

с/з, дан Н. Новосилев

11 коп.

Индекс 70067

НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

ЗНАНИЕ

3/1975

СЕРИЯ
ТЕХНИКА

Н. Н. Долгополов
В. И. Фридман
ПЛАЗМЕННАЯ
ТЕХНИКА



Долгополов Н. Н. и Фридман В. И.

Д64 Плазменная техника. М., «Знание», 1975.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Техника», 3. Издается ежемесячно с 1961 г.).

Плазменная техника — одна из новых отраслей техники, обретенных своим появлением научно-технической революции. Авторы рассматривают проблемы внедрения плазменной техники и технологии в производство, экономическую эффективность этого процесса. Кроме того, дается представление о способах получения плазмы и существующих типах плазмотронов. Описываются конкретные области применения плазменной техники: резка и сварка металлов, металлургия, наплавка металлов и сплавов, напыление порошков, выращивание кристаллов и т. д.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей.

30000

537

Введение

Современная научно-техническая революция «бесшумна» и «незаметна», но она несет с собой грандиозные преобразования. Наука все в большей степени становится непосредственной производительной силой. В технике появляются такие принципиально новые дисциплины, как техническая кибернетика, бионика и др. Изменилось положение человека в системе производства, развиваются «притехнические» дисциплины — эргономика, техническая эстетика, инженерная психология.

Но особенно важно в настоящее время обратить внимание на создание техники, дающей значительную экономию живого труда. Поэтому в девятой пятилетке создаются и внедряются в производство принципиально новые орудия труда, материалы и технологические процессы, ускоряется модернизация и замена устаревших машин и агрегатов, повышается уровень электрификации производства, завершается комплексная механизация важнейших производственных процессов и т. д. Именно благодаря этим обстоятельствам пристальное внимание ученых и практиков привлекла в последнее время плазменная техника.

Плазма — это газ, содержащий более 1% молекул в ионизированном состоянии. Однако не всякий ионизированный газ можно назвать плазмой. Необходимое условие ее существования — квазинейтральность, т. е. в ней не должно быть заметного перевеса зарядов одного знака над зарядами другого знака.

Плазма может быть трех видов.

1. Термоядерная, область температур которой от нескольких миллионов до сотен миллионов градусов. Она интенсивно изучается физиками как потенциальный источник термоядерной энергии.

2. Газоразрядная, или «холодная», возникающая при электрических разрядах в газах при низком давлении. Она используется в газосветных трубках (лампах Вавилова) и во многих других аппаратах.

3. Низкотемпературная — частично ионизированный газ с температурой от 1 до 50 тыс.°К. Название «низкотемпературная плазма» отражает тот факт, что температура ее несравненно ниже, чем у термоядерной. С точки зрения техники низкотемпературная плазма — источник сверхвысоких температур, недостижимых никакими другими путями. Для нее характерны высокая концентрация энергии — до 100 кВт/см² при нормальных коэффициентах использования (более 0,6), большой диапазон скоростей истечения струи — от 1 до 10 тыс. м/с, сравнительная простота получения.

Использование низкотемпературной плазмы в промышленности — одно из крупных достижений современной научно-технической революции.

Плазменная резка и сварка черных и цветных металлов реализованы на многих тысячах предприятий машино-, авиа- и судостроения. Плазменная наплавка и напыление — эффективные средства улучшения прочности, износостойкости и других свойств рабочих органов машин и технологического оборудования. Напыление интересно так же, как один из путей разработки принципиально нового класса материалов — композитных. Большие перспективы открываются перед плазменной металлургией: прямое восстановление металлов из руд, переплав и зонная очистка для получения сверхчистых металлов, производство порошков и т. д. Плазменную технику успешно используют для синтеза минералов и выращивания тугоплавких кристаллов. Особое значение имеет применение плазмы в различных отраслях химической промышленности; будущее высокотемпературной плазмохимии представляется весьма значительным и охватывает большой круг соединений и материалов.

Аппаратура для конкретных плазменных процессов (резка, сварка, напыление и пр.) производится серийно в СССР и во многих зарубежных странах. Плазменные генераторы сравнительно дешевы и долговечны, поэтому их применение дает существенный экономический эффект. Дело в том, что стоимость, например, азотной плазмы почти вдвое меньше стоимости кислородно-ацетиленового пламени при эквивалентных выделениях

энергии, причем энергетический уровень плазменной струи существенно выше (6400°К против 3400°К). Это лишь одна из причин высокой экономической эффективности плазменной техники — перевод технологии на гораздо более высокие уровни энергии.

Если к этому добавить высокий к.п.д. плазменных генераторов, простоту автоматизации технологических процессов, возможность перехода на воздух и воду в качестве плазмообразующей среды, то становится очевидным, что плазменная технология — технология завтрашнего дня.

Внедрение любого плазменного процесса в промышленность сопровождается значительным экономическим эффектом. Годовая экономия от применения плазменно-дуговой резки в среднем по СССР составляет 4 млн. руб.; от внедрения плазменно-дуговой резки вместо газовой электрической на судостроительном заводе им. Носенко — 70 тыс. руб. Пост КГМ-1 для резки черных и цветных металлов в монтажных условиях экономит 4000 руб/год; проходческий комбайн с плазменным нагревателем ПГК-40 — 8000 руб/год. И список этот бесконечен...

Таким образом, деятельность плазменной техники в промышленности многообразна и экономически эффективна, в чем читатель сможет убедиться, прочитав эту книжку.

Генераторы низкотемпературной плазмы

Все известные генераторы низкотемпературной плазмы, или плазмотроны, можно разделить по принципу действия на электродуговые и высокочастотные.

На оси свободно горящей электрической дуги температура достигает $5000\text{--}7000^\circ\text{K}$, а среднемассовая температура — не более 3000°K . Трудность повышения температуры дуги в том, что с увеличением подводимой мощности увеличивается сечение столба дуги, сопротивление ее уменьшается, а плотность тока стремится остаться постоянной.

Если электрическую дугу пропускать через охлаждаемое сопло и одновременно обдувать газом, то дуга сжимается, причем на границе электрического разряда происходят интенсивный теплообмен и деионизация. Принудительное охлаждение газом вызывает термическое сжатие столба дуги (термический пинч-эффект), что, в свою очередь, усиливает сжимающее действие собственного магнитного поля дуги. В результате увеличивается напряженность электрического поля разряда, соответственно электрическая мощность, выделяющаяся в единице объема столба дуги. Это приводит к тому, что температура на оси дуги повышается и может достигать величин, характерных для низкотемпературной плазмы, т. е. $20\text{--}50\text{ тыс.}^\circ\text{K}$.

Принцип действия всех электродуговых плазмотронов одинаков и основан на принудительном охлаждении и сжатии столба электрической дуги газом или жидкостью.

Известны три типа дуговых плазмотронов — с дугой прямого действия, косвенного действия и комбинирован-

ной дугой (рис. 1). У всех у них один из электродов — стержень с тугоплавким наконечником из вольфрама, циркония, гафния и пр. Как правило, это катод. Анод вмонтирован в цилиндрическую камеру, оканчивающуюся медным соплом с отверстием, соосным с катодом. Катод и анод электрически изолированы и охлаждаются

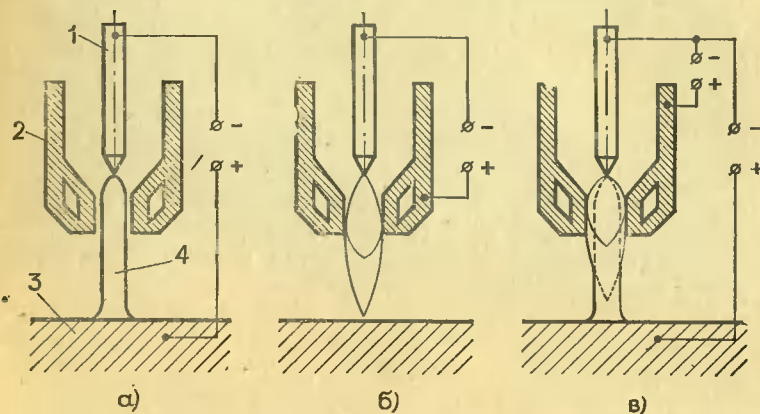


Рис. 1. Типы дуговых плазмотронов:

a — с зависимой дугой (прямого действия); *б* — с независимой дугой (косвенного действия); *в* — с комбинированной дугой.
1 — катод; 2 — сопло; 3 — обрабатываемое изделие; 4 — дуга

водой или воздухом. Дуга между катодом (стержнем) и анодом (соплом) проходит через сопло под давлением газа, подаваемого в разрядную камеру. Место контакта дуги с анодом — анодное пятно — перемещается по внутренней стенке канала сопла, а столб дуги оказывается стабилизированным по оси электрода и сопла. Значительная часть газа, называемого плазмообразующим или рабочим, проходя через столб, при выходе из сопла образует сильно нагретую ионизированную плазменную струю. Слой газа, омывающий столб дуги, относительно холодный и обеспечивает его электрическую и тепловую изоляцию от стенок разрядной камеры, а главное, предохраняет сопло от разрушения. Этот наружный слой газа обуславливает сжатие дуги, в результате плотность тока в плазмотронах достигает 100 А/мм^2 , что на порядок выше плотности тока свободной дуги при атмосферном давлении.

