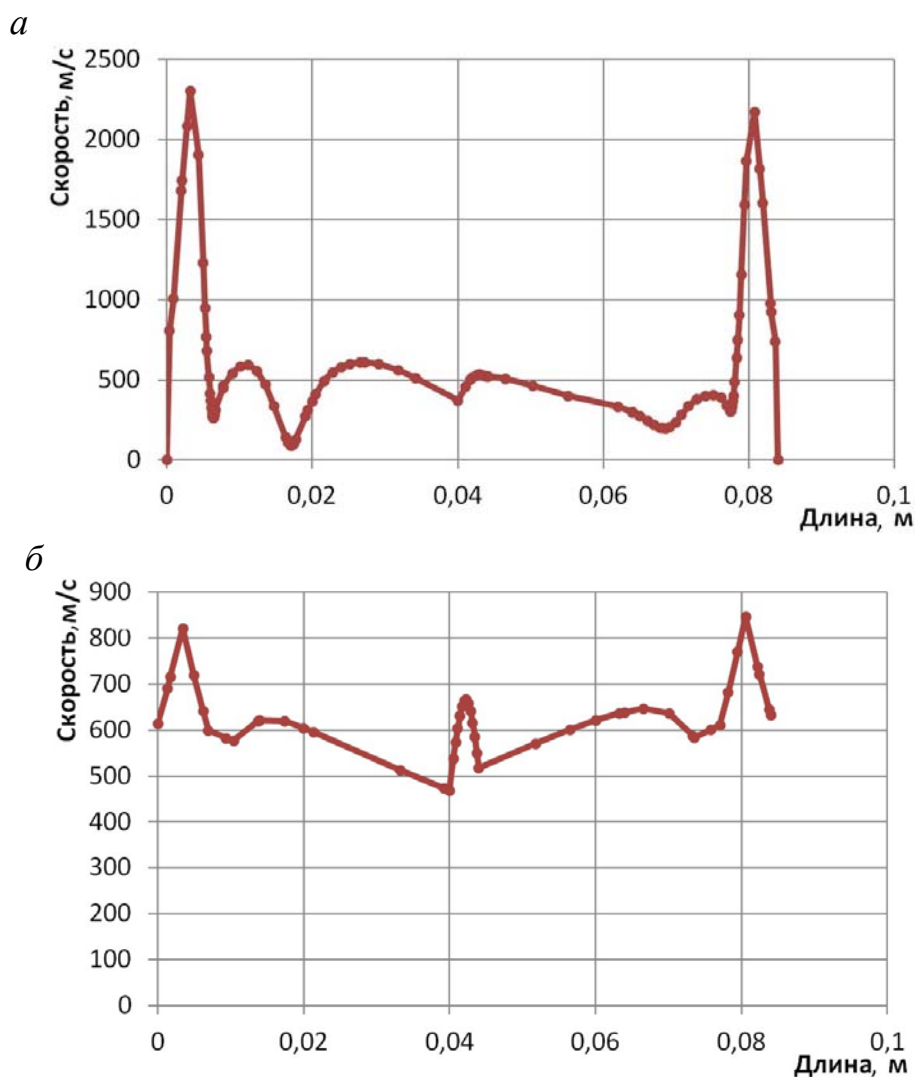


Рис. 52. График распределения скорости вдоль П-образной контрольной траектории:
а – плазматрон ПМВР-5,3; *б* – плазматрон ПМВР-9.1

В результате были обнаружены следующие отличия:

1) существенная асимметрия распределения температур плазменной струи, генерируемой плазматроном ПМВР-5.3, по сравнению с практически симметричным распределением при работе плазматрона ПМВР-9.1;

2) достижение максимальных температур на удалении в 2–3 см от среза сопла плазматрона ПМВР-5.3 и на торце П-образной траектории (удаление 40 см) при работе плазматрона ПМВР-9.1;

3) более высокие (в 1,5 раза) максимальные температуры, достигаемые в пределах контрольной П-образной траектории при использовании разработанного плазматрона ПМВР-9.1 по сравнению с базовым ПМВР-5.3;

4) существенное (в 2,5–3 раза) превышение максимальных температур, достигаемых на торце П-траектории (в пределах ширины разделочного шва в зоне нижней кромки разрезаемого листа) для плазмотрона ПМВР-9.1 по сравнению с ПМВР-5.3;

5) значительное (более, чем в 2 раза) увеличение протяженности высокотемпературного ядра струи, генерируемой плазмотроном ПМВР-9.1, по сравнению с плазмотроном ПМВР-5.3;

б) применение технологии узкоструйной плазмы позволяет сформировать на начальном участке струйного истечения воздушно-плазменный поток фактически идеальной цилиндрической формы, а на ее последующих участках получить меньшее расширение потока с более равномерным распределением газодинамических параметров.

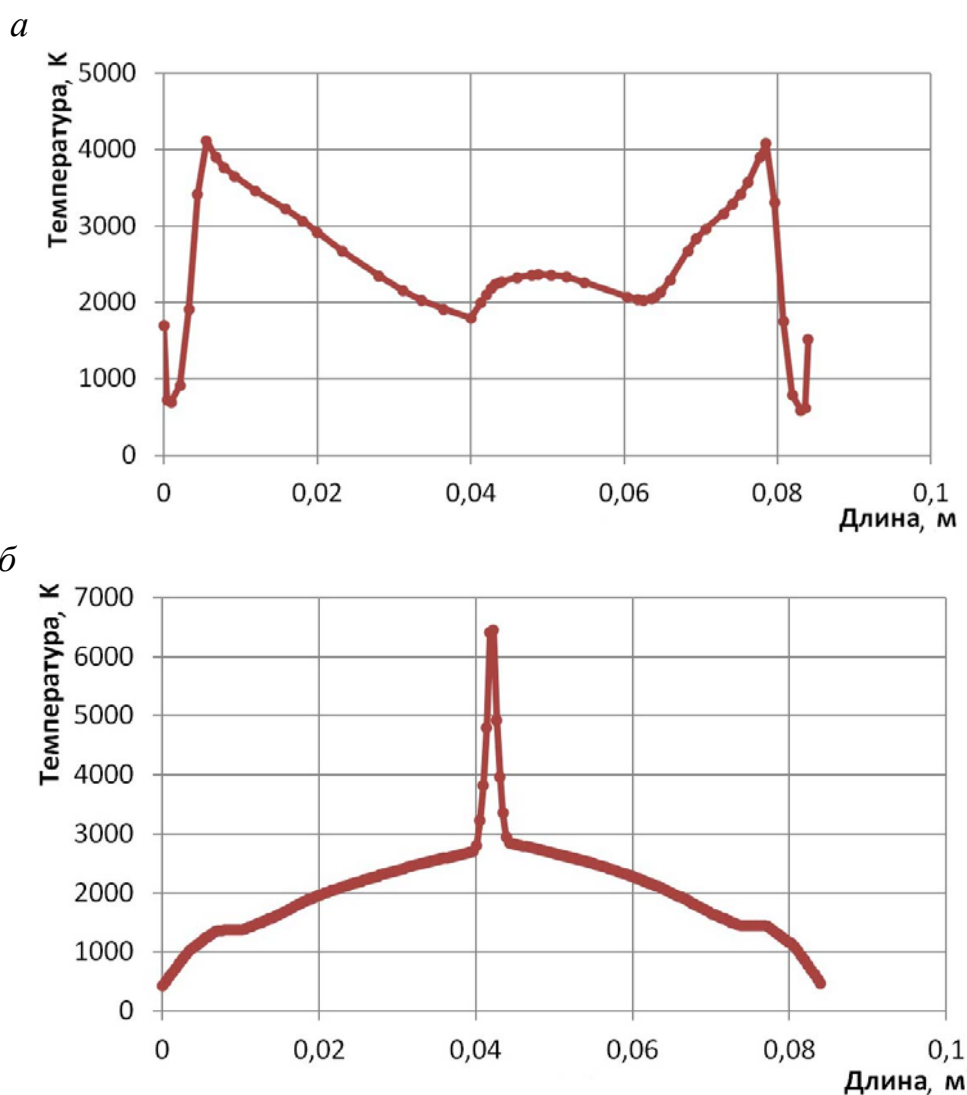


Рис. 53. График распределения температуры вдоль П-образной контрольной траектории:

а – плазмотрон ПМВР-5.3; *б* – плазмотрон ПМВР-9.1

В табл. 11 представлен сравнительный статистический анализ параметров эффективности ГВС, подтверждающий газодинамические преимущества разработанного плазмотрона ПМВР-9.1.

Таблица 11

Расчетные значения критериев эффективности системы ГВС
вдоль П-образной контрольной траектории*
(участок вне зоны начального расширения – 0,010–0,074 м)

Плазмотрон	Критерии эффективности ГВС						Параметры распределения		
	$\langle V \rangle$	V_{\max}	S	F	a	Z	A	E	m_a
ПМВР-9.1	578	667	49	0,09	42	0,07	-0,43	-0,80	0,17
ПМВР-5.3	385	611	169	0,44	150	0,39	-0,25	-1,23	0,27

* При нормальном распределении.

Очевидно, что данные результаты свидетельствуют о большей эффективности примененной в плазмотроне ПМВР-9.1 системы ГВС, действие которой приводит к формированию более концентрированного (сжатого) и равномерного газоплазменного потока за пределами соплового узла плазмотрона, а также более высоких динамических и термокинетических параметров плазменной дуги (струи), позволяющих производить разделку металлов больших толщин с улучшенными характеристиками качества разделочных швов (ширина реза, величина укоса, шероховатость и т. д.). Кроме того, сочетание высоких динамических и термокинетических параметров позволяет получить более высокие значения скорости разделки и повысить ее экономичность за счет минимизации размеров зоны термического воздействия (из-за ограничения времени протекания процессов по изменению структурного и фазового состояния металла на прилегающих участках к кромке реза), а также исключения дополнительных операций по ее последующему механическому удалению при производстве сварных соединений.

С учетом требований системного подхода был также проведен анализ особенностей проектирования металлорежущих плазмотронов по теплофизическим критериям. Установлено, что системы охлаждения плазмотронов для резки позволяют осуществлять свободную прокачку теплоносителя в заявленных технологических режимах. В расчетах параметров охлаждения, зависящих от давления, потери напора теплоносителя по тракту водяного охлаждения можно не учитывать. Эффективное

охлаждение катодного узла для данных плазмотронов достигается при скоростях подачи охлаждающей жидкости в катодный узел $V > 4$ м/с в режиме развитой турбулентности ($Re > 20\ 000$). Следует также выбирать катод с геометрией, обеспечивающей минимальную плотность теплового потока на максимально возможной площади водяного охлаждения. Для эффективного охлаждения сопла достаточно использовать газ-вихревую систему стабилизации плазменной дуги с максимально допустимыми скоростями подачи ПОГ в сопловой узел из завихрителя.

В заключении представленного по результатам CFD-анализа обоснования преимуществ, достигнутых при проектировании металлорежущих плазмотронов с новыми системами ГВС, следует упомянуть о необходимости подтвердить эффективность и качество их работы результатами реальных (натурных) экспериментов. Подобные эксперименты, подтверждающие более высокие показатели производительности, качества реза и безопасности работы разработанных плазмотронов, были проведены авторами, однако их подробное представление выходит за рамки данной монографии.

2.5. Плазменная утилизация техногенных металлосодержащих отходов

Рассмотрение плазменных технологий в качестве инструмента обеспечения норм экологической безопасности открывает широкую палитру возможностей их применения в производствах экологической направленности (рис. 54).



Рис. 54. Инструменты безопасности в электроплазменных технологиях

К настоящему времени разработано большое число методов и способов утилизации различных видов отходов: биологических, термических, химических, механических и смешанных. Основным достоинством плазменных технологий (по сравнению с физико-химическими и биологическими) является их универсальность, т. е. возможность подвергать переработке практически любые отходы: твердые, растворимые, жидкие и газообразные. В основе таких технологий лежит контактная или бесконтактная обработка утилизируемого вещества высокотемпературным теплоносителем, в зависимости от свойств которого технологии можно разделить на плазмохимические, пиролизные, окислительно-огневые, газификационные, паротермические и т. д. Другим преимуществом плазменных технологий является то, что обезвреживание происходит в окислительной или восстановительной среде с подачей воздуха, кислорода и других газов, за счет чего возникает возможность регулирования параметров среды с целью эффективного воздействия на конкретные утилизируемые вещества (диоксины, пестициды и т. д.).

Наиболее широко применяемой плазменной технологией в экологической сфере в настоящее время является переработка техногенных металлосодержащих отходов, использующая традиционный метод плазменной резки для ручного или автоматизированного демонтажа металлоконструкций (корпусов судов, самолетов, объектов военного и спецназначения, элементов нефте- и газодобычи и транспортировки) и их разделки в транспортный габарит для последующей утилизации в виде металлолома [3]. В экологическом плане применение таких технологий обусловлено проблемой, остро стоящей перед урбанизированными и индустриально нагруженными территориями: потребностью в утилизации большого количества брошенной техники и оборудования в полевых условиях (рис. 55).



Рис. 55. Техногенные металлосодержащие отходы

Накопление металлосодержащих отходов – характерная черта всех промышленно развитых регионов, среди которых Урало-Сибирский регион занимает особое место в силу своей индустриальной специфики. Большой объем неиспользуемых металлоемких конструкций (военной техники, бесхозных судов, магистральных трубопроводов, нефтехимического, машиностроительного оборудования, автотехники), а также несанкционированных свалок обусловлен не только транспортными, но и технологическими проблемами, возникающими при утилизации таких объектов. В результате только по северу Тюменской области объем металлоотходов составляет не менее 5 млн тонн. Около 100 тыс. тонн металлов в год переходит в водные растворы, загрязняет ионами тяжелых металлов поверхностные и подземные источники хозяйственного водоснабжения, тем самым нанося ущерб окружающей среде (до 800 млн р. в год). В отличие от поддающейся простому административному регулированию проблемы сбора мелких, в первую очередь бытовых, металлосодержащих отходов, задача сбора и утилизации промышленных отходов требует не только административно-правового, но и технологического решения.

Плазменные технологии для разделки и утилизации таких отходов с каждым годом находят все более широкое применение. В их основе лежит использование генератора низкотемпературной плазмы – плазмотрона с температурой плазменной дуги (струи) от 2000 до 10 000 К. Высокая температура и кинетическая энергия потока ионизированного газа позволяют использовать плазмотрон как крайне эффективный инструмент в технологиях скоростной разделки металлов. Стандартная технологическая схема плазменной разделки металла с указанием материально-энергетических потоков и параметров их контроля представлена на рис. 3. Необходимыми элементами такой схемы, помимо самого плазмотрона, являются системы подготовки и подачи плазмообразующего газа, охлаждения плазмотрона и источник питания. В экологическом плане важным моментом является возможность компактного размещения всех этих элементов в транспортируемые модули (рис. 56, вкладка), которые позволяют вести разделку крупных металлообъектов (брошенной техники и оборудования) в транспортный габарит в полевых условиях (рис. 57) с последующим вывозом металлолома на переплавку.

Для резки в полевых условиях можно использовать мобильные плазморезательные установки мощностью до 50–60 кВт в перемеща-

емом контейнерном или передвижном (на базе прицепов) исполнении, при разделке металлолома в стационарных условиях – автоматизированные плазменные комплексы мощностью от 10 до 1000 кВт разработки ООО НПО «Полигон» (см. рис.56, вкладка), предназначенные для полуавтоматической воздушно-плазменной резки ручным плазмотроном металлов толщиной до 15 мм (с воздушным охлаждением) либо до 80 мм (с водяным охлаждением).

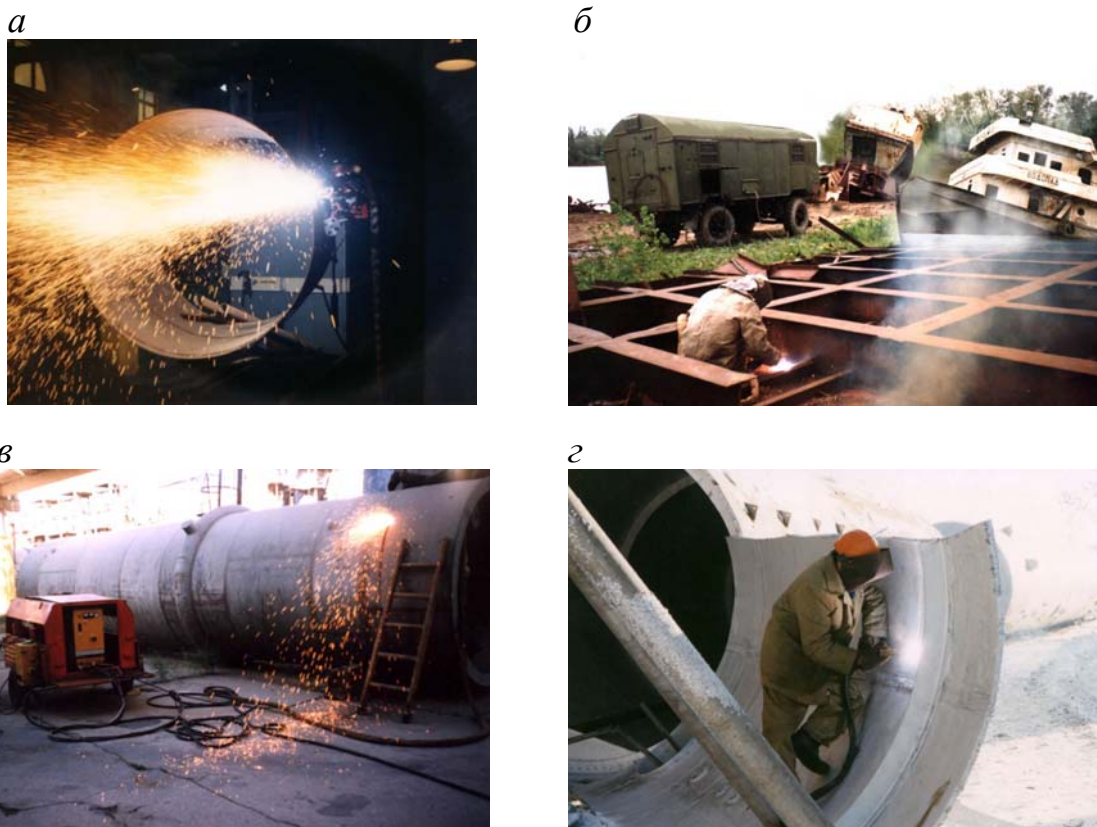


Рис. 57. Плазменная утилизация (резка) металлообъектов:
а – магистральных трубопроводов; б – судов;
в – спецобъектов; г – авиаракетной техники

В комплекте таких установок – плазмотрон с источником питания типа ВПР или АПР, системы подготовки плазмообразующего газа (воздуха) и охлаждения (водяная замкнутая), электропит управления. Установки высокоэффективны при разделке тонкостенных объектов (корпуса самолетов, ракет и т. д.) для их последующего вывоза и переплавки (см. рис. 57), а замкнутая система водяного охлаждения с минимальным расходом воды дает возможность их использования в необеспеченных водой местах.

Для более мелкой разделки лома, а также для разделки толсто-стенных металлоотходов целесообразно использовать стационарные механизированные плазменные посты. В зависимости от траектории резки и геометрических параметров разрезаемого металла посты для термической механизированной разделительной резки оснащаются следующими шарнирно-консольными машинами отечественного производства: для прямолинейной резки проката – «Гугарк» (скорость перемещения резака – 50–1100 мм/мин), для фигурной резки листового проката – «Огонек» (50–1600 мм/мин), для резки по замкнутому контуру (резка труб) – «Орбита» (100–1200 мм/мин).

Опыт внедрения плазменных технологий свидетельствует об эффективности их применения в процессах разделки военной техники и вооружений (ликвидации бронетехники и разделке бронекорпусов), аварийных самолетов, подводных и надводных судов Военно-морского флота. Широко используются такие разработки и на предприятиях народного хозяйства. В Урало-Сибирском регионе заказчиками плазменных технологий были АО «Синарский трубный завод», ПО «Турбомоторный завод», ОАО «Первоуральский новотрубный завод», АО «Пневмостроймашина», ПАО «Автоприцеп» (Челябинск), АО «Челябинский завод дорожных машин им. Коллющенко», ПО «Ангарскнефтеоргсинтез», ООО ПО «Булат» (Златоуст), ЗАО «Опытный завод блочных электроконструкций», ЗАО «Лесмаш», АО «Завод керамических изделий», ПАО «Уралхиммаш», а также ряд других предприятий, специально для которых разрабатывались и внедрялись участки плазменного раскроя листового и трубного металлопроката.

Как уже отмечалось, известными преимуществами плазменных технологий являются возможность резки любых металлов (а иногда и неметаллов) толщиной до 150 мм, использование воздуха в качестве плазмообразующего газа, высокая скорость и производительность резки, низкая себестоимость (в расчете на метр реза). При этом, конечно, следует учитывать необходимость использования вспомогательного оборудования: источника питания, компрессора и системы водоохлаждения (для мощных плазмотронов), а также применения мер защиты от опасных и вредных факторов, таких как большие токи, искры, брызги и выбросы расплава, высокий уровень шума, различные виды излучений и газовыделение. В качестве примеров мобильных комплексов для воздушно-плазменной резки можно упомянуть

российские разработки ООО «НПО Полигон» (Екатеринбург), за рубежом – установки для утилизации металлов и токсичных отходов неметаллического происхождения Westinghouse Plasma Corporation (США), исключая необходимость транспортировки отходов к местам их переработки. Можно также отметить заводы General Motors (Огайо, США), Essar Steel (Индия), ALCAN (Канада), перерабатывающие десятки тонн металлолома в час с использованием плазмотронов Marc II фирмы Solena мощностью 2,5 МВт.

К настоящему времени специализированные предприятия производят целый спектр плазморезательного оборудования, а также внедряют готовые технологии и установки по плазменной разделке металлов и утилизации отходов широкого класса [65]. Высокоскоростная резка металлов эффективна при использовании разработанных в авторском коллективе механизированных плазмотронов серии ПМВР, позволяющих резать черные металлы толщиной до 100 мм, медь и ее сплавы – до 90 мм, алюминий и его сплавы – до 110 мм, а также плазмотронов серии ПВР, предназначенных для ручной, автоматизированной и микроплазменной резки (рис. 58). Такие плазмотроны работают на постоянном токе силой до 450 А, используют воздух в качестве плазмообразующего газа и имеют принудительное жидкостное охлаждение. Плазмотроны могут использоваться со всеми отечественными источниками питания и машинами для термической резки по ГОСТ 5614-74.



Рис. 58. Механизированные (ПМВР) и ручные (ПВР) плазмотроны для резки металлов

Эффективное использование методов плазменной утилизации требует комплексного подхода и невозможно без научных исследований в следующих направлениях:

- оптимизация и адаптация параметров плазменного оборудования (плазменная резка, наплавка, напыление) к условиям эксплуатации;
- совершенствование методов плазменной обработки материалов;
- разработка методик и программ различных уровней (предприятие, город, область, отрасль, регион) по комплексной очистке от металлических загрязнений;
- разработка комплекса мер по утилизации металлолома с целью снижения уровня концентрации двухвалентного железа в глубинных питьевых источниках и водосборах рек.

Таким образом, плазменная утилизация техногенных отходов является перспективной областью исследования и призвана обеспечить соблюдение норм экологической безопасности как отдельных стран, так и мира в целом.

Глава 3. ПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА

3.1. Физические основы плазменной и микроплазменной сварок

Сварочные технологии занимают значительный объем в производственных процессах многих отраслей промышленности. Наибольшее применение сегодня имеют газовая сварка, пайка и дуговая сварка неплавящимся электродом в непрерывном и импульсном режимах. Плазменная сварка – это разновидность дуговой сварки плавлением. По параметру плотности энергии она занимает промежуточное положение между лазерной, электронно-лучевой и дуговой сварками, поэтому сварные соединения, выполненные плазменной сваркой, менее подвержены короблению и трещинообразованию. Однако, несмотря на лучшие энергетические характеристики, технологии плазменной сварки уступают автоматической дуговой сварке плавящимся электродом по стоимости оборудования и скорости, что сдерживает их применение и развитие [66].

В настоящее время плазменная сварка (сварка сжатой дугой) наиболее успешно применяется при изготовлении изделий из нержавеющей стали, титана, никелевых сплавов, молибдена, вольфрама и многих других металлов и сплавов в авиационной и электронной промышленности, судостроении, при производстве корпусных деталей и узлов специальной техники, в том числе боевых машин пехоты, из легких сплавов, в нефтехимическом машиностроении и ряде других отраслей [33].

Основным отличием сварочных плазмотронов от обычных является использование сжатой дуги вместо свободной. При этом эффект плавления достигается не за счет выделения тепла в анодном и катодном пятнах (свободная дуга), а путем термического воздействия искусственно удлиненного столба сжатой дуги с высокой плотностью энергии. Температура плазменной струи в плазмотронах для сварки может достигать 20 000...30 000 К. Тепловая эффективность плазменной струи, также как и в технологиях плазменной резки, зависит от величин тока и напряжения, расхода и скорости истечения ПОГ, рас-

стояния от сопла до поверхности металла, скорости перемещения плазмотрона и т. д. Геометрия воздействия на поверхность металла может быть различной (круглая, квадратная и т. д.) и определяется формой выходного отверстия сопла плазмотрона, а также скоростью и траекторией его перемещения.

Для возбуждения дуги, как правило, используют дежурную дугу, горящую между электродом и соплом горелки, зажигаемую с применением осциллятора. Питание плазмообразующей дуги осуществляется источниками сварочного тока (рабочие напряжения, меньшие, чем при плазменной резке).

Анализ результатов плазменной сварки на больших токах показал, что сжатая дуга, формируемая каналом сопла, принимает форму цилиндра (в отличие от колоколообразной при дуговой сварке) и имеет большую пространственную устойчивость, чем свободно горящая в аргоно-дуговых горелках (рис. 59 [40], вкладка). Это преимущество сжатой дуги применимо также и для сварки металлов малых толщин ($d < 1$ мм).

Работы по использованию сжатой дуги для сварки металлов малой толщины начались в 60-х гг. XX в. в Научно-исследовательском институте авиационной технологии (НИАТ) и в ряде фирм Швейцарии, Англии, США и Франции. Такой способ получил название микроплазменной сварки, физическая суть которой заключается в обеспечении стабильного горения сжатой дуги на очень малом токе, а сварочная горелка, используемая для этого, была названа микроплазмтроном. Больших успехов в разработке микроплазменной сварки достигли сотрудники ИЭС им. Е. О. Патона. Однако микроплазменной сварке в настоящее время очень сложно конкурировать (помимо цены) с маломощной волоконной лазерной сваркой.

Прототипом для микроплазменной сварки послужила аргоно-дуговая (аргонодуговая, аргонно-дуговая) сварка неплавящимся электродом. Схема аргоно-дуговой горелки представлена на рис. 60 [2]. Сварка осуществляется на прямой полярности. Вольфрамовый стержень 1 служит катодом, свариваемое изделие – анодом. В конструкции всех аргоно-дуговых горелок основную роль играет цанговый охлаждаемый или неохлаждаемый зажим 2 для крепления вольфрамового катода. Зажим снабжен керамическим соплом 4 для подачи защит-

ного газа и ручкой 7, внутри которой расположены газо- и водоподводы. Токоподвод обычно совмещен с водоподводом, при его отсутствии – с газоподводом.

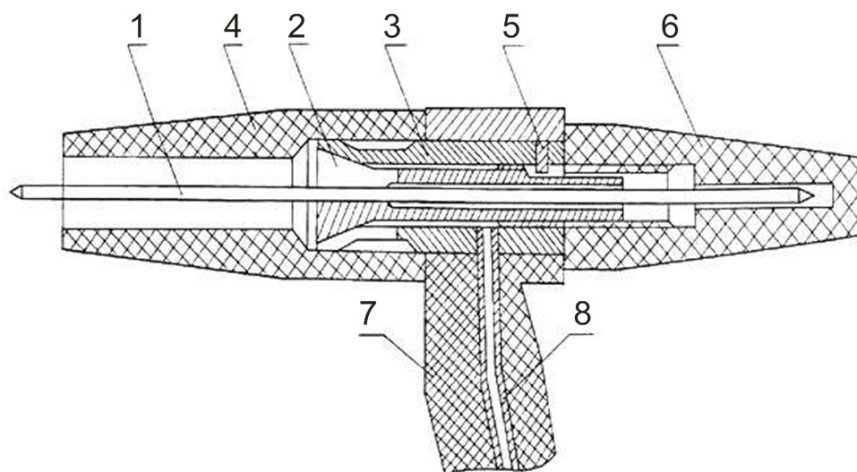


Рис. 60. Аргано-дуговая горелка:

1 – катод; 2 – цанга; 3 – корпус; 4 – сопло; 5 – штифт; 6 – изолятор; 7 – ручка; 8 – токоподвод, совмещенный с газоподводом

Дуга поджигается осциллятором либо касанием изделия вольфрамовым электродом. Первый способ предпочтительнее, так как при поджиге дуги касанием на конце вольфрамового стержня образуется однобокая оплавленная полусфера, из-за чего происходит пространственное отклонение дуги от оси электрода. В результате снижается качество сварки изделий и возникает необходимость частой перезаточки вольфрамового электрода. Аргон в горелках способствует пространственной стабилизации дуги и защищает от окисления вольфрамовый катод и металл изделия в окрестностях сварочного шва. Несмотря на высокую температуру аргонной дуги (более 10 000 К), при атмосферном давлении основным источником тепла (примерно 80 %), расплавляющего металл в сварочном шве, является тепловой поток от прианодной области, регулируемый силой тока [33].

3.2. Принципы и методы проектирования сварочных плазмотронов

Как уже было отмечено, сварочные плазмотроны были созданы на базе аргано-дуговых горелок (рис. 61, а [8]) и отличались от них тем, что неплавящийся вольфрамовый электрод и часть столба дуги поме-

щались в водоохлаждаемую металлическую камеру, оканчивающуюся цилиндрическим отверстием (соплом), расположенным соосно с электродом (рис. 61, б [8]).

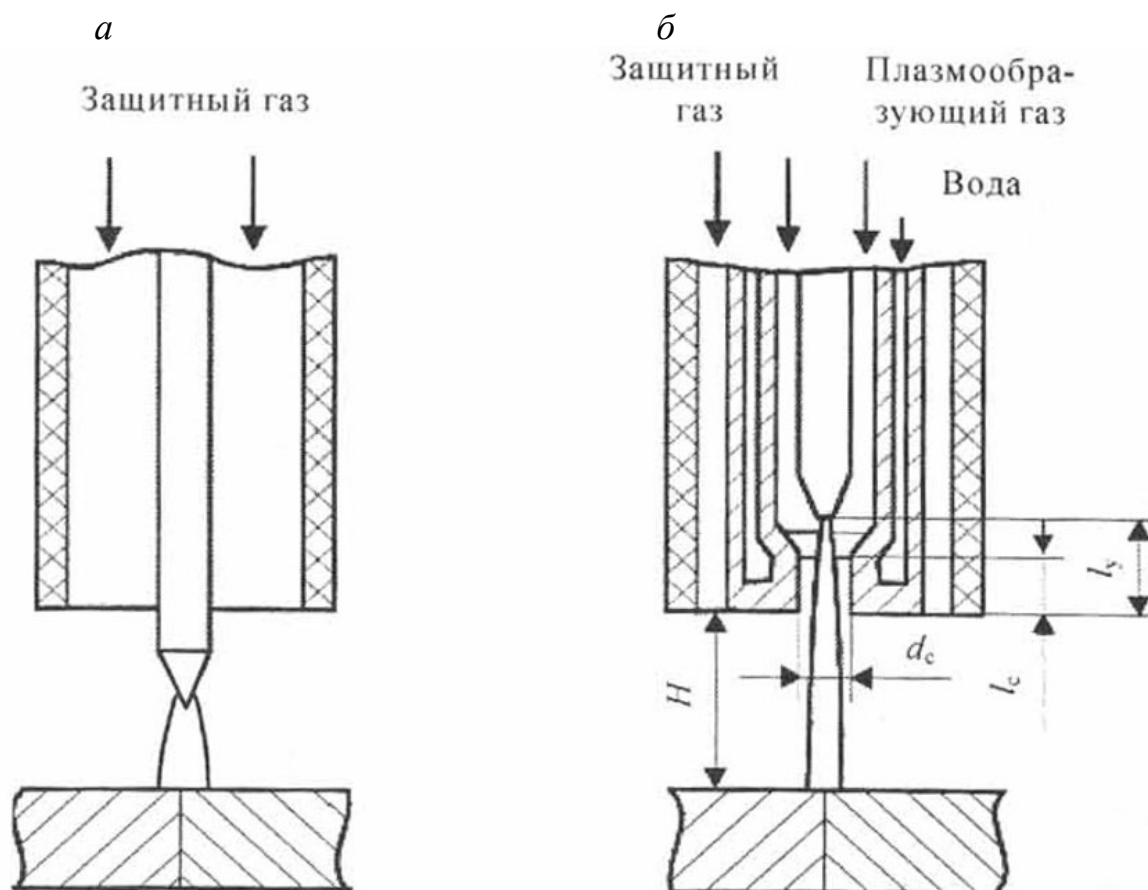


Рис. 61. Схемы сопловых частей горелок:
а – аргоно-дуговой; б – плазменной

Пространственно стабилизирующее дугу сопло имеет два важных размера – диаметр выходного отверстия d_c и длину l_c (см. рис. 61, б). Расстояние от электрода до выходного отверстия сопла называется углублением электрода l_y , а расстояние между внешней поверхностью (торцом) сопла и свариваемым изделием – рабочим расстоянием H . Через наружное газовое сопло в большинстве случаев подается защитный газ, предотвращающий окисление сварочной ванны и кристаллизующегося металла.