При выходе из сопла поток ионизированного газа несколько расширяется, т. е. сопло как бы является диафрагмой, перетягивающей плазменную струю. Это приводит к возникновению осевого градиента давления собственного магнитного поля дуги, повышающего скорости истечения плазменной струи до значений, превышающих в несколько раз скорость звука.

В плазмотронах с «зависимой» (прямого действия) дугой анод — обрабатываемое изделие (рис. 1,а). Сопло электрически нейтрально и служит для сжатия и стабилизации столба дуги. Непосредственное возбуждение дуги между катодом и изделием через узкий канал сопла осуществить трудно, поэтому первоначально возбуждается вспомогательная дуга между катодом и соплом, питаемая чаще всего от того же источника через токоограничивающее сопротивление, а затем в результате ионизации дугового промежутка и снижения пробойного напряжения возникает основная (рабочая) дуга между катодом и изделием, а вспомогательная — при устойчивом горении основной — отключается.

В плазмотронах с зависимой дугой в обрабатываемое изделие электронным током дуги вводится дополнительная доля тепла; их к.п.д. значительно выше, чем других, и поэтому их целесообразно применять для резки, сварки, наплавки, плавки и других видов обработки электропроводных материалов (металлов).

В плазмотронах с «независимой» — косвенного действия (рис. 1,б) дугой тепловая энергия к изделию передается лишь струей плазмы, нагреваемой столбом дуги. Такого типа плазмтроны используют в основном для обработки неэлектропроводных материалов (напыление, сфероидизация, нагрев, химический синтез и др.). Стабилизируют столб аксиальной или вихревой подачей газа. В первом случае газ проходит вдоль катода, охлаждает его и выходит из отверстия сопла. Во втором — поступает в разрядную камеру через расположенные касательно отверстия и движется по спирали, омывая столб дуги вихревым потоком.

Часто для сварки и резки используют плазмтроны с двойным или комбинированным газовым потоком. Они имеют два сопла, газы, подаваемые в каждое сопло, могут быть разными по назначению, составу и расходу: один — плазмообразующий, а другой — защитный. Существуют плазмтроны и с тремя концентрическими соп-

лами, через третье подается, как правило, газ, транспортирующий в плазменную струю обрабатываемый материал (порошки).

Характеристики плазменной струи определяются в значительной мере плазмообразующим газом. Используются одноатомные инертные газы — аргон, гелий, двухатомные — азот, водород, кислород и многоатомные — углекислый газ, аммиак и др.

Плазма двух- и многоатомных газов содержит больше тепла, поскольку процесс рекомбинации молекул в них идет при более низких температурах. На энтальпию плазменного потока сильно влияет расход плазмообразующего газа. С увеличением его уменьшается площадь поверхности разряда вследствие уменьшения диаметра проводящего столба. Это снижает интенсивность теплопередачи к потоку газа, а следовательно, и его теплосодержание.

Часто для образования плазмы используют смеси различных газов. Подбором можно создать любую среду плазменной струи — окислительную, восстановительную или нейтральную.

Подавляющее количество плазмтронов работает на постоянном токе и прямой полярности: на аноде выделяется большее количество тепла, чем на катоде. В результате стойкость катода в 10 раз выше, чем на обратной полярности, и в 2 раза выше, чем при работе на переменном токе. Проблема выпрямления тока в настоящее время практически решена благодаря широкому выпуску электропромышленностью малогабаритных полупроводниковых вентилях. Первоначальные затраты и расходы на эксплуатацию плазменных установок постоянного и переменного тока приблизительно равны. Поэтому для большинства процессов обработки материалов целесообразно применять плазмтроны постоянного тока.

Плазмтроны постоянного тока имеют и более высокий коэффициент использования мощности, чем плазмтроны на переменном токе. Кроме того, важное их преимущество — большая стабильность горения дуги. Во время перемены полярности (переменный ток) дуга может погаснуть, поэтому обычно напряжение холостого хода источника переменного тока не менее чем вдвое превышает рабочее напряжение дуги.

Плазмтроны переменного тока применяют иногда в

силу технологических особенностей процесса. Например, сварку алюминиевых сплавов целесообразно вести на переменном токе, так как в периоды обратной полярности разрушается тугоплавкая пленка окиси алюминия, препятствующая нормальному процессу сплавления металла.

Конструкции дуговых плазмотронов различны, но общее для них — электрическая дуга, горение которой организуется таким образом, чтобы получить достаточно чистую плазменную струю, мало загрязненную примесями материала электродов, испаряющихся при очень сильных токах в электрической дуге. Однако полностью устранить загрязнение струи не удастся, что затрудняет процесс получения высокочистых материалов. В ряде случаев известные трудности создают и высокие скорости истечения струи.

Указанные недостатки могут быть устранены при использовании безэлектродных плазмотронов, в которых реализуется высокочастотный (ВЧ) или сверхвысокочастотный (СВЧ) разряд. Впервые безэлектродный ВЧ-разряд большой мощности при давлениях, близких к атмосферному, получил советский ученый Г. И. Бабат. Десять лет спустя появились сообщения о работах американца Рида и других, посвященных описанию конструкций ВЧ-плазмотронов и примерам технологического применения.

В настоящее время промышленность ряда стран выпускает ВЧ-безэлектродные плазмотроны. Рабочие частоты их — от сотен килогерц до десятков мегагерц, мощность в разряде — от единиц до десятков киловатт, к.п.д. — до 70%.

Основной элемент такого плазмотрона — разрядная камера, в большинстве случаев из плавленого кварца и в форме трубы. Снаружи камеры, в средней части ее, помещен индуктор, питаемый от ВЧ-генератора. В камеру тангенциально подается плазмообразующий газ (аргон, водород, кислород, воздух, их смеси). Разряд зажигается, когда в зону индуктора вводится тугоплавкий металлический или графитовый электрод; при разогреве его в поле индуктора возникает тлеющий разряд, который служит первичным источником ионизации. Под действием магнитного поля индуктора он преобразуется в кольцевой безэлектродный разряд — замкнутый виток плазмы в форме веретенообразного факела, свободно вися-

щего в полости камеры. От стенок камеры плазменный факел отделен потоком обтекающего газа, который способствует его стабилизации.

После возникновения кольцевого разряда электрод из камеры убирают. Разряд сохраняет устойчивость при определенном соотношении диаметра разрядной камеры, подводимой мощности и расхода плазмообразующего газа. Важен вопрос термозащиты стенок камеры. Существует ряд способов термозащиты — принудительное внутреннее газовое охлаждение, водяное охлаждение, внутренний экран из медных водоохлаждаемых труб.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан металлический ВЧ-плазмотрон из двух водоохлаждаемых медных полуцилиндров, разделенных термостойкими диэлектрическими прокладками и стянутых диэлектрическими трубами.

Сверхвысокочастотные плазмотроны созданы сравнительно недавно. В них ток от СВЧ-генератора по волноводу поступает в разрядную трубку. В центральной части трубки при помощи перестраиваемого поршня устанавливается максимум напряженности электрического поля. Пробой происходит при атмосферном давлении. Регулируя режим работы генератора и расход газа, формируют разряд в виде плотной цилиндрической струи. Для отрыва струи плазмы от стенок разрядной трубки применен тангенциальный ввод рабочего газа. Изменяя анодное напряжение, можно регулировать импульсную и среднюю мощность генератора: импульсную — от десятков киловатт до 2—3 МгВт, среднюю — от десятков ватт до десятков киловатт. Рабочая частота СВЧ-плазмотронов колеблется около 300 МГц, ресурс определяется сроком службы генератора и достигает 1000 ч. Температура газа в разряде при расходе 5 л/мин составляет 7000—8000°K.

Отличительные преимущества высоко- и сверхвысокочастотных плазмотронов — возможность получения особо высоких среднетемператур плазмы, длительное время контакта при проведении химических реакций и исключительная чистота плазменной струи.

Мощность выпускаемых высокочастотных плазмотронов достигает 1000 кВт при ресурсе непрерывной работы около 2000 ч и к.п.д. 60—70%; сверхвысокочастотные плазмотроны имеют мощность до 50 кВт, но в принципе

могут быть созданы установки мощностью в несколько сотен киловатт с к.п.д. до 80%.

Серийно выпускаемая отечественная аппаратура для плазменных процессов отличается большим разнообразием, так как к плазмотронам наряду с общими требованиями (надежное зажигание и стабильное горение дуги, высокий ресурс работы электродов, надежная электроизоляция, легкость сборки, разборки, ремонта и др.) предъявляется и ряд специфических, обусловленных особенностями технологического процесса. Так, плазмотроны для сварки и наплавки должны обеспечивать надежную защиту шва от вредного воздействия окружающей среды; плазмотроны для напыления — высокое теплосодержание плазменной струи, достаточное время ее контакта с обрабатываемыми частицами, эффективную теплопередачу от струи к дисперсным частицам; плазмотроны для резки — высокую концентрацию теплового потока плазменной струи. Конструкция плавильных плазмотронов должна способствовать интенсивному охлаждению всех узлов (при отсутствии подводящих коммуникаций в рабочем пространстве печи), защите всех уплотнений от излучения и др.

Описание специализированных плазменных установок приводится в соответствующих разделах.

Резка металлов

Высокая сосредоточенность энергии плазменной струи (порядка 10^6 Вт/см^2) позволяет чрезвычайно быстро расплавлять металл, а ее значительная скорость гарантирует немедленное удаление расплава. Поэтому одним из первых применений низкотемпературной плазмы в промышленности стала плазменная резка металлов.

В 1959—1960 гг. технологию плазменной резки металлов освоили на судостроительных заводах им. Жданова и Черноморском. А в настоящее время, всего через 15 лет, плазменно-дуговую резку применяют сотни предприятий нашей страны. Годовой объем производства промышленных установок подходит к десяти тысячам единиц.

Области применения плазменно-дуговой резки чрезвычайно широки: раскрой листового металла толщиной от 0,1 до 300 мм, сверление отверстий диаметром от

0,06 мм и более, резка труб диаметром до 2500 мм, резка цветных металлов — меди, алюминия, титана, а также нержавеющей и малоуглеродистых сталей. Резка может быть прямолинейной и профильной, со скосом и без скоса кромок. Возможны поверхностная строжка (подрубка корня шва), вырезка канавок, обработка кромок под сварку, вырезка дефектов, обточка кованых заготовок из высоколегированных сталей, снятие окалины с поковок и литейной корки.

Преимущества плазменной резки хорошо видны на следующих примерах. При разделке кромок под сварку алюминиевого листа толщиной 16 мм плазменная разделка в 8 раз быстрее, чем та же операция, выполняемая на строгальном станке. Сравнение расходов на механическую и плазменную резку алюминия при толщине листа 35 мм свидетельствует о преимуществе последней в 30—35 раз, а при толщине 20 мм — в 150 раз!

Плазменно-дуговая резка наиболее эффективна при использовании плазмотронов с зависимой дугой, когда рабочий анод — разрезаемое изделие или лист металла. В качестве плазмообразующего газа используют двухкомпонентные смеси — водородсодержащие и кислородсодержащие. Если основной режущий газ водород, то для минимального износа сопла необходим аргон или азот, причем рекомендуются соотношения аргон — водород — 1 : 4, азот — водород — 1 : 1.

Кислородсодержащий газ в современных плазменных установках — обыкновенный воздух. Долгое время его не удавалось использовать из-за низкой стойкости вольфрамовых катодов. Интенсивные поиски привели к созданию «пленочных» катодов, названных так потому, что некоторые металлы, например цирконий, при высокой температуре образуют на поверхности тонкую тугоплавкую и электропроводящую пленку, предотвращающую их испарение и окисление. Маленький кусочек циркониевой проволоки, запрессованный в медную обойму и вставленный в корпус катода, обеспечивает работу плазмотрона на воздухе при токе 400 А в течение 24 ч, а затем может быть заменен, на что требуется 2—3 мин.

Интересны плазмотроны для резки металлов, в которых в качестве рабочей среды используется вода. Водород способствует высоким показателям работы водоелектрических плазмотронов. Чтобы повысить их ресурс,

создана специальная система закрутки охлаждающей воды, и в рабочее сопло попадает ее не более 1—2%.

Плазменно-дуговая резка металлов может быть ручной и машинной. При ограниченных объемах резки на территориально-рассредоточенных объектах используется ручной способ, однако при этом оператор находится в непосредственной близости от испаряющегося металла, который не удается удалить даже интенсивной вентиляции.

Основная сфера деятельности ручной резки — монтажные работы, связанные с применением алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей в судостроительной промышленности, при строительстве и ремонте предприятий химического машиностроения, а также при монтаже энергосистем. Для этих целей во ВНИИЭСО разработана установка УГЭР-300 с воздушным охлаждением систем; она выпускается серийно Тбилисским заводом ЭСО им. Е. О. Патона. Рабочий ток плавно регулируется в диапазоне 50—400 А при рабочем напряжении 120 В, что позволяет резать алюминиевые сплавы толщиной до 70 мм, нержавеющую сталь до 50 мм и медь до 30 мм.

В установке использован плазмотрон Т-14 на аргоно-водородной смеси диаметром 55 мм и весом 600 г. Для его охлаждения можно использовать водовоздушную смесь. По интенсивности охлаждения она практически не уступает проточной воде, но одновременно сохраняется легкость и маневренность плазмотронов с разомкнутой системой охлаждения. Такие плазмотроны с пределом по току до 800 А были внедрены на Электростальском заводе тяжелого машиностроения в литейных цехах на тяжелых и трудоемких операциях — удалении пригаров, облоя, литников, выборе дефектных мест, поверхностной строжке. При этом производительность труда возросла в 10 раз, и оказалось возможным удалять такие пригары, которые другими способами вообще невозможно было удалить. Поскольку расход воды весьма мал — до 7 л/ч, то способ можно применять даже зимой на открытых площадках — достаточно иметь бачок воды емкостью несколько литров с нагревателем 500—600 Вт.

Упомянем также несколько других установок ручной плазменной резки металлов. Резак РПВ-1 с воздушным охлаждением для резки металлов толщиной до 50 мм;

установка КПМ-1 с резаком РДП-2 для цветных металлов (до 50 мм) и нержавеющей сталей (до 40 мм) Кировоканского завода «Автогенмаш»; трест № 7 Минмонтажспецстроя СССР разработал и изготавливает установку УПРМ-1 с резаками КРП-1 или «Вихрь-69»; Одесский завод «Автогенмаш» выпускает установку УРПД-67 с водяным охлаждением.

Машинная плазменно-дуговая резка хорошо себя зарекомендовала на предприятиях с большим объемом раскроя листового проката, труб и вообще металлических заготовок однотипных деталей. В 1969 г. отечественная промышленность начала выпускать установки типа «Кристалл» с цифровым программным управлением для плазменно-дуговой резки, которые значительно эффективнее установок для газовой резки металлов. Так, при толщине листа 15—20 мм скорость плазменной резки втрое выше скорости газовой (1100—1500 мм/мин против 360—500 мм/мин), а при малых толщинах — 5—10 мм — это отношение возрастает до 3,5—5,0.

Высокая производительность отличает и другие установки и машины плазменной резки металлов, например СГУ с установкой УВПР «Киев» Одесского завода «Автогенмаш» с копированием контура по шаблонам; установка ИТЭФ-20 (Институт теоретической и экспериментальной физики) для резки листов, труб, обрезки штамповок и отливок из цветных металлов и сплавов при максимальной толщине разрезаемого металла 220 мм; аппарат АВПР-1 ИЭС им. Е. О. Патона с плазмотроном ВПР-6; установки УГЭР-500, ОПР-6 и др.

Установки с фото- и магнитокопировальными устройствами работают на Выборгском судостроительном заводе, на Электростальском электрометаллургическом заводе им. Тевосяна (поточная линия плазменной резки сутунки), Челябинском трубопрокатном заводе и ленинградском заводе «Лентрублин» (плазменная резка чугунных и стальных труб), Новомосковском металлургическом заводе (плазменная резка труб диаметром 2500 мм), Ждановском заводе тяжелого машиностроения (раскрой листового металла) и ряде других крупных предприятий.

Плазменная резка нашла свое место среди других способов обработки металлов в упорной конкуренции с газовой, в частности с кислородной. Дело в том, что высокая скорость процесса сохраняется лишь при малой

толщине металла. Так, при толщине 5—10 мм скорость плазменной резки в 4—8 раз выше скорости кислородной. С увеличением толщины скорость процесса снижается так, что при работе с конструкционной сталью толщиной 30—40 мм она уже равна скорости кислородной резки, а за этими пределами не только скорость последней выше, но и экономика свидетельствует в ее пользу.

С появлением воздушно-плазменной резки положение существенно изменилось. Теперь плазменная резка быстрее и выгоднее кислородной вплоть до толщины 50 мм, а при токе 800 А — и до 80 мм.

В свое время способ воздушно-плазменной резки был успешно разработан в США, но американские исследователи не довели процесс до промышленного использования. Сегодня воздушно-плазменная резка только в нашей стране получила широкое промышленное распространение. А на заводе высокочастотного электрооборудования в г. Степановане в 1972 г. начато серийное производство установки АПР-401 (разработка ВНИИЭСО).

Уже имеется значительный опыт применения воздушно-плазменной резки на многих машиностроительных, судостроительных, металлургических, трубных и авиационных заводах и наметились основные области ее оптимального использования. В первую очередь резка углеродистых и нержавеющей сталей — с 1 до 50 мм. Она дает малую ширину разогрева, металл коробится незначительно — судостроительные заводы после нее не правят листы.

Алюминий. Хорошего качества реза при воздушно-плазменной резке здесь удастся достигнуть лишь до толщины 30 мм; при больших толщинах рез имеет рваную поверхность и появляется трудно удаляемый грат (застывшие капли металла). Следует отметить, что у резки цветных металлов ряд особенностей, обуславливающих применение плазмотронов, работающих на аргонно-водородных смесях. Дело в том, что, скажем, медь и ее сплавы имеют высокую теплопроводность, это вынуждает работать на больших токах, которых легче всего достичь в аргонно-водородной плазме. При резке алюминия металл из полости реза удаляется в виде струи из мелких капель; рекомендуются аргонно-водородные смеси с пониженным содержанием водорода.

Нержавеющая сталь. Область применения плазмен-

ной резки — листы толщиной до 120 мм, при большей толщине кислородно-флюсовая резка проходит при более высоких скоростях. Но при малых толщинах преимущества плазменной резки несомненны. Оптимальные плазмообразующие среды в данном случае — азот и воздух.

Технология плазменно-дуговой резки несложна. Один из обязательных моментов — надежное заземление листа, в противном случае возникает двойная дуга. Специальной обработки листов не требуется, единственное требование — зачистить участок металла в том месте, с которого начинается рез, причем достаточно просто нанести несколько глубоких царапин, чтобы в этом месте на поверхности листа могла возникнуть дуга.