Сварка изделий из металлов, не имеющих поверхностной окисной пленки (сталь, медь и др.), производится плазмотронами прямой полярности: внутренний электрод – катод (вольфрамовый стержень), изделие – анод.

На рис. 62 [40] представлена принципиальная схема сварочного плазмотрона, работающего на прямой полярности, а на рис. 63 – внешний вид такого плазмотрона (разработка кафедры сварочного производства Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ)). Плазмотрон может иметь модификации для работы на токах средней (15–200 А) и высокой мощности (20–400 А) и предназначен для автоматической (проникающей или расфокусированной дугой) и ручной плазменной сварки на токе прямой полярности конструкций из легированных и высоколегированных сталей, титановых (толщиной 2–18 мм), медных и сложнолегированных сплавов (толщиной 2–12 мм). Конструкция плазмотрона включает в себя корпус – несущую деталь, в котором выполнены газо- и водоподводящие магистрали, вольфрамовый электрод, играющий роль катода, электрододержатель плазмообразующего и защитного сопел, изолятор.

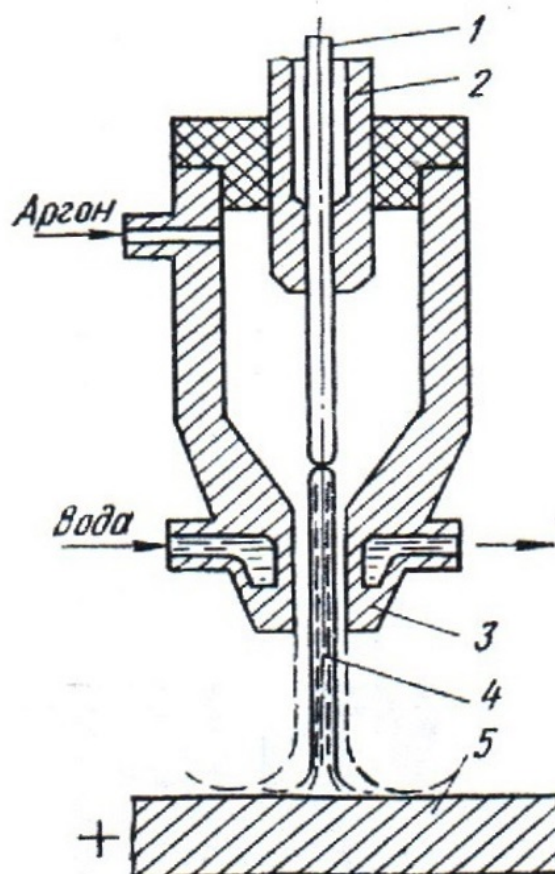


Рис. 62. Схема плазменной сварки на прямой полярности:
 1 – вольфрамовый электрод, 2 – цанга, 3 – сопло, 4 – плазменная дуга,
 5 – свариваемая деталь

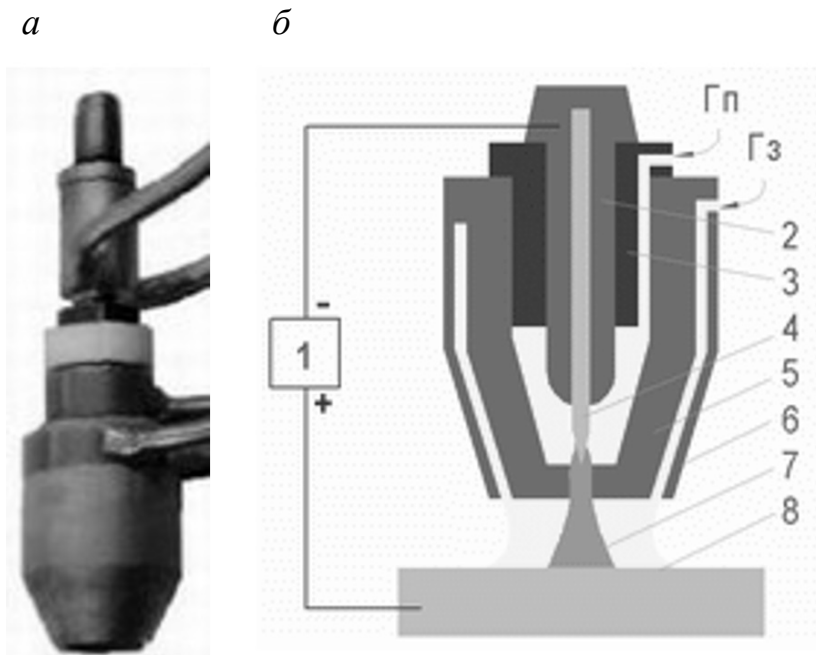


Рис. 63. Плазматрон для сварки прямой полярности:

а – внешний вид, *б* – схема работы:

1 – источник питания сжатой дуги; *2* – электрод-анод; *3* – изолятор-завихритель; *4* – плазмообразующее сопло; *5* – защитное сопло; *6* – сжатая дуга; *7* – изделие; *8* – свариваемая деталь; *Гп* – плазмообразующий газ; *Гз* – защитный газ

На рис. 64 [2] представлен общий вид микроплазматрона, предназначенного для сварки тонкостенных труб на прямой полярности в автоматическом режиме. Плазматрон состоит из двух основных частей: катодного корпуса *1*, в котором размещены цанга *8* и электрод *3*, и соплового корпуса *2* с соплом *4*. Оба корпуса электрически разделены изолятором *5* и охлаждаются водой. Плазмообразующий газ (аргон) подается через штуцер *11*.

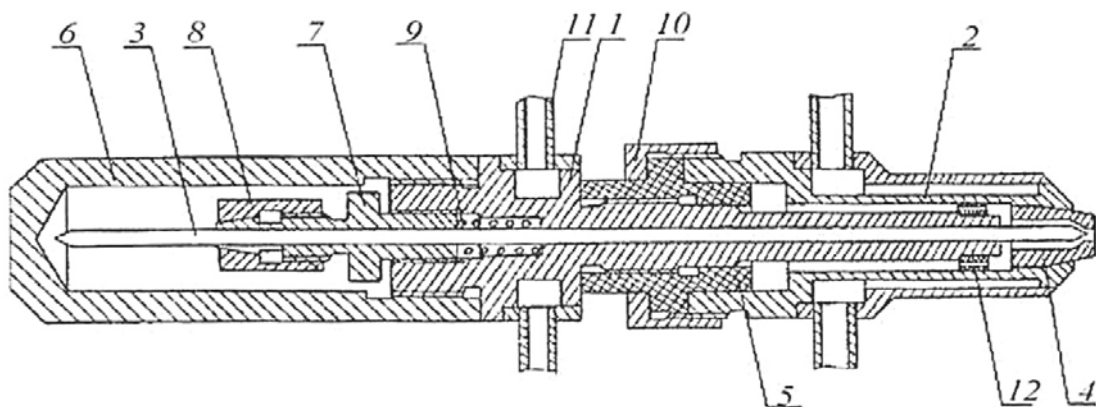


Рис. 64. Общий вид плазматрона для сварки тонкостенных труб:

1 – катодный корпус; *2* – сопловый корпус; *3* – катод; *4* – сопло; *5* – изолятор; *6* – колпак; *7* – гайка; *8* – цанга; *9* – пружина; *10* – гайка; *11* – штуцер; *12* – изолятор

Качество микроплазменной сварки во многом зависит от соосности электрода с отверстием сопла. В данном плазмотроне (см. рис. 64) центровка обеспечена тем, что большая часть вольфрамового стержня со стороны рабочего конца помещена в протяженную цилиндрическую трубу l . Расстояние l_y (см. рис. 61, б) между электродом и соплом, важное для качественной сварки и длительной работы плазмотрона, легко устанавливается и регулируется поворотом цангового зажима δ (см. рис. 64).

Надежная работа плазмотрона и стабильное качество сварки труб зависят от многих факторов. Например, значения тока дуги в процессе сварки не должны отклоняться от необходимого более чем на $\pm 3\%$. Однако при неправильном выборе режимов сварки возможно появление нерегулярных колебаний тока и напряжения с амплитудой отдельных выбросов по току и напряжению до 15% . Основной причиной возникновения крупномасштабных колебаний тока дуги является ее шунтирование в промежутках катод – сопло, сопло – изделие. При анализе надежности работы требуется обращать внимание и на так называемый рециклинг – образование «усов» в виде короны на острие вольфрамового стержня. Данный эффект усиливается при увеличении тока дуги и уменьшении диаметра электрода.

Процесс плазменной сварки, как правило, осуществляется в автоматическом режиме, параметры которого можно определить заранее по формулам, полученным в ходе анализа литературы и экспериментальных данных [2].

Оптимальная скорость сварки (м/мин):

$$V = 0,015 \cdot I / \delta, \quad (18)$$

где I – ток дуги, А;

δ – толщина стенки трубы, мм.

Оптимальный диаметр вольфрамового электрода (мм):

$$d_э = \sqrt{\frac{I}{14}}. \quad (19)$$

Диаметр сопла (мм):

$$d_c = d_э / 1,25. \quad (20)$$

Длина линейной части сопла (мм):

$$l_c = d_c / 1,25. \quad (21)$$

Ошибки при выборе V , d_3 , d_c , l_c , обусловленные влиянием менее значимых факторов, составляют $\pm 10\%$ и корректируются подбором величины тока.

Расход аргона через плазматрон при $d_c \geq 1,4$ мм составляет (г/с):

$$G_{Ar} = 0,0125 \cdot d_c. \quad (22)$$

Расход аргона, подаваемого в фильерный узел (защитный газ) (г/с):

$$G_3 = 0,03 \cdot d_c. \quad (23)$$

При $d_c > 1,4$ мм расход аргона равен (г/с):

$$G_{Ar} = 0,022d_c. \quad (24)$$

При сварке на прямой полярности в качестве электрода используются газозащитные вольфрамовые стержни, крепящиеся в цанговых зажимах. Высокая прочность, электро- и теплопроводность вольфрама способствуют тому, что при работе в инертной среде (аргон, гелий) при нагрузке $j = 15 \dots 20$ А/мм² электрод практически не расходуется. Однако при сварке на обратной полярности их можно использовать только при малых токах, так как тепловой поток в анод при прочих равных условиях почти в 2 раза больше, чем в катод. По этой причине сечение вольфрамового электрода при обратной полярности должно быть в 9 раз больше, чем при прямой, а в сварочных плазматронах обратной полярности применяются составные паяные или прессованные медно-вольфрамовые (Cu-W) водоохлаждаемые аноды. Поперечные геометрические размеры электродных узлов с составными анодами существенно больше, чем со стержневыми, что ведет к увеличению размеров плазматронов.

Геометрия электрода определяется также формой его заточки, существенно зависящей от условий эксплуатации (рис. 65 [2]). Так, для токов от 4 до 40 А рекомендуется острая заточка с углом $\alpha = 32^\circ$ (см. рис. 65, а). Для токов 30...80 А форма заточки более сложная, с дополнительным углом $\beta = 60^\circ$ и высотой L (см. рис. 65, б). Для диапазона 60...150 А форма заточки отличается от предыдущей (см. рис. 65, в). Диаметр d (мм) перехода от угла 32° к углам 60 и 90° рассчитывается по формуле

$$d = \sqrt{I/20\pi}. \quad (25)$$

Увеличение диаметра D вольфрамового стержня и проходных сечений водяных каналов охлаждения электродного узла позволяет создать плазматроны с более высокой токовой нагрузкой на базе составного Cu-W-анода. Для расчета предельного тока и теплофизичес-

кого анализа можно использовать схему, представленную на рис. 66 [2], в которой для упрощения задачи коническая площадка контакта вольфрама с дугой заменена на плоскую с радиусом $r_{\text{п}} = d/2$.

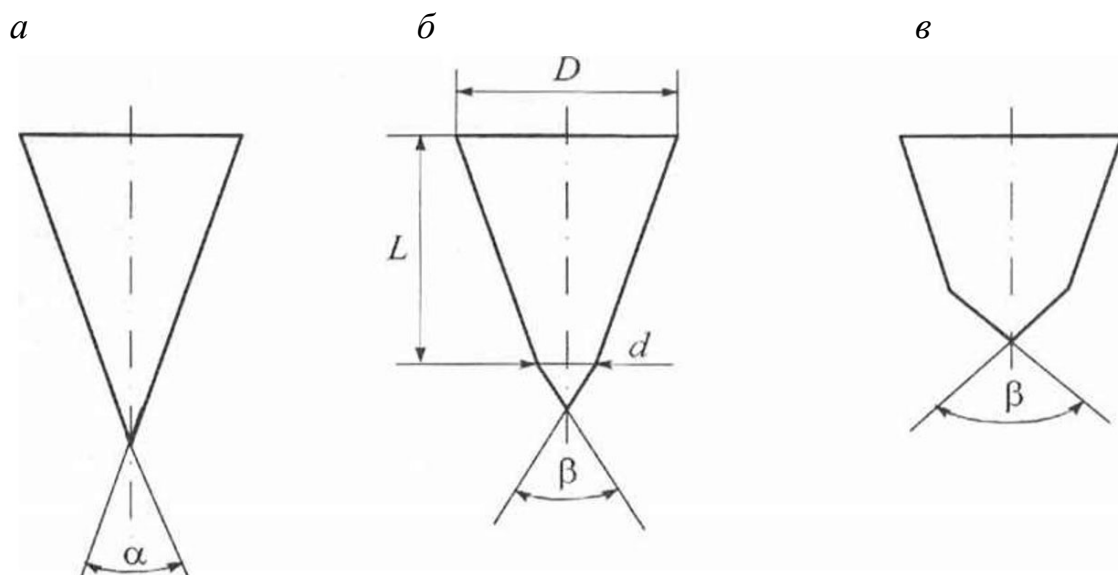


Рис. 65. Формы заточки и геометрия вольфрамового анода:
a – заточка для токов 4–40 А; *б* – заточка для токов 30–80 А;
в – заточка для токов 60–150 А

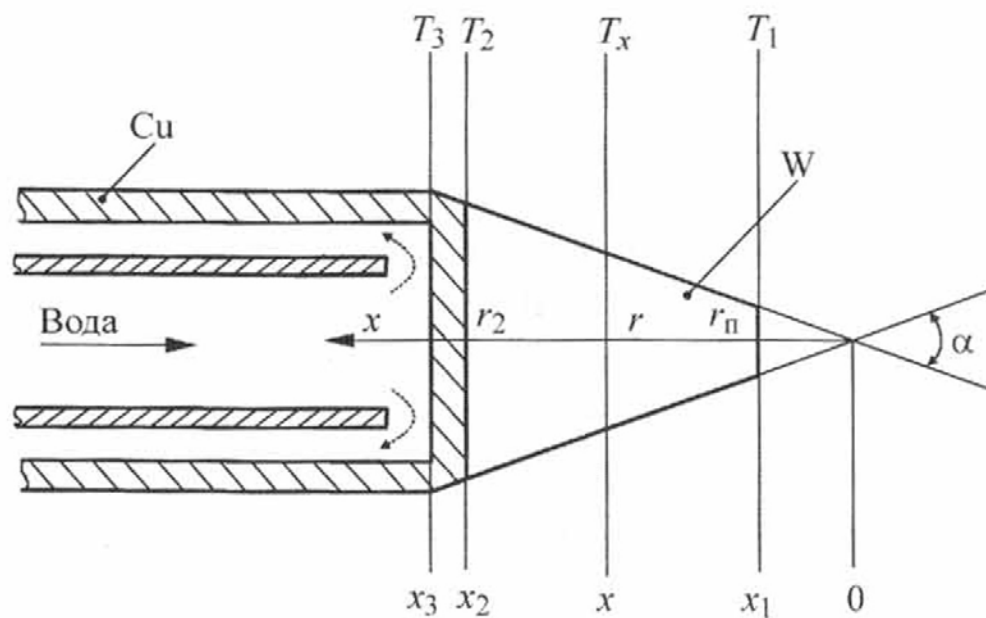


Рис. 66. Расчетная схема вольфрамового анода:
 r – текущий радиус; $r_{\text{п}}$ – радиус рабочей площадки; r_2 – радиус контактной поверхности вольфрама с медью; x, x_1, x_2, x_3 – сечение электрода;
 T_x, T_1, T_2, T_3 – соответствующие температуры

Согласно полученным оценкам [2], для электрода данной формы происходит компенсация энергии поверхностного излучения и теплоотдачи к аргону энергией, выделяемой в вольфраме за счет джоулева нагрева. Следовательно, можно считать, что тепловой поток $Q = I \cdot U_3$ (U_3 – вольтов эквивалент теплового потока), поступающий от дуги в электрод, остается неизменным в любом его сечении x . В этом случае уравнение теплопроводности имеет вид

$$Q = \lambda S \frac{dT}{dx},$$

где S – площадь сечения электрода.

Так как $S = \pi r^2 = \pi x^2 \operatorname{tg}^2(\alpha / 2)$, то получим

$$\frac{dT}{dx} = \frac{Q}{\pi \lambda x^2 \operatorname{tg}^2(\alpha / 2)}. \quad (26)$$

При граничных условиях $T_{x_3} = T_3$, $T_{x_1} = T_1$, получаем

$$T_1 = T_2 + Q(1/x_1 - 1/x_2) \lambda_{\text{w}} \pi \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha / 2), \quad (27)$$

$$T_2 = T_3 + Q(1/x_2 - 1/x_3) \lambda_{\text{Cu}} \pi \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha / 2), \quad (28)$$

где λ_{w} , λ_{Cu} – средние значения теплопроводности вольфрама и меди.

В качестве граничных максимальных температур поверхности вольфрама со стороны дуги принимается $T_1 = 3000$ К, а с охлаждаемой стороны – $T_3 = 373$ К. Последнее условие связано с недопустимостью парообразования в полости электрода.

Данные расчетов для различных значений параметров D , d , α и $U_3 = 6,15$ В обобщены в виде

$$I_{\text{пр}} = 6,92 \cdot d^{1,8} D^{-0,66} \alpha^{0,6}, \quad (29)$$

а для $U_3 = 8$ В они имеют вид

$$I_{\text{пр}} = 4,84 \cdot d^{1,8} D^{-0,66} \alpha^{0,6}. \quad (30)$$

Здесь угол α измеряется в градусах, диаметры D и d – в миллиметрах, ток $I_{\text{пр}}$ – в амперах; применимо для $D = 5 \dots 10$ мм, $d = 1 \dots 9$ мм, $\alpha = 20 \dots 50^\circ$. Формулы (29) и (30) получены обобщением расчетных данных, и точность их составляет примерно $\pm 15\%$. Однако еще на стадии проектирования плазмотрона они позволяют с достаточной для практики точностью рассчитать для заданного диапазона тока основные геометрические размеры электрода (D , d , α), обеспечивающие его максимальный ресурс.

Среди других конструкций выделим плазмотроны для плазменной сварки плавящимся электродом (принципиальная схема расположена на рис. 67 [40]), предназначенные для автоматической плазменной сварки и наплавки на токе прямой или обратной полярности с токоведущей или обесточенной присадочной проволокой. Сфера их применения – сварка и наплавка легированных сталей, алюминиевых, титановых, медных, сложнолегированных сплавов. В настоящее время это один из наиболее перспективных способов сварки и наплавки, сочетающий максимальную производительность и качество процесса. Среди преимуществ данного способа, помимо высокой скорости, можно отметить малую величину зоны термического влияния, стабильность процесса, отсутствие необходимости контролировать постоянную длину дуги.

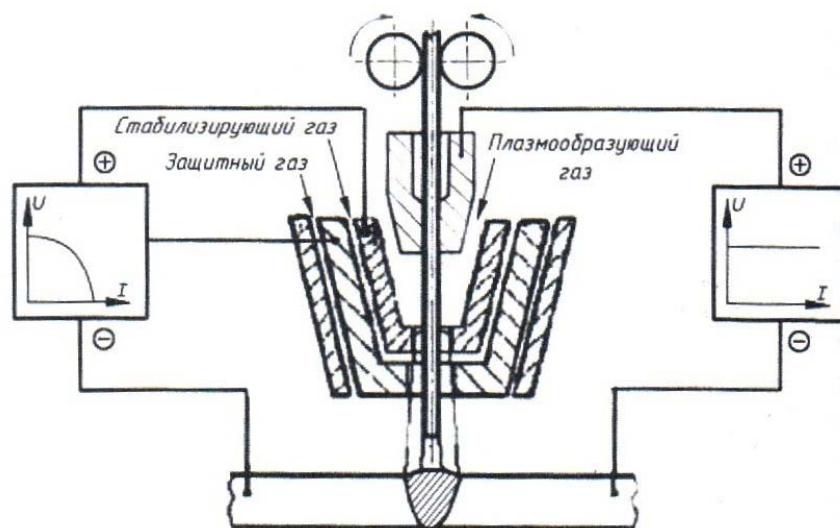


Рис. 67. Схема процесса плазменной сварки плавящимся электродом

Плавящийся электрод подается по оси плазменной дуги, а водоохлаждаемый медный анод-сопло используется в качестве неплавящегося электрода. В результате участок вылета электрода и дуговой разряд, горящий между плавящимся электродом и изделием, оказываются окружены аксиальным потоком плазмы, создаваемым дугой, что повышает эффективность нагрева и плавления электрода. За счет этого улучшаются параметры эффективности и качества плазменной сварки.

В качестве примера представим результаты разработки и исследования подобной технологии, проведенных на кафедре сварочных технологий ПНИПУ (рис. 68). По данным разработчика, спроектированный плазмотрон обеспечивает высокую производительность сварки со скоростью от 15 до 20 м/ч при сварке обесточенной проволокой и до 200–300 м/ч при сварке электродной проволокой со струйным и пароструйным переносом.

Специфика работы такого плазмотрона заключается в использовании трех газовых потоков (плазмообразующего, стабилизирующего и защитного), что значительно повышает стабильность процесса и качество сварки. Для питания сжатой дуги, работающей на токах до 200 А, используются сварочные источники питания постоянного тока с падающей внешней характеристикой, для питания дуги плавящегося электрода (МИГ-дуги) – источники питания с жесткой внешней характеристикой (токи до 300 А).

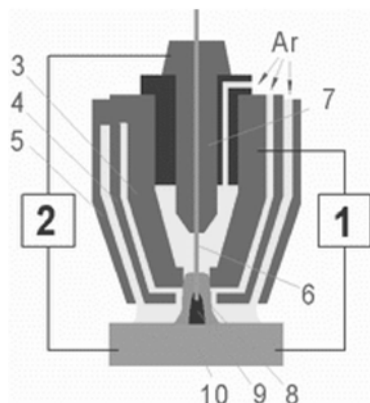


Рис. 68. Плазмотрон для сварки плавящимся электродом:
 1 – источник питания сжатой дуги; 2 – источник питания МИГ-дуги;
 3 – неплавящийся электрод; 4 – стабилизирующее сопло; 5 – защитное сопло;
 6 – плавящийся электрод; 7 – токоподвод; 8 – сжатая дуга; 9 – МИГ-дуга; 10 – изделие

Отметим также и технологию плазменной сварки неплавящимся электродом с боковой подачей присадочной проволоки, схема которой показана на рис. 69 [40].

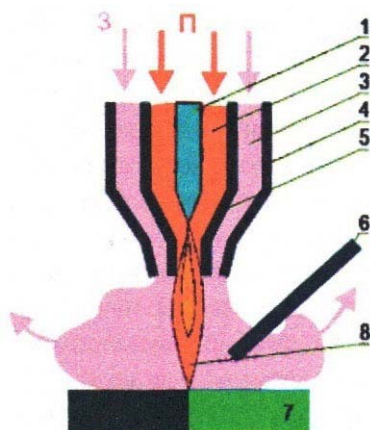


Рис. 69. Схема плазменной сварки неплавящимся электродом с боковой подачей присадочной проволоки:
 1 – вольфрамовый электрод; 2 – канал для подачи ПОГ; 3 – канал для подачи защитного газа; 4 – керамическое сопло; 5 – плазмообразующее сопло; 6 – присадочная проволока; 7 – свариваемые детали; 8 – дуга; П – ПОГ; З – защитный газ

К сожалению, применение представленных моделей сварочных плазмотронов не решает всех проблем, ограничивающих широкое внедрение технологий плазменной сварки, что заставляет разработчиков искать дополнительные способы повышения эффективности данной технологии.

3.3. Разработка новых сварочных плазмотронов

Помимо упомянутых в п. 3.2 технологических и конструктивных недостатков сварочных плазмотронов постоянного тока (низкий ресурс элементов соплового узла, нестабильность дуги из-за несоосности электрода и изменения его формы), следует отметить еще ряд проблем, возникающих в процессе их эксплуатации:

- неэффективность системы охлаждения;
- возникновение течей в паянных соединениях;
- шум при высоких значениях тока сварочной дуги.

В целях устранения перечисленных недостатков авторами была проведена конструкторская разработка (рис. 70) сварочных плазмотронов постоянного тока (серии ПМС – рис. 71), учитывающая рассмотренные выше принципы и методы проектирования плазмотронов. Сборочный чертеж разработанной модели показан на рис. 72.

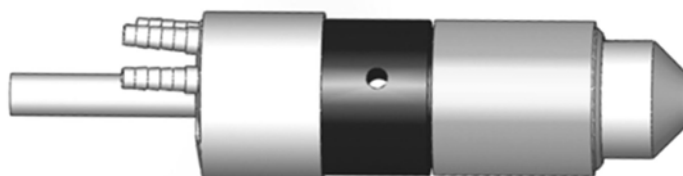


Рис. 70. Сварочный плазмотрон (CAD-модель)

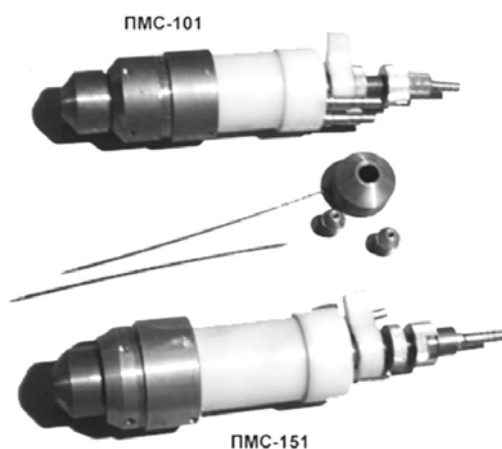


Рис. 71. Сварочные плазмотроны ПМС-101 (до 100 А) и ПМС-151 (до 150 А)

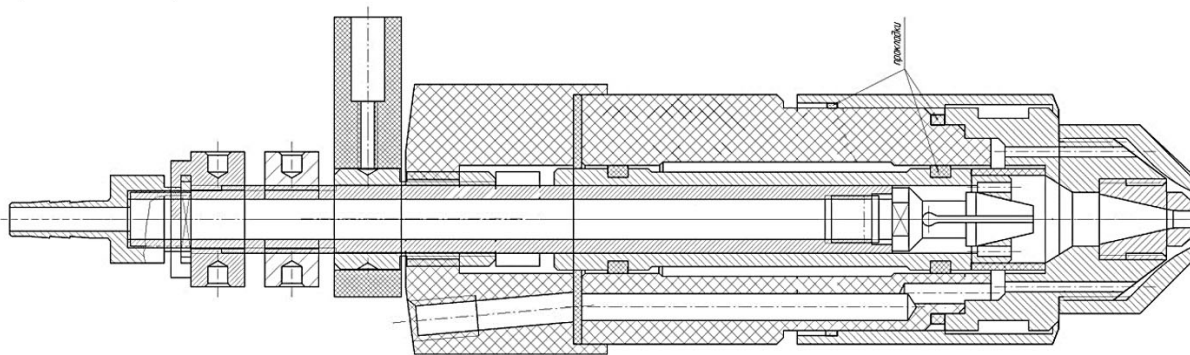


Рис. 72. Сварочный плазмоторн (сборочный чертеж)

Среди других разработок последних лет отметим произведенный в ПАО «Криогенмаш» (г. Балашиха, Московская область) плазмоторн КАБ-3Ми (рис. 73), позволяющий осуществлять отдельную одновременную импульсную подачу плазмообразующих газов (гелия и аргона) [67]. Плазмоторн работает в составе установки, которая помимо плазмоторна КАБ-3Ми включает в себя системы охлаждения, возбуждения дуги и газообеспечения с устройством импульсной подачи, плазмомодуль, а также аппарат подвешенного типа, источник питания и программное обеспечение.

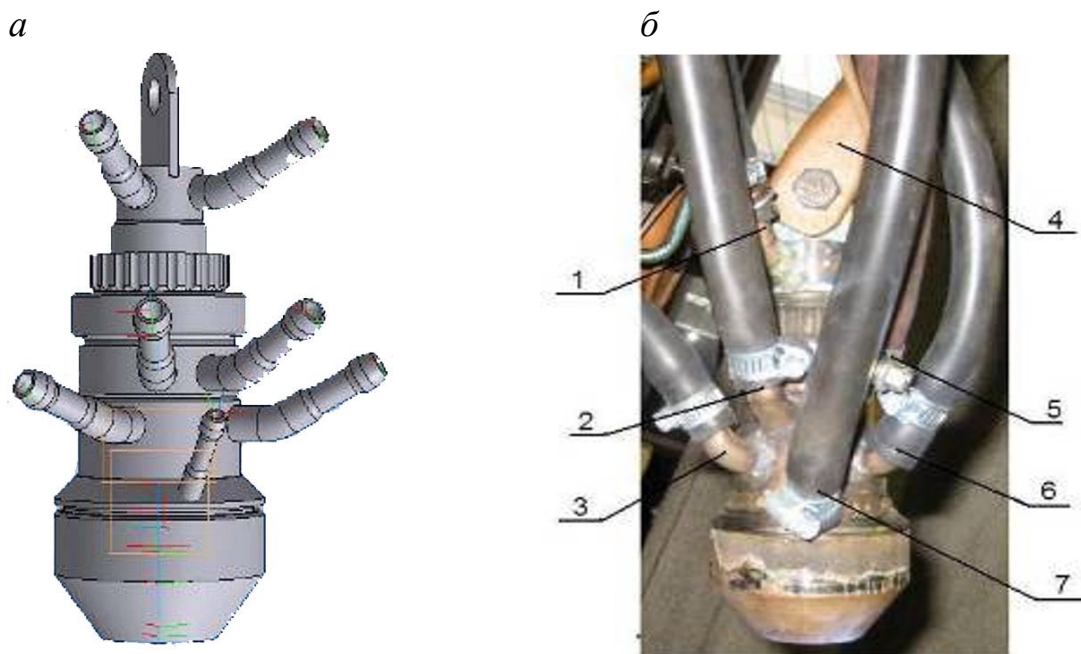


Рис. 73. Плазмоторн КАБ-3Ми:

а – 3D-модель плазмоторна; *б* – фото плазмоторна в составе установки;
 1 – патрубков системы охлаждения; 2 и 3 – патрубки подачи защитных газов;
 4 и 5 – электроды; 6 и 7 – патрубки подачи плазмообразующих газов

Плазмомодуль выполняет функции управления процессом в части газоснабжения плазмотрона, возбуждения плазменной дуги на стадии дежурной дуги и автоматического отключения дежурной дуги в момент возбуждения основной плазменной дуги, а также системой защиты от включения плазмотрона без подачи газов и охлаждающей жидкости. Газоснабжение состоит из систем защитного и плазмообразующих газов. На каждой линии подачи газа располагается клапан, обеспечивающий включение и выключение согласно заложенной программе. В едином корпусе плазмомодуля расположена система управления клапанами блока импульсной подачи плазмообразующих газов. Сущность его заключается в применении пульсации отдельных потоков защитных газов – аргона и гелия, направленных на периодически изменяемые характеристики дуги. Установлено, что гелий увеличивает проплавляющую способность процесса, а аргон стабилизирует дугу и проплавляет металл в хвостовой части сварочной ванны. Пульсация подачи защитных газов повышает качество сварного шва за счет создания повышенных условий всплытия неметаллических включений, пор, пузырьков газа и инородных частиц.