Расстояние между верхней плоскостью листа и нижней точкой плазмотрона должно быть в интервале 10—15 мм. Несоблюдение интервала увеличивает ширину реза, и к тому же плазмотрон может замкнуться на изделие.

Вначале возбуждают «дежурную» дугу — между катодом и анодным соплом — и включают двигатель опускания плазмотрона. При расстоянии 20—30 мм от поверхности загорается рабочая дуга, а когда расстояние достигнет 10—15 мм, срабатывает выключатель начальной скорости перемещения и начинается цикл. Резы, выполненные плазменной дугой, обычно несколько расширяются кверху, однако существуют режимы, позволяющие получать практически параллельные кромки, даже раскрывающиеся книзу.

Как правило, стремятся к минимальной ширине реза. В этом плане необходимо отметить установки плазменной резки РА 20 и РА 100, разработанные научно-исследовательским институтом профессора М. фон Арденне (ГДР) в содружестве с заводом «Кельберг». Назначение их — резка и глубинная подрезка на весу толстого металла. Благодаря специальной форме резаков можно получить косые срезы, не изменяя расстояние между резаком и изделием. На установках обрабатывают углеродистые и нержавеющей стали, алюминий, медь и др. Плазмообразующая среда — аргонно-водородные смеси. Катод из торированного вольфрама, медное конусное сопло диаметром 1,0 мм охлаждается водой. Установка РА 20 работает с металлом толщиной до 30 мм при ширине реза 0,3—3 мм. Установка РА 100

имеет сопло резака диаметром 3,0—4,5 мм, может резать металлы толщиной до 100 мм при ширине реза до 10 мм.

Сварка металлов

Плазменно-дуговая сварка применяется в ряде отраслей промышленности: электронной, авиационной, ракетной, судостроительной, нефтехимической и др. С ее помощью сваривают продольные стыки трубопроводов, детали из нержавеющей стали, титана, никелевых сплавов, молибдена, вольфрама. Во многих случаях плазменная сварка заменила аргонно-дуговую. Дело в том, что по сравнению с аргоновой плазменная дуга горит более стабильно, отсюда равномерно проплавляются кромки, высокая скорость, меньшее количество проходов и меньший расход присадочного металла.

Температура обычной сварочной дуги в атмосфере защитного газа (аргона) не превышает 3000—4000°K. Плазменная, или «сжатая» водоохлаждаемым соплом, дуга может иметь в несколько раз большие температуры и теплосодержание, что расширяет возможности подбора параметров процесса сварки. Однако при использовании плазменной дуги часть тепла идет на охлаждение столба дуги холодными стенками сопла, поэтому эффективный к.п.д. несколько ниже, чем для обычной дуги.

По проплавляющей способности плазменная дуга занимает промежуточное положение между электронным лучом и сварочной дугой в среде аргона. Плазменная струя имеет цилиндрическую форму, поэтому процесс сварки менее чувствителен к изменению ее длины, чем при аргонно-дуговой, когда дуга конической формы. Пятно нагрева практически неизменного диаметра, что позволяет сохранить неизменной ширину шва, а прогиб кромок на 30—40% меньше, чем при сварке открытой дугой.

Расширение диаметра дуги после выхода ее из канала сопла приводит к увеличению объема сварочной ванны, а ее динамическое воздействие ухудшает форму шва. Чтобы избавиться от этого, предложили формировать плазменную струю двумя противоположными потоками газа, направленными поперек струи: активное пятно на-

грева сжимается в плоскости действия струй, что на 30% уменьшает ширину верхней части шва.

Благоприятной формы пятна можно достичь также с помощью специальных сопел. Если необходимо иметь пятно вытянутой формы, то в сопле делают два дополнительных отверстия. Через них поступает холодный плазмообразующий газ, что уменьшает поперечный размер пятна и придает ему вытянутую форму. При сварке таким соплом зона термического влияния сужается, а скорость сварки возрастает на 50—100%.

Другой вариант — сопло с дополнительными отверстиями для создания фокусирующего газового потока. Поток направлен под углом к оси столба дуги, благодаря чему создается усилие ее дополнительного сжатия.

Для сварки плазменной дугой разработана горелка с частичным отсосом газа из зоны сварки. Пятно нагрева такой горелки меньше, чем у обычной, что сокращает ширину шва.

Форму струи можно менять и наложением внешних магнитных полей. Переменное магнитное поле формирует плоскую веерообразную струю плазмы, которой можно проплавить дорожку шириной до 30 мм. Бегущее поле перемещает дугу по образующей конуса, что используется для обварки цилиндрических деталей.

В качестве плазмообразующего газа используют аргон и смеси его с водородом и гелием. Состав газа влияет на глубину проплавления при данной величине тока. Добавка к аргону небольших количеств водорода (оптимальная—7%) увеличивает глубину проплавления, причем при использовании гелия последняя меньше. При сварке нержавеющей сталей добавка к аргону 7% водорода не вызывает пористости шва, которая возникает при аргонно-дуговой сварке при значительно меньшем содержании водорода.

Расход плазмообразующего газа не должен превышать 0,5 м³/ч, чтобы истечение плазмы из сопла не было турбулентным, а силовое воздействие плазменной струи на поверхность сварочной ванны не приводило к разбрызгиванию расплавленного металла. С увеличением расхода газа увеличивается и проплавляющая способность дуги, последняя приобретает режущие свойства. Разработан способ сварки «проникающей дугой» на грани, за которой начинается резка. Плазменная струя проходит через всю толщу свариваемого металла и обра-

зует сквозное отверстие на передней кромке ванны. Факел раскаленных газов выходит за нижнюю плоскость деталей, а расплавленному металлу не дают стекать силы поверхностного натяжения.

Характер защитного газа при плазменной сварке определяется составом свариваемого металла. Для сварки нержавеющей сталей применяют аргон, гелий и аргонно-водородные смеси; для алюминия — чистый азот; для меди, никеля и его сплавов — аргон с добавкой 5—8% водорода. При сварке титана и циркония нельзя применять водород, который легко образует соединения с этими металлами. Низкоуглеродистые и низколегированные стали можно сваривать в среде углекислого газа.

Защитные газы применяют при плазменной сварке, когда сварочный ток превышает 100 А. Меньшие токи и небольшие расстояния между соплом и изделием позволяют вести процесс без специальной защиты. А при сварке проникающей дугой защищают от окисления и обратную сторону шва.

Существуют горелки, конструкция которых обеспечивает защиту сопла при помощи насадки, электрически изолированной от него. Поток газа между соплом и насадкой дополнительно сжимает столб дуги и препятствует возникновению аварийного режима — двойного дугобразования.

Сварку продольных или кольцевых швов листов толщиной менее 3,2 мм выполняют за один проход. При односторонней сварке более толстых листов плазменная дуга проплавляет сквозное отверстие, через которое может вылиться металл. Сварка металла большой толщины производится с разделкой кромок и применением присадочной проволоки. При соединении тяжелых конструкций из листов толщиной до 25 мм требуется V- или U-образная подготовка кромок. Глубина и угол разделки значительно меньше, чем для аргонно-дуговой сварки. При плазменно-дуговом способе расход присадочного металла снижается приблизительно в 6 раз.

Присадочную проволоку подают на переднюю кромку ванны, однако ее можно подавать и в столб дуги или в концевую часть ванны. Лучших результатов достигают при электрическом контакте присадочной проволоки с изделием — увеличивается скорость плавления присадки.

В настоящее время разработано большое количество типов плазменных горелок для сварки — горелки механизированной сварки током до 450 А со сменными вольфрамовыми электродами диаметром 1,6; 2,4; 3,2 мм (дуга прямой полярности) и медными водоохлаждаемыми электродами (дуга обратной полярности); установки АП-4 и АП-5, УСП-300, УП-301, 302, 303 — для механизированного процесса; установка УПСР-300 — для ручной сварки и др.

Установка УП-303 предназначена для сварки продольных и кольцевых швов. В качестве источника питания используется преобразователь ПСО-300. Плазменная горелка может перемещаться в вертикальной и горизонтальной плоскостях и изменять угол наклона к изделию на 90°. Присадочная проволока подается со скоростью 0,3—3 м/мин, угол наклона к горизонтальной плоскости 5—15°. С помощью установки можно соединять листы толщиной до 10 мм за один проход без скоса кромок.

Плазменной дугой успешно сваривают листы никеля и высоконикелевых сплавов в отожженном состоянии толщиной до 7,3 мм без разделки кромок.

Особенно большие преимущества имеет плазменная аппаратура при сварке труб; здесь ее применение резко повышает производительность. Так, замена аргонно-дуговой сварки труб из нержавеющей стали с толщиной стенки 2,3 и 7,0 мм плазменно-дуговой увеличивает скорость процесса в некоторых случаях в 2 раза. Для сварки труб с толщиной стенки до 3,8 мм рекомендуется повышать концентрацию водорода в аргонно-водородной смеси до 15%, а при толщине стенки больше 3,8 мм снижать ее до 5—7%.

В настоящее время сварные изделия из алюминиевых сплавов получают аргонно-дуговым способом. Он позволяет добиться высокого качества сварных соединений, но из-за малой проплавляющей способности дуги непроизводителен. Плазменная же сварка позволяет выполнять соединения из алюминиевых сплавов с большой скоростью и малой погонной энергией.

Хорошо изучена плазменная сварка алюминия дугой переменного тока. По сравнению с аргонно-дуговой она имеет следующие преимущества: более высокую проплавляющую способность, эффективный к.п.д. нагрева до 75—80%, что позволяет увеличить скорость сварки на

50—70% и получать узкие швы; расход аргона на 1 м шва в 4 раза ниже; снижается степень деформации конструкции.

При дуговой сварке алюминия и его сплавов в среде инертных газов без обработки флюсом необходимое условие получения качественных соединений — катодная очистка поверхности металла от окисной пленки (при сварке на переменном токе или на постоянном токе обратной полярности). Это же требование сохраняется и при плазменно-дуговом методе. Кроме того, обязательное условие — наличие потока инертного газа, защищающего ванну расплавленного металла.

В последние годы освоена также плазменная сварка меди и хромовой бронзы на постоянном токе прямой и обратной полярности. Эти металлы характеризуют высокие теплопроводность и линейное расширение, которые возрастают с повышением температуры. В условиях неравномерного нагрева и охлаждения линейное расширение приводит к значительным деформациям не только тонких материалов, но и толстых швов большой протяженности. Поэтому при сварке цветных металлов и сплавов необходимо применять приспособления, предотвращающие отрыв свариваемых листов от подкладки и способствующие их скольжению. Низкие значения поверхностного натяжения для цветных металлов и сплавов, а также повышение жидкотекучести меди заставляют формировать швы на подкладках из различных материалов.

Известно, насколько трудно сваривать тонколистовые материалы, толщина стенок которых менее 1 мм. Прожоги, провисание шва, коробление ухудшают качество соединений. Среди способов микросварки — аргонно-дуговой и импульсный. А микроплазменная сварка имеет ряд преимуществ перед ними — резкое уменьшение коробления кромок, высокая стабильность дуги, малая чувствительность стабильности к длине дуги, большая проплавливающая способность. Все это позволяет получать более качественные соединения. С ее помощью можно изготавливать прецизионные изделия из меди, алюминия, титана, тантала, молибдена, вольфрама, никеля, кобальта, инконеля, хастеллоя, углеродистых и нержавеющей сталей.

Микроплазменная сварка игольчатой дугой используется для соединения материалов толщиной от десят-

ков микрон до 1 мм. Ток постоянный — 0,1—10 А, дуга зависимая или независимая. Плазмообразующий газ — аргон, защитный — аргон, смеси его с гелием и водородом, азот, углекислый газ.

Оборудование микроплазменной сварки отличается более высоким напряжением в сварочной цепи (до 60 В), вспомогательная дежурная дуга, а также то, что диаметр выходного канала сопла плазмотрона достигает 0,75 мм.

При включении источника питания зажигается дежурная дуга между катодом и анодным соплом. Когда горелку подводят к изделию на 1—1,5 мм, она вытягивается и возбуждает рабочую дугу между катодом и изделием. Последняя обжимается потоком защитного газа и образует плазменную струю в виде иглы. Длина игольчатой плазменной струи в 10 раз больше, чем при аргонно-дуговой сварке, и в 7—8 раз тоньше. Угол расхождения ее не превышает 6°, стабильность обеспечивается тем, что ее вольт-амперная характеристика почти горизонтальна. Изменение тока от 1 до 10 А при аргонно-дуговой сварке приводит к изменению напряжения на 100%, а при микроплазменной — на 5%.

В стыковых швах зазоры не должны быть более 15% толщины свариваемых кромок, одна кромка может превысить другую не больше чем на 20% их толщины; несоблюдение этих условий ведет к прожогам. Если эти требования выполнить невозможно, сварку ведут с присадочным материалом или применяют стыковое соединение с отбортовкой кромок (для толщины металла менее 0,125 мм). Наилучшее соединение — торцовое; иногда целесообразно применять медные зажимы и подкладки для предотвращения протекания расплавленного металла в зазор.

Непрерывная микроплазменная сварка игольчатой дугой деформирует металл на 25—30% меньше, чем аргонно-дуговая на тех же токах, — это следствие уменьшения зоны разогрева: данное обстоятельство особенно важно при выполнении швов большой протяженности.

Микроплазменную сварку фигурных швов можно механизировать, применив плавающую головку, управляемую напряжением дуги. Величина сигнала ± 10 В вполне достаточно для управления перемещением плазмотрона. Автоматизация не снижает качества шва благодаря стабильности электрических характеристик

игольчатой дуги и возможности обеспечить удовлетворительное качество сварки при отклонении от горизонтали на угол до 45° .

Микроплазменная сварка весьма удобна и для изготовления поперечношовных сильфонов (наружный диаметр 63 мм, внутренний 26 мм, толщина 0,12 мм) из нержавеющей стали, микроэлектронных диодных матриц из кобальта, капилляров из нержавеющей стали без последующей рихтовки, корпусов реле, проволоки из титана и никеля, угловых соединений (иногда с присадочным металлом). Особенно хорошие результаты и высокий экономический эффект дает микроплазменная сварка микроизделий в электронной технике, в том числе с вакуумно-плотными швами. Соединение, например, корпусов реле толщиной 0,25 мм производится током 3,5—4 А со скоростью 125 мм/мин с применением аргоно-водородной защитной среды. Корпус из нержавеющей стали при сварке закрепляется медными зажимами и устанавливается на медную пластину. Если механизировать процесс, скорость можно еще увеличить. Таким же методом и ремонтируют эти изделия. Микроплазменная сварка здесь — конкурент электронно-лучевой, поскольку оборудование для нее значительно проще и дешевле.

Интересно использование микроплазменных горелок при исправлении дефектов и устранении микропор в наружных слоях изделий. На Киевском арматурно-машиностроительном заводе они испытаны для восстановления бракованных деталей арматуры (седла, золотники), рабочие части которых наплавлялись стеллитом марки ВЗК. Игольчатая дуга благодаря местному нагреву заплавляет микропоры, трещины, раковины без какого-либо нарушения геометрии детали. После заплавления незначительных дефектов дальнейшая механическая обработка детали не требуется, так как закристаллизовавшаяся микрораковина имеет гладкую и ровную поверхность, свободную от окислов.

На Свердловском заводе кислородного машиностроения автоматической плазменно-дуговой сваркой обрабатывают внутренний сосуд Дьюара из нержавеющей стали толщиной 0,3—1 мм. Сварные швы получают прочными, вакуумно-плотными и хладостойкими, что позволило отказаться от дорогих и дефицитных цельнотянутых труб. Установка с источником питания ИПИД-1

обеспечивает микроплазменную сварку как в постоянном, так и в импульсном режимах. Импульсный ввод тепла благоприятно влияет на кристаллизацию ванны жидкого металла и формирование шва. Импульсы постоянного тока, регулируемые по длительности, накладывают на постоянно горящую дежурную дугу малой мощности, которая стабилизирует повторное возбуждение. Установка бесступенчато регулирует и вращение изделия при сварке кольцевых швов, а также плавное бесступенчатое перемещение сварочной горелки при сварке продольных швов. Специальный механизм зачищает кромки под сварку, он совместно со сварочной горелкой движется параллельно оси вращения изделия. Аппаратура позволяет сваривать сосуды диаметром 150—450 мм с толщиной стенки 0,3—2,0 мм. Сварочный ток максимум 150 А, ток дежурной дуги 1—3 А, длительность импульса тока 0,08—0,44 с, максимальная длина шва 600 мм. Можно сваривать нержавеющие, жаропрочные и высокопрочные стали.

Микроплазменная сварка используется для соединения встык проволок из различных металлов, например титановой и никелевой. Проволоки диаметром 0,5 мм сваривались током 2,5 А, время сварки одного стыка 0,2 с. Плотный контакт проволок достигается применением специального приспособления. Микроплазменная сварка оказалась более простой и производительной по сравнению с применявшейся контактной.

Установки для микроплазменной сварки разработаны и фирмами США, Канады, Швейцарии и др. Так, швейцарская фирма «Сешерон» создала установку для сварки металлов толщиной до 0,01 мм. Сварочный ток около 2 А, плазмообразующий газ — аргон, защитный — аргоно-водородная смесь.

Источники питания для микроплазменных горелок должны иметь гиперболическую вольт-амперную характеристику или приближенную к ней линейнопадающую. В ИЭС им. Е. О. Патона разработан источник А-1255 с линейнопадающей характеристикой на рабочий ток 10 А, простого устройства и высокой надежности. Он обеспечивает стабильную работу горелки и хорошие качества швов при значительных колебаниях напряжения сети.

Таким образом, в настоящее время можно считать доказанным, что плазменная сварка целесообразна для

соединения различных цветных металлов, сплавов, углеродистых и нержавеющей сталей малых (менее 1 мм) и в некоторых случаях средних (до 10 мм) толщин.

Наплавка металлов и сплавов

Рабочие органы многих машин и технологического оборудования подвержены интенсивному абразивному износу, воздействию высоких температур и коррозионной среды. Для упрочнения и увеличения срока службы изделий на их рабочие поверхности наплавляют металлы и сплавы со специальными свойствами, причем вес наплавки составляет небольшую долю от общего веса изделия. Такие биметаллические конструкции позволяют экономить дорогостоящие и дефицитные материалы. Кроме того, наплавку можно возобновлять по мере износа, что во много раз снижает потребность в запасных частях и стоимость эксплуатации машин и оборудования.