Эффективность газовихревой стабилизации в плазмотроне зависит от скорости закрутки плазмообразующих газов (регламентированная скорость закрутки $V_{\varphi} = 200$ м/с), величина которой зависит от их подачи (расхода), геометрии винтовых канавок завихрителя, а также от формы сопла и происходящих в нем газодинамических и теплофизических процессов (рис. 74). При отдельной подаче плазмообразующих газов в сопле плазмотрона происходит их смешение в результате взаимной диффузии, а в выходном канале сопла за счет термобародиффузии осуществляется их разделение, причем гелий концентрируется преимущественно в центре канала, а аргон – на его периферийной части.

Аппараты подвесного типа имеют плавную регулировку скорости перемещения по направляющим в диапазоне от 6 до 24 м/ч и способны нести весовую нагрузку до 20 кг, включая кассету с проволокой. Однако следует учитывать, что при плазменной сварке на постоянном токе обратной полярности выделяется большое количество энергии, поэтому автоматы тракторного типа имеют дополнительную систему теплоотражения. Наиболее предпочтительно использовать подвесные автоматы, которые перемещаются по рейкам, расположенным в достаточном удалении от места сварки, благодаря чему снижа-

ется вероятность воздействия на них тепловой энергии дуги, что в свою очередь обеспечивает точность траектории перемещения плазмотрона относительно свариваемого стыка. В составе автомата используется механизм подачи проволоки, обеспечивающий введение в сварочную ванну присадочного материала диаметром от 3 до 5 мм.

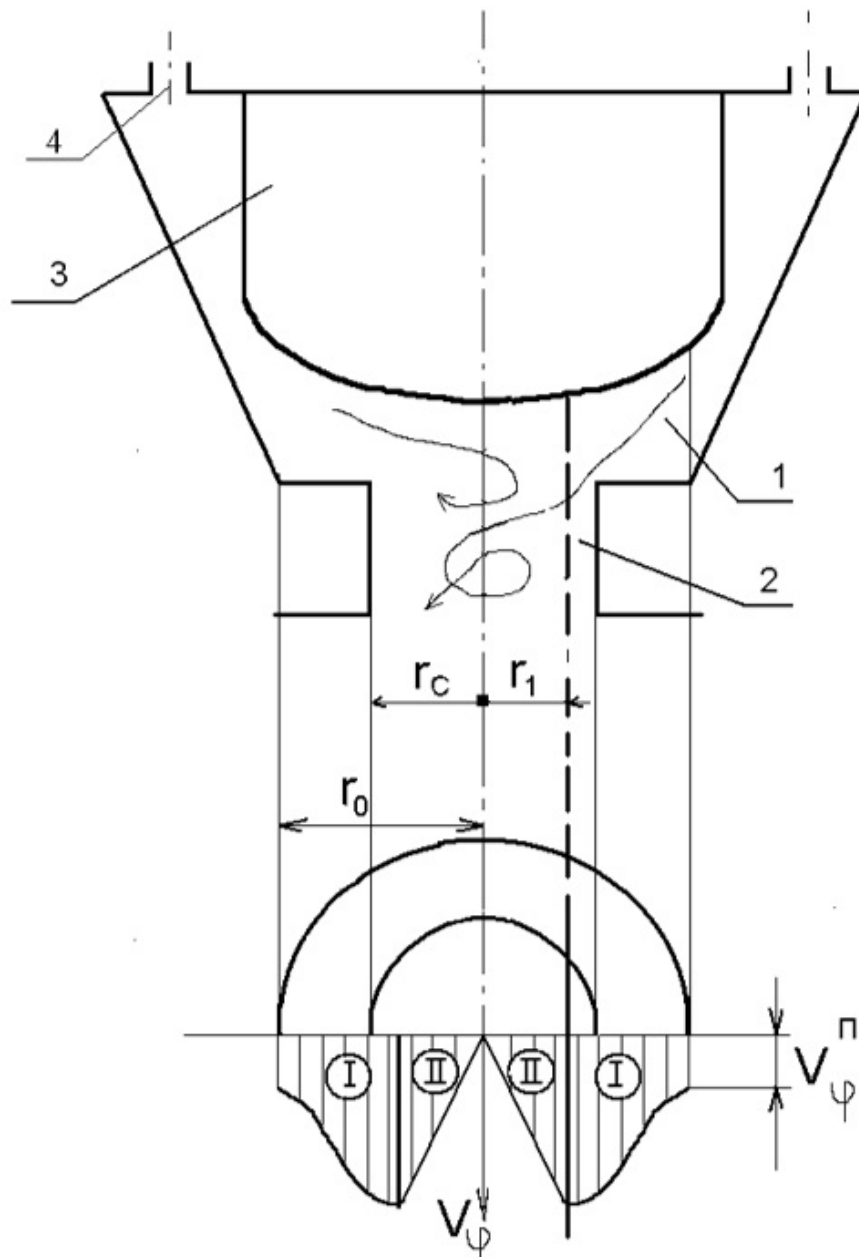


Рис. 74. Схема камеры закрутки:

I – потенциальная зона; II – зона твердого тела; 1 – камера закрутки; 2 – канал сопла; 3 – анод; 4 – винтовые канавки; r_0 – радиус камеры закрутки; r_1 – радиус границы раздела двух зон; r_c – радиус сопла; V_{φ}^{II} – скорость предварительной закрутки газа; V_{φ}^I – скорость закрутки газа

Источники питания для плазменной сварки толщин до 30 мм должны удовлетворять следующим требованиям:

- величина тока $I_{св}$ не менее 500 А при продолжительности включения (ПВ) 100 %;
- напряжение холостого хода $U_{хх}$ 60 В и выше;
- плавная регулировка величины тока;
- внешняя вольт-амперная характеристика (ВАХ) – падающая;
- защита источника от высокочастотного разряда;
- возможность программирования с запоминанием не менее 20 программ;
- внутренняя стабилизация питающего напряжения;
- коммутируемость с плазмомодулем.

Данным требованиям сегодня удовлетворяет большое число источников (ТИР-300, ТИР-630, ВД-306/400т, MW-5000). Режимы сварки с применением плазмотрона КАБ-3Ми представлены в табл. 12 [67], определенные в результате расчетов вольт-амперные характеристики – на рис. 75.

Таблица 12

Режимы сварки конструкций

Свариваемые толщины, мм	Параметры режима сварки*			
	Ток I , А	Скорость сварки $V_{св}$, м/ч	Расход ПОГ, л/мин	Частота f , Гц
4**	100	20	30	1,2
6**	120	18	30	1,2
8**	150	17	50	1,4
10	180	16	50	1,4
12	200	15	50	1,6
14	220	14	70	1,8
16	250	12	70	1,8
18	280	10	70	1,8
20	300	10	70	1,8
22	350	8	70	2,0
25	400	8	70	1,8

* При суммарном расходе защитного газа $G = 6$ л/мин.

** Сварка на аргоне в два прохода.

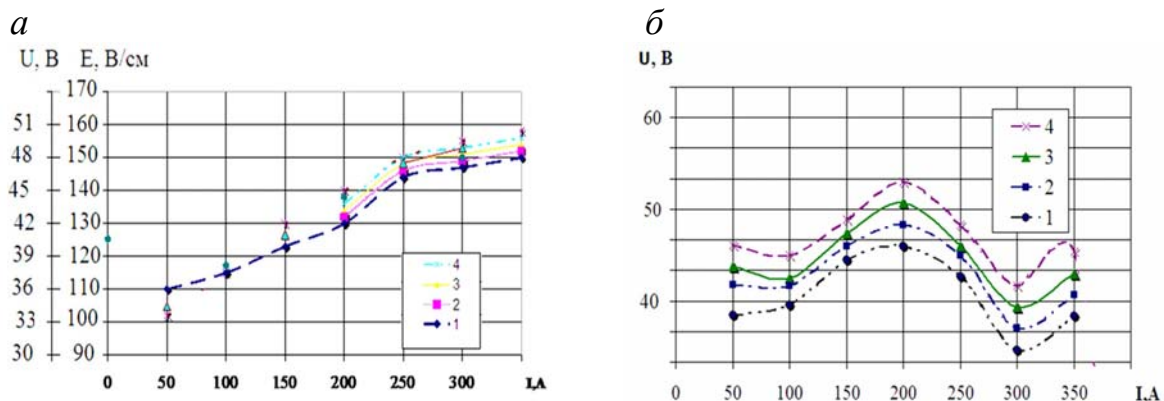


Рис. 75. Вольт-амперные характеристики:

а – для аргонной плазмы; *б* – для гелиевой плазмы; 1–4 – зависимости, полученные расчетным путем при G , равном 1,0; 2,0; 3,0 и 4,0 л/мин соответственно

Технология импульсной сварки с применением плазмотрона включает в себя механическую обработку стыков шарошками с целью удаления окисной пленки и соблюдения необходимого зазора в стыке в процессе сварки. Сварка продольных стыков карт предусматривает применение специальных стенов для сварки кольцевых стыков, для сварщика предусмотрен комплекс рекомендаций. Вследствие высокой теплоотдачи плазменной дуги предлагаемая технология позволяет осуществлять устранение дефектов шва без вскрытия дефектного участка. В результате применения плазменной сварки алюминиевых сплавов на постоянном токе обратной полярности и импульсной подачи плазмообразующего газа, а также использования двухкомпонентной смеси для образования столба плазмы достигается высокая эффективность и экономичность технологии, обеспечивающей большие величины проплавляемых толщин металла (до 30 мм) без разделки кромок с обеспечением высокого качества сварного соединения.

В ряду других применений плазмотронов в сварочных процессах отметим многочисленные комбинированные технологии, основанные на использовании нескольких источников энергии в зоне обработки (плазменной дуги и дуги плавящегося или неплавящегося электрода, лазерного или электронного луча и т. д.). Комбинация различных способов воздействия расширяет как технологические возможности процесса, так и способы его управления и в результате позволяет использовать такие методы не только в сварочных технологиях, но и для резки, наплавки, напыления покрытий, модификации и упрочнения поверхностей и т. д.

На рис. 76 показана схема плазменной сварки и наплавки плавящимся электродом, в которой медное сопло является электродом-анодом, а плавящийся электрод подается по оси плазмотрона, а на рис. 77 – различные виды указанной технологии [40]. Эффективность данных способов определяется возможностью экранирования электрода ионизированным газоплазменным потоком, что обеспечивает самопроизвольное начало разряда, улучшает контроль над переносом металла, повышает устойчивость столба сжатой дуги. В результате появляется возможность глубокого проплавления металла и увеличения скорости сварки металлов различной толщины. Основные преимущества – бездефектность швов, регулирование глубины проплавления, высокая производительность сварки [40].

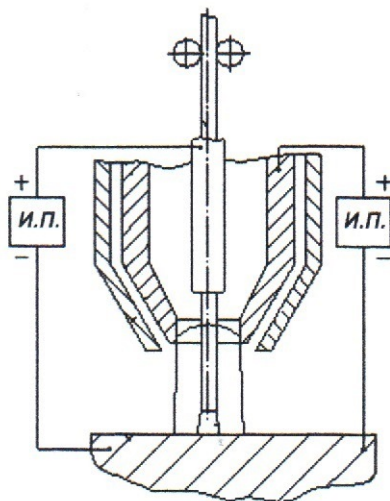


Рис. 76. Схема сварки с использованием сопла-анода:
И.П. – источник питания

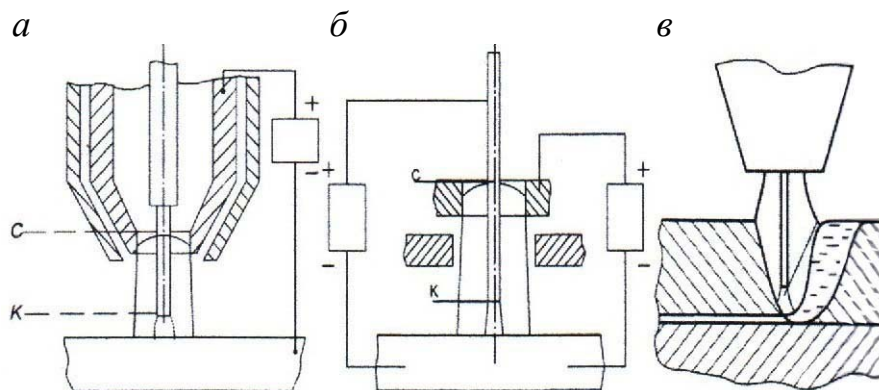


Рис. 77. Схемы комбинированной плазменной сварки:
а – обесточенной проволокой; *б* – токоведущей проволокой, *в* – заглубленной дугой плавящегося электрода; *С* – сопло; *К* – катод

Отметим также способы расширения технологических возможностей комбинированных плазменных технологий с использованием нескольких источников питания. На рис. 78 показаны три схемы такого подключения, позволяющие повысить эффективность и стабильность плазменных процессов за счет взаимодействия дуги, горящей между соплом и электродом, с дугой, горящей с сопла на металл. За счет взаимодействия двух дуг повышается тепловложение в изделие, что позволяет сваривать большие толщины без разделки кромок, производить сварку цветных металлов (алюминия, магния и т. д.) без дополнительных операций, характерных для обычных способов сварки. В результате появляется возможность повысить производительность и качество технологии в несколько раз, а также снизить временные и стоимостные затраты.

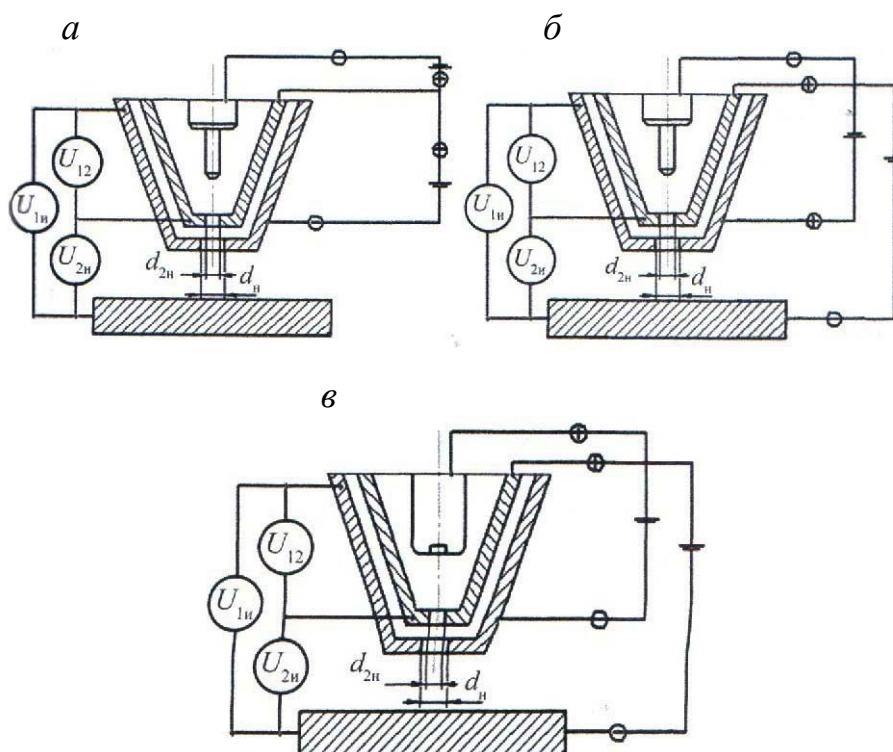


Рис. 78. Схемы подключения нескольких источников питания к плазмотрону:

а – комбинация дуг разной полярности; *б* – двойная дуга прямой полярности; *в* – двойная дуга обратной полярности

По сравнению с базовыми плазмотронами для сварки в плазмотронах ПМС-101 и ПМС-151 были выполнены следующие конструктивные и технологические изменения:

- сопряжение сменных элементов в сопловом узле;

- коррекция параметров соплового узла по газодинамическим и акустическим критериям;
- изменение тракта охлаждения с коррекцией гидродинамического потока (см. рис. 72).

Разработанные на этой основе плазмотроны имеют улучшенный ресурс и качество работы, более эффективны по показателям производительности (испытывается модель сварочного плазмотрона с током дуги до 250 А) и акустической безопасности. Отдельного внимания заслуживает возможность раздельной подачи плазмообразующего и защитного газа, а также дополнительная подача 3-го газа непосредственно в плазменную струю для изменения свойств и характеристик потока плазмы для различных технологических процессов (например, для насыщения поверхностного слоя металла какими-либо активными элементами, как это описано далее).

Глава 4. ПЛАЗМЕННАЯ ПОВЕРХНОСТНАЯ МОДИФИКАЦИЯ И ТЕРМОУПРОЧНЕНИЕ

4.1. Технологии плазменной закалки

Важное место в современном машиностроительном производстве занимают процессы модификации поверхности материалов. Использование в промышленности большинства методов восстановления и упрочнения поверхностей неэффективно по причине высокой стоимости, трудоемкости и опасности возникновения неблагоприятного напряженного состояния в поверхностном слое. В связи с этим весьма перспективным является использование методов поверхностной обработки высококонцентрированными источниками нагрева (ВКИН). Проводя физико-химические превращения в приповерхностном слое с использованием высокоинтенсивных источников нагрева (плазменных, лазерных, электронно-лучевых и др.), за малые времена и с высокой производительностью возможно получать слои на различных изделиях и конструкциях со специальными свойствами при сохранении исходных свойств в массе материала. Среди методов упрочнения металлов авторы справочника «Упрочнение машиностроительных материалов» [68] выделяют шесть основных классов, причем методами одного класса осуществляются процессы различных типов. Отметим следующие классы:

- модификация поверхностного слоя металла изменение химического состава (метод диффузионного насыщения);
- упрочнение изменением структуры поверхностного слоя (лазерная и плазменная закалка по методу физико-термической обработки; электроимпульсная, электроконтактная, электроэрозионная и ультразвуковая обработка по методу электрофизической обработки; термомеханическая обработка; наплавка газовым пламенем, электрической дугой, плазмой, лазерным лучом, пучком ионов);
- упрочнение изменением энергетического запаса поверхностного слоя (электроферромагнитная обработка, обработка в импульсном магнитном поле);
- упрочнение изменением всего объема металла (закалка светлая, несквозная, сквозная, изотермическая, с самоотпуском, с подстуживани-

ем, с непрерывным охлаждением и ступенчатая, отпуск высокий и низкий по методу термообработки при положительных температурах).

Методы поверхностной модификации концентрированными потоками энергии (КПЭ) обладают следующими преимуществами:

1) уменьшение хрупкости деталей и изделий в результате образования пластической и вязкой сердцевины, а также в случаях местного расположения закаленного слоя только на участках, твердость которых должна быть высокой;

2) существенное уменьшение деформаций во время нагрева и охлаждения, достигаемое за счет жесткости холодной сердцевины;

3) практически полное устранение окисления и обезуглероживания, что позволяет в отдельных случаях производить закалку без шлифования;

4) уменьшение затрат на нагрев, так как нагреваемый слой составляет небольшую часть от массы детали.

Первым методом поверхностного упрочнения можно считать гальваническое хромирование, разработанное в России в 1836 г. К концу XIX в. к нему добавилась поверхностная цементация по методу Гарвея (США). В начале XX в. появились твердосплавная наплавка, напыление по методу Шоопа, закалка газовым пламенем. Позднее были открыты новые способы и усовершенствованы уже известные, в совокупности насчитывавшие более 100 наименований. За рубежом их объединили понятием «инженерия поверхности», а в нашей стране – «методы упрочнения». Широкое внедрение в промышленность методов упрочнения в середине XX в. привело к появлению нового поколения машин с резко возросшими сроками гарантийной эксплуатации, получившее в 1970–80 гг. название безремонтных.

Среди методов упрочнения наиболее распространенной оказалась закалка. Отнесем сюда и объемную закалку с нагревом в печах, и поверхностную с нагревом концентрированными источниками, такими как лазер, плазма, токи высокой частоты (ТВЧ) и др. Из методов ВКИН наиболее экономичным и производительным является плазменная обработка. Плазменно-дуговая поверхностная обработка обладает преимуществами, свойственными поверхностным методам термообработки (ТО) КПЭ, сочетая при этом в себе высокую производительность и возможность локальной ТО, получения специфических режимов ТО, управляемость и автоматизацию процесса, высокую

концентрацию энергии в пятне тепловложения (табл. 13) и наличие относительно простых методов магнитоуправления дугой при использовании сканирующих методов ТО поверхности и т. д.

Таблица 13

Параметры процессов термообработки концентрированными потоками энергии

Источник нагрева	Мощность, Вт		Плотность мощности, Вт/см ²		Эффективный КПД нагрева
	min	max	min	max	
Газовое пламя	10 ²	10 ⁴	2 · 10 ²	6 · 10 ²	0,55
Электрическая дуга	50	2 · 10 ⁵	5 · 10 ²	4 · 10 ⁴	0,75
Плазменная струя	10 ³	10 ⁵	5 · 10 ²	10 ⁵	0,80
Ионный луч	10	10 ³	10 ²	10 ⁵	0,85
Электронный луч	10	10 ⁵	5 · 10 ²	10 ⁷	0,85
Лазерный луч	10	2,5 · 10 ⁴	10 ²	10 ¹⁰	0,85

Процесс плазменного поверхностного упрочнения достаточно хорошо изучен и эффективно используется при поверхностной модификации для упрочнения деталей и инструмента (от небольших по размеру сверел и резцов до крупногабаритных валков прокатных станов) цилиндрической и плоской формы, для придания поверхности антикоррозионных, гидроизоляционных, защитно-декоративных свойств, металлизации и т. д. Расширение номенклатуры изделий, эксплуатационные свойства которых возможно повысить при помощи плазменной модификации, ограничено формой и размерами этих деталей, а также особенностями применяемых плазмотронов. Это связано с необходимостью обеспечения малой дистанции обработки – расстояние от среза сопла до обрабатываемой поверхности должно выдерживаться в пределах (5 ± 1) мм. Габариты плазмотронов высокой мощности в сочетании с плоской торцевой поверхностью сопловой части делают практически невозможным выполнение указанных условий при упрочнении сложных поверхностей. Кроме того, известные конструкции плазменных генераторов не всегда позволяют эффективно проводить процессы модификации поверхностей материалов вследствие низких и неравномерных по ширине обработки тепловых потоков, узкой ширины зоны обработки и др. Для ряда конструкций, например,

при использовании дуги прямого действия невозможно обрабатывать как диэлектрические, так и металлические материалы. Таким образом, возможность обработки деталей сложной формы, а также достижения заданных свойств поверхностного слоя связаны с необходимостью выбора оптимальных конструкционных и технологических параметров плазмотрона или применения ручных способов плазменной закалки.

Процесс плазменного поверхностного термоупрочнения (закалки) заключается в термическом воздействии плазменной дугой (струей), перемещаемой относительно поверхности металла. Термоупрочнение КПЭ подчиняется общим закономерностям структурных и фазовых изменений, происходящих в сплавах при внешнем тепловом воздействии. Таким образом, процесс плазменной закалки включает в себя четыре стадии: нагрев, фазовое ($\alpha \rightarrow \gamma$)-превращение, гомогенизацию и быстрое охлаждение. Одной из наиболее важных особенностей поверхностного термоупрочнения переменными тепловыми источниками считается увеличение скорости нагрева, с которым связывают измельчение зерна, сдвиг стадии ($\alpha \rightarrow \gamma$)-превращения к более высоким температурам, наследование карбидной фазы и дефектов исходной структуры. При увеличении скорости нагрева (для стали $\geq 100 \div 500$ град/с) уменьшение внутренних напряжений осуществляется путем рекристаллизации, приводящей к измельчению зерен с образованием при последующем ($\alpha \rightarrow \gamma$)-превращении мелкозернистой аустенитной структуры, которая после охлаждения дает мелкодисперсный мартенсит с повышенными прочностными характеристиками (61...65 HRC [69]). При дальнейшем увеличении скорости нагрева свыше $10^4 \div 10^5$ град/с (для стали) [70, 71] рекристаллизационные процессы не успевают произойти и измельчения зерна не наблюдаются. Таким образом, оптимальные скорости нагрева лежат в диапазоне $10^2 \div 10^4$ град/с, что дает измельчение зерна в 15–30 раз до 11–14-го балла (площадь зерен 8...60 мм²) [72], в отличие от печного нагрева, когда аустенитное зерно имеет 7–10-й балл (250...1000 мм²).

Для получения слоя с более равномерным распределением свойств перемещение анодного пятна по поверхности осуществляют как поступательно, так и в перпендикулярном направлении за счет воздействия на дугу переменным магнитным полем, а также производят обработку с небольшим перекрытием термообработанных слоев.

Оптимальный коэффициент перекрытия составляет $\sim 0,5$, что обеспечивает получение примерно одинаковых по глубине зон закалки при однократном тепловом воздействии. При обработке больших площадей поверхностей, а также использовании сканирования возникает эффект многократного наложения отдельных рядов обработки, что приводит к появлению поверхностных зон с пониженной микротвердостью из-за наложения тепловых пятен с переменной интенсивностью и эффекта отпуска ранее закаленного участка. Данного эффекта можно избежать путем оптимизации временных параметров теплового воздействия по сравнению со скоростью структурных превращений. Положительный эффект термоциклирования поверхности сказывается также на повышении трещиностойкости поверхности вследствие выравнивания остаточных поверхностных напряжений. Наиболее интересны эффекты, достигаемые при термоциклировании в процессе термообработки поверхности сканирующим тепловым источником. Оптимизацией параметров сканирования (частоты и амплитуды различных типов сканирования, скорости перемещения источника, теплофизических и геометрических особенностей теплового источника и обрабатываемого материала) можно добиваться как эффектов упрочнения с высокими механическими свойствами поверхности (повышенной пластичностью, износостойкостью), так и избегать негативных последствий, характерных для других методов термообработки, в процессах отпуска, аморфизации, нормализации металлов.

В качестве иллюстрации рассмотренного метода можно привести описание представленного на рис. 79 процесса сканирующей термообработки синусоидально движущимся по поверхности обрабатываемого материала плазменно-дуговым источником тепла, управляемым за счет воздействия переменного магнитного поля на ионизированный поток в плазменной дуге (струе). Магнитное поле индуцируется в магнитных катушках (соленоидах), взаимное расположение которых, а также фазировка питающего их переменного электрического тока позволяют создавать различные схемы движения теплового источника. Характер изменения амплитуды магнитного поля определяется временной зависимостью амплитуды переменного тока. Несмотря на инерционность процессов, приводящих к небольшому искажению классических форм, в целом движение теплового источника можно описать синусоидальной зависимостью (рис. 80).

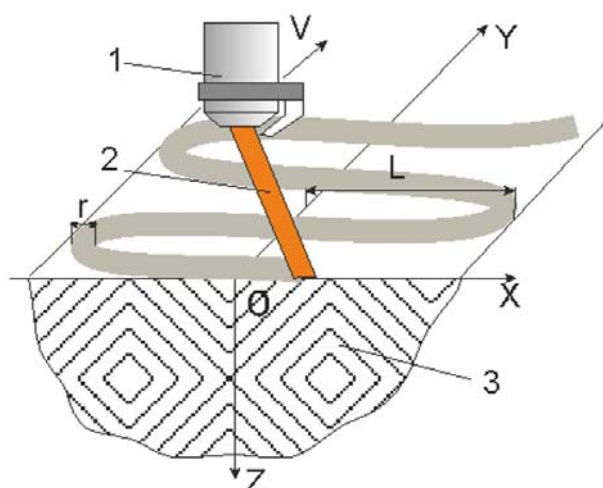


Рис. 79. Схема сканирующей синусоидальной термообработки: 1 – плазматрон со сканирующим устройством (дефлокатором); 2 – плазменная дуга; 3 – зона термического воздействия (ЗТВ); r – радиус пятна нагрева; L – амплитуда сканирования; V – скорость линейного перемещения по оси OY

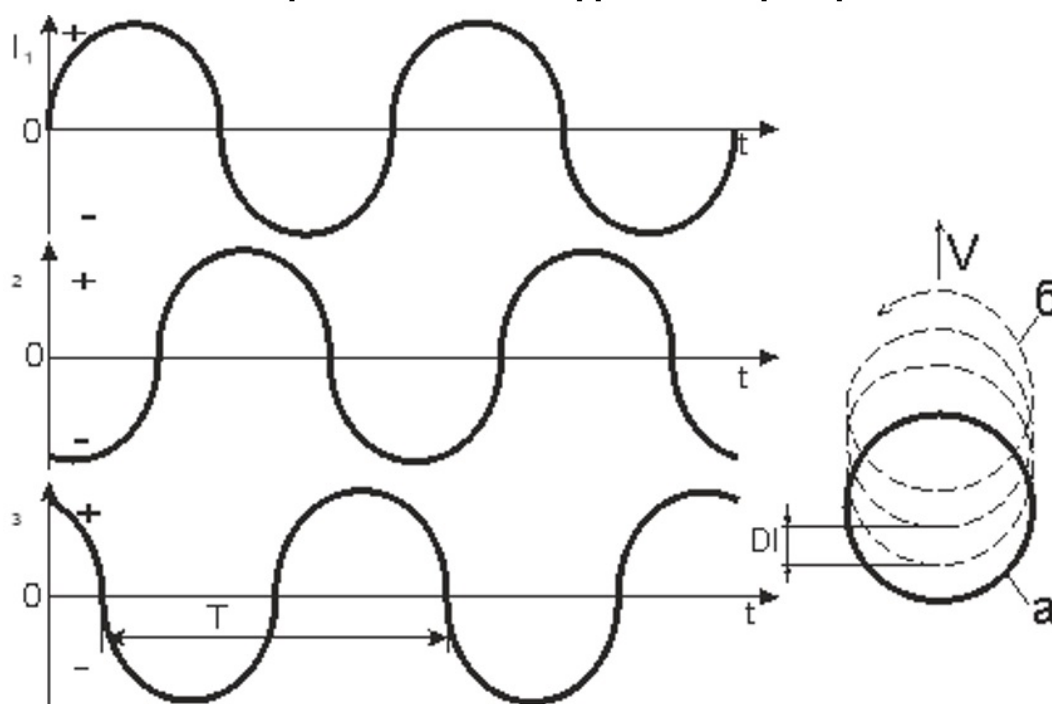


Рис. 80. Схема питания 3-фазного сканирующего устройства переменным током синусоидальной формы и характер перемещения теплового пятна по поверхности: a – в неподвижной системе; b – в подвижной системе; T – период времени; DI – смещение за один период

Анализ процессов плазменного воздействия на материал показывает, что поверхность обрабатываемого материала находится в зоне воздействия начального участка плазменной струи, характеризуемого неизменными температурой и скоростью потока по оси (равными значениям на срезе сопла), высокой турбулизацией и резким расширением струи, зависящим от формы сопла и характеризующимся углом полурасширения α . Для оценки теплофизических процессов в поверхностном слое материала помимо свойств самого материала необходимо учитывать величину температуры в пятне тепловложения (площадь пятна изменяется при сканировании), плотность распределения энергии в зоне нагрева, эффективную тепловую мощность, коэффициент полезного действия, геометрию струи (дуги), скорость перемещения пятна по траектории сканирования. В результате расчет характерных процессов становится сложной дифференциальной задачей с переменными параметрами и граничными условиями. Ряд таких задач применительно к описываемой технологии был решен авторами, что позволило оценить эффективность ее применения.

На рис. 81 представлены зависимости минимально допустимой скорости линейного передвижения V_{\min} теплового источника, рассчитанные в наиболее прогреваемой зоне, от частоты сканирования f и мощности источника P . Рост частоты ведет к снижению минимально допустимой скорости V_{\min} , при этом влияние частотного фактора снижается при частотах в несколько сотен герц. Увеличение мощности теплового источника закономерно ведет к росту поверхностной температуры и, как следствие, к снижению скорости V_{\min} . По сравнению с предельно допустимыми скоростями перемещения источника без сканирования V_{\min} для процессов со сканированием снижается в 5–10 раз, что позволяет вести процесс термообработки в более широком диапазоне технологических режимов.

Особенностью синусоидальной сканирующей обработки является неравномерность нагрева по ширине зоны термообработки, что ведет к неравномерности глубины закалки z (рис. 82) и свойств материала. Характер неравномерности зависит от типа теплового источника: при нагреве плазменными струями имеет место более равномерный нагрев на оси зоны и более быстрый спад температуры при удалении от оси, что приводит к меньшей ширине зоны закалки L по сравнению с плазменно-дуговым термоупрочнением. Также снижает-

ся и средняя скорость нагрева в наиболее прогреваемой полосе, что закономерно дает большие значения глубины закалки и снижение минимально допустимых скоростей линейного перемещения V_{\min} . При малых амплитудах сканирования эффект, вызванный неравномерностью потока, незначителен.