Свойства металла наплавки и его соединения с основным металлом в значительной мере зависят от глубины проплавления основного материала, перемешивания его с наплавляемым и перехода его элементов в металл наплавки. Как правило, чем больше глубина проплавления, степень перемешивания и переход элементов основного металла в металл наплавки, тем хуже свойства как металла наплавки, так и сплава в целом.

Широко применяющиеся в промышленности способы наплавки — автоматическая электродуговая под слоем флюса проволокой и лентой, плавящимся электродом в среде защитных газов — практически исчерпали свои возможности в части уменьшения глубины проплавления основного металла.

Требованию минимального проплавления основного металла отвечает плазменная наплавка. Кроме того, она отличается высокой производительностью, не требует сложного оборудования, позволяет наплавлять тонкие слои (до 250 мкм) металлов, в том числе тугоплавких. Присадочный материал при плазменной наплавке можно использовать в виде проволоки, ленты или порошка.

Известно несколько способов плазменной наплавки.

Наплавку проволокой или лентой можно осуществлять зависимой (прямой) и независимой (косвенной) дугой. Зависимая, горящая между катодом горелки и наплавляемым изделием, значительно проплавляет последнее. Способ применяют главным образом для нанесения толстых слоев металла, идентичного металлу изделия.

В 1963 г. в Институте металлургии им. Байкова АН СССР был разработан способ наплавки с токоведущей проволокой, принципиальная схема которой показана на рис. 2. Источник тепла — независимый двухдуговой раз-

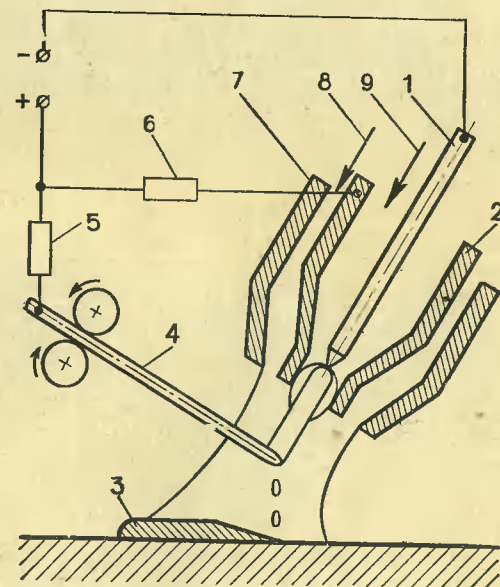


Рис. 2. Схема плазменной наплавки с токоведущей присадочной проволокой:

1 — катод; 2 — сопло; 3 — наплавленный слой; 4 — присадочная проволока; 5 — балластное сопротивление; 6 — ограничительное сопротивление; 7 — защитная насадка; 8 — ввод защитного газа; 9 — ввод плазмообразующего газа

ряд. Одна дуга горит между катодом и анодным соплом плазмотрона, вторая — между катодом и токоведущей присадочной проволокой. Поскольку первая необходима только для возбуждения и поддержания второй, то величина тока в ней подбирается из условия надежной ра-

боты горелки (до 40 А), а во второй — в зависимости от диаметра присадочной проволоки. Расстояние от среза сопла горелки до торца токоведущей проволоки 8—12 мм, а от проволоки до изделия — 10—30 мм.

Параметры наплавки можно подобрать такими, что расплавления основного металла не происходит. Тогда содержание металла наплавки в основном металле незначительно и зависит от длительности диффузии расплава в твердую фазу. При времени контактирования жидкой меди при наплавке на сталь в 1,5—4 с доля железа менее 0,5%. Хорошие результаты при плазменной наплавке с токоведущей проволокой получены для меди, наносимой на сталь, а также бронз и латуней на различные стали и пр.

Плазменную наплавку можно осуществлять не только с присадочной проволокой, но и с использованием порошков. Наиболее простой способ наплавки порошков сводится к следующему. Крупнозернистый порошок — крупка — насыпается на поверхность изделия, а плазменная дуга между катодом и изделием его расплавляет. Вариант способа — подача крупки специальным питателем в процессе наплавки. Слой порошка должен быть 0,5—2,5 мм. Благодаря тяжести зерен он не раздувается, что существенно, когда деталь предварительно подогрета.

Для качественной защиты сварочной ванны она обдувается инертным газом. Благодаря поперечным колебаниям горелки за один проход можно получить наплавленный валик шириной 50—60 мм и толщиной до 5—6 мм. Наплавка по слою крупки, однако, имеет существенный недостаток — она пригодна только для поверхностей с малой кривизной.

Другой способ плазменной наплавки порошков основан на подаче порошка в сварочную ванну: дуга между катодом и изделием образует на последнем ванну (расплав), куда и подается порошок. Способ позволяет получить изделие, в поверхность которого вкраплены зерна тугоплавких металлов.

Наиболее универсальна наплавка с подачей тонкого порошка в плазменную струю. В некоторых случаях порошок может быть нагрет до капельно-жидкого состояния и в расплавленном виде нанесен на изделие. Для реализации способа создано несколько типов плазменных горелок. Например, в ИЭС им. Е. О. Патона разработа-

на горелка комбинированного типа с тремя соплами — внутренним, наружным и защитным.

Одна плазменная дуга горит между катодом и внутренним соплом. Между внутренним и наружным соплами имеется конический зазор, по которому присадочный порошок вдувается транспортирующим газом в плазменную струю. В струе порошок плавится и попадает на поверхность изделия, оплавленную второй плазменной дугой, — между катодом и изделием.

Изменяя величину тока, можно регулировать количество тепла на плавление порошка, нагрев и оплавление основного металла. В горелке ИЭС им. Е. О. Патона три потока газов — центральный плазмообразующий, транспортирующий и защитный. Для подачи порошка применен питатель барабанного типа, который позволяет точно и плавно регулировать его расход в пределах 0,5—15 кг/ч. Минимальная толщина наплавленного слоя около 0,5 мм.

При применении плазменных методов в зависимости от температуры плавления основного и наплавляемого металлов процесс может протекать как с расплавлением основного металла, так и без расплавления. Если температура плавления наплавляемого металла близка к таковой основного или выше ее, то основной металл расплавится обязательно. В этом случае их соединение — результат образования общей сварочной ванны и ее последующей кристаллизации. Таков процесс при наплавке однородного металла, а также при наплавке нержавеющих сталей на малоуглеродистые.

Если температура плавления наплавляемого металла значительно ниже температуры плавления основного, то процесс можно организовать таким образом, что основной металл все время остается в твердом состоянии (например, при наплавке меди и ее сплавов на сталь). Прочное металлическое соединение между атомами основного металла и металла наплавки происходит в процессе смачивания, но без образования общей ванны.

Успех наплавки в большой степени зависит от подготовки присадочной проволоки или порошка и поверхности изделия. Проволока должна быть абсолютно чистой, без следов масла или ржавчины. Наилучшие результаты получают тогда, когда проволока зачищена до металлического блеска и обезжирена химически. Кроме того, проволоку необходимо равномерно подавать в дугу (что

удаётся, когда она намотана на кассеты без изгибов). Последнее условие обязательно также и для плазменной наплавки порошком. Для этого нужно, чтобы порошки состояли из частиц сферической или округлой формы. Обычно применяют порошки фракции 0,04—0,16 мм, а для наплавки по слою крупки — до 0,5 мм.

Высокими технологическими и эксплуатационными свойствами отличаются наплавленные покрытия из порошковых хромоникелевых сплавов, легированных бором и кремнием. Их получают механическим дроблением, термической сфероидизацией и распылением жидкого металла водой или инертными газами. Присадки бора и кремния снижают температуру их плавления и придают способность к самофлюсованию. Одновременно они увеличивают твердость и износостойкость сплавов. Сплавы жаропрочны, жаростойки, обладают высокой коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах. Примесь железа заметно ухудшает свойства хромоникелевых сплавов, поэтому при наплавке на сталь следует избегать ее сильного проплавления.

Хромоникелевые сплавы целесообразно применять для наплавки деталей, работающих в среде кислот и хлоридов, в условиях сильного абразивного износа, при температурах не выше 650—700°C. Благодаря низкой температуре плавления этих сплавов (980—1080°C) возможна наплавка при небольшой мощности плазменной дуги. Их самофлюсование особенно ценно, когда наплаваемая поверхность покрыта окисной пленкой.

Важное значение имеет, как уже говорилось, подготовка поверхности изделия. Чтобы добиться хорошего контакта, поверхности изделия тщательно очищают от окислов, масел, ржавчины и других загрязнений, для чего используют дробеструйную, пескоструйную или механическую обработку с обязательным обезжириванием. Хорошая подготовка поверхности способствует смачиванию и растеканию жидкого наплаваемого металла и резко повышает качество наплавки — в ней отсутствуют поры и окисные включения.

При некоторой ширине наплаваемого слоя наплавку производят с поперечными колебаниями плазменной горелки, чтобы нагрев основного металла был по возможности равномерным. При наплавке поверхности большой ширины, например 200 мм и более, накладыва-

ют несколько валиков, которые перекрывают друг друга на 8—12 мм. Наплавку тел вращения ведут по спирали. Плазменная горелка в этом случае смещается на 3—5 мм от осевой линии против направления вращения изделия.

Плазменная наплавка с успехом может применяться для создания биметаллических изделий с основой из малоуглеродистых или низколегированных сталей и плакирующего слоя из меди, бронзы или аустенитных нержавеющей сталей и для многих других пар металлов, соединение которых возможно в твердо-жидком состоянии.