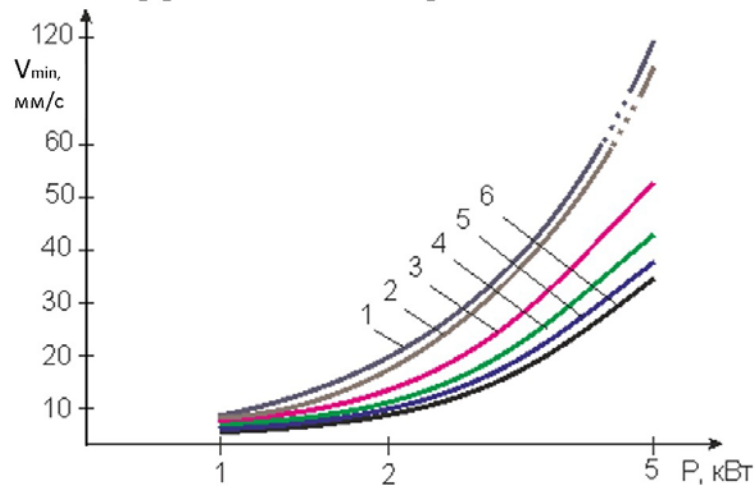


Рис. 81. Зависимость минимально допустимой скорости линейного перемещения V_{\min} от эффективной мощности P теплового источника ($r = 5$ мм) и частоты сканирования f :
 1 – 2 Гц; 2 – 5 Гц; 3 – 10 Гц; 4 – 50 Гц; 5 – 100 Гц; 6 – 500 Гц

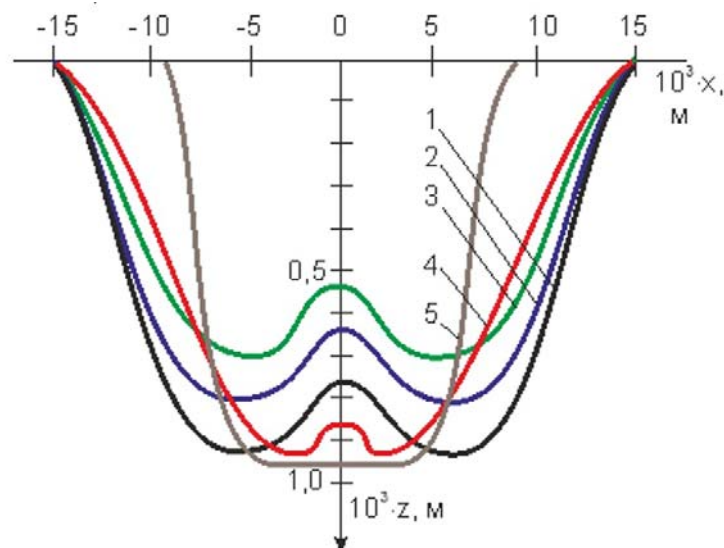


Рис. 82. Профиль термоупрочненной зоны ($r = 5$ мм) при поверхностной плотности энергии $q_0 = 6 \cdot 10^6$ Вт/м²:
 1 – $L = 15$ мм, $V_{\min} = 40$ мм/с, $f = 5$ Гц; 2 – $L = 15$ мм, $V_{\min} = 40$ мм/с, $f = 50$ Гц; 3 – $L = 15$ мм, $V_{\min} = 40$ мм/с, $f = 200$ Гц; 4 – $L = 15$ мм, $V_{\min} = 8$ мм/с, $f = 5$ Гц; 5 – $L = 7$ мм, $V_{\min} = 40$ мм/с, $f = 50$ Гц

Расчеты режимов охлаждения показывают (рис. 83), что во всем диапазоне исследуемых частот ($2 \div 1000$ Гц) и глубин закалки соблюдается режим быстрого охлаждения со скоростью, необходимой для получения структуры мелкодисперсного мартенсита, что обеспечивает твердость закаленной структуры на уровне $300 \div 330$ НВ. Производительность процесса $\Pi = 2LV_{\min}$ аппроксимируется формулой (рис. 84):

$$\Pi = \frac{A \cdot q_0^{0,3}}{f^{0,1} \cdot z}, \quad (31)$$

где $A = \text{const}$, зависящая от единиц измерения ($A = 1,8 \cdot 10^{-9}$ в диапазоне поверхностной плотности энергии $q_0 = (0,1 \div 7,5) \cdot 10^7$ Вт/м²).

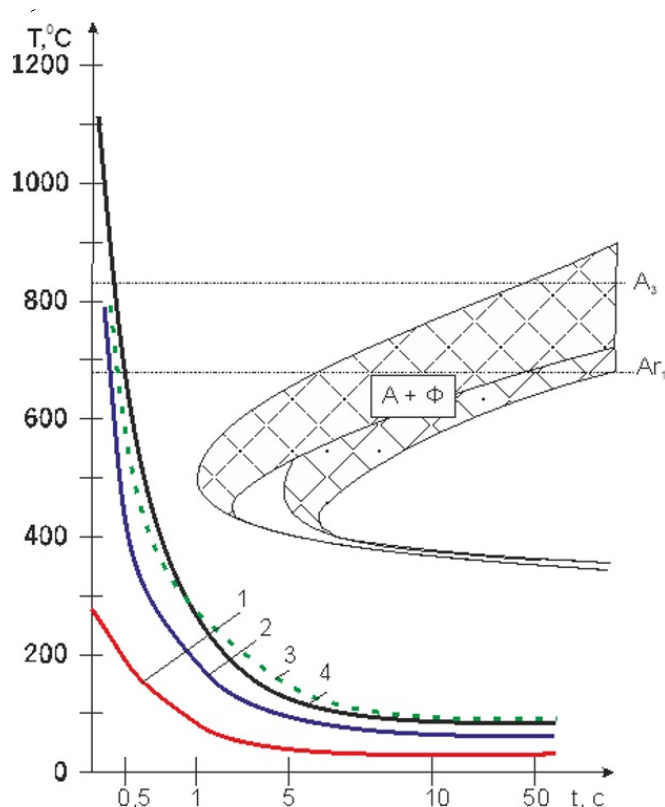


Рис. 83. Сравнительный график температур остывания и термокинетической диаграммы распада аустенита ($P_{\text{эфф}} = 5$ кВт; $L = 15$ мм; $r = 5$ мм; $V = 40$ мм/с; $f = 50$ Гц):
 1 – $x = 14,5$ мм, $z = 0$ мм; 2 – $x = 0$ мм, $z = 0$ мм; 3 – $x = 5$ мм, $z = 0,8$ мм;
 4 – $x = 5$ мм, $z = 0$ мм

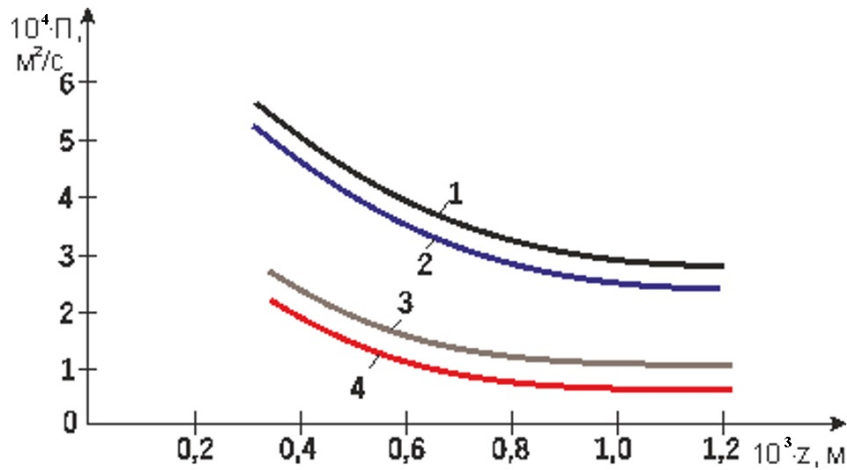


Рис. 84. Зависимость производительности $\Pi = 2LV_{\min}$ от максимальной глубины закалки z :

1 – $q_0 = 8 \cdot 10^6$ Вт/м²; $f = 50$ Гц; 2 – $q_0 = 8 \cdot 10^6$ Вт/м²; $f = 200$ Гц;
 3 – $q_0 = 7 \cdot 10^6$ Вт/м²; $f = 50$ Гц; 4 – $q_0 = 7 \cdot 10^6$ Вт/м²; $f = 200$ Гц

Для определения параметров закалки описываемым методом предложены диаграммы и аппроксимационные формулы для расчета температуры, времени нагрева, глубины закалки, границ частотно-скоростных диапазонов в зависимости от параметров процесса [73]. Для расчета глубины закалки можно использовать формулу

$$z = \frac{A \cdot q}{f^{0,3}} \cdot \exp(-0,75) \cdot \frac{V}{f^{0,2} \cdot \sqrt{q}}, \quad (32)$$

где $A = 3,1 \pm 0,7$;

q – мощность, кВт;

f – частота сканирования, Гц;

z – глубина закалки, мм.

Выявленные теоретические закономерности сканирующей термообработки подтверждены экспериментальными исследованиями на системах плазменно-дугового взаимодействия со сталями среднеуглеродистого класса и антифрикционной латунью. Эксперименты проводились на разработанной авторами в ООО НПО «Полигон» (Екатеринбург) и внедренной в СП «Коммаш» (объединении «Пневмостроймашина») установке для термоупрочнения металлов типа УТМ-3 (рис. 85). В составе установки находятся следующие элементы:

1) источник питания типа ВДУ-506 с падающими ВАХ, обеспечивающими номинальный ток не менее 300 А при ПВ = 60 %;

- 2) пульт управления с блоками импульсного возбуждения и управления дугой;
- 3) плазмотрон либо газозлектрическая горелка с механизмом перемещения и сканирующим устройством (дефлектором);
- 4) токосъемное щеточное устройство;
- 5) электро-, газо- и водоподводящая аппаратура и контрольно-измерительные приборы;
- 6) система принудительного охлаждения.

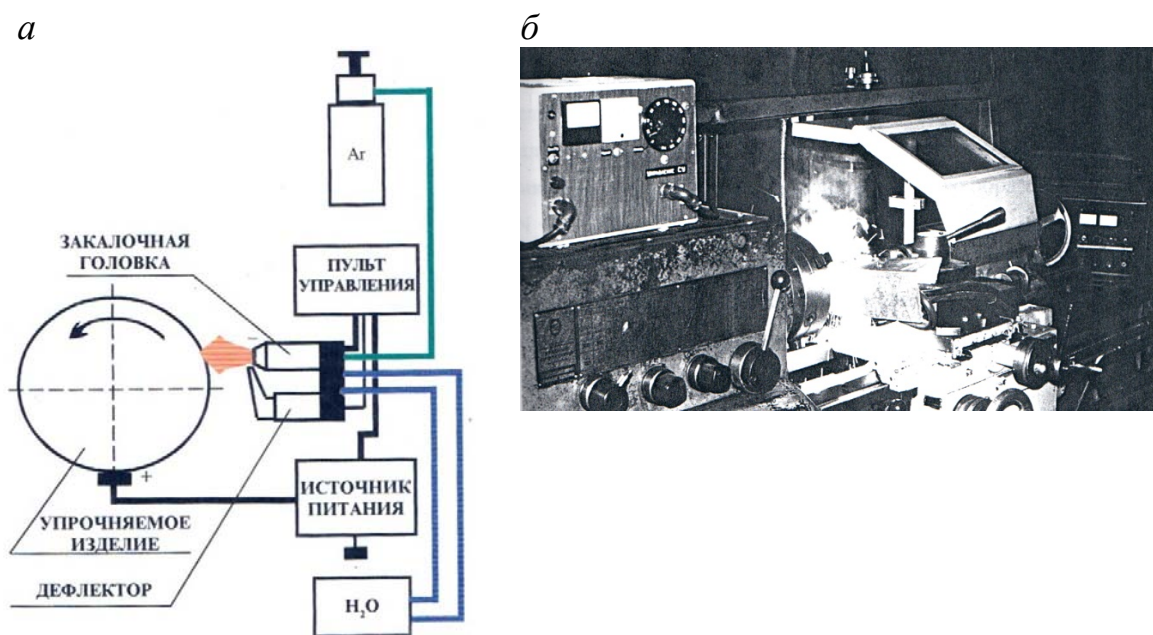


Рис. 85. Установка для плазменного термоупрочнения:
а – принципиальная схема; *б* – установка с манипулятором на базе токарного станка

В качестве теплового источника использовалась плазменно-дуговая горелка, предназначенная для поддержания дугового разряда между поверхностью детали и неплавящимся вольфрамовым электродом (анодом), закрепляемым в корпусе плазмотрона посредством цангового зажима, через который осуществлялся подвод тока и отвод тепла от электрода. Выходное напряжение холостого хода источника питания дуги составляет не менее 65 В, импульсного высокочастотного возбуждателя дуги (ИВД) – 20 ÷ 30 кВ. Напряжение с выхода ИВД поступало на воздушный промежуток между электродом и деталью, после его электрического пробоя питание ИВД отключалось и в работу вступало сканирующее устройство (магнитный дефлектор). Дефлектор состоит из полого водоохлаждаемого магнитопровода и катушки (соленоида), питаемой переменным электрическим током. Для

регулирования напряженности магнитного поля, создаваемого дефлектором, напряжение питания соленоида плавно изменялось в пределах 0...250 В (с катушкой на 110 В), что позволяло регулировать амплитуду сканирования дуги в пределах 20 мм.

В качестве плазмообразующей и защитной среды использовался аргон или смеси на основе аргона с азотом и другими газами. Расход газа регулировался в пределах 0,3...1,2 м³/ч, длина дугового промежутка – в пределах до 30 мм. В качестве манипулятора изделия в экспериментах применялся токарный станок типа 16К20 (см. рис. 85, б), что позволило обрабатывать цилиндрические детали диаметром до 150 мм и длиной до 1 м, обеспечивая перемещение дуги в 2 координатных осях по поверхности детали как за счет ее вращения, так и за счет перемещения суппорта станка с закрепленным на нем узлом термообработки (плазмотрон и дефлектор). Для водоохлаждения узла термообработки использовалась замкнутая водооборотная система с расходом 2...5 л/мин за счет подкачки воды помпой из резервуара.

Рассмотренная установка позволяет вести термообработку в диапазоне скоростей поступательного движения теплового источника 5 ÷ 95 мм/с, мощности дуги от 3,2 до 11,0 кВт, при амплитуде сканирования до 20 мм и частоте 50 Гц. Исследования по сканирующей термообработке, проведенные на сталях марок 40Х, Ст. 45, Ст. 50 и 9ХФ, показали увеличение поверхностной микротвердости на 150–250 НВ (30–35 HRC) и 20–25 единиц по Шору с неравномерностью величин по ширине зоны. Расчетные и экспериментально измеренные глубины закалки совпадают с точностью 15 ÷ 20 %.

Представленный метод термообработки, как указывалось выше, имеет широкий спектр практического применения, реализуемого выбором конкретных режимов обработки и специальных конструкций генераторов плазмы и устройств управления сканирующим устройством. С этой целью предлагается использовать плазмотрон с широким соплом-катодом (рис. 86), в котором плазменная дуга горит в пространстве между металлом-анодом и соплом, перемещаясь по пластинам-катадам, питаемым переменным током, что позволяет при термообработке со сканированием высокой частоты (свыше 1 кГц) рассматривать схему нагрева плоским полосовым движущимся источником. Перспективным представляется и использование различных схем сканирования, когда пятно нагрева при перемещении по обрабатываемой поверхности движется по спиральной траектории с образующими спи-

раль треугольниками, овалами или прямоугольниками, что позволит повысить качество обработки поверхностного слоя, создать структуру поверхности с заданным распределением упрочненных участков для получения специальных свойств, нанести специальный рисунок на поверхности в режиме микрооплавления в виде узоров различной формы и т. д. Реализовать подобные схемы сканирования можно с использованием дефлектора плазменной дуги, состоящего из двух-четырех соленоидов, питаемых трехфазным переменным током со сдвигом фаз на 120° . Так, при питании катушек током трапецевидной формы (рис. 87) на поверхности образуется узор треугольной формы (с наложением при движении источника дуги).

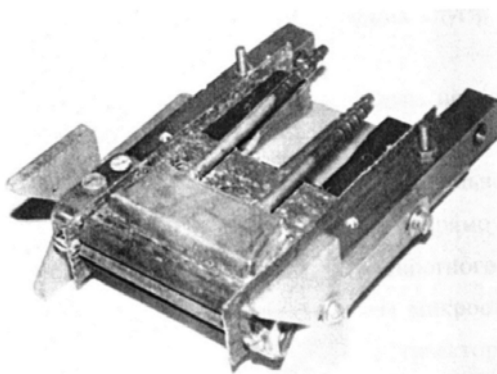


Рис. 86. Электродуговой плазматрон с широким соплом-катодом

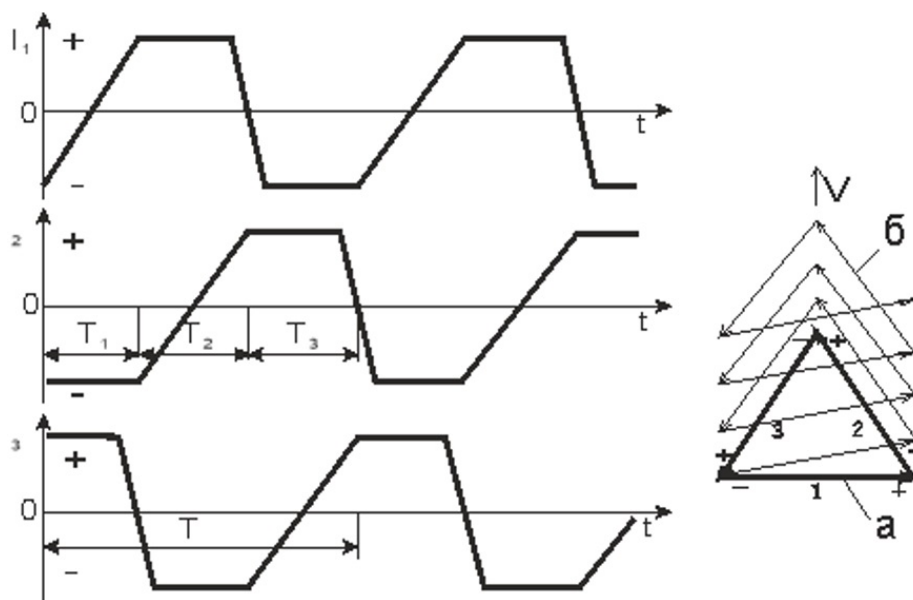


Рис. 87. Схема питания 3-фазного сканирующего устройства переменным током трапецевидной формы и характер перемещения теплового пятна по поверхности:

a – в неподвижной системе, *б* – в подвижной системе

Модификация подобной автоматизированной технологии приведена на рис. 88 [74]. Согласно технологии, поверхность изделия нагревают электрической дугой с током в 30–600 А, перемещаемой возвратно-поступательно (с амплитудой не более 250 мм над поверхностью изделия) переменным полем в направлении, перпендикулярном поступательному перемещению изделия (линейная скорость поступательного перемещения изделия относительно электрической дуги – 1–250 мм/с). Кроме того, в прианодной области на дугу воздействуют постоянным магнитным полем, отжимая ее от поверхности изделия не менее чем на 3 мм. При этом анодное пятно располагают на аноде (на расстоянии 1–25 мм от его поверхности в зависимости от формы обрабатываемого изделия), а ось катода направляют под углом к плоскости обработки. В результате горячие газы из прианодной области перемещаются над поверхностью изделия, нагревая и модифицируя ее свойства. Очевидно, что подобные автоматизированные методы термоупрочнения применимы только к деталям простой геометрической формы (плоским или телам вращения) и достаточно сложны в управлении.

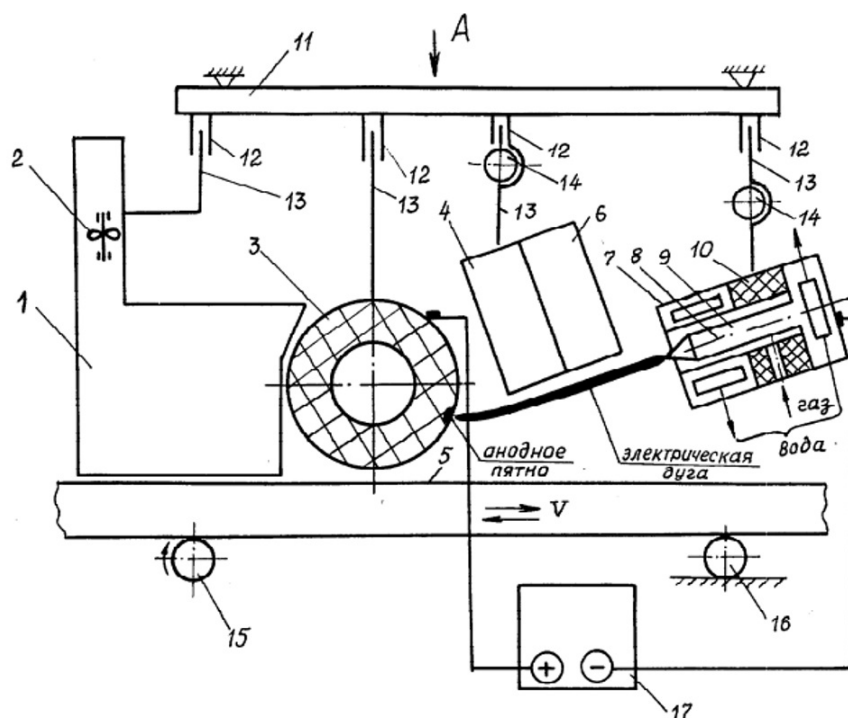


Рис. 88. Способ плазменной термической обработки изделий:
 1 – ковш с вентилятором; 2, 3 – анодный узел; 4 – блок отжима электрической дуги от поверхности обрабатываемого металлического изделия; 5, 6 – блок электромагнитной развертки; 7 – водоохлаждаемый катодный узел (в составе: 8 – центральный стержневой катод; 9 – сопло; 10 – корпус-изолятор; 11 – рама; 12 – направляющие; 13 – стойки); 14 – шарнирные соединения; 15 – привод; 16 – ролики; 17 – источник питания

Среди известных технологий плазменной закалки, позволяющих вести термоупрочнение изделий сложной конфигурации, можно обратить внимание на многолетний опыт использования установки УДГЗ-200 (ООО «Русстанком») (рис. 89). В состав установки входит источник питания типа ВД-306 или УДГУ-251 со встроенными блоками возбуждения дуги и охлаждения, тележка для перемещения установки и газового баллона и плазменная горелка (плазмотрон) с коммуникационными кабелями и рукавом. Установка имеет следующие параметры: мощность – 7 кВт, максимальная сила тока источника – 350 А, максимальная сила тока закалки – 200 А, производительность – до 110 см²/мин, расход рабочего газа (аргона) – 15 л/мин, глубина закалки – до 2 мм, твердость закалки (зависит от марки стали) ≤ 65 HRC. Установка мобильна и позволяет проводить закалку сталей и чугунов, в том числе низкоуглеродистых сталей, по месту эксплуатации деталей, а малые габариты горелки позволяют добираться до труднодоступных мест.



Рис. 89. Установка плазменно-дуговой закалки УДГЗ-200

Технология ручной закалки позволяет производить локальное упрочнение подверженных износу участков [75]. Оператор берет горелку в руки, подносит к изделию, возбуждает дугу и начинает равномерно перемещать горелку на расстоянии 20 мм вдоль поверхности полосами 7...14 мм с некоторым перекрытием. Скорость перемещения определяется по проявлению эффекта «вспотевания» поверхности. Для удобства оператора предусмотрены 2- и 4-тактные режимы работы. Возможна автоматизация закалки для тел вращения или пор-

талов. Закалочная горелка может закрепляться на рабочем органе робота или автомата, подобно тому, как это делается с горелкой сварочного полуавтомата, обычно находящейся в руке сварщика.

Закалка металла представляет собой нагрев до некоторой критической температуры (более 750 градусов) и последующее быстрое охлаждение, в результате чего твердость стали и чугуна увеличивается в 2–3 раза, с 20–25 HRC до 50–65 HRC (при сохранении вязкой сердцевины детали), а изнашивание деталей, соответственно, замедляется. Снижение износа может составлять десятки и даже сотни раз. Закалка осуществляется без подачи воды на деталь (за счет теплоотвода в ее тело), поэтому применяется не только в специализированных цехах, но и на ремонтных площадках. Оставляя на поверхности цвета побежалости, закалка при этом не увеличивает шероховатость в диапазоне Rz 4...40 и не дает деформаций, благодаря чему детали могут эксплуатироваться без последующей механообработки (шлифовки).

4.2. Влияние активных газовых компонент на эффект плазменного поверхностного упрочнения

Известно, что применение широкого класса методов высокотемпературного воздействия на поверхность металла струей (дугой) плазмотрона (резка, сварка, термообработка) сопровождается увеличением содержания азота в поверхностном слое материала. Как показали результаты авторских исследований, при плазменной резке углеродистой стали 09Г2С в зоне термического воздействия концентрация азота увеличивается в десятки раз по сравнению с исходным состоянием приповерхностного слоя и сопровождается повышением поверхностной микротвердости на 25–70 HV [76]. В свою очередь, рост микротвердости поверхностной кромки реза – параметр, определяющий качество плазменной резки, объем и стоимость последующих операций по подготовке поверхности металлического шва под сварку.

В связи с этим была проведена оценка возможности модификации поверхностного слоя в процессе воздействия на поверхность металлов движущейся плазменной дугой прямого действия. В рассматриваемой задаче предполагалось, что ионизированные компоненты активного газа низкотемпературной плазменной дуги (струи) имплантируются в тонком поверхностном слое металла и за счет высоких скоростей диффузии в металле, обусловленных большими значения-

ми пиков температурных волн, сорбируются в пределах некоторой глубины. При этом не рассматривались явления сорбции из газовой фазы, хемосорбции и поверхностные эффекты аккомодации ввиду их больших характерных времен по сравнению с характерным временем действия тепловой волны.

Для исследования был выбран процесс воздействия на металл струей плазмотрона постоянного тока (сила тока $I = 300$ А, расход газа $G = 10 \div 50$ л/мин, $\sim 0,2 \div 1,0$ г/с, диаметр сопла $d = 1 \cdot 10^{-2}$ м, давление $P = 1,013 \cdot 10^5$ Па, напряжение на дуге $U = 30 \div 45$ В).

Произведем оценку тепловой мощности плазмотрона:

$$W = U\eta, \quad (33)$$

где η – тепловой КПД плазмотрона, значение которого можно оценить, согласно работе «Электродуговые генераторы термической плазмы» [1]:

$$\frac{\eta}{1-\eta} = 5,85 \cdot 10^{-5} \left(\frac{I^2}{G-d} \right)^{0,265} \left(\frac{G}{d} \right)^{-0,265} (Pd)^{0,3} \quad (34)$$

Расчеты дают значения $W = 8,7$ кВт и $\eta = 0,65$ для заданных параметров обработки. Считая, что вся эффективная тепловая мощность передается поверхности обрабатываемого материала, можно определить характерные значения плотности теплового потока на его поверхности (Вт/м^2):

$$q_{\text{т}} \approx \frac{W}{\pi r^2} \approx (0,7 \div 1,2) \cdot 10^7, \quad (35)$$

где r – радиус теплового пятна на поверхности, равный $1,5 \div 2,0$ см.

Процесс азотирования поверхности металла плазменной дугой (струей) – нестационарный и неизотермический. Произведем оценку возможности диффузии азота в металл, согласно уравнению Фика с коэффициентом диффузии, зависящим от температуры:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) = \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial c}{\partial x} + D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (36)$$

где c – концентрация азота в металле;

D – коэффициент диффузии;

x – глубина слоя азотирования от поверхности.

Так как процесс неизотермический, то температура $T = T(x, t) \neq \text{const}$, следовательно, $D = D(T) = D(x, t)$ и, согласно закону Аррениуса,

$$D = D_0 e^{-E/RT(x)}, \quad (37)$$

где E – энергия активации диффузии.

Тогда

$$\frac{\partial D}{\partial x} = \frac{D(x, t)E}{RT^2} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (38)$$

и уравнение Фика принимает вид

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left\{ \frac{E}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right\}, \quad (39)$$

где $c = c(x, t)$;

$D = D(x, t)$;

$T = T(x, t)$.

С начальными и граничными условиями III рода (на границе задается входной поток частиц ионизированного газа с учетом поверхностной имплантации и поток термической и радиационно-индуцированной десорбции) получаем:

$$c(x, 0) = 0, \\ -D \frac{\partial c(0, t)}{\partial x} = \alpha J(t) - S_T c(0, t) - S_p c^2(0, t), \quad (40)$$

где α – коэффициент внедрения (≈ 1);

J – поток атомов и ионов плазмы;

S_T – константа скорости термодесорбции;

S_p – константа скорости радиационно-индуцированной десорбции.

$$J(t) = \begin{cases} J_{\text{ат}} + J_{\text{ион}}, & t < t_0 \\ 0, & t > t_0 \end{cases},$$

где t_0 – время поверхностного воздействия.

$$t_0 = \frac{2r}{V},$$

где V – скорость перемещения струи по поверхности плазмы.

Процессами азотирования из атмосферы в момент отсутствия плазменного воздействия ($t > t_0$) пренебрегаем в силу существенно меньших атомно-ионных концентраций азота в воздухе по сравнению с плазмой. Линеаризуем граничные условия:

$$-D \frac{\partial c(0,t)}{\partial x} = J(t) - S_1 c(0,t), \quad (41)$$

где $S_1 = S_p + S_T$.

Произведем оценку температуры слоя азотирования. В силу неизотермичности процесса расчет температуры как функции координат и времени следует произвести согласно уравнению Фурье:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (42)$$

где c – теплоемкость;

ρ – плотность;

λ – коэффициент теплопроводности металла.

Начальные и граничные условия запишем в виде

$$T(x, 0) = T_0,$$

$$-\lambda \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = q - \alpha_T (T(0,t) - T_{\text{окр}}) = q - \alpha_T \Delta T(0,t), \quad (43)$$

где q – тепловая мощность;

α_T – коэффициент теплоотдачи с поверхности;

$T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды.

$$q = \begin{cases} q_T, & t < t_0 \\ 0, & t > t_0 \end{cases}, \quad (44)$$

$$\Delta T(0,t) \sim k\sqrt{t}, \quad t < t_0.$$

В этом случае распределение температуры в металле в одномерном приближении может быть рассчитано согласно данным из работы «Математическая теория диффузии в приложениях» [77]:

$$T = T_0 + \frac{2q_T \sqrt{\alpha\pi}}{\lambda} \begin{cases} \sqrt{t} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right), & t < t_0 \\ \sqrt{t} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) - \sqrt{t-t_0} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a(t-t_0)}}\right), & t > t_0 \end{cases}, \quad (45)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{2q_T \varepsilon \sqrt{\pi}}{\lambda} \cdot \operatorname{erfc}(\varepsilon) \{1 - \varepsilon\}, \quad (46)$$

$$\varepsilon = \frac{x}{2\sqrt{at}},$$

где a – коэффициент температуропроводности материала.

Очевидно, что в такой постановке задача не имеет решения в общем виде и требуется численное решение по четырехточечной схеме $((t_i, x_i) \rightarrow T_i \rightarrow D_i \rightarrow C_i)$. Будем искать приближенное решение в зонах Δx с температурами $T = T_{эфф} = const$ и соответствующими коэффициентами $D(T_{эфф}) = const$, $S_l(T_{эфф}) = const$. Произведем подобный расчет для стали с характерными параметрами – $a = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda \approx 40 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $c_p = 5 \cdot 10^6 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ – и максимальной температурой нагрева поверхности $\sim 1800 \text{ }^\circ\text{C}$. Учитывая данную температуру, можно оценить скорость перемещения струи по поверхности металла $V \sim (1,0 \div 1,5) \text{ см}/\text{с}$ и время теплового воздействия в данной точке поверхности $t_0 = \frac{2r}{V} \sim 2,6 \text{ с}$

$\left(\Delta T_{\max} = \frac{2q_i \sqrt{a\pi 2r/V}}{\lambda} \right)$. Характерные распределения температурных полей в металле, рассчитанные согласно (45), представлены в табл. 14 и на рис. 90, 91.