Способ пригоден для повышения усталостной прочности тел вращения — валов, штоков, поршней и пр. На одном из заводов оборудован пост на базе модернизированного токарного станка 1А62, на суппорте которого установлены подающий механизм полуавтомата ПД ШР-500, плазменная горелка ИМЕТ-107, механизм ее поперечных колебаний и кассета с проволокой. Скорость вращения шпинделя регулируется в пределах 0,15—0,75 об/мин. Плавность регулировки вращения изделия достигнута с помощью коробки скоростей станка и дополнительного реостата в цепи шунтовой обмотки двигателя. В цеховых условиях наплавливают штоки, валики клязов, поршни арматуры диаметром 60—170 мм. Перед наплавкой заготовки обрабатываются на станке до чистоты $\nabla 3$.

Производительность процесса 5—6 кг/ч. Он обеспечивает необходимую чистоту наплавленного металла; уже в первом слое переход железа из стали в медь 0,5—1,2%, причем железо распределено по сечению наплавленного слоя практически равномерно. Нет проплавления основного металла. В зоне сплавления наблюдается диффузионная прослойка толщиной 10—30 мкм, которая практически не влияет на прочностные свойства изделий. Прочность сцепления наплавленного металла со сталью на уровне прочности наплавленного металла и составляет 30—35 кг/мм².

На Коммунарском металлургическом заводе была осуществлена плазменная наплавка роликов проводковой арматуры стана «600» с присадкой порошков сплавов высокостойких к абразивному износу при повышенных температурах — стеллита, сормаита, сплавов на ос-

нове карбида хрома и др. Для этого использовали аппарат А-1105 конструкции ИЭС им. Е. О. Патона.

На Выборгском судостроительном заводе внедрена плазменная наплавка нержавеющей стали при изготовлении узлов запорной арматуры и для получения коррозионно-стойкой поверхности. Используется вращающийся стол, а сварочный автомат (АДСП-1), на котором установлена плазменная горелка, неподвижен. Толщина наплавляемых деталей 12—15 мм, частота колебаний горелки 30—40 колебаний в минуту, амплитуда 22—25 мм, сварочный ток 160—170 А. Ширина наплавленного валика 28—32 мм, высота 4,5—5,0 мм. Сплавление со сталью хорошее, глубина проплавления 0,2—0,5 мм, дефекты в наплавленном металле и зоне сплавления — трещины, крупные поры, шлаковые включения — отсутствуют.

Первая партия изделий запорной арматуры с деталями, уплотнительные поверхности которых наплавлены нержавеющей сталью, успешно эксплуатируется на судах морского флота с 1970 г. Замена ручной дуговой наплавки аустенитными электродами на плазменную наплавку проволокой Св-06Х19-Н10Т дает около 2,0 руб. экономии на 1 дм² поверхности при толщине наплавленного слоя около 3 мм.

Опыт, накопленный промышленностью в области плазменной наплавки различных деталей и изделий, подтверждает ее высокую эффективность. Она позволяет значительно сократить расход дефицитных и дорогостоящих материалов, улучшить эксплуатационные свойства и повысить работоспособность изделий.

При наплавке плазменной струей с токоведущей присадочной проволокой за час работы можно наплавить на сталь 5—12 кг металла, что сопоставимо с другими способами наплавки. Однако если при наплавке с расплавлением основного металла следует наплавлять несколько слоев для обеспечения чистоты верхнего слоя, то при плазменной наплавке необходимые состав и свойства металла достигаются уже в первом его слое. При этом работоспособность соединений, полученных плазменной наплавкой, существенно выше. Техничко-экономические показатели плазменной наплавки могут быть на 25—50% повышены, если применить вторую, нетоковедущую проволоку.

Плазменная наплавка цветных металлов на сталь (с

целью замены изделий из цветного металла биметаллическими) дает значительную экономию цветного металла. Так, при наплавке бронз на стальные сухари шпindelных соединений приводов валков рабочих клетей прокатных станов расход бронзы сокращается в 3 раза.

Высокая производительность процесса достигается и при использовании присадочных порошков — до 6 кг металла в час. Плазменная наплавка порошков особенно целесообразна, если нужно получить слой наплавки малой высоты и при этом значительно сэкономить наплавляемый металл.

Напыление порошков

Нанесение покрытий напылением — один из наиболее развитых в настоящее время плазменных процессов. Его применение в промышленности характеризует большой объем работ и широкий круг напыляемых материалов. Плазмой можно наносить покрытия из металлов, сплавов, окислов, карбидов, нитридов, силицидов, многокомпонентных смесей.

Отличия плазменного напыления от получившего распространение значительно раньше газопламенного метода следующие:

высокая температура плазмы позволяет использовать для напыления любые тугоплавкие материалы;

плазмообразующий газ, не содержащий кислорода, исключает возможность окисления напыляемых материалов, в то время как в кислородно-ацетиленовых горелках нельзя напылять карбиды, бориды, нитриды, силициды и другие соединения, свойства которых изменяются под воздействием окислительной среды при высоких температурах;

высокие скорость и температура плазменного потока позволяют получать более высокую плотность покрытий (малую пористость) при лучшем сцеплении с подложкой;

плазменные покрытия можно наносить на дерево, керамику, бетон, пластмассы, легкоплавкие металлы и сплавы, поскольку поверхность обрабатываемого материала нагревается не выше 100—200°C;

температуру и теплосодержание плазменного потока

можно регулировать в широких пределах, в зависимости от требований технологии;

производительность плазменного напыления высока, например для керамических порошков в 6—10 раз более высокая, чем газопламенного напыления.

Известно и применяется также электродуговое нанесение покрытий. Когда напыляется материал в виде токопроводящей (металлической) проволоки, оно может оказаться проще и экономичнее плазменного. Однако при нанесении порошков, в том числе керамических, электродуговой способ непригоден.

Процесс плазменного напыления порошков во многом сходен с наплавкой. Частицы порошка под действием плазменной струи оплавляются или превращаются в жидкие капельки и, попадая на поверхность изделия, растекаются и затвердевают. Важно то, что порошок должен плавиться без разложения и возгонки.

При выборе материала для напыления прежде всего учитывается его назначение. Для теплозащитных и электроизоляционных покрытий чаще используют окислы металлов, у которых высокая температура плавления, химическая стойкость и низкая теплопроводность, например окислы алюминия, циркония. Хорошие результаты дают бориды титана и циркония, силицид молибдена и др.

Для покрытий высокой износостойкости используют карбиды переходных металлов (IV—VI групп), карбиды бора и кремния, различные сплавы. Защиту от газовой коррозии осуществляют интерметаллидами. Интерметаллидные покрытия могут быть синтезированы из чистых металлов непосредственно в процессе напыления. Химическое взаимодействие исходных металлов происходит в плазменном факеле, а на поверхности защищаемой детали формируется покрытие из расплавленных частиц интерметаллида. Подавляющее большинство таких соединений образуется с выделением тепла, что способствует полному расплавлению частиц и образованию химической связи покрытия с основой. Для создания плотных газонепроницаемых покрытий наиболее перспективен алюминид никеля.

Напыляемый порошок должен быть сухим и легко взвешиваться в газовом потоке. Наиболее пригодны порошки сферической формы, с размерами от 20 до 100 мкм. Слишком крупные частицы не успевают рас-

плавиться и попадают на поверхность подложки в непластичном состоянии, ухудшая качество покрытия; слишком мелкие частицы создают трудности при транспортировке, засоряют сопло, испаряются, быстро охлаждаются и теряют скорость.

В качестве плазмообразующих газов применяют аргон, гелий, азот, водород, аммиак и их смеси. Гелий и водород в чистом виде почти не применяют из-за сильного разрушающего воздействия на электроды плазмотрона, к тому же они снижают стабильность истечения плазмы и тепловых характеристик. Чистый аргон по воздействию на материал покрытия и основы наиболее благоприятен. Однако из-за невысокой энтальпии и теплопроводности его в чистом виде применяют главным образом при напылении материалов высокой теплоемкости и теплопроводности. Азотная плазма имеет наименьшую скорость истечения и сообщает соответственно меньшую скорость частицам, что улучшает условия напыления. Однако наилучшие показатели — у газовых смесей, в частности аргонно-азотной и аргонно-водородной. Плазмообразующую смесь выбирают исходя из требуемой температуры потока, его теплосодержания, скорости и степени инертности к распыляемому материалу и защищаемой поверхности. Если желателен минимальный нагрев, используют одноатомные газы.

Транспортирующим порошок газом обычно служит азот как наиболее дешёвый, инертный и безопасный. Между расходом плазмообразующего и транспортирующего газов соблюдается определенное соотношение, которое устанавливается в каждом конкретном случае.

Частицы напыляемого порошка в расплавленном состоянии взаимодействуют с окружающей средой. Если эта среда воздух, то, как правило, напыляемый материал частично окисляется, азотируется и обезуглероживается, что увеличивает пористость и снижает прочность сцепления покрытия с подложкой.

Для защиты распыляемых частиц и обрабатываемой поверхности от окисления часто используют кольцевой поток инертного газа — он как бы обволакивает плазмообразующий поток. Более эффективное средство защиты — специальные камеры с контролируемой средой. Регулируя химический состав плазмы и среды, можно активно воздействовать на напыляемый материал, проводя его рафинирование, легирование, насыщение газами,

контролируемое окисление; удается задерживать распад термически диссоциирующих соединений, например карбидов или нитридов. Так, напыление в неконтролируемой среде порошка карбида титана приводит к потере 40% углерода, а в камере с концентрацией кислорода 0,1% покрытие сохраняет все его 100%.