Таблица 14

Распределение температуры в поверхностном слое металла

Время t , с	Температура T , К при заданной глубине слоя x , м			
	10^{-6}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}
0,1	630	598	416	298
1,0	1350	1315	1044	304
2,6	1992	1959	1389	421
5,0	1020	1055	1027	669
10,0	762	762	764	656
100,0	436	436	431	395

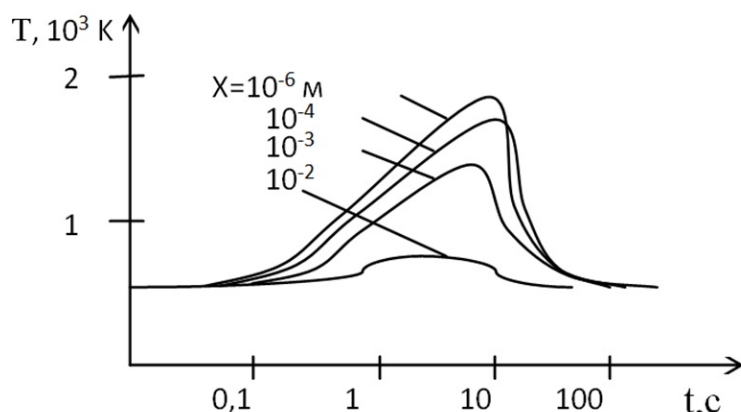


Рис. 90. Временные зависимости температуры на различных глубинах поверхностного слоя металла

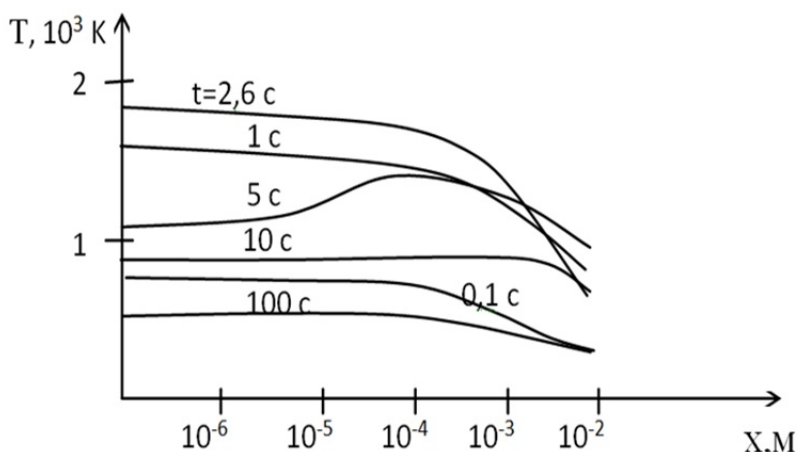


Рис. 91. Температурные распределения в поверхностном слое металла в зависимости от времени

С учетом распределения температур рассчитаем их эффективные (усредненные) значения, необходимые для определения температурно-зависимых значений коэффициентов диффузии:

$$T_{\text{эфф}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} T(t) dt}{t_2 - t_1} \approx \frac{\sum_{i=n}^m (T_i + T_{i+1})(t_{i+1} - t_i)}{2(t_m - t_n)}. \quad (47)$$

В данном случае усредняем только по времени, так как $\bar{T}_x \approx T(t)$ при $x \leq 10^{-4}$. В общем случае, когда необходимо усреднение по глубине x , эффективные значения вычислялись по уравнению

$$T_{\text{эфф}} = \frac{\int_0^x \int_{t_1}^{t_2} T(x, t) dx dt}{x(t_2 - t_1)}, \quad (48)$$

результаты которых с точностью $\approx 5\%$ совпали с расчетами по (47) на глубинах до 10^{-4} м. Отдельные результаты расчета $T_{\text{эфф}}$ представлены в табл. 15.

Таблица 15

Эффективные значения температур $T_{\text{эфф}}$, К ($t_n = 1\text{с}$)

Время t_m , с	Температура $T_{\text{эфф}}$, К при заданной глубине x , м			
	10^{-6}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}
5	1760	1560	1360	472
10	1250	1200	1100	577

При расчете эффективных значений коэффициента диффузии азота в металле (табл. 16) использовалась Аррениусовская зависимость, характерная для α -Fe [78] ($\text{м}^2/\text{с}$):

$$D_{\text{эфф}} = D_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_{\text{эфф}}}\right) = 6,6 \cdot 10^{-7} \exp\left(-\frac{77,8 \cdot 10^{-3}}{RT_{\text{эфф}}}\right). \quad (49)$$

Таблица 16

Эффективные значения коэффициента диффузии

Время t_m , с	Коэффициент диффузии $D_{\text{эфф}}$, $\text{м}^2/\text{с}$ при заданной глубине x , м			
	10^{-6}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}
5	$3,5 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$3,5 \cdot 10^{-11}$	$1,6 \cdot 10^{-15}$
10	$1 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$5,8 \cdot 10^{-14}$

Для дальнейших расчетов необходимо оценить количественный состав плазмы азотной дуги (струи).

Оценка состава плазмы производилась по известной методике, изложенной в работе А. В. Донского и В. С. Клубникаина, при температуре, равной максимальной температуре поверхностного слоя металла, т. е. $T_{\text{пл}} \approx T_{\text{Me}}^{\text{max}}(0)$ [51]. Плотность тока плазменной дуги, усредненная по площади пятна поверхностного воздействия ($\text{А}/\text{м}^2$), рассчитывается следующим образом:

$$j = \frac{I}{\pi r^2} \cong 2,4 \cdot 10^5. \quad (50)$$

Напряженность электрического поля в такой дуге (В/м)

$$E \sim 15 \div 20 \frac{\text{В}}{\text{см}} = (1,5 \div 2) \cdot 10^3.$$

С другой стороны,

$$j = n_e e V_e = \frac{n_e e^2 \lambda_e}{m_e V} E, \quad (51)$$

где n_e – плотность (концентрация) электронов в плазме;

e – заряд;

V_e – скорость дрейфа;

λ_e – длина свободного пробега;

m_e – масса;

V – тепловая скорость электронов.

$$V = \sqrt{\frac{3kT_e}{m_e}} \sim 3 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$$

Длину свободного пробега электронов оценим по формуле

$$\lambda_e = \frac{kT_e}{PQ}, \quad (52)$$

где k – постоянная Больцмана;

P – давление;

Q – сечение столкновения.

Для электрических дуг $Q = Q_{ia} + Q_{ii} + Q_{ea} + Q_{ee} + Q_{ei} \approx Q_{ea}$ (соответствующие сечения: Q_{ia} – перезарядки, Q_{ii} – Гвоздовера, Q_{ea} – Рамзауэра, Q_{ee} и Q_{ei} – прилипания и захвата электрона, i – ион, a – атом, e – электрон). Для азотной плазмы заданных параметров

$$Q_{ea} \sim 2 \cdot 10^{-19} \text{ м}^{-2}, \quad n_e = \frac{j m_e V}{e^2 \lambda_e E} \approx 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3} \text{ и } V_e \sim \frac{j}{n_e e} \sim 1,5 \cdot 10^3 \text{ м/с.}$$

Произведем оценку неравновесности плазмы по энергии:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_T} = \frac{eE\lambda}{3/2kT} = \frac{2}{3} \cdot \frac{e}{Q_{ea}} \cdot \frac{E}{P} \sim 1 \cdot 10^{-2}, \quad (53)$$

где $\Delta\omega$ – энергия, полученная электроном от поля на участке λ_e ;

ω_T – энергия теплового движения электрона.

Степень неравновесности по температуре:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{T_e - \Delta T}{T_d} = \frac{m_a}{4m_e} \cdot \frac{(\lambda_e e E)^2}{\left(\frac{2}{3} k T_e\right)^2} \approx 0,3 \quad \left(\text{для } E \sim 15 \frac{\text{В}}{\text{см}} \right), \quad (54)$$

где m_a – масса атомов;

T_d – температура газа;

$T_d \approx T_i$ – температуре ионов ($\sim 2 \cdot 10^3$ К).

Следовательно, электронная температура $T_e = \frac{T_d}{1-0,3} \cong 2570$ °С.

Квазинейтральность плазмы оценим по радиусу Дебая:

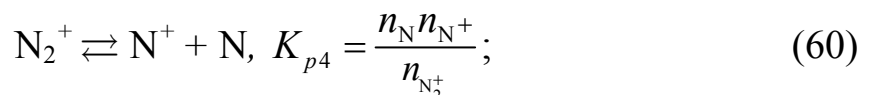
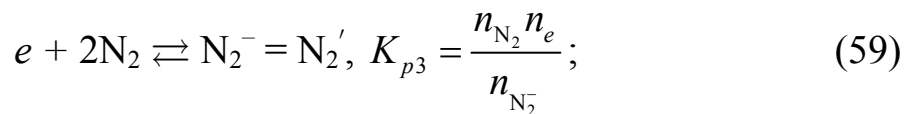
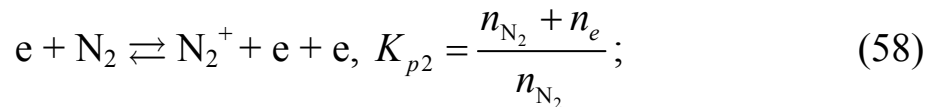
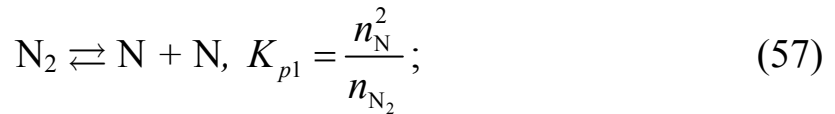
$$r_D \leq 5 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}} \approx 6,7 \cdot 10^{-9} \text{ м} \ll \lambda_e. \quad (55)$$

Таким образом, рассматриваемую плазму можно считать квазинейтральной.

Плотность частиц в плазменной дуге в области воздействия на поверхность материала:

$$n \cong \frac{\rho}{kT} \sim 4 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}. \quad (56)$$

Рассмотрим вариант воздействия на поверхность струей (дугой) плазмообразующего газа азота (анализ с небольшими поправками справедлив и для воздушной плазмы). В такой плазме будут идти следующие реакции (K_{pi} – константа равновесия i -й реакции):



$$e + N_2 \rightleftharpoons N_2^- \rightleftharpoons N^- + N, K_{p5} = \frac{n_N n_{N^-}}{n_{N_2^-}}; \quad (61)$$

$$e + N \rightleftharpoons N^+ + e + e, K_{p6} = \frac{n_{N^+} n_e}{n_{N_2^-}}; \quad (62)$$

$$e + N^+ \rightleftharpoons N^{++} + e + e, K_{p7} = \frac{n_{N^+} n_e}{n_{N^+}}; \quad (63)$$

$$e + N \rightleftharpoons N^-, K_{p8} = \frac{n_{N^-}}{n_N n_e}; \quad (64)$$

$$e + N_2^+ \rightleftharpoons N_2 \rightleftharpoons N + N, K_{p9} = \frac{n_{N^+} n_e}{n_{N^+}}; \quad (65)$$

$$N_2^+ + N_2^- \rightleftharpoons N_2 + N + N, K_{p10} = \frac{n_N^2 n_{N_2}}{n_{N_2^+} n_{N_2^-}}. \quad (66)$$

Таким образом, в плазме будут присутствовать молекулы N_2 , атомы N , ионы N_2^+ , N_2^- , N^{++} и электроны e . Из условия квазинейтральности следует, что

$$n_{N_2^+} + n_{N^+} + 2n_{N^{++}} = n_e + n_{N_2^-} + n_{N^-}. \quad (67)$$

Будем учитывать только концентрации n_{N_2} , n_N , n_{N^+} и n_e (основные реакции – (57), (58), (60) и (62)), так как $n_e \approx n_{N^+}$ и $n_{N_2} \gg n_e \gg n_{N_2^+}$, $n_{N^{++}}$, $n_{N_2^-}$, n_{N^-} (с учетом того, что $K_{pi} \sim e^{\frac{-E_i}{kT}}$). Оценим число диссоциированных атомов:

$$K_p(T) = \frac{n_N^2}{n_{N_2}} = \frac{m_n^{3/2} V_{\text{кол}} g_N}{4\sqrt{\pi} kT I_m g_{N_2}} \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right), \quad (68)$$

где I_m – момент инерции молекулы;

T – характеристическая температура для вращения молекул;

$V_{\text{кол}}$ – колебательная частота молекулы;

E_d – энергия диссоциации;

g_N и g_{N_2} – статистические веса внутренних степеней свободы атомы и молекулы, соответственно.

$$I_m = \frac{h^2}{8\pi^2 kT},$$

где h – постоянная Планка.

Характерные значения энергий диссоциации (E_d) и ионизации (E_I) представлены в табл. 17.

Таблица 17

Энергии диссоциации и ионизации плазменных компонент

Частица	Энергия, эВ			
	E_d	E_{I1}	E_{I2}	E_{I3}
N	–	14,53	29,59	47,43
N ₂	9,78	15,60	–	–
N ₂ ⁺	8,74	–	–	–

Для азотной плазмы

$$K_p(T) \approx 1,8 \cdot 10^{33} T^{1/2} \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right), \quad (69)$$

$$K_{p1} \sim 1,6 \cdot 10^{10}, \quad n_N = \sqrt{n_{N_2} K_p} = \sqrt{\frac{PK_p}{kT}} = 2,5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}.$$

Примем $n_n \sim 1 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ (с учетом остальных реакций). Теперь можно произвести оценку скоростей потоков частиц в плазме $J = nV$ следующим образом:

а) для ионов $V = V_e = \sqrt{\frac{2eU}{m_N}} \sim 2 \cdot 10^4 \text{ м/с}$ и $J_{\text{ион}} = n_N V_e \approx 2 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$;

б) для молекул $V = V_m = \sqrt{\frac{3kT}{m_{N_2}}} = 1,4 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ и $J_{\text{моп}} = n_N 2V_m = 5,4 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$;

в) для атомов $V = V_a = \sqrt{\frac{3kT}{m_N}} = 1,9 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ и $J_{\text{ат}} = n_N V_a = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Так как $J_{\text{ат}} \ll J_{\text{ион}}$, будем учитывать только ионные потоки. Ионы могут имплантироваться в металл на глубину $\lambda_{\text{и}}$, равную

$$\lambda_{\text{и}} = \frac{1}{n\sigma} = 2 \cdot 10^8 \cdot \frac{U}{p} \approx 0,08 \text{ мкм}, \quad (70)$$

где σ – сечение торможения ионов.

Концентрацию азота в металле рассчитаем по формуле, предложенной в работе А. И. Райченко [77], предположив начальное отсутствие азота в металле ($c(x, 0) = 0$) с граничным условием $c(0, t) = c_s(t)$:

$$c = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} c_s \left(t - \frac{x^2}{4D\varepsilon^2} \right) e^{-\varepsilon^2} d\varepsilon, \quad (71)$$

где $c_s(t)$ – поверхностная концентрация.

Так как $D \left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x=0} \ll J_{\text{ион}}$, то

$$c_{\text{пов}} = c(0, l) \approx \frac{J_{\text{ион}}}{S_1(t)} \left(c_{\text{пов}} \approx \frac{J_{\text{ион}}}{S_1 + \sqrt{\frac{D}{t}}} \right). \quad (72)$$

С учетом оценки констант скорости десорбции $S_T = 4 \cdot 10^{-3} \exp\left(-\frac{0,38}{kT}\right)$ и $S_p = 7 \cdot 10^{-5}$ м/с, диффузионный поток при $t < t_0$ рассчитывается следующим образом: $D \frac{\partial c}{\partial x} \sim D \frac{c_0 \cdot 0,8 - c_0 \cdot 0,024}{10^{-4}} \sim 2 \cdot 10^{-5} c_0$.

При $T = \text{const}$ поток $D \frac{\partial c}{\partial x} = c_0 \sqrt{\frac{D}{t}}$ и $S_1 c_0 \sim 3 \cdot 10^{-4} c_0$, следовательно, можно пренебречь $D \frac{\partial c}{\partial x}$ по сравнению с десорбционным потоком $S_1 c_0$. В таком случае возможно получить приближенное решение

$$\frac{c}{c_{\text{ТВ}}} \approx \begin{cases} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}, & t < t_0; \\ \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} - e^{ix+h^2D(t-t_0)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D(t-t_0)}} + hD(t-t_0) \right), & t > t_0, \end{cases} \quad (73)$$

где $h = \frac{S_1}{D}$.

Расчет можно произвести по использованной ранее аналогичной схеме ($x_i, t_i \rightarrow T_{\text{эфф}} \rightarrow D_{\text{эфф}}, S_{1\text{эфф}}, h_{\text{эфф}}, c_{\text{пов}} \rightarrow c$). Если учесть, что к моменту времени $t > 10$ с коэффициент диффузии D уменьшается на 4–5 порядков, то изменением концентрации на таких временных промежутках можно пренебречь и ограничиться при расчетах толщинами $x < 10^{-3}$ м

и временем $t \leq 10$ с. Характерные значения относительной концентрации азота в приповерхностном слое металла можно найти в табл. 18.

Таблица 18

Изменение концентрации азота в приповерхностном слое металла

Время t , с	Относительные концентрации азота $c/c_{\text{пов}}$ при заданной глубине x , м		
	10^{-6}	10^{-4}	10^{-3}
1	0,800	0,024	–
5	0,996	0,430	–
10	0,860	0,400	–

Временная зависимость (в пределах времени плазменного воздействия) абсолютных значений поверхностной концентрации – в табл. 19 и на рис. 92. Небольшое снижение концентрации к моменту ухода плазменного пятна и более существенное в последующие моменты времени обусловлены усилением роли термически стимулируемых процессов диффузии вглубь материала и десорбции с его поверхности (температура поверхности достигает максимума к моменту t_0 , а приповерхностных слоев – при $t > t_0$ – см. рис. 90, 91).

Таблица 19

Временная зависимость поверхностной концентрации азота
(в пределах времени плазменного воздействия)

Время t , с	0,1	1,0	2,6
Поверхностная концентрации азота $c_{\text{пов}}, \text{M}^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{29}$	$9,0 \cdot 10^{28}$	$8,8 \cdot 10^{28}$

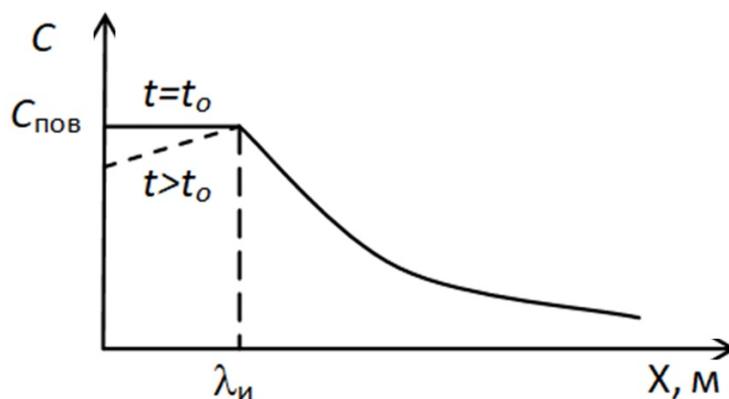


Рис. 92. Характер изменения концентрации азота по окончании времени плазменного поверхностного воздействия

В моменты времени $t > t_0$ на поверхности будет отсутствовать ионный поток ($J_{\text{ион}} = 0$). Следовательно, граничное условие можно будет представить в виде

$$D \left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x=0} = S_1 c(0). \quad (74)$$

Произведем оценку на глубину имплантации ионов:

$$-D \frac{c(\lambda) - c(0)}{\lambda_{\text{и}}} \approx S_1 c(0); \quad (75)$$

$$c(0) \approx \frac{c(\lambda_{\text{и}})}{1 + \frac{S_1}{D} \lambda_{\text{и}}}. \quad (76)$$

Так как $\frac{S_1}{D} \sim \frac{S_{\text{T}}}{D_0} \exp\left(\frac{5 \cdot 10^3}{T}\right)$, то в пределах времен роста температуры ($t \leq t_0$) отношение $\frac{S_1}{D}$ уменьшается (диффузия идет быстрее десорбции), а при последующем остывании ($t > t_0$) $\frac{S_1}{D}$ растет одновременно с убыванием $c(\lambda)$. Следовательно, поверхностная концентрация $c(0)$ ионов изменяется незначительно в течение достаточно большого промежутка времени.

Произведем оценку по десорбции:

$$2,3 \log_{10} \frac{c}{c_{\text{пов}}} = -K_1 t. \quad (77)$$

С учетом того, что $D_{\text{мин}} \sim 10^{-17} \text{ м}^2/\text{с}$, $S_{\text{мин}} \sim 10^{-5} \text{ м/с}$, константа десорбции $K_1 \sim 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (при $T = 10^3 \text{ К}$) и глубина имплантации $\lambda_{\text{и}} \sim 10^{-10} \text{ м}$. Оценки, сделанные согласно (77), свидетельствуют также о незначительном изменении поверхностной концентрации за счет десорбции с течением времени: $c = 0,99 c_{\text{пов}}(0)$ ($t = 5 \div 10 \text{ с}$) и $c = 0,92 c_{\text{пов}}(0)$ ($t \sim 100 \text{ с}$).

Произведем оценку по диффузии:

$$c(x) \sim \frac{N}{(D(t)t)^{\frac{2}{3}}} e^{-\frac{x^2}{4D(t)t}}, \quad (78)$$

где N – число частиц.

Очевидно, для моментов времени $t > t_0$ коэффициент диффузии будет уменьшаться за счет снижения температуры. Следовательно, $D(t)t \approx const \rightarrow c(x, t) \approx c(x, t_0)$. Произведем более строгую оценку. Из (78) следует, что скорость изменения концентрации меняется в соответствии с уравнением:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{Ne^{-\frac{x^2}{4D(t)t}}}{(Dt)^{\frac{5}{2}}} \left(\frac{3}{2} + \frac{x^2}{4Dt} \right) D \left(1 + t \frac{E}{RT^2} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right). \quad (79)$$

С учетом характерных значений энергии активации диффузии ($E = 7,8 \cdot 10^4$ Дж/(моль · К)) и скорости остывания поверхностного слоя ($\partial T/\partial t = -(1 \div 10) \cdot 10^2$ К/с) определим знак выражения в скобках $\left(1 + t \frac{E}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t} \right) < 0$ при $t > 1$ с. Следовательно, $\frac{\partial c}{\partial t} > 0$ при $t > 1$ с и $\frac{\partial c}{\partial t} \rightarrow 0$ ($c \rightarrow const$) при $t \rightarrow \infty$. Таким образом, азот «замораживается» в приповерхностном слое металла.

Изменение содержания азота в металле с течением времени представлен на рис. 93. Процентное содержание азота (атомное $N_{ат}$ и массовое $N_{масс}$) определялось по формулам:

$$N_{ат} (\%) = \frac{N_{масс} \cdot 100}{N_{масс} + (1 - N_{масс})0,25}, \quad (80)$$

$$N_{масс} (\%) = \frac{c_N}{c_N + 4c_{Fe}} \cdot 100, \quad (81)$$

где c_{Fe} – атомная концентрация железа ($\sim 8,7 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$).

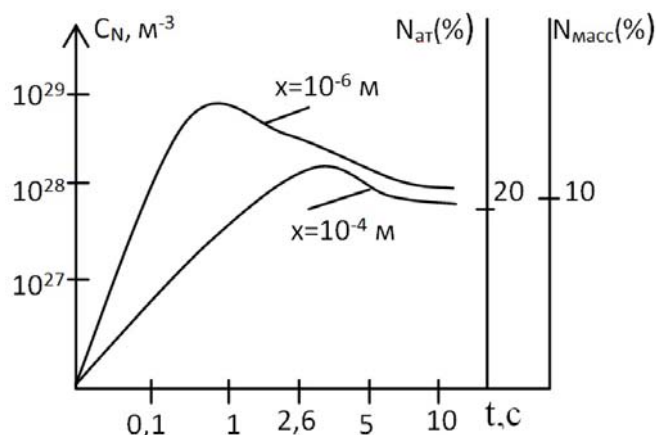


Рис. 93. Распределение концентрации атомного и массового процентного содержания азота в поверхностном слое

Результаты расчетов подтверждаются проведенными ранее исследованиями газового содержания поверхностного слоя реза металла [76]. Анализ содержания азота производился на ТС-600 анализаторе фирмы LECO по методу измерения коэффициента теплопроводности, зависящего от концентрации газа, выделившегося в процессе плавления образца. Параллельно исследовалось содержание кислорода с помощью датчика инфракрасного излучения. В зависимости от типа применяемого плазмотрона и режима обработки было выявлено увеличение массового содержания азота в 5–20 раз и кислорода в 3–10 раз по сравнению с исходным ($2,1 \pm 0,3$ (N₂), $6,3 \pm 1,2$ (O₂), %).

В случае азотирования стали следует учесть влияние углерода, который, как известно, понижает растворимость азота в металле, %:

$$\log_{10} f_N^e = e_c^N, \quad (82)$$

где f_N^e – активность азота в металле;

$$e_c^N = 0,11 \text{ при } 1200 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Для стали с 0,5 %-м содержанием углерода $f_N^e = 1,13$. Следовательно, $c_{\text{ист}} = \frac{c_N}{f_N^e} = 0,88 c_N$, т. е. содержание азота в закаливаемой стали будет на 10–12 % меньше, чем в железе.

Приведенные выше оценки содержания азота в приповерхностном слое металла свидетельствуют о том, что при остывании возможно образование нитридов железа, обладающих повышенной твердостью в кристаллическом состоянии. Оценки, сделанные по фазовой диаграмме Fe – N [78], дают возможность ожидать появления на глубине ~1–10 мкм переходов $\varepsilon_{\text{фаза}} \rightarrow \varepsilon + \xi_{\text{фаза}}$, на глубине ~100 мкм – переходов $\varepsilon \rightarrow \gamma' - \alpha'_{\text{фаза}}$, глубине ~1 мм – образования ненасыщенного α' раствора азота в железе. Известно, что $\varepsilon_{\text{фаза}}$ – соединение Fe_{3–2}N с гексагональной решеткой (4,55 ÷ 11,00 % содержание азота), $\xi_{\text{фаза}}$ – Fe₂N – устойчивая фаза с упорядоченным распределением азотных атомов (11,1 ÷ 11,3 %), γ' – Fe₄N (2,3 ÷ 2,8 %), α' – N-мартенсит. Процесс по своим результатам сходен с высокотемпературным (выше эвтектоидного превращения – 600 ÷ 1200 °C) азотированием, применяемым для ферритных и аустенитных сталей и тугоплавких металлов для повышения износостойкости в атмосфере, пресной воде и паре.

Для повышения стойкости катодов, улучшения параметров плазменной дуги и сдвига равновесия реакций взаимодействия плазмы с металлом в сторону образования нитридов, карбидов и цианидов металла и его легирующих элементов азот следует использовать в следующих смесях:

а) $N_2 - H_2$ (2 ÷ 4 %) – для светлого отжига низкоуглеродистой стали и ее азотирования (особенно для сталей с элементами, обладающими большим сродством к углероду – Cr, Ti и др.).

б) $N_2 - H_2 - CH_4$ (до 10 ÷ 15 %) – для науглероживания за счет присутствия углеводородов по реакциям $2CO \leftrightarrow CO_2 + C \rightarrow C + 3Fe \rightarrow Fe_3C$ и $CH_4 \leftrightarrow C_{\gamma-Fe} + 2H_2$ со сдвигом равновесия вправо.

Азот следует использовать с газами восстановителями (H_2 , CO, CH_4) при условии глубокой осушки. Можно использовать аммиак (чистый либо в смеси с водородом и смесями, приведенными выше). Аммиак диссоциирует легче, чем азот ($2NH_3 \rightarrow N+N+6H$ и $2NH_3 \rightarrow N_2+3H_2$), следовательно, возможно увеличение плотности ионных потоков $J_{\text{ион}}$. Использование смеси (80 % N_2 , 20 % CH_4 или CO_2) приводит к углеродоазотированию. Повышение концентрации углеродсодержащих газов (до 40 %) увеличивает область существования ϵ -фазы и облегчает образование цементита, нитрокарбида $Fe_3(C, N)$ и карбоксинитридных фаз $Fe_3(C, O, N)$. Карбоксинитридная фаза с 0,8 ÷ 2,5 % C содержит меньше азота (4,5 ÷ 6 %), чем азотистая ϵ -фаза (9 ÷ 10 %). Меньшее содержание азота в ϵ -фазе повышает ее сопротивление хрупкому разрушению. Под карбонитридным слоем образуется зона внутреннего азотирования – твердый раствор азота в α -Fe, γ' -фаза и нитриды легирующих элементов.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что в моменты времени, превышающие длительность поверхностного плазменного воздействия, концентрация азота в металле уменьшается за счет десорбции с поверхности и диффузии в металл. Однако скорости диффузионных и поверхностных процессов резко уменьшаются вследствие быстрого охлаждения детали. Таким образом, азот «замораживается» в металле. Вместе с тем азот успевает имплантироваться и раствориться в поверхностном (до 100 мкм) слое металла до концентраций, необходимых для образования нитридов железа различного фазового состава, обладающих повышенной твердостью в кристаллическом состоянии и ненасыщенного раствора азота в железе (N-мартенсит) на глубинах до 1 мм. Следовательно, использование азота или воздуха в качестве плазмообразующего газа приводит к повышению поверхностной твердости и износостойкости металла.

Применение плазменной струи на основе азота может быть выполнено для получения металла с повышенной износостойкостью поверхностного слоя. В случае добавки в смесь углеродсодержащих газов можно повысить твердость и предел выносливости поверхности металла. Например, использование рассмотренной ранее конструкции магнитоуправления дугой в совокупности с оригинальным устройством для химико-термической обработки (ХТО) металлических деталей (патент авторов [79]) позволяет получать поверхности с подобными характеристиками. Конструкция устройства для ХТО состоит из камеры и плазмотрона для нагрева поверхности металла и подачи насыщающего газа в камеру, причем стенки камеры выполнены с уплотнением между ее торцом и обрабатываемой деталью. Камера выполнена с осевым отверстием, в котором размещена направляющая втулка, при этом плазмотрон размещен во втулке с возможностью осевого перемещения перпендикулярно обрабатываемой детали, что позволяет менять параметры плазменной дуги и, соответственно, управлять процессом модификации поверхностных свойств материала. Насыщающий газ поступает в камеру по газоздушному тракту плазмотрона, при этом возникающее разряжение в плазменной струе обеспечивает дополнительный приток в зону обработки.

При испытаниях устройства по обработке цилиндрической детали из стали 35Х с размерами упрочняемой части $\varnothing 330 \times 500$ мм смесью плазмообразующего (насыщающего) газа (аргон (60 %), азот (30 %), окись углерода (5 %) и метан (5 %)) твердость поверхности возросла от $28 \div 33$ HRC до $55 \div 60$ HRC при толщине упрочненного слоя $0,2 \div 0,3$ мм. Процесс имел следующие параметры: ток и напряжение дуги – 300 А и 35 В, расход газовой смеси – $5 \div 7$ л/мин, ширина обрабатываемой за один проход полосы – $10 \div 12$ мм, перекрытие полос – $50 \div 60$ %, скорость вращения детали – 2 об./мин. При обработке плазмо-насыщающей смесью аргона (80 %) и азота (20 %) твердость азотированного слоя возросла от $28 \div 33$ HRC до $48 \div 51$ HRC при толщине слоя $0,15 \div 0,20$ мм. Избыточное давление в камере стравливалось через уплотнение в зоне контакта камеры с деталью.

Таким образом, применяя различные способы плазменно-дугового воздействия, путем оптимизации скоростей нагрева и охлаждения, плотности потока энергии, управления пространственным распределением тепловой мощности можно реализовать как различные механизмы термоупрочнения, так и снизить негативные эффекты других методов термообработки.

Глава 5. ОСНОВЫ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

5.1. Вредные и опасные факторы плазменных технологий

Плазменные технологии, являясь эффективным источником воздействия на материалы, оказывают неблагоприятное влияние на окружающую среду и рабочий персонал. Проблему негативного воздействия на сотрудников применяемых в рабочей зоне электроплазменных технологий начали изучать в 70-х гг. XX в. Так, относительно серийно выпускаемого в СССР плазменного оборудования ВНИИ охраны труда ВЦСПС (Ленинград), НИИ охраны труда (Свердловск) и Московский НИГИ им. Ф. Ф. Эрисмана проводили комплексные санитарно-гигиенические оценки процессов плазменно-механической обработки, резки и сварки, в ходе которых было выявлено большое количество вредных и опасных производственных факторов (табл. 20 [26], рис. 4).

Таблица 20

Вредные и опасные факторы в технологиях высокоэнергетического
воздействия на материалы

Технология	Вредные производственные факторы										Опасные факторы			
	Вредные вещества	Излучение в оптическом диапазоне			Электромагнитные поля	Магнитные поля	Ионизирующее излучение	Шум	Ультразвук	Статические нагрузки	Электрический ток	Искры, брызги и выбросы расплавленного металла	Движущиеся механизмы и изделия	Повышенное к атмосферному давление
Ультрафиолетовое	Видимое	Инфракрасное												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Плазменная резка	хх	х	хх	хх	–	–	х	хх	хх	хх	хх	хх	х	хх
Плазмохимия	хх	х	хх	хх	хх	хх	х	хх	хх	–	хх	–	–	хх

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Сварка: плазменная	xx	x	xx	xx	—	—	x	xx	xx	—	xx	xx	x	xx
ультразву- ковая	x	—	—	—	—	—	—	xx	xx	—	x	—	x	—
ручная ду- говая	xx	xx	xx	xx	—	—	—	x	—	x	xx	xx	x	—
электро- шлаковая	xx	x	x	xx	—	—	—	x	—	—	xx	xx	xx	—
контактная	xx	—	—	x	x	x	—	x	—	x	xx	x	xx	x
электрон- но-лучевая	x	xx	xx	—	—	—	xx	x	—	—	xx	—	x	x
диффузи- онная	—	—	—	—	xx	—	—	x	xx	—	xx	—	xx	x
высоко- частотная	—	—	—	—	xx	—	—	—	—	—	xx	—	x	—
газовая	x	xx	xx	xx	—	—	—	x	—	x	x	xx	x	xx
лазерная (+ резка)	x	x	x	xx	—	—	—	x	—	—	xx	—	x	xx
Кислород- ная резка	xx	x	xx	xx	—	—	—	xx	x	x	x	xx	x	xx
Пайка	xx	—	—	—	—	—	—	—	—	—	xx	—	—	—
Наплавка	xx	x	xx	xx	—	—	—	—	—	x	xx	x	x	x
Напыление	xx	xx	x	x	—	—	—	xx	xx	—	xx	xx	x	x

Примечание: xx – интенсивный фактор, x – умеренный фактор, (–) – незначительный фактор или его отсутствие.



Рис. 94. Вредные и опасные факторы плазменных технологий

Очевидно, что комплекс неблагоприятных факторов, сопровождающих плазменно-дуговые процессы (см. табл. 20), во многом схож с комплексом, сопутствующим сварочным и лазерным технологиям, по причине общности используемого принципа высокоэнергетичного концентрированного воздействия на материалы. Тем не менее именно плазменные процессы (особенно технология плазменной разделки металлов) требуют повышенного внимания к нормам обеспечения условий безопасного труда, так как сопровождаются наибольшим количеством факторов вредного и опасного воздействия на рабочий персонал. Соблюдение этих норм обеспечивается целым комплексом конструкторских, санитарно-технических и организационных мероприятий.

Влияние вредных факторов на безопасность труда выражено не так сильно, как опасных, однако их длительное воздействие на организм человека на уровнях, превышающих предельно допустимые, может привести к различным заболеваниям (пневмокониозу, вазовегетативной дистонии, астеноневротическому синдрому, полиневриту, ожогу глаз и т. д.). Среди таких факторов большую роль играет *пылегазовыделение*, вызывающее заболевания органов дыхания. С этой точки зрения, в числе плазменных технологий особенно опасными являются ручная плазменная резка и напыление металлов. В первом случае в процессе испарения, конденсации паров и последующей коагуляции частиц образуются высокодисперсные аэрозоли окислов металлов. Будучи хорошими сорбентами, окислы металлов находятся в значительной связи с газами, образуя «сварочный аэрозоль», вдыхание которого приводит к появлению так называемой лихорадки сварщиков. Во втором случае испарение присутствует в гораздо меньшей степени, а преобладают процессы сфероидизации частиц напыляемого материала с образованием газопорошковой смеси. Мелкодисперсная пыль с размерами частиц 1–5 мкм (особенно алюминий) вместе с раздражающими газами легко проникают в глубокие отделы легких, вызывая развитие ларингитов, а при совместном действии с нитрогазами – ларингоспазмы.

В качестве эффективного газа при плазменной резке обычно употребляется воздух, а сам процесс сопровождается образованием вредных газов: окиси азота NO, двуокиси азота NO₂, озона O₃, окиси углерода CO, дыма (пары металлов) и аэроионов. В соответствии с СН 245–71 «Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий»

и ГОСТ 12.1.007–76 «Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности» эти вредные вещества по степени воздействия на организм человека относятся к разным классам опасности: от 1-го (вещества чрезвычайно опасные) с предельно допустимой концентрацией (ПДК) менее 0,1 мг/м³ до 4-го (вещества малоопасные) с ПДК более 10 мг/м³. Газы, используемые в плазменной резке, не являются горючими. Однако в случае образования смеси с объемом содержания водорода 4 % и при температуре обработки 560 °С существует вероятность образования гремучего газа. Такой газ может также образовываться при выполнении плазменной резки под водой, которая тем не менее является одним из наиболее эффективных способов комбинированного снижения эффекта действия вредных факторов плазменного производства.

Предельно допустимые концентрации вредных веществ в рабочей зоне, характерных для процессов плазменной резки, представлены в табл. 21. Следует отметить, что нормы по ПДК различных вредных элементов в России более жесткие, чем в странах Евросоюза, США и Японии, что не снижает опасности их воздействия ввиду низкой производственной дисциплины соблюдения этих норм на практике. Проведенные в Германии и Японии исследования по наличию вышеупомянутых вредных газов в процессе плазменной резки металлов показали их характерные концентрации вокруг рабочего места, на расстоянии 500–600 мм от места резки (табл. 22).

Таблица 21

ПДК вредных веществ в воздухе рабочей зоны

Вещество	ПДК ₃ мг/м ³	Агрегатное состояние в условиях производства	Класс опасности	Особенности действия на организм
1	2	3	4	5
Двуокись азота	2, 000	Пары или газы	3	Остронаправленное
Ангидрид хромовый	0,010	Аэрозоль	1	
Бериллий и его соединения	0,001	Аэрозоль	1	
Ванадий и его соединения	0,100–0,500	Аэрозоль	1–2	

Окончание табл. 21

1	2	3	4	5
Вольфрам, карбид вольфрама	6,00	Аэрозоль	4	Фиброгенное
Кадмий и его неорганические соединения	0,050/ 0,010	Аэрозоль	1	
Кобальт	0,500	Аэрозоль	2	
Марганец	0,100– 0,200	Аэрозоль	2	
Медь	0,500	Аэрозоль	2	
Молибден и его соединения	1,000– 6,000	Аэрозоль	3	
Никель и его соединения	0,500	Аэрозоль	1	
Озон	0,100	Пары или газы	1	Остронаправленное
Свинец и его соединения	0,010/ 0,050	Аэрозоль	1	
Углерода оксид	200,000	Пары или газы	4	
Алюминий и его сплавы	2,000	Аэрозоль	3	Фиброгенное
Железа триоксид	6,000	Аэрозоль	4	Фиброгенное
Титан и его диоксид	10,000	Аэрозоль	4	
Феррохром	2,000	Аэрозоль	3	
Чугун (смесь с электрокорундом)	6,000	Аэрозоль	4	
Хроматы, бихроматы	0,010	Аэрозоль	1	Аллергенное
Дихрома триоксид	1,000	Аэрозоль	3	Аллергенное
Цинка оксид	0,500	Аэрозоль	2	

Таблица 22

Концентрации вредных веществ в рабочей зоне

Единицы измерения	O ₃	NO ₂	NO	CO	Пары металлов
мг/м ³	0,04–0,60	0,80–0,90	1,23–122,00	22,80	0,90–12,30
ppm	0,03	28,00		15,00	–

Эффект *комбинированного воздействия* пыли и газов при плазменной обработке стимулируется за счет фотохимических реакций под влиянием ультрафиолетового излучения, особенно сильно выраженного (в 25–30 раз более интенсивно, чем в воздухе) при работе плазменной дуги в среде защитных газов. В этом случае образуются токсичные компоненты в виде окислов азота и озона (до 10 ПДК в рабочей зоне при максимуме скорости образования в диапазоне 200–300 мкм), влияние которых на организм трудно дифференцировать, а совместный эффект воздействия вызывает раздражение слизистых оболочек и изменения в организме по типу фиброза (при многократном воздействии). Поскольку влияние газопорошковых смесей на организм сочетается с шумовым, ультразвуковым и электромагнитным воздействиями, чувствительность организма к отдельным компонентам этих смесей может изменяться, как правило, в сторону уменьшения их ПДК. В ситуации комбинированного воздействия физических и химических факторов среды наблюдается «синдром взаимного отягощения», когда повышенная интенсивность одного из них понижает общую реактивность организма, увеличивая тем самым его чувствительность к действию других факторов и вызывая эффект их «взаимопотенцирования». Роль газового фактора можно считать ведущей в технологиях сфероидизации, плазменной металлургии и плазмохимии, обезвреживании продуктов переработки отходов (дожиг отходящих газов), когда уровень шума находится в пределах нормативных величин.

Очевидно, что решая вопрос применения на производстве плазменной резки металла, необходимо предварительно продумать методы очистки производственных помещений от вредных газов, характерных для данного процесса, а в ситуации с плазменным напылением – технологию защиты от порошкообразной пыли. Следует также обращать внимание на продукты плазмохимической переработки и вещества, образующиеся при использовании плазмотронов в экологических целях (при переработке бытовых и производственных отходов). Характеризуя в целом эффект влияния газопылевого фактора, следует отметить его широкую вариативность, обусловленную в первую очередь различием в спецификациях обрабатываемых материалов. Это осложняет детальный учет данного фактора в каждом конкретном случае плазменно-дугового воздействия, но позволяет выработать меры, способствующие снижению его негативного влияния.

При работе с открытой плазменной дугой необходимо защищать оператора от воздействия *электромагнитного излучения*, интенсивность которого в видимом, инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах во много раз превышает физиологическую норму, достигая значений 10^7 нит по яркости. Для сравнения: типичная яркость дисплея компьютера колеблется от 200 до 300 нит. Яркость дуги в среде защитных газов возрастает по сравнению с ручными технологиями. Особенно это заметно при плазменной обработке алюминия, когда возникает эффект многократного отражения на частицах алюминиевой пыли. В результате такого воздействия могут возникать патологии органов зрения (ожог роговицы, кератит, конъюнктивит) и кожи. Следует учитывать и тепловой эффект, снижающий защитную реакцию организма (допустимая интегральная интенсивность теплового облучения не должна превышать 350 Вт/м^2). Источником такого воздействия может стать нагретый металл.

При использовании высокочастотных (ВЧИ) плазмотронов, работающих на токах с частотой 0,06–50,00 МГц и сверхвысокочастотных (СВЧ) плазмогенераторов (частоты 900–2450 МГц) следует учитывать наличие *переменных электромагнитных полей*, влияние которых на организм человека зависит от мощности устройства и регламентируется по ГОСТ 12.1.006–76 и СН 1742–77 (табл. 23).

Таблица 23

Предельно допустимые напряженности электрических
и магнитных полей

Параметр	Значение параметра						
	0	50	(0,06– 1,50)· 10^6	(1,5– 3,0)· 10^6	(0,3– 3,0)· 10^7	(3– 5)· 10^7	(5–30)· 10^7
Частота поля, Гц	0	50	(0,06– 1,50)· 10^6	(1,5– 3,0)· 10^6	(0,3– 3,0)· 10^7	(3– 5)· 10^7	(5–30)· 10^7
Напряженность электрического поля, В/м	–	$5 \cdot 10^3$	50	50	20	10	5
Напряженность магнитного поля, А/м	$8 \cdot 10^3$	–	5	–	–	0,3	–

Применение ручных и полуавтоматических методов плазменного воздействия должно учитывать и *статическую нагрузку* на руку плазморезчика, так как вес ручных плазмотронов с подводщими коммуникациями может достигать нескольких килограммов. Длительная работа в таких режимах может привести к заболеваниям нервно-мышечного аппарата плечевого пояса. Высокая скорость плазменной резки несколько снижает остроту влияния данного фактора, но требует регламентации режимов работы или применения устройств, уменьшающих статическую нагрузку.

Универсальными мерами по предотвращению комплексного негативного воздействия на персонал должны стать рекомендации по автоматизации электроплазменных процессов, по использованию средств индивидуальной защиты (СИЗ) и оборудованию рабочего места, предотвращающему распространение и усиление вредных факторов в рабочей зоне. Также необходим регламент работы, ограничивающий превышение рекомендуемых безопасных доз облучения.

Опасные факторы электроплазменных процессов несут за собой риск внезапного поражающего воздействия на организм человека, вплоть до летального исхода. К сожалению, большая электрическая мощность, потребляемая плазмотронами и обеспечивающая высокую плотность тока плазменной дуги ($j \sim 10^5 \text{ А/см}^2$), является технологически необходимым фактором, определяющим производительность соответствующих процессов. За последние 10–15 лет отечественными и зарубежными производителями создано большое число плазмотронов, энергоэффективность которых заметно выше, чем у применяемых в 80–90-е гг. XX в. Тем не менее большие токи (до 400 А при плазменной резке) и напряжения (250–300 В), а также высокая концентрация термокинетической энергии в плазменной дуге (струе) и продуктах ее воздействия (искрах, брызгах и выбросах расплава), возможность взрыва газовых баллонов и систем, находящихся под давлением, необходимость применения сложных механизмов перемещения деталей и самих плазмотронов по-прежнему требуют соблюдения очень жестких норм и требований безопасности труда. В настоящее время в России разработка и эксплуатация плазменных установок регламентируются «Санитарными правилами на устройство и эксплуатацию оборудования для плазменной обработки металлов» № 4053–85, ГОСТами 12.3.039–85 «Система стандартов безопасности труда. Плазменная обработка. Требования безопасности», ГОСТ 12221–79 «Аппаратура для плазменно-дуговой резки металлов. Типы и основ-

ные параметры», а также большим числом систем стандартов безопасности труда, санитарных норм и правил, касающихся работы в зоне применения плазменных технологий.

Комплексный учет вредных и опасных факторов, характерных для электроплазменных технологий, требует использования как специфичных [80], так и универсальных мер по борьбе с их негативным влиянием, что позволит в конечном итоге сделать их применение не только эффективным, но и безопасным.

5.2. Анализ факторов оптического излучения технологий плазменной резки

Плазменная дуга является источником *излучения* в диапазоне от инфракрасного до рентгеновского. Так как характерные температуры, сопровождающие процессы работы с открытой плазменной дугой (резка, сварка), составляют 8–15 тыс. К, то согласно закону Вина, максимум теплового излучения должен находиться в ультрафиолетовом диапазоне длин волн $\lambda_{\max} = 190\text{--}360$ нм, который является и наиболее опасным из всех видов излучения плазменной дуги. Рентгеновское излучение, соответствующее температурам 10^5 К и выше, в низкотемпературных плазменных технологиях присутствует в пренебрежимо малых количествах. Тем не менее при неупругих столкновениях электронов с характерными для плазменно-дуговых процессов энергиями в 100–400 эВ с атомами вещества возможен эффект ионизации среды и возникновение небольших потоков β - и γ -излучения (мощность экспозиционной дозы не должна превышать 0,4 мР/ч на расстоянии 0,05 м от корпуса установки или защитной камеры). С точки зрения здоровья, наиболее опасна область ультрафиолетовых длин волн от 250 до 300 нм (табл. 24), которые могут вызвать ожоги недостаточно защищенного кожного покрова. При этом излучение на длине волны способствует образованию озона, имеющего свои особенности негативного воздействия на организм.

Помимо интенсивности облучения в ультрафиолетовом диапазоне следует обращать внимание на плотность потока теплового излучения, регламентируемого в соответствии с ГОСТ 12.1.005–88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» и ГОСТ 12.4.123–83 «ССБТ. Средства коллективной защиты от инфракрасных излучений. Общие технические требования» для видимого и коротковолнового инфракрасного диапазонов (табл. 25 [81]).

Таблица 24

Допустимые уровни оптической облученности плазморезчиков

Область спектра	Область излучения	Длина волны, нм	Допустимая плотность потока излучения, Вт/м ²
Ультрафиолетовая	С	200–280	0,001
Ультрафиолетовая	В	280–315	0,010
Ультрафиолетовая	А	315–400	10,000
Видимая	–	400–760	В соответствии с СП 52.13330.2016
Инфракрасная	–	760–1000	140,000

Таблица 25

Допустимые уровни теплового облучения плазморезчиков*

Облученность тела, %	Предельная интенсивность, Вт/м ²
> 50	35
25–50	70
< 25	100
< 25 при наличии источника типа нагретого металла, «открытого» пламени и т. п. (при использовании СИЗ)	140

* В соответствии с ГОСТ 12.1.005–88.

Авторами проведен комплекс экспериментальных исследований технологий плазменной резки, в ходе которого определялись освещенность (E , лк) в видимой области спектра (380...760 нм) и энергетическая освещенность (E_e , мВт/м²) в спектральном диапазоне УФ-излучения (280–400 нм, зоны А + В) с помощью люксметра-УФ-радиометра ТКА-ПКМ (06) в соответствии с рекомендациями ГОСТ 24940–96, СП 52.1333.2016 и СН4557–88. Следует, однако, заметить, что на точность измерения характеристик излучения плазменной дуги сильно влияют характер и скорость движения плазмотрона в процессе резки, большое количество искр и брызг металла в зоне измерения, из-за чего значения определяемых величин могут изменяться в разы импульсным образом. По этой причине приходилось корректировать методику измерения, исключая из обрабатываемых данных пиковые значения, получаемые в процессе измерения, а также перемещая датчик параллельно движущемуся плазмотрону. Результаты измерений

освещенности рабочей зоны (на расстояниях $r = 0,35$ и $1,00$ м от источника излучения – плазмотрона) в оптическом диапазоне представлены в табл. 26, в ультрафиолетовом диапазоне – в табл. 27.

Таблица 26

Результаты экспериментального исследования излучения плазмотронов в видимом диапазоне оптического излучения

Диаметр сопла d_c , мм	Мощность N , кВт	Сила тока дуги I , А	Напряжение на дуге U , В	Освещенность E , лк	
				$r = 0,35$ м	$r = 1$ м
Плазмотрон ПМВР-М					
2	19,8	90	220	270	20
	20,0	100	200	260	30
	22,0	110	200	160	70
	23,1	110	210	600	–
	23,4	130	180	180	20
	23,4	130	180	210	40
	$\langle N \rangle = 22,0$	$\langle I \rangle = 110$	$\langle U \rangle = 200$	$\langle E \rangle = 280 \pm 150$	$\langle E \rangle = 36 \pm 20$
3	23,1	140	165	480	50
	32,4	180	180	550	145
4	19,2	160	120	800	7
	28,8	160	180	950	230
Плазмотрон ПМВР-5.1 (2М)					
2	14,4	80	180	85–105	35
	14,1	88	160	200–250	65
	–	150	–	510–540*	200–210*
	$\langle N \rangle = 14,2$	$\langle I \rangle = 84$	$\langle U \rangle = 170$	$\langle E \rangle = 160 (280^*)$	$\langle E \rangle = 50 (100^*)$
3	22,4	160	140	600	260
	$\langle N \rangle = 29,3$	$\langle I \rangle = 170$ (180)	$\langle U \rangle = 175$ (180)	$\langle E \rangle = 410 (500)$	$\langle E \rangle = 53 (60)$
	30,4	190	160	460–520	–
	30,4	190	160	520–960	–
4	30,4	190	160	280–350	–
Плазмотрон Kjellberg РВ S-45W					
1	10,8	90	120	140–200 (max–400)	–
2**	12,6	90	140	360–400	–
4. Плазмотрон ПМВР-9.1					
1	13,1	75	175	250–350	–

* Расчет по трем измерениям.

** Косой рез под сварку.

Таблица 27

Результаты экспериментальных исследований излучения
плазмотронов в ультрафиолетовом диапазоне оптического излучения

Ди- аметр сопла d_c , мм	Мощность N , кВт	Сила тока дуги I , А	Напряжение на дуге U , В	Энергетическая освещен- ность E_e , мВт/м ²		
				$r = 0,35$ м	$r = 1$ м	
1	2	3	4	5	6	
1. Плазмотрон ПМВР-М						
2	19,8	90	220	580	30	
	20,0	100	200	300	30	
	20,0	100	200	400	20	
	21,0	105	200	–	95	
	22,0	110	200	250	100	
	22,0	110	200	300	–	
	21,6	120	180	700	105	
	23,4	130	180	200	20	
	23,4	130	180	130	30	
	$\langle N \rangle = 21,5$	$\langle I \rangle = 110$	$\langle U \rangle = 195$	$\langle E \rangle = 360 \pm 150$	$\langle E \rangle = 50 \pm 30$	
3	23,1	140	165	320	40	
	32,4	180	180	500	30	
	32,4	180	180	–	90	
		$\langle N \rangle = 29,3$	$\langle I \rangle = 170 (180)$	$\langle U \rangle = 175 (180)$	$\langle E \rangle = 410 (500)$	$\langle E \rangle = 53 (60)$
4	19,2	160	120	680	9	
	28,8	160	180	1500	290	
2. Плазмотрон ПМВР-5.1(2М)						
2	14,4	80	180	60	15	
	14,4	80	180	50	10	
	14,4	80	180	300–380	80–140	
	14,1	88	160	320–360	35	
		$\langle N \rangle = 14,2$	$\langle I \rangle = 82$	$\langle U \rangle = 175$	$\langle E \rangle = 200 \pm 180$	$\langle E \rangle = 40$ (20 ± 14)
		30,4	190	160	360–580 (max – 1000)	–
3	22,4	160	140	600	260	
	30,4	190	160	170–250 (max – 1450)	–	
4	30,4	190	160	340–620 (max – 1280)	–	

1	2	3	4	5	6
3. Плазмотрон Kjellberg PB S-45W					
1	10,8	90	120	220–240 (max – 1000)	–
2	12,6	90	140	300–360* (max – 1000)	–
4. Плазмотрон ПМВР-9.1					
1	13,1	75	175	230–260 (max – 450– 700)	–
1	13,1	75	175	450–550*	–

* Косой рез под сварку.

Проведенные исследования факторов освещенности рабочей зоны, помимо упомянутых выше особенностей измерения, выявили существенный динамический характер излучения как в видимом, так и в ультрафиолетовом диапазоне электромагнитного спектра, влияние объема открытой части плазменной дуги и площади ее излучающей поверхности. Например, фиксируемое импульсное воздействие в начальный момент врезки плазменной дуги в металл в 4–5 раз превосходило средние значения освещенности в процессе резки, когда зазор сопло – металл составлял минимальное значение (~5 мм). Существенно (в разы) возрастал уровень освещенности и при увеличении диаметра сопла, а, следовательно, объема и поверхности излучения. Отметим, что излучение плазменной дуги в среднем оказалось по упомянутым причинам приблизительно в 2 раза менее интенсивным, чем при сварке плавящимся электродом.

В целом измерения освещенности в видимом диапазоне спектра показали значения от 200 до 1000 лк на расстоянии 0,4 м от плазменной дуги. При этом наименьшая освещенность (менее 250 лк) была зафиксирована при резке на соплах диаметром 2 мм плазмотроном ПМВР-5.1(2М), что оказалось даже меньше уровня, регистрируемого при работе Kjellberg PB S-45W и ПМВР-М (около 300 лк) на соплах с сопоставимыми диаметрами. Освещенность при работе на соплах диаметром 3 мм составила порядка 500–600 лк, диаметром 4 мм – 800–1000 лк.

В ультрафиолетовом диапазоне минимальные уровни излучения были зафиксированы также при резке на соплах диаметром 1–2 мм ($200\text{--}400\text{ мВт/м}^2$) с общей тенденцией к увеличению при возрастании диаметра сопла ($400\text{--}600\text{ мВт/м}^2$ для сопел диаметром 3 мм и $600\text{--}1500\text{ мВт/м}^2$

для сопел диаметром 4 мм). Отмечена также тенденция увеличения освещенности при разделке металла под сварку, когда необходимость выполнения косого реза вызывает увеличение длины дуги, а, следовательно, и уровня излучения.

Анализ физических причин генерации оптического излучения плазменной дугой показал, что геометрические размеры дуги существенно влияют на интенсивность излучения. Размеры дуги, в свою очередь, зависят от конструктивных и технологических особенностей ее сжатия и стабилизации. Исходя из этого, а также на основе анализа известных моделей шумоизлучения для струйного истечения, характерного для двойных сопел, был сделан вывод, что внедрение плазматронов с двухконтурным способом подачи газа (формирующим и стабилизирующим плазменную струю ГВТ) способно снизить уровень оптического и акустического излучения, повысив тем самым безопасность их применения. При одинаковых внешних размерах двойного сопла и максимальных газодинамических параметрах потоков меньшая акустическая мощность генерируется соосными струями со скоростями истечения из внешнего сопла, большими, чем из основного. Для соосных струй с противоположным соотношением скоростей пониженные уровни шумоизлучения (особенно в области высоких частот) наблюдаются для сопел с относительно широким внешним диаметром, что связано с существенным снижением градиента средних скоростей при смешении внутреннего потока с окружающей средой и, следовательно, снижением интенсивности турбулентных пульсаций скорости. Применение подобных мер, например, в технологии узкоструйной плазмы, способно снизить интенсивность излучения в оптическом диапазоне, тем самым уменьшив вредное воздействие на плазморезчика. Подобное снижение может быть учтено при оценке экономической эффективности проектирования и использования защитных средств и норм безопасного пребывания в рабочей зоне.

5.3. Причины возникновения и методы борьбы с шумовым фактором плазменных технологий

Отдельного внимания заслуживает *повышенное шумовыделение* – характерный фактор для большинства плазменных процессов (табл. 20 и рис. 95 [4]).

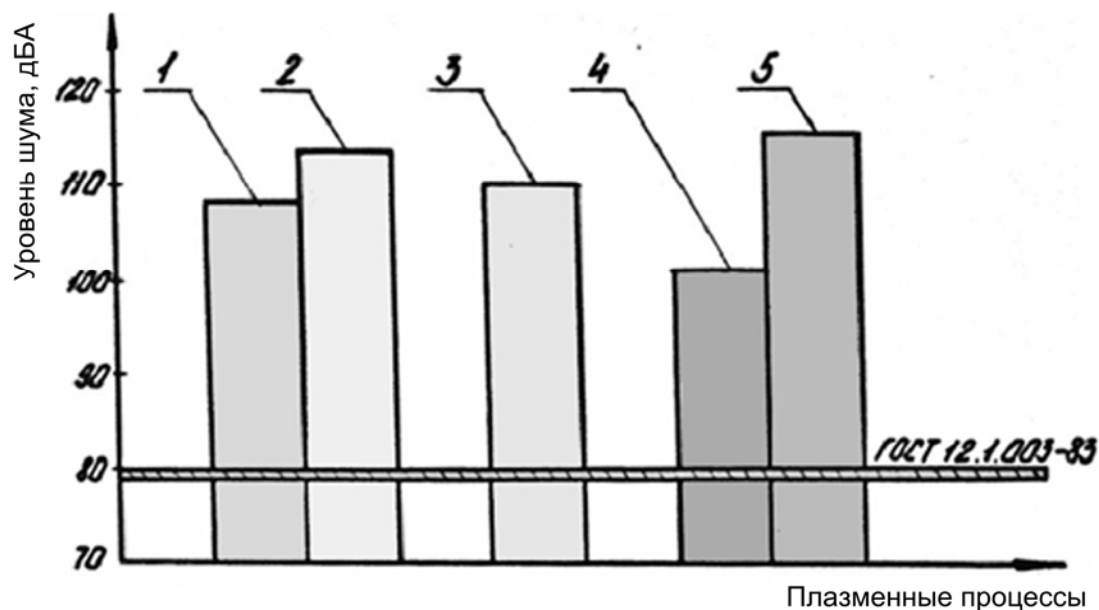


Рис. 95. Акустическая характеристика (уровень звука) процессов плазменной обработки:

1 – плазменная резка (портальная машина ППлЦ-2,5 и шарнирная машина ШПлМ-1-4-1); 2 – плазменно-механическая обработка; 3 – плазменное напыление; 4 – плазмотрон в камере; 5 – плазмотрон без камеры

Решением проблемы акустической безопасности электроплазменных процессов авторы книги начали заниматься с 80-х гг. XX в. В связи с появлением в XX в. новых технологий плазменной резки, а также разработки новых плазмотронов для данных технологий был проведен дополнительный комплекс экспериментальных исследований. Для выявления и анализа источников акустического излучения определялись следующие характеристики звукового поля: спектральные (уровень звукового давления (УЗД) L_m , дБ, уровень звука (УЗ) L_A , дБА), энергетические (уровень звуковой мощности (УЗМ) L_p , дБ) и пространственные (зоны одинакового уровня шума и диаграммы направленности излучения звука). В процессе измерений использовался как ориентировочный метод, согласно ГОСТ 12.1.028–80, так и точные методы исследований, которые регламентируются ГОСТ 12.1.024–81 и ГОСТ 12.1.025–81. В качестве объекта изучения были выбраны рассмотренные ранее по газодинамическим критериям современные дуговые плазмотроны типа ПМВР-М, ВПР-410, ПЗ-400ВА, РПВ-401 и серийно выпускаемый с 80-х гг. XX в. ПВР-402У4. Для сравнения был взят плазмотрон РВ S-45W производства компании Kjellberg (Германия).

На рис. 96 представлены основные источники шума в зоне плазменной резки и факторы, влияющие на его генерацию. Непосредственно в зоне плазменной обработки шум образуется на нескольких участках:

- 1) непосредственно внутри плазмоторона (70–72 % общей звуковой мощности рабочей зоны);
- 2) турбулентным газодинамическим потоком плазменной струи;
- 3) в щели разрезаемого металла в процессах резки;
- 4) в области за разрезаемым металлом.



Рис. 96. Источники и факторы шума в зоне плазменной резки

Спектрограммы шума, создаваемого различными источниками в пределах рабочей зоны, свидетельствуют, что основным источником шума является плазмоторон (рис. 97). При этом наблюдается высокий общий уровень звукового давления, достигающий 115–125 дБ, с превышением допустимых значений в области средних звуковых частот (до 1 кГц) на 4–7 дБ, на низких частотах ультразвукового диапазона (8–16 кГц) – на 30–35 дБ. В нормируемом диапазоне слышимых (до 16 кГц) и низких ультразвуковых частот (до 31,5 кГц) уровень звуковой мощности во многом определяется дискретными тонами, превышающими в своих пиковых значениях средний уровень на 10–15 дБ, которые возникают уже при малых давлениях плазмообра-

зующего газа и маскируются турбулентным шумом струи при увеличении давления. Частота и интенсивность этих пиков зависят от режимов обработки (температуры и скорости плазменной струи, давления и типа плазмообразующего газа) и конструкции плазмотрона, сохраняя в целом свой периодический характер для отдельно выбранной конструкции.

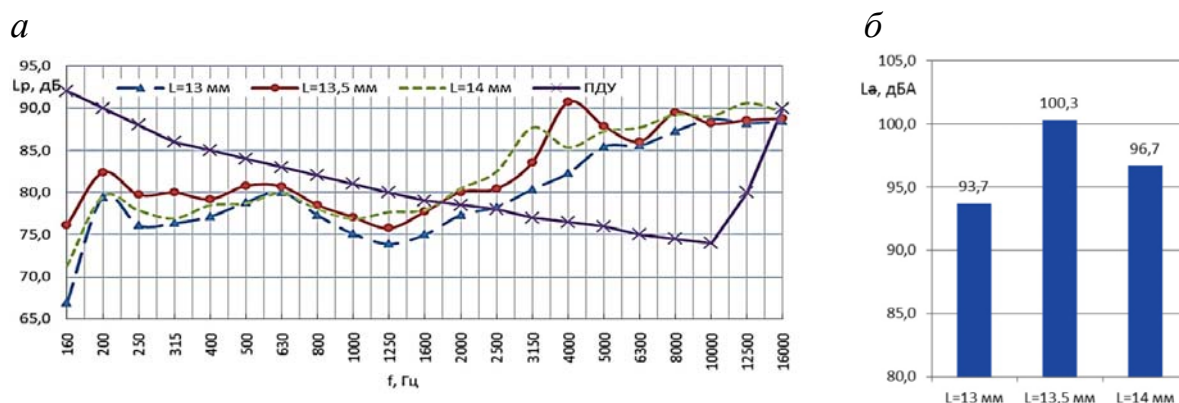


Рис. 97. Уровни звуковой мощности и давления плазмотрона ПМВР-М в зависимости от расстояния L от среза сопла до катода (режим «холодной» струи, $P_{вх} = 0,4$ МПа, нормируемый звуковой диапазон (до 8 кГц))

Процессы акустической генерации существенным образом зависят от конструктивных особенностей плазмотронов и технологических параметров их применения. Несмотря на конструктивное сходство, каждая из моделей плазмотронов имеет свои специфические особенности (длины отдельных участков, диаметры и площади проходных сечений, профили сопел, углы закрутки в завихрителе и т. д.), которые влияют на характер течения ПОГ, а, следовательно, и на уровень аэродинамического шума. Например, изменение профиля соплового узла за счет варьирования расстояния L от среза сопла до катода приводит к появлению тональных составляющих в спектре шумоизлучения и изменению уровня звукового давления (см. рис. 97). Фактически это свидетельствует о наличии резонансного механизма возбуждения дискретных тонов в области высоких (до 10 кГц) звуковых частот, определяемого геометрией ГВТ плазмотрона, и в частности его соплового узла.

Общий уровень излучения в ультразвуковой области, как показали исследования, определяется особенностями аэродинамического

струйного механизма образования шума высокоскоростными турбулентными струями. При этом появление серии дискретных тонов излучения в ультразвуковой области также связано с резонансными явлениями в сопловом узле плазмотрона.

Помимо конструктивных особенностей было исследовано влияние технологических факторов на излучение плазмотронов. Было определено влияние температуры, давления, расхода и состава применяемого ПОГ, подводимой электрической мощности, силы тока, напряжения дуги и ее полярности, рода тока. Учет механизмов генерации высокочастотного шума при до- и сверхкритическом характере ее истечения и особенностей газодинамического протекания ПОГ по ГВТ плазмотрона позволил среди других факторов, влияющих на шумоизлучение, выделить скорость, форму и длину струи (основная мощность генерируется на начальном участке струи длиной ~5 калибров), которые, в свою очередь, зависят от большинства вышеперечисленных факторов.

Известно, что в странах с высокоразвитым производством в целях снижения шума не используются ручные плазмотроны при рабочих токах свыше 150 А, а автоматическая плазменная обработка на более высоких токах разрешена только при нахождении оператора за защитным экраном вне рабочей зоны. Однако широкая практика использования ручной плазменной резки в России и недостаточный уровень защиты персонала в условиях ее автоматизированного применения ставят задачу снижения шума непосредственно в источнике его генерации – плазмотроне, которую можно решить в процессе проектирования новых конструкций плазменных генераторов. Для определения основных принципов и методов проектирования, учитывающих фактор безопасности, необходимо понимание физических механизмов акустической генерации с построением соответствующей им параметрической модели.

Появление дискретных тонов в спектре шума можно объяснить с помощью теоретических моделей, связанных с механизмом резонансного самовозбуждения турбулентных пульсаций потока ПОГ на собственных частотах газоздушного тракта плазмотрона с последующей передачей энергии звуковых колебаний и их излучением из сопла плазмотрона. Весь ГВТ плазмотрона ПМВР в этом случае можно представить в виде механической модели колебательной системы с сосредоточенными параметрами, в которой плазмообразующий газ в расширениях обладает упругой реакцией, а в сужениях – инерционной, и ее

эквивалентной электрической схемы, которая может быть упрощена в пренебрежении диссипативных потерь. Анализ модели показал, что в зависимости от геометрии ГВТ в спектре излучения возможно появление одного или двух резонансных пиков или их отсутствие. Для точного определения параметров шумоизлучения необходим строгий расчет газодинамических параметров потока ПОГ, изменяющихся по газозвоздушному тракту плазмотрона.

Предложенные модели позволяют определить частоты появления тональных составляющих в спектре шума ω_1 и ω_2 и звуковую мощность L_p , генерируемую плазмотроном в нормируемом диапазоне слышимых частот ω :

$$L_p = 10 \lg \left(\frac{K_2^1 P_{10}^2 S_2}{m_1 m_2 P_0} \left| \frac{(\omega^2 - \omega_2^2)}{(\omega^2 - \omega_1^2)} \right| \cdot \left[4(\omega^2 - \omega_1^2)^2 + \frac{\rho^2 S_2^4 \omega^6}{4\pi^2 c^2 m_2^2} \right]^{-1} \right), \quad (83)$$

где K_2^1 – коэффициент жесткости, Н/м;

$P_{10} = \frac{F_0}{S_2}$ – звуковое давление, Па;

S_2 – поперечная площадь сужения, м²;

m_1, m_2 – акустические массы, кг;

$P_0 = 10^{-12}$ Вт – пороговая звуковая мощность;

ρ – плотность газа, кг/м³;

c – скорость звука, м/с.

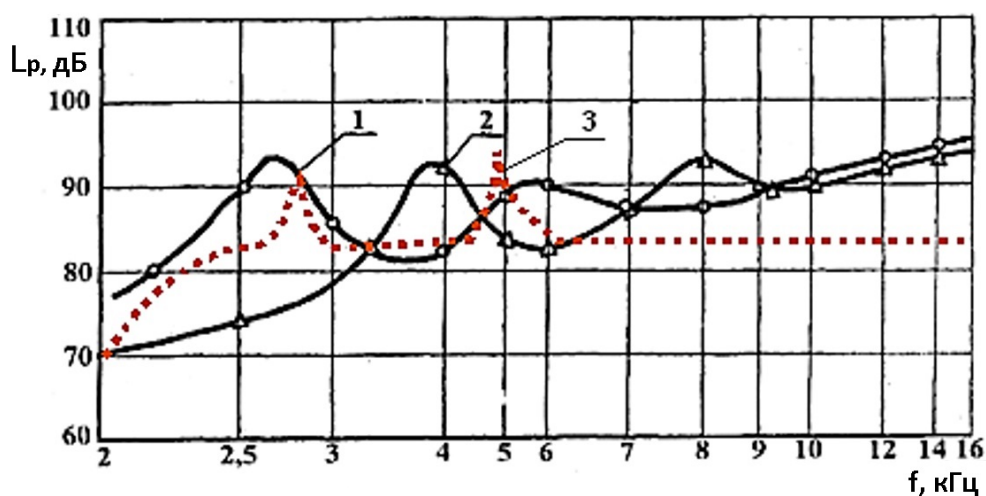


Рис. 98. Зависимость энергетических характеристик акустического шума плазмотрона от расстояния между срезом сопла и торцом катода:

1 – 14,7 мм; 2 – 14,2 мм; 3 – расчет по формуле (83)

Расчет по формуле (83) дает качественное согласие с экспериментальными данными (рис. 98). Для уменьшения звуковой мощности, генерируемой плазмотроном в нормируемом диапазоне слышимых частот, необходимо изменить параметры акустической системы с таким расчетом, чтобы резонансные пики были смещены в область нормируемого ультразвука (свыше 20 кГц) с допустимым УЗД 110 дБ либо уменьшены по амплитуде или было изменено соотношение акустических масс и жесткостей в системе. Наиболее рациональным решением является устранение нерегулярности площади поперечного сечения ГВТ, что позволит уменьшить действие возбуждающих сил, обусловленных пульсациями потока ПОГ, исключить условия образования и усиления звука и тем самым снизить «внутренний» аэродинамический шум, генерируемый плазмотроном в нормируемом диапазоне слышимых частот. Дополнительным фактором, действующим в упомянутых направлениях, может стать профилирование тракта с уменьшением соответствующих акустических масс расширений путем снижения их объемов и площадей проходного сечения.

Анализ физической модели генерации звука, вызванной резонансными явлениями, происходящими внутри цилиндрической части соплового канала, позволяет оценить уровень звуковой мощности L_p , излучаемой открытым концом сопла плазмотрона:

$$L_p = 10 \lg \frac{JS}{P_0} = 10 \lg \left[\frac{F^2(t)}{2S\rho c P_0} \cdot \frac{\text{sh}(\ln(\pi ka))}{\left(\text{sh}^2\left(\frac{1}{2} \ln(\pi ka)\right) + \sin^2\left(kl - \frac{\pi}{4}\right)\right)} \right], \quad (84)$$

где J – интенсивность излучения, Вт/м²;

$P_0 = 10^{-12}$ – пороговое значение звуковой мощности, Вт;

$F(t)$ – вынуждающая колебания сила, Н;

ρ – плотность ПОГ в сопловом канале, кг/м³;

c – скорость звука, м/с;

k – волновое число, м⁻¹;

a – диаметр соплового канала плазмотрона, м;

l – длина соплового канала плазмотрона, м.

Результаты расчета в рамках рассмотренной модели показывают удовлетворительное совпадение с данными экспериментальных ис-

следований для плазмотрона ПВР-402У4. Недостатком модели является невозможность учесть убывание амплитуд дискретных составляющих спектра с ростом номера гармоники в области высоких ультразвуковых частот. Поскольку в данной области уровни звуковой мощности не превосходят нормируемого уровня, следует заключить, что обсуждаемая модель также позволяет с достаточной степенью объективности принять во внимание влияние конструктивных особенностей ГВТ плазмотрона на характер и уровень ультразвукового акустического излучения.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что для устранения причин появления дискретных составляющих акустического спектра необходимо профилирование соплового узла плазмотрона в его прикатодной области и цилиндрическом сопловом канале. При проектировании плазмотронов нужно избегать возникновения больших объемов и минимизировать площади проходного сечения в прикатодной области соплового узла плазмотрона с одновременным уменьшением диаметра канала сопла и его длины до значений, определенных на основе критериев эффективности газовихревой стабилизации плазменной дуги.

На основе анализа полученных данных были сформулированы основные принципы проектирования плазмотронов по критериям акустической безопасности:

1. Устранение условий для резонансного возбуждения тональных составляющих акустического спектра шумоизлучения плазмотрона за счет профилирования ГВТ согласно критерию

$$-1 < \lg(S_i/S_{i+1}) < 1,$$

где S_i – площадь сечения i -го участка ГВТ.

2. Снижение уровня аэродинамического шума за счет формирования условий докритического истечения плазменной струи ($V < C_{зв}$).

С учетом влияния профиля ГВТ на характер шумоизлучения было разработано несколько конструкций плазмотронов с улучшенной (по шумовым характеристикам) газодинамикой течения плазмообразующего газа. При разработке малошумных плазмотронов в качестве базовых были взяты конструкции плазмотронов для резки ПМВР-М и ВПР-410.

Были использованы следующие методы акустического («безопасного») проектирования плазмотронов для резки и сварки:

1) оптимизация геометрии завихрителя, обеспечивающего минимальный размер акустического ядра плазменной струи;

2) технологически возможное уменьшение диаметра сопла плазмотрона и скорости истечения струи до значений, определенных на основе критериев эффективности газовихревой стабилизации плазменной дуги;

3) профилирование ГВТ плазмотрона в целях снижения степени турбулентности потока ПОГ, а также оптимизация геометрии соплового узла в целях предотвращения генерации тональных составляющих шума.

Было предложено и проанализировано (по газодинамическими акустическим критериям) несколько профилей ГВТ плазмотрона – с «эквидистантным» и «гладким» профилем ГВТ в сопловом узле, а также с сопряженно изменяющейся формой катода и соплового узла. Подобное профилирование позволяет уменьшить общий уровень шума за счет устранения причин, вызывающих появление дискретных пиков в спектре шумоизлучения либо широкополосного шума.

В основе проектирования соплового узла (основного генератора тонального шума) должна стоять задача уменьшения числа источников акустического возмущения газодинамической системы и устранения условий для их резонансного усиления. Поскольку пульсации турбулентного потока ПОГ образуются в областях резкого изменения профиля проходного сечения ГВТ, необходимо исключить возможность отрыва потока и вихреобразования в ГВТ соплового узла плазмотрона. Для уменьшения числа источников усиления таких пульсаций следует устранить камеры-резонаторы, присутствующие в сопловых узлах большинства применяемых плазмотронов. Обе эти задачи могут быть решены одновременно за счет согласованного профилирования обводов сопла и катода в форме поверхностей с постоянной или непрерывно меняющейся кривизной.

Установлено, что проектирование можно вести, выбирая в качестве базовой конфигурации профиль сопла либо катода. В случае проектирования по профилю соплового узла необходимо выбрать оптимальную аппроксимирующую зависимость площади проходного сечения ГВТ. При проектировании по профилю катода можно использовать технологически допустимые аппроксимации площади проходного сечения ГВТ, сопрягающие площади на входе и на выходе из соплового узла.

Предложены конструкции сопловых узлов плазмотронов, спроектированные на основе профилей сопла Витошинского, а также известные в звукопередающих и вещательных системах сопла экспоненциальной и катеноидальной (рис. 99, *a*) форм, в которых за счет характерного изменения площади проходного сечения может существенно изменяться активная составляющая акустической мощности. Показаны их преимущества и недостатки с акустической и технологической точек зрения. В конфузорах экспоненциальной формы уменьшается энергия высокочастотного излучения, в катеноидальных – звукового диапазона. Условие сопряжения выходной площади сопла длиной L с площадью цилиндрического канала сопла F_1 позволяет задать закон изменения профиля сужающегося экспоненциального сопла r_c :

$$r_c(x) = R_c \cdot \left(\frac{r_0}{R_c} \right)^{\frac{x}{L}}, \quad (85)$$

где x – расстояние от начала соплового узла;
 R_c – радиус основания сопла (на входе);
 r_0 – радиус цилиндрической части сопла (в критическом сечении).

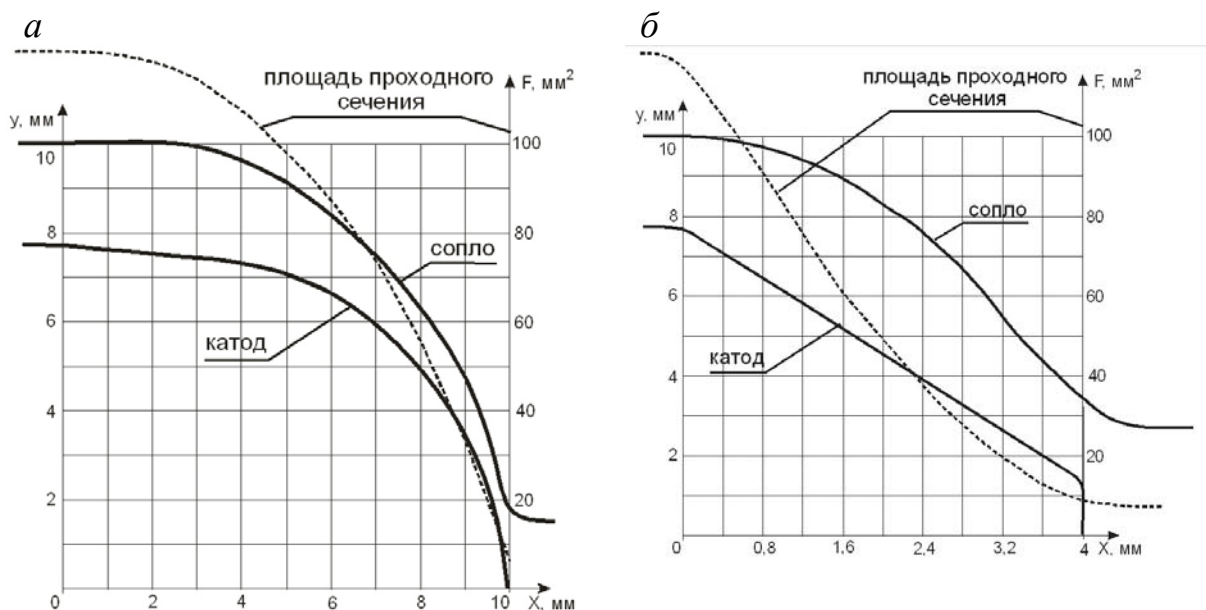


Рис. 99. Профили сопловых узлов, спроектированных на базе:
a – катеноидальной профилей сопла, *б* – конусного катода

В случае проектирования узла на базе катеноидального конфурзорного узла профиль сопла будет изменяться по закону:

$$r_c(x) = R_c \cdot \sqrt{2 - ch^2(\beta x)} = R_c \cdot \sqrt{1 - sh^2(\beta x)}. \quad (86)$$

$$\beta = \frac{1}{L} \cdot \operatorname{arch} \left(\sqrt{2 - \frac{F_1}{F_c(0)}} \right) = \frac{1}{L} \cdot \operatorname{arch} \left(\sqrt{1 - \frac{F_1}{F_c(0)}} \right), \quad (87)$$

где $F_c(0)$ – площадь сечения соплового узла в начале отсчета.

Для случаев профилирования соплового узла по профилю катода предложены параболическая аппроксимация для конусного катода с линейно изменяющимся профилем и эллиптическая для катода с эллиптически изменяющимся профилем катодной поверхности (рис. 99, б). С учетом системного принципа проектирования необходимы коррекции профилей сопловых узлов по теплофизическим, материаловедческим и технологическим критериям. В случае проектирования по профилю сопла такие корректировки несущественно влияют на характер изменения площади сечения ГВТ. Для сопловых узлов, спроектированных по профилю катода, возникает скачок площади в области катодного торца, требующий дополнительной корректировки выходного канала соплового узла и режимов работы плазмотрона. Показано незначительно влияние технологических изменений профиля катода (выгорание катодной тугоплавкой вставки) в процессе работы плазмотрона на его акустические характеристики.

Предложенные методы проектирования сопловых узлов плазмотронов позволяют избежать резких перепадов площади проходного сечения ГВТ, и, следовательно, снизить вероятность появления тональных шумов в акустическом спектре плазмотрона. Однако профилирование ГВТ в области завихрителя и катододержателя способно повлиять на форму и стабильность плазменной струи, а также на характер излучения широкополосного аэродинамического шума.

Анализ результатов проектирования по принципам безопасности свидетельствует о достигнутых преимуществах в борьбе с шумовым фактором. У профилированного плазмотрона ПМВР-5.1 отсутствуют тональные составляющие в спектре излучения, а узкоструйный плазмотрон ПМВР-9.1 показывает максимальное снижение уровня звукового давления на 10–12 дБ в диапазоне 125–500 Гц, что позволяет уменьшить область сверхнормативного излучения на 1/3 октавы. Суммарный уровень звуковой мощности плазмотронов ПМВР-5.1 и ПМВР-9.1 на 4–6 дБА

меньше, чем у ПМВР-М и сопоставим с одним из наиболее эффективных зарубежных плазмотронов Kjellberg PB S-45W (рис. 100). Подтверждено, что применяемая в узкоструйной технологии резка на соплах меньшей длины и диаметра позволяет снизить общий уровень звуковой мощности в ультразвуковой области, а также интенсивность оптического излучения в видимом и ультрафиолетовом диапазоне. Средняя интенсивность излучения в оптическом диапазоне у плазмотрона ПМВР-9.1 меньше, чем у базовых плазмотронов, и сопоставима с Kjellberg PB S-45W. На 50 лк меньше уровень излучения в оптическом диапазоне и у плазмотрона ПМВР-5.1 (в сравнении с базовым плазмотроном).

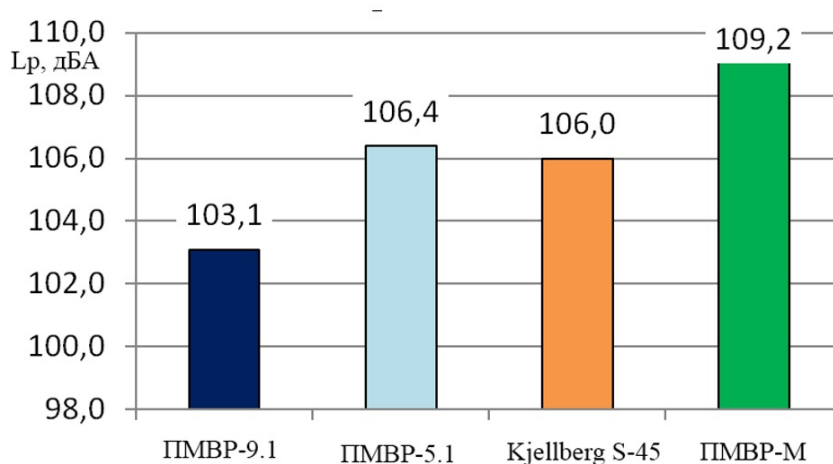


Рис. 100. Уровень звуковой мощности плазмотронов для резки в звуковой области

Существенно продвинуться на пути решения задачи проектирования более безопасной плазменной технологии, на наш взгляд, можно путем внедрения технологии узкоструйной плазмы, позволяющей понизить шумоизлучение как за счет уменьшения длины интенсивно излучающего высокоскоростного ядра плазменной струи, так и за счет ее экранирования потоком внешней струи с меньшей скоростью истечения из кольцевого сопла внешнего контура. Использование данной технологии позволяет также значительно снизить негативное влияние и ряда других вредных и опасных факторов. Работа на существенно меньших токах помимо улучшения энергоэффективности снижает также уровень требований по электробезопасности технологии и уменьшает интенсивность электромагнитного излучения в различных диапазонах воздействия. Кроме того, малая ширина реза позволяет снизить объем выделения вредных газоаэрозолей в пространство рабочей

зоны без использования экранирующих и поглощающих устройств, а также улучшить показатели экономичности процесса по сравнению с другими видами резки (механической, газовой и т. д.). Помимо этого, следует учесть пониженное энергопотребление и повышенную надежность узкоструйного плазмотрона, улучшенные показатели качества и безопасности его работы.

Общий уровень акустического излучения можно дополнительно понизить за счет использования устройств и технологий по борьбе с шумом на пути его распространения. Такие устройства проектируются с учетом диаграмм направленности и спектрограмм шума плазмотронов, законов его распространения и поглощения [80]. Авторами разработаны и внедрены звукопоглощающие насадки и экраны различных типов (рис. 101): для напыления, для термо- и химико-технологической обработки, для резки металлов. Они позволяют снизить как общий, так и пиковый уровень шума на 5–15 дБ, сгладив резонансный вид спектра шумоизлучения в области высоких и низких ультразвуковых частот.

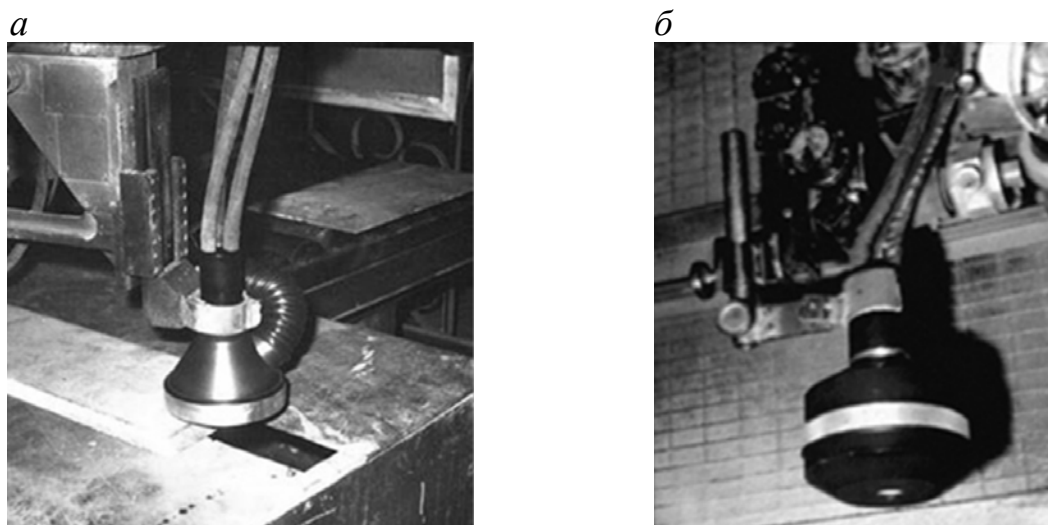


Рис. 101. Глушители шума:

а – для плазменной резки; *б* – для плазменного напыления

В условиях механизированной плазменной резки широкое применение получил звукоизолирующий экран с водяной завесой (рис. 102), позволяющий дополнительно к эффекту снижения шума сократить выброс в окружающую среду пыли, токсичных газов, ультрафиолетового и светового излучения. Исследования показали также перспективность использования пенной завесы для эффективного поглощения шума, газовых выделений и радиационного излучения [4].

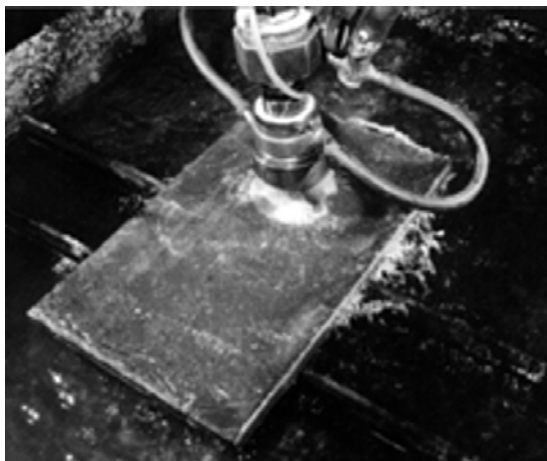
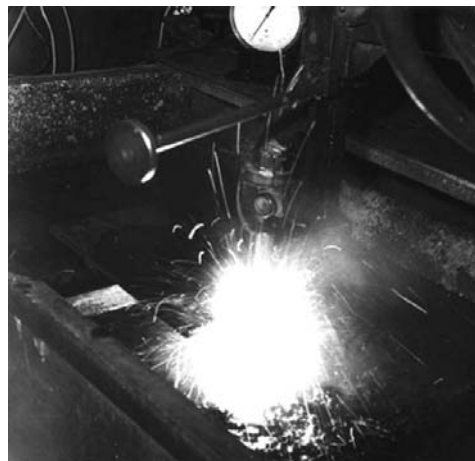
а*б*

Рис. 102. Водяной экран:

а – «холодный» режим; *б* – «горячий» режим (с плазменной дугой)

Рассмотренный комплекс мероприятий по борьбе с шумом и сопутствующими ему вредными факторами в процессе использования электроплазменных технологий, а также практика промышленной эксплуатации малошумных плазматронов свидетельствуют о возможности успешного решения проблемы безопасности при сохранении требуемой эффективности и качества труда. Представленные в данной работе сведения о причинах возникновения и методах борьбы и защиты от вредных и опасных факторов, сопутствующих электроплазменным процессам, являются общими для плазматронов большинства типов. Следует, однако, констатировать, что между различными типами плазматронов в разных областях их применения различия настолько велики, что практически для каждого рабочего места или каждой технологической операции следует индивидуально решать вопросы безопасности работ и защиты здоровья обслуживающего персонала и его окружения. Общий перечень процедур, регламентирующих вопросы безопасности, можно найти в соответствующих ГОСТах и санитарных нормах. Не надо забывать об этих требованиях и на стадии проектирования нового электроплазменного оборудования, внедрение которого имеет большой инновационный потенциал. Проблема безопасности, понятая в широком смысле обеспечения приемлемых для здоровья человека условий жизни, также должна затрагивать и вопрос использования плазменных технологий в экологических проектах. Комплексный подход, обеспечивающий одновременно эффективность и безопасность применения таких технологий, позволяет сделать процесс их внедрения одним из ведущих направлений инновационной политики.

Заключение

К настоящему времени у проектировщиков плазмотронного оборудования накоплен богатый опыт, позволяющий осуществлять процессы плазменного воздействия на материалы с высокой производительностью и экономичностью. Вместе с тем специфика плазменных технологий требует комплексного (интегрального) подхода к их изучению, при котором системный элемент любой технологии – плазменный генератор – рассматривается с точки зрения целого комплекса задач: естественнонаучного описания и понимания сложных технологических процессов, формулировки и применения принципов и методов проектирования плазменного оборудования, исследования и оптимизации их использования в конкретных производственных процессах. Этим объясняется стремление авторов представить плазменные технологии в рамках интегральной модели субъект-объектных отношений, обеспечивающих как регулирование, так и соблюдение параметров качества, эффективности и производительности технологий на основе решения перечисленных выше задач. В этом же контексте лежит и рассмотрение плазменных технологий с точки зрения безопасности процессов – фактора, часто искусственно ретушируемого разработчиками и производителями подобной техники. При этом уникальность электроплазменных технологий состоит в том, что их можно рассматривать и как инструмент обеспечения техносферной безопасности, применяя в целях улучшения экологического состояния окружающей среды.

В основу данной книги легли тематические и научно-исследовательские работы, проведенные авторами в 2015–2021 гг. Многолетний опыт научных исследований и опытно-конструкторской деятельности в сфере применения электроплазменных технологий дал нам право привлечь особое внимание к технологиям применения плазмотронов в качестве инструмента в различных машиностроительных технологиях. Акцент в работе сделан на последних результатах, достигнутых авторами в сфере физического объяснения различных процессов плазменной обработки, проектирования плазмотронов и сопутствующего оборудования, обоснования эффективности результатов конструкторской деятельности. Особый интерес, как в силу специфики авторской

научной и производственной деятельности, так и с учетом широты реального применения, представляют технологии плазменной резки и различные аспекты ее применения. Тем не менее и другие важные плазменные инструменты, разработанные при участии авторов и задействованные в различных отраслях машиностроения (сварка, плазменная поверхностная модификация и упрочнение и др.), были освещены в данной работе. При этом каждая технология была представлена и в историческом контексте своего развития, и через призму описания известных (помимо авторских) разработок. Рассмотрение плазменных технологий в качестве интегрального элемента поставило также задачу рассмотреть их внедрение в экологические проекты наряду с проблемой безопасности самих технологий. Разумеется, ограниченный объем данной работы не позволил превратить ее в энциклопедию по всем возможным технологиям плазменного применения в машиностроении. Например, за рамками остались такие значимые и развивающиеся в настоящее время технологии, как плазменное напыление, производство металлопорошков для металлургических и аддитивных технологий, плазмохимия и т. д. Однако представленный материал, как надеются авторы, создаст у читателя понимание инновационных преимуществ плазменных технологий, а также широты, значимости и эффективности их применения для решения различных задач современного промышленного производства.

Библиографический список

1. *Электродуговые* генераторы термической плазмы / М. Ф. Жуков, И. М. Засыпкин, А. Н. Тимошевский [и др.]. Новосибирск: Наука, 1999. Т. 17: Низкотемпературная плазма. 712 с. Текст: непосредственный.
2. *Чередниченко, В. С.* Плазменные электротехнологические установки: учебник / В. С. Чередниченко, А. С. Аньшаков, М. Г. Кузьмин. Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-та, 2011. 602 с. Текст: непосредственный.
3. *Анахов, С. В.* Экологическое проектирование: стратегии и технологии / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, AV Akademiker Verlag GmbH & Co. KG, 2012. 125 с. Текст: непосредственный.
4. *Анахов, С. В.* Плазмотроны: проблема акустической безопасности. Теплофизические и газодинамические принципы профилирования газоздушных трактов малошумных плазмотронов / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин. Екатеринбург: Ред.-изд. отд. Урал. отд-ния Рос. акад. наук, 2012. 224 с. Текст: непосредственный.
5. *Курнаев, В. А.* Плазма – XXI век / В. А. Курнаев. Москва: Изд-во Моск. инж.-физ. ин-та, 2008. 88 с. Текст: непосредственный.
6. *Клименко, Г. К.* Конструкции электродуговых плазмотронов: электронное учебное пособие / Г. К. Клименко, А. А. Ляпин. Москва: Изд-во Мос. гос. техн. ун-та им. Баумана, 2010. 56 с. URL: <http://wwwcdl.bmstu.ru/e8/lyarin/index.htm>. Текст: электронный.
7. *Электродуговые* плазмотроны: рекламный проспект / А. С. Аньшаков, Г. Н.-Б. Дандаров, В. П. Ефремов [и др.]; под ред. М. Ф. Жукова. Новосибирск: Изд-во Сиб. отд-ния Акад. наук СССР, 1980. 84 с. Текст: непосредственный.
8. *Дресвин, С. В.* Плазмотроны: конструкции, параметры, технологии: учебное пособие / С. В. Дресвин, С. Г. Зверев. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 208 с. Текст: непосредственный.
9. *Физика* и техника низкотемпературной плазмы / С. В. Дресвин, А. В. Донской, В. М. Гольдфарб, В. С. Клубникин; под общ. ред. С. В. Дресвина. Москва: Атомиздат, 1972. 352 с. Текст: непосредственный.
10. *Экспериментальные* исследования плазмотронов: сборник статей / отв. ред. М. Ф. Жуков. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 390 с. Текст: непосредственный.

11. *Плазмотроны. Исследования. Проблемы* / М. Ф. Жуков, А. Н. Тимошевский, С. П. Ващенко [и др.]. Новосибирск: Изд-во Сиб. отд-ния Рос. акад. наук, 1995. 203 с. Текст: непосредственный.

12. *Васильев, К. В.* Плазменно-дуговая резка / К. В. Васильев; под ред. И. А. Антонова, Д. Л. Глизманенко. Москва: Машиностроение, 1974. 111 с. Текст: непосредственный.

13. *Быховский, Д. Г.* Плазменная резка: Режущая дуга и энергетическое оборудование / Д. Г. Быховский. Ленинград: Машиностроение, 1972. 166 с. Текст: непосредственный.

14. *Коротеев, А. С.* Плазмотроны: Конструкции, характеристики, расчет / А. С. Коротеев, В. М. Миронов, Ю. С. Свирчук. Москва: Машиностроение, 1993. 296 с. Текст: непосредственный.

15. *Кручинин, А. М.* Плазменные промышленные установки. Промышленные плазмотроны: учебное пособие / А. М. Кручинин, В. П. Цишевский; под ред. В. С. Макарова. Москва: Изд-во Моск. энергет. ин-та, 1991. 103 с. Текст: непосредственный.

16. *Даутов, Г. Ю.* Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами / Г. Ю. Даутов, В. Л. Дзюба, И. Н. Карп. Киев: Наук. думка, 1984. 168 с. Текст: непосредственный.

17. *Ширшов, И. Г.* Плазменная резка / И. Г. Ширшов, В. Н. Котиков. Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. 192 с. Текст: непосредственный.

18. *Журавлев, В. Ф.* Основы применения структурно-функционального метода в учебном процессе и исследованиях. Кибернетический подход / В. Ф. Журавлев, И. А. Ридингер, Т. В. Рыжкова. Екатеринбург: АМБ, 2011. 152 с. Текст: непосредственный.

19. *Анахов С. В.* Интегративные элементы физической модели «Плазмотрон» / С. В. Анахов. Текст: непосредственный // Физическое образование в вузах. 2011. Т. 17, № 2. С. 69–75.

20. *Основы физических процессов в плазме и плазменных установках: учебное пособие* / С. К. Жданов, В. А. Курнаев, М. К. Романовский, И. В. Цветков. Москва: Изд-во Моск. инж.-физ. ин-та, 2000. 259 с. Текст: непосредственный.

21. *Анахов, С. В.* Влияние активных газовых смесей на эффективность плазменного поверхностного упрочнения / С. В. Анахов. Текст: непосредственный // Сварочное производство. 2011. № 9. С. 26–33.

22. *Фролов, В. Я.* Плазменные электротехнологические установки и технологии / В. Я. Фролов, С. В. Дресвин, Д. В. Иванов. Текст: непосредственный // Высокоэнергетические методы обработки материалов: сборник / под ред. В. Б. Демидовича. Санкт-Петербург: Изд-во Ленингр. электротехн. ин-та, 2008. С. 150–250.

23. *Лащенко, Г. И.* Плазменное упрочнение и напыление / Г. И. Лащенко. Киев: Экотехнология, 2003. 64 с. Текст: непосредственный.

24. *Высокоэнергетические* процессы обработки материалов / О. П. Солоненко, А. П. Алхимов, В. В. Марусин [и др.]. Новосибирск: Наука, 2000. Т. 18: Низкотемпературная плазма. 425 с. Текст: непосредственный.

25. *Плазменное* поверхностное упрочнение / Л. К. Лещинский, С. С. Самоутугин, И. И. Пирч, В. И. Комар. Киев: Тэхника, 1990. 109 с. Текст: непосредственный.

26. *Безопасность* жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств (Охрана труда): учебное пособие для вузов / П. П. Кукин, В. Л. Лапин, Н. Л. Пономарев, Н. И. Сердюк. Москва: Высш. шк., 2002. 319 с. Текст: непосредственный.

27. *Безопасность* производственных процессов: справочник / С. В. Белов, В. Н. Бринза, Б. С. Векшин [и др.]; под общ. ред. С. В. Белова. Москва: Машиностроение, 1985. 448 с. Текст: непосредственный.

28. *Борьба* с шумом на производстве: справочник / Е. Я. Юдин, Л. А. Борисов, И. В. Горенштейн [и др.]; под общ. ред. Е. Я. Юдина. Москва: Машиностроение, 1985. 400 с. Текст: непосредственный.

29. *Пыкин, Ю. А.* Факторы снижения шумов при работе плазменного оборудования / Ю. А. Пыкин, С. В. Анахов. Текст: непосредственный // Технология машиностроения. 2008. № 7. С. 64–66.

30. *Анахов, С. В.* Шумообразующие факторы в технологиях высокоэнергетического воздействия на материалы / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин, О. И. Стеклов. Текст: непосредственный // Сварочное производство. 2004. № 10. С. 47–50.

31. *Анахов, С. В.* Плазменные технологии для экологизации производств / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин. Текст: непосредственный // Безопасность в техносфере. 2011. № 5. С. 45–53.

32. *Анахов, С. В.* Принципы и методы проектирования в электроплазменных и сварочных технологиях: учебное пособие / С. В. Анахов. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2014. 144 с. Текст: непосредственный.

33. *Анахов, С. В.* Принципы и методы проектирования плазмотронов / С. В. Анахов. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2018. 165 с. Текст: непосредственный.

34. *Кайдалов А. А.* Современные технологии термической и дистанционной резки конструкционных материалов / А. А. Кайдалов. Киев: Экотехнология, 2007. 456 с. Текст: непосредственный.

35. *Матушкин, А. В.* Совершенствование системы газовыхревой стабилизации электродуговых плазмотронов для резки металлов: диссертация ... кандидата технических наук / Анатолий Владимирович Матушкин. Екатеринбург, 2017. 132 с. Текст: непосредственный.

36. *Евтихийев, Н. Н.* Лазерные технологии: учебное пособие / Н. Н. Евтихийев, О. Ф. Очин, И. А. Бегунов. Долгопрудный: Интеллект, 2020. 240 с. Текст: непосредственный.

37. *Anakhov, S.* Gas and RRR distribution in high purity Niobium EB welded in Ultra-High Vacuum / S. Anakhov, X. Singer, W. Singer, H. Wen. Text: print // AIP Conference Proceedings. 2006. Vol. 837. № 1. P. 71–85.

38. *Кайдалов, А. А.* Электронно-лучевая сварка и смежные технологии / А. А. Кайдалов. 2-е изд., перераб., доп. Киев: Экотехнология, 2004. 260 с. Текст: непосредственный.

39. *Еремин, Е. Н.* Плазменно-дуговая резка / Е. Н. Еремин, Ю. О. Филиппов. Омск: Изд-во Омск. гос. техн. ун-та, 2015. 264 с. Текст: непосредственный.

40. *Овчинников, В. В.* Технология дуговой и плазменной сварки и резки металлов: учебник / В. В. Овчинников, М. А. Гуреева. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 240 с. Текст: непосредственный.

41. *Эсибян, Э. М.* Плазменно-дуговая аппаратура / Э. М. Эсибян. Киев: Техніка, 1971. 162 с. Текст: непосредственный.

42. *Чиеу К. Ф.* Исследование эффективности технологии узкоструйной плазменной резки металлов: диссертация... кандидата технических наук / Куанг Фи Чиеу. Санкт-Петербург, 2008. 143 с. Текст: непосредственный.

43. *Малаховский, В. А.* Плазменные процессы в сварочном производстве: учебное пособие / В. А. Малаховский. Москва: Высш. шк., 1988. 72 с. Текст: непосредственный.

44. *Основы* расчета плазмотронов линейной схемы / под общ. ред. М. Ф. Жукова. Новосибирск: Изд-во Сиб. отд-ния Акад. наук СССР, 1979. 148 с. Текст: непосредственный.

45. *Костылев, А. М.* Электродуговые установки (плазматроны): учебное пособие / А. М. Костылев. Москва: МВТУ, 1969. 109 с. Текст: непосредственный.

46. *Абрамович, Г. Н.* Прикладная газовая динамика: в 2 частях / Г. Н. Абрамович. 5-е изд., перераб., доп. Москва: Наука, 1991. Ч. 1. 600 с.; Ч. 2. 304 с. Текст: непосредственный.

47. *Жуков, М. Ф.* Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны) / М. Ф. Жуков, В. Я. Смоляков, Б. А. Урюков. Москва: Наука, 1973. 232 с. Текст: непосредственный.

48. *Лебедев, Л. Д.* Особенности аэродинамики однокамерного плазматрона с вихревой газовой стабилизацией и ее влияние на поведение дуги / Л. Д. Лебедев, Г. И. Марцева, В. Я. Смоляков // Известия СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1967. Вып. 1, № 3. С. 53–59. Текст: непосредственный.

49. *Колонина, Л. И.* Продольно обдуваемая дуга в разных газах / Л. И. Колонина, В. Я. Смоляков. Текст: непосредственный // Генераторы низкотемпературной плазмы: Труды 3-й Всесоюзной конференции по генераторам низкотемпературной плазмы / под ред. А. В. Лыкова [и др.]. Москва: Энергия, 1969. С. 209–218.

50. *Михайлов, Б. И.* Влияние геометрии дуговой камеры, давления, расхода и рода плазмообразующего газа на осевую стабилизацию дуги в газовых вихревых плазмотронах / Б. И. Михайлов. Текст: непосредственный // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8, № 1. С. 133–141.

51. *Донской, А. В.* Электроплазменные процессы и установки в машиностроении / А. В. Донской, В. С. Клубникин. Ленинград: Машиностроение, 1979. 221 с. Текст: непосредственный.

52. *Пиралишвили, Ш. А.* Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / Ш. А. Пиралишвили, В. М. Поляев, М. Н. Сергеев; под ред. А. И. Леонтьева. Москва: Энергомаш, 2000. 412 с. Текст: непосредственный.

53. *Математическое* моделирование течения газа в вихревых камерах с тангенциальным вдувом / А. Е. Бутырев, М. П. Галанин, В. Г. Гнеденко [и др.]. Москва: [Б. и.], 2007. 29 с. (Препринт / Рос. акад. наук, Ин-т прикл. математики им. М. В. Келдыша. № 85 за 2007 г.). Текст: непосредственный.

54. *Алексеевко, В. П.* Расчет характеристик вихревых систем термостатирования / В. П. Алексеевко, А. С. Стукалов, П. Ю. Якимов. Текст: непосредственный // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11, № 5. С. 170–176.

55. *Савченко, Н. В.* Регулирование вихревой трубы при постоянном расходе охлажденного потока / Н. В. Савченко. Текст: непосредственный // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11, № 5–2. С. 424–427.

56. *А. с. 559787 СССР.* Плазмотрон / Д. Г. Быховский, Ю. А. Богородский, А. Я. Медведев, В. Н. Фирсов (СССР). № 2063301/27; заяв. 10.10.74; опубл. 30.05.77, Бюл. № 20. Текст: непосредственный.

57. *А. с. 1830323 СССР.* Плазмотрон / Ю. А. Пыкин, А. Ю. Савиных, И. Д. Ларионов (СССР); № 4816900/08; заяв. 23.04.90; опубл. 30.07.93, Бюл. № 28. Текст: непосредственный.

58. *Пат. 2459010* Российская Федерация. Плазменное устройство и система / В. В. Белашенко (СССР), О. П. Солоненко (РФ), А. В. Смирнов (РФ); № 2009124486/02; заяв. 27.11.2007; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23. Текст: непосредственный.

59. *Пат. 2193955* Российская Федерация. Плазмотрон для резки и установка для плазменно-дуговой резки / Н. М. Камышный, А. Б. Клейменов, В. Г. Павлов, Д. С. Смагин, С. Ф. Бялоцкий (РФ); № 2000128730/02; заяв. 17.11.2000; опубл. 10.12.2002, Бюл. № 34. Текст: непосредственный.

60. *Пат. 2353485* Российская Федерация. Плазменная горелка (варианты) / В. С. Тверской, А. В. Тверской (РФ). № 2007126769/02; заяв. 13.07.2007; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 12. Текст: непосредственный.

61. *Anakhov, S. V.* Investigation of systems for gas vortex stabilization of plasma torches / S. V. Anakhov, Yu. A. Pykin, A. V. Matushkin. Text: print // Welding International. 2016. Vol. 30, Issue 4. P. 310–314. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1058005>.

62. *Оценка* эффективности газовихревой стабилизации в плазмотронах для резки металлов / М. П. Шалимов, С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин [и др.]. Текст: непосредственный // Сварка и диагностика. 2018. № 2. С. 57–61.

63. *Anakhov, S. V.* Effect of a gas-vortex stabilization method on the kinematic properties of the jet in metal-cutting plasmotrons / S. V. Anakhov, A. V. Matushkin, Yu. A. Pykin. Text: print // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 681. Article 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/681/1/012003>.

64. Пат. 2754817 Российская Федерация. Плазмотрон / Ю. А. Пыкин, С. В. Анахов, А. В. Матушкин. № 2021107721; заяв. 24.03.2021; опубл. 07.09.2021, Бюл. № 25. Текст: непосредственный.

65. Глебов И. А. Мощные генераторы плазмы / И. А. Глебов, Ф. Г. Рутберг. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 153 с. Текст: непосредственный.

66. Алешин, Н. П. Современные способы сварки: учебное пособие / Н. П. Алешин, В. И. Лысак, В. Ф. Лукьянов. Москва: Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана, 2011. 59 с. Текст: непосредственный.

67. Киселев, Г. С. Разработка технологии плазменной сварки алюминиевого сплава АМг5 с импульсной подачей плазмообразующих газов: диссертация... кандидата технических наук / Глеб Сергеевич Киселев. Тула, 2010. 192 с. Текст: непосредственный.

68. Полевой, С. Н. Упрочнение машиностроительных материалов: справочник / С. Н. Полевой, В. Д. Евдокимов. Москва: Машиностроение, 1994. 496 с. Текст: непосредственный.

69. А.с. 1765213 СССР. Способ термической обработки изделий / В. Н. Давыдов, В. И. Журавлев, Е. Н. Сафонов [и др.] (СССР). № 4157550/02; заяв. 16.12.86; опубл. 30.09.92, Бюл. № 36. Текст: непосредственный.

70. Астапчик, С. А. Фазовые и структурные превращения в сталях и сплавах при лазерном нагреве / С. А. Астапчик. Текст: непосредственный // Вести АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. 1982. № 4. С. 30–37.

71. Дьяченко, С. С. Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах / С. С. Дьяченко. Москва: Metallургия, 1982. 128 с. Текст: непосредственный.

72. Лазерная техника и технология: в 7 книгах / под ред. А. Г. Григорьянца. Москва: Высш. шк., 1987. Кн. 3: Методы поверхностной лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов. Москва: Высш. шк., 1987. 191 с. Текст: непосредственный.

73. Метод расчета температурных полей в процессе плазменной закалки со сканированием / С. В. Анахов, Н. Н. Алексеенко, Ю. А. Пыкин, С. И. Фоминых. Текст: непосредственный // Теплофизика высоких температур. 1994. Т. 32, № 1. С. 40–43.

74. Пат. 2092580 Российская Федерация. Способ плазменной термической обработки изделий и устройство для его осуществления / А. М. Лыков, В. Г. Почапаев, Ю. Г. Редькин. № 96105478/02; заяв. 29.03.96; опубл. 10.10.97. Текст: непосредственный.

75. *Коротков, В. А.* Установка для ручной поверхностной закали плазменной дугой / В. А. Коротков. Текст: непосредственный // Главный механик. 2010. № 5. С. 18–26.

76. *Anakhov, S. V.* Examination of the cut surface in thermal cutting of 09G2S steel / S. V. Anakhov, K. Singer, Yu. A. Pykin, S. A. Shakurov. Text: print // Welding International. 2008. Vol. 22, Issue 4. P. 267–270.

77. *Райченко, А. И.* Математическая теория диффузии в приложениях / А. И. Райченко. Киев: Наук. думка, 1981. 396 с. Текст: непосредственный.

78. *Химико-термическая* обработка металлов и сплавов: справочник / Г. В. Борисенок, Л. А. Васильев, Л. Г. Ворошнин [и др.]; под ред. Л. С. Ляховича. Москва: Металлургия, 1981. 424 с. Текст: непосредственный.

79. *Пат. 93019122* Российская Федерация. Устройство для химико-термической обработки поверхности металлических материалов / Ю. А. Пыкин, И. Д. Ларионов, С. И. Фоминых, С. В. Анахов. № 93019122/02; заяв. 13.04.93; опубл. 20.01.97. Текст: непосредственный.

80. *Пат. 93019130* Российская Федерация. Способ поглощения звуковой энергии при плазменно-дуговой обработке материалов и устройство для его осуществления / Ю. А. Пыкин, С. В. Анахов. № 93019130/08; заяв. 13.04.1993; опубл. 20.08.1995. Текст: непосредственный.

81. *ГОСТ 12.1.005–88.* Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. Москва: Стандартинформ, 2005. 48 с. Текст: непосредственный.

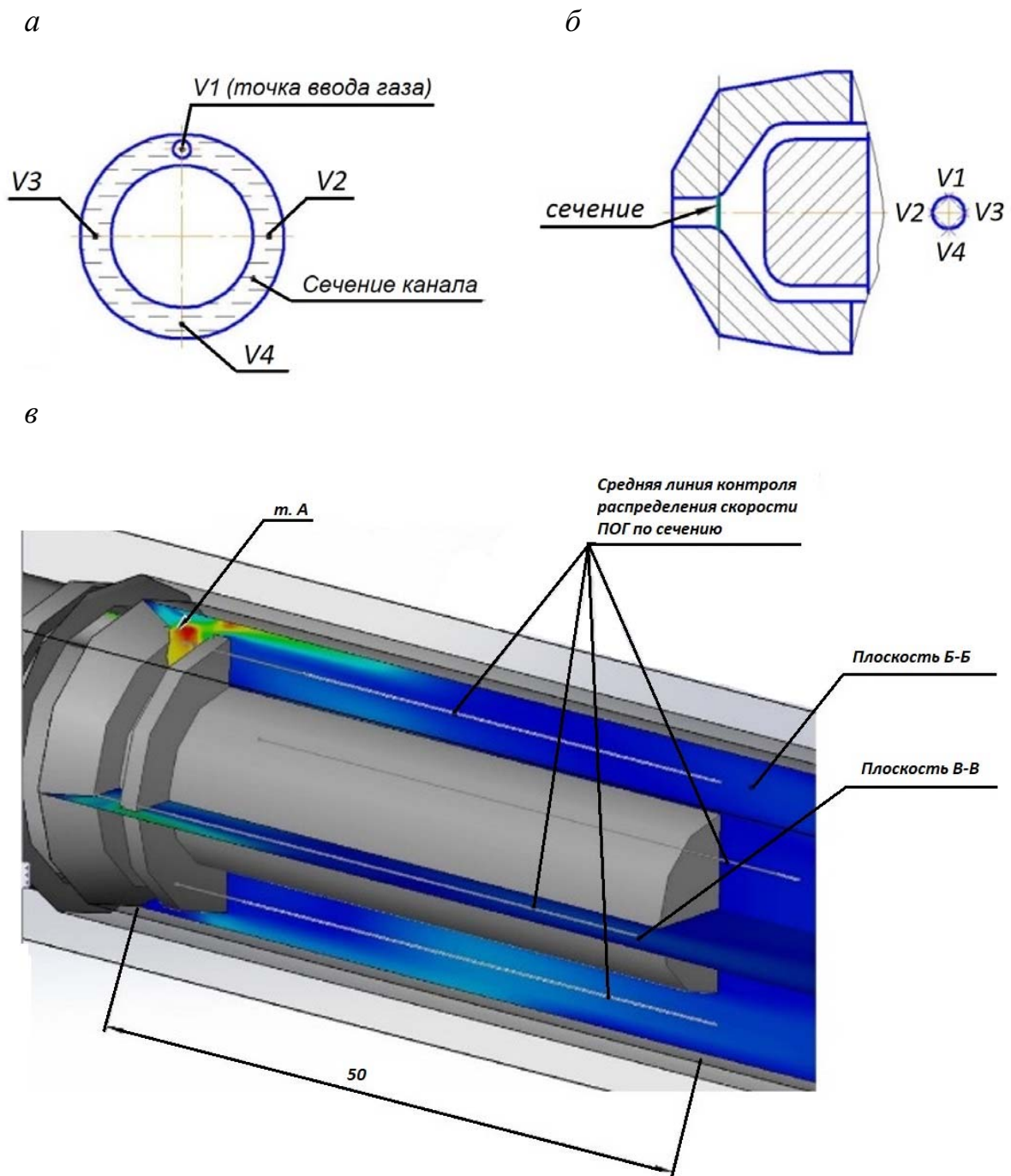


Рис. 35. Расположение точек расчета и участков контроля параметров потока ПОГ:
 а – по сечению каналов ГВТ; б – в контрольной плоскости; в – линии контроля (т. А – ввод ПОГ в камеру расширения, плоскость Б–Б проходит через контрольные точки V1 и V3, В–В – через V2 и V4)

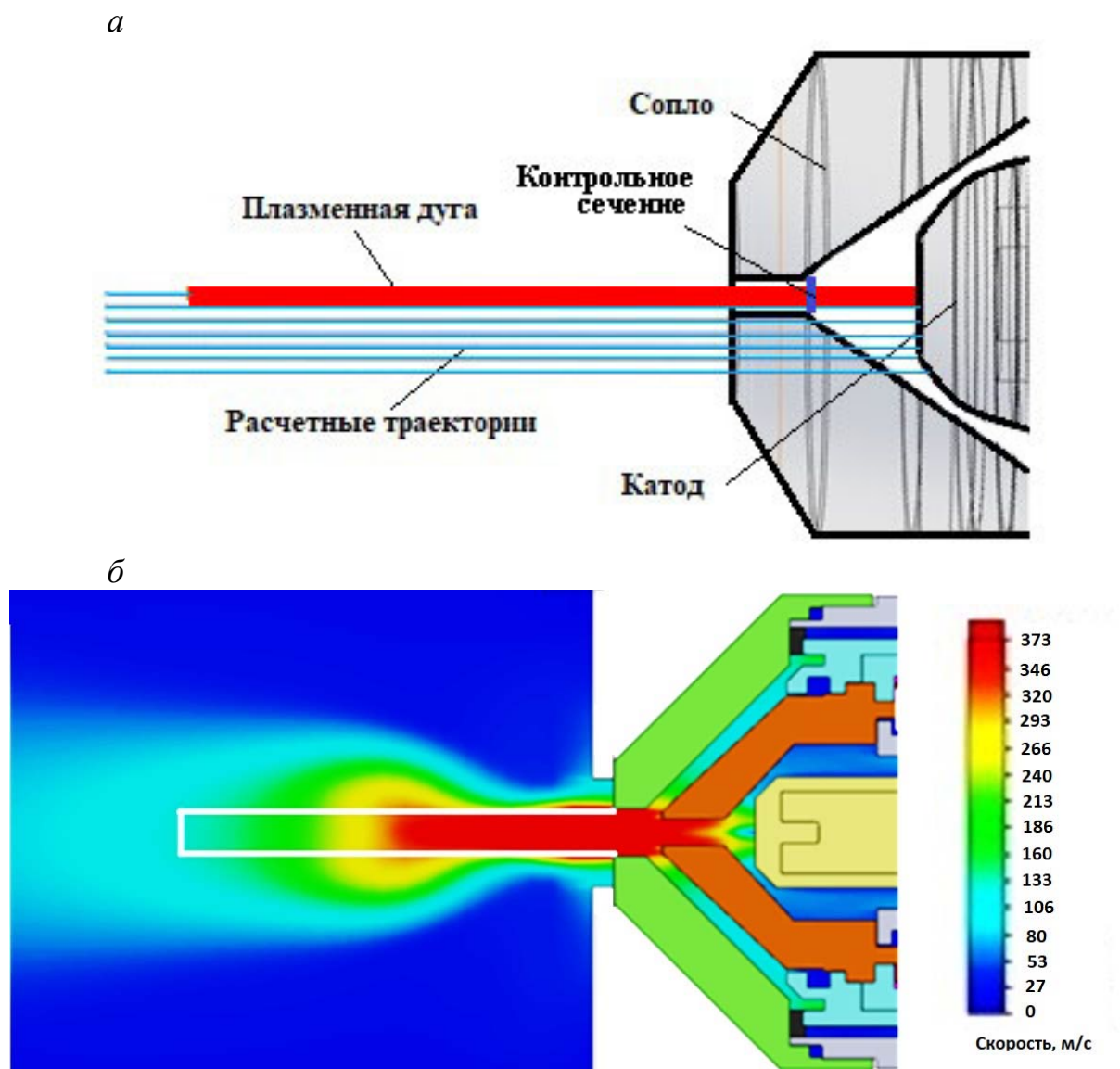


Рис. 37. Схема расчета параметров плазменной струи:
а – по линейным траекториям; *б* – по П-образной траектории

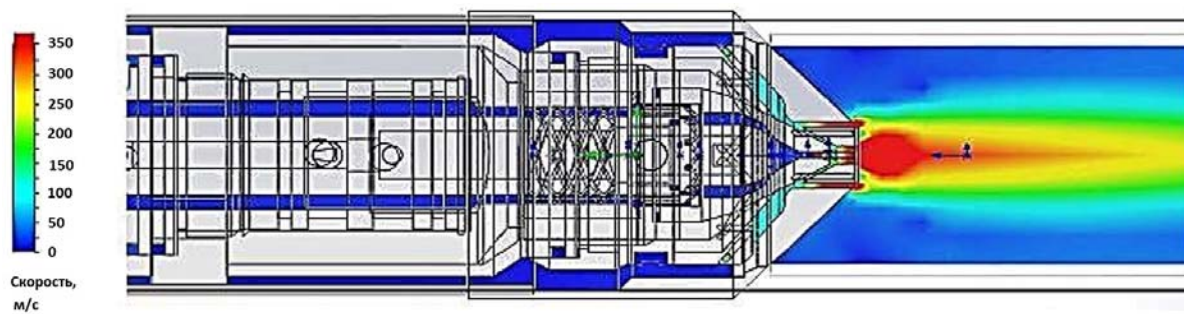


Рис. 44. 3D-проектирование газодинамических процессов
 в плазмотроне ПМВР-9

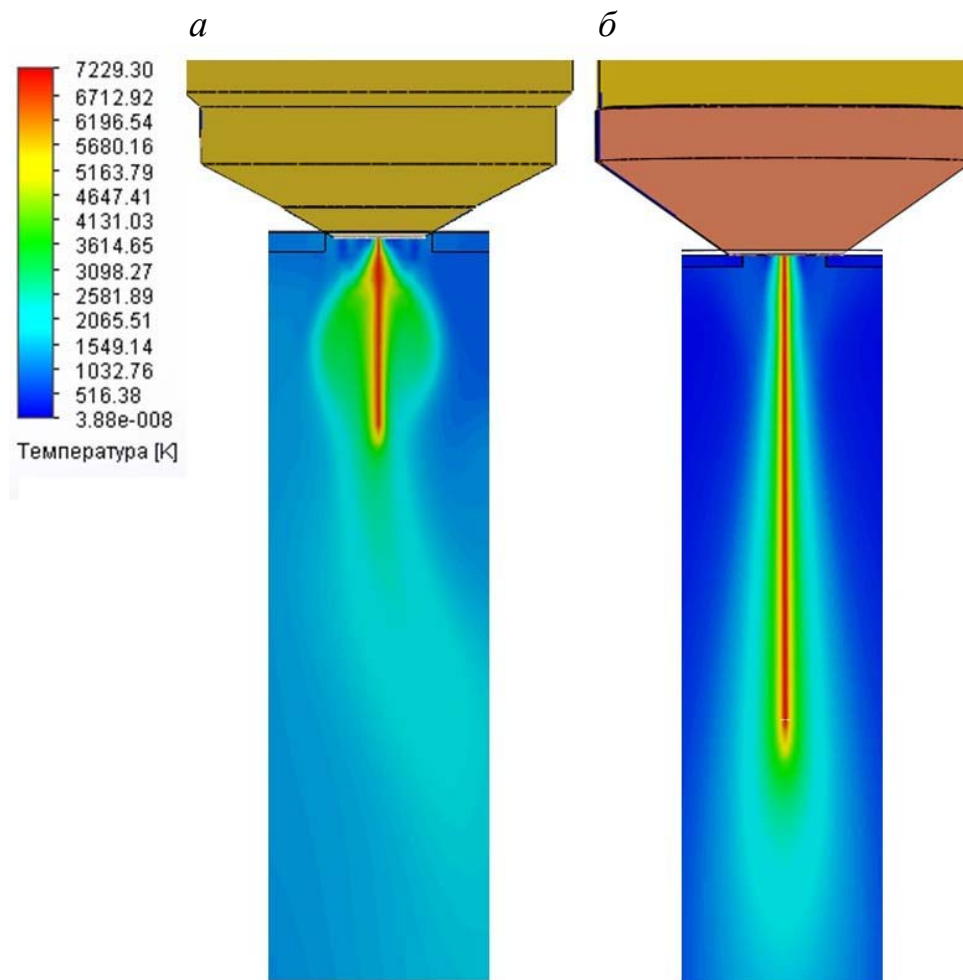


Рис. 50. График распределения температур плазменной дуги (струи), генерируемой плазмотронами (по результатам CFD-анализа):
а – ПМВР-5.3; *б* – ПМВР-9.1

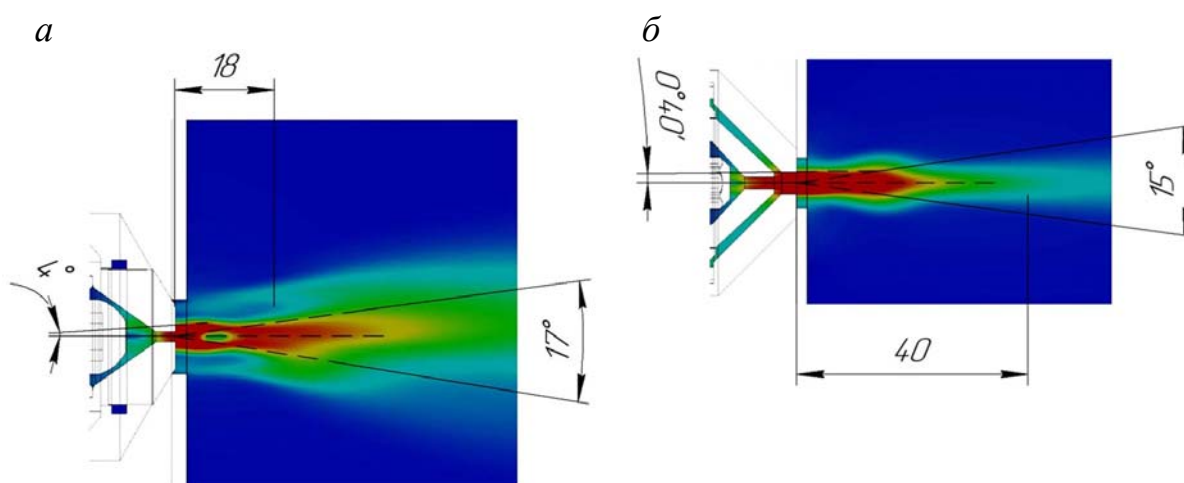


Рис. 51. Оценка геометрии плазменной струи по результатам CFD-анализа:
а – плазмотрон ПМВР-5.3, *б* – плазмотрон ПМВР-9.1



Рис. 56. Транспортируемые модули для плазменной разделки металлообъектов (ООО «НПО Полигон»):
а – мобильная установка на базе кунга,
б – комплектное рабочее место в перемещаемом контейнерном исполнении

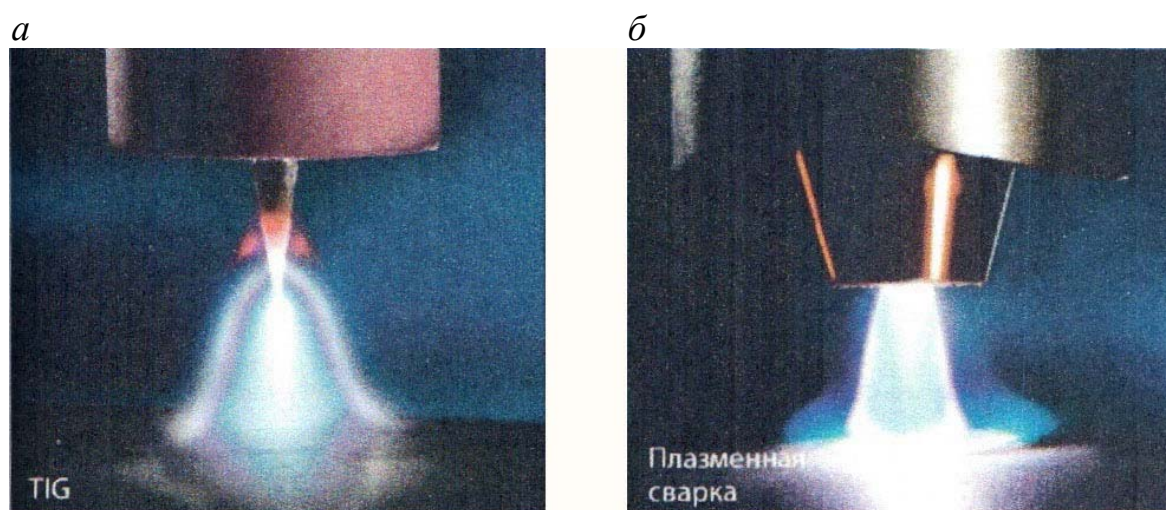


Рис. 59. Форма дуги при сварке:
а – неплавящимся электродом в аргоне,
б – сжатой плазменной дугой

Научное издание

Анахов Сергей Вадимович
Пыкин Юрий Анатольевич
Матушкин Анатолий Владимирович

ПЛАЗМЕННЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ
В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Монография

Редактор Н. А. Мезина
Компьютерная верстка Н. А. Ушениной

Печатается по постановлению
редакционно-издательского совета университета

Подписано в печать 03.04.23. Формат 60×84/16. Бумага для множ. аппаратов.
Печать плоская. Усл. печ. л. 11,1. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 500 экз. Заказ № ____.
Издательство Российского государственного профессионально-педагогического университета. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11.