Следует отметить, что наблюдаемые при напылении окисление и азотирование могут быть использованы для получения модифицированных покрытий. Так, вводя алюминий или титан в азотную плазму, получают покрытие из смеси металла, его нитрида и частично оксида, причем переменные параметры плазменного процесса позволяют регулировать эти соотношения в широких пределах.

Свойства покрытия зависят от природы материала, на который оно наносится, и в первую очередь от состояния его поверхности. Прочность сцепления с подложкой определяется чисто механическим зацеплением затвердевших частиц покрытия с шероховатостями поверхности, а также физико-химическим взаимодействием материалов основы и покрытия. Неровности и шероховатости поверхности увеличивают механическую связь; для их создания используют песко- или дробеструйную обработку. Помимо наклепа в поверхностном слое, такая обработка одновременно повышает его химическую активность. Все это создает условия для образования межатомных связей.

Кроме того, прочность сцепления покрытия с подложкой зависит от температуры последней. Чем выше температура подогрева, тем интенсивнее диффузионные процессы между материалами покрытия и подложки. Однако нагрев выше 200°C приводит к интенсивному росту окисных пленок, которые препятствуют образованию соединения, разделяя взаимодействующие фазы: чтобы избежать этого, напыление при повышенных температурах подложки необходимо вести в защитной среде.

При напылении неметаллических порошков на металлы возникают трудности, связанные с малым сцеплением покрытия и подложки и различными коэффициентами линейного расширения. Эти трудности преодолевают, нанося промежуточный слой между изделием и покрытием — подслои. Так, напыляя окись алюминия на металлы, применяют подслои из нержавеющей стали и нихрома. Нихром имеет на поверхности прочную пленку

окислов и шпинели, которые хорошо взаимодействуют с окисью алюминия. В то же время он хорошо сцепляется со стальной подложкой.

На качество покрытия и производительность процесса существенно влияют технологические условия, среди которых следует выделить расстояние сопла горелки от изделия (дистанция напыления), угол между направлением потока частиц и поверхностью напыления и скорость перемещения горелки относительно изделия. Условия, максимизирующие производительность напыления ряда материалов (стали, двуокиси циркония, двуокиси церия, карбидов титана, тантала и циркония) при хорошем качестве покрытия могут быть выражены следующими величинами: мощность плазменной струи — 10—25 кВт, расход плазмообразующего газа — 0,85—1,75 м³/ч, расход транспортирующего газа — 0,14—0,20 м³/ч, скорость подачи порошка — 9—15 г/мин, дистанция напыления — 5—10 см, скорость передвижения горелки — 17—30 мм/с, расход защитного газа — 4—7 м³/ч, размер частиц — 10—70 мкм.

Наибольший эффект дает плазменное напыление покрытий из тугоплавких материалов. Наиболее распространен здесь молибден и вольфрам, которые образуют износостойкие и эрозионно-стойкие покрытия при высоких температурах в вакууме, нейтральной и восстановительной средах. Из тугоплавких неметаллических соединений широко используют окиси алюминия и циркония, карбиды бора и кремния, бориды титана и циркония, силицид молибдена и некоторые другие.

Плазменные покрытия, поскольку они образованы в результате удара, деформации и быстрого затвердевания расплавленных частиц, неоднородны в структурном отношении и имеют развитую систему стыков между частицами. Когда покрытие предназначено для теплозащиты, очень важна его эластичность и пористость, они противостоят теплоудару.

Пористость создает предпосылки для использования покрытий в качестве антифрикционных, износостойких в узлах трения. Чтобы получить противозадирные покрытия ковочных алюминиевых сплавов (для поршней двигателей внутреннего сгорания) с высокими антифрикционными свойствами, были созданы композиции на основе меди с добавками 35% стойкого против окисления никеля и 5% твердых дисперсных включений ни-

трида бора. Общая пористость покрытия составила 4—5%. Стендовые испытания поршней авиационного двигателя с таким покрытием показали его работоспособность, повышенную износостойкость и высокие противозадирные качества.

С другой стороны, пористость — существенный недостаток покрытий, если их назначение — защита материала от износа и химического воздействия окружающей среды. Разработан комплекс мероприятий для ее уменьшения в таких случаях. Это уменьшение среднего размера частиц, сокращение дистанции напыления, увеличение мощности и энтальпии плазменной струи. Наименее пористые покрытия получают при напылении интерметаллидов, многокомпонентных металлических сплавов, смешанных боридов, силицида молибдена. Однако все эти меры лишь частично решают проблему.

Чтобы полностью устранить пористость, необходимо покрытие пропитывать полимерными смолами и лаками или подвергать термообработке, которая резко увеличивает плотность и прочность сцепления.

Эффективно уплотнить и упрочнить покрытие можно с помощью самофлюсующихся порошковых твердых сплавов, которые оплавляются после нанесения. По износостойкости покрытия из таких сплавов значительно превосходят конструкционные стали. За рубежом (фирма «ОМСО», Бельгия) широкое распространение получил самофлюсующийся сплав «Колмоной». Отечественная промышленность выпускает подобные сплавы под марками СНГН, ВСНГН (разработка ВНИИТС), ПГ-ХН80СР 2,3 и 4 (разработка ИЭС им. Е. О. Патона).

Сплав СНГН повышает износостойкость деталей в 5 раз по сравнению со сталью 45. Важное его свойство — способность практически не изменять начальную твердость до температуры 500—600°C. Он рекомендуется для упрочнения арматуры энергетического оборудования, насосов, двигателей, пневмотранспортирующих устройств, лопастей вентиляторов, деталей, работающих в условиях гидроабразивного износа. Сплав ВСНГН — для упрочнения деталей, работающих в условиях сильного абразивного износа при обработке материалов с высокой твердостью — лопастей мешалок и шнеков для керамических материалов, пресс-форм изделий из высокоабразивных материалов, шиберов размольного оборудова-

ния, работающих при высоких температурах (500—550°C).

Оплавление покрытий при температуре 1000—1200°C осуществляется пламенем горелки, высокочастотным нагревом и в печах с защитной или восстановительной атмосферой. Оплавление как бы закрепляет металлическую связь между напыленным слоем и основным металлом; разрыв происходит всегда по основному металлу, так как сила сцепления очень высока.

Отечественная промышленность выпускает серийно несколько типов плазменных установок для напыления, из которых наиболее эффективны УМП-5-68 (разработка ВНИИавтогенмаша, изготовитель Барнаульский аппаратно-механический завод) и УПУ-3М (изготовитель Ржевский электромеханический завод). В ЦНТИ «Поиск» разработана автоматическая плазменная установка для напыления порошковых материалов с производительностью до 12 кг/ч — АПУ-1. В комплект оборудования входят плазменная установка, аппаратура для подготовки поверхности, приборы для рассева порошков по фракциям.

Нанесение плазменных покрытий, как отмечалось, широко распространено в промышленности. Приведем некоторые данные. Так, напыление на внешнюю поверхность лопастей вентилятора, работающего в парах серной кислоты при 125°C, покрытия из карбида хрома (0,6—1,0 мм) увеличили срок службы лопастей с 3 до 24 месяцев.

Покрyтия на основе Al_2O_3 с добавкой TiO_2 с никелевым подслоем успешно использовались на рабочих поверхностях золотников насосов и кольцевых компенсаторов на вращающихся фильтрах, и больших реакционных сосудах (диаметр 1,6 м, высота напыления 6 мм). Покрyтия толщиной 0,7—0,8 мм предназначены для защиты металлической стенки от коррозии конденсированной фазы. Покрyтия из карбида вольфрама и хрома на торце колонковых труб для бурения повысили производительность бурения в 2 раза. Покрyтия из окиси алюминия и хрома (с подслоем из хрома) на бронзовом винте танкера (площадь напыления 30,5 м²) после 18 месяцев эксплуатации оказались в отличном состоянии.

Весьма распространены плазменные покрытия в авиационной промышленности. В США их наносят на зам-

ковые соединения компрессорных лопаток из титанового сплава и узлы компрессорной турбины реактивных двигателей, работающие при 500°C. В ФРГ напыляют алюминид никеля и карбид хрома на магниевые сплавы; алюминид никеля и смесь карбида хрома с нихромом — на алюминиевые сплавы; алюминид никеля, кадмий, карбид вольфрама, окись хрома — на оси шасси, перекладки тележек, соединительные болты, фитинги из малолегированных высокопрочных сталей; молибден, алюминид никеля, нихром — на детали реактивных двигателей из нержавеющей стали, кобальтовых и никелевых сплавов. Плазменные покрытия используют как способ восстановления размеров деталей авиационных и ракетных двигателей и для придания поверхности стойкости к нагреву, истиранию, эрозии, различным видам износа.

Нанесение плазменного покрытия из карбида хрома предотвращает истирание и износ ножевых кромок направляющей лопатки сопла турбины и направляющих стержней выходного подкоса. Цапфы главного шасси покрывают алюминидом никеля для восстановления размеров, что экономичнее, чем гальваническое хромо-вое покрытие. А покрытие из двуокиси циркония толщиной 0,4 мм защитило обтекатель реактивного снаряда от перегрева внутренней поверхности (при нагреве наружной поверхности до 700°C).

Покрытие из цирконата магния (0,3 мм) увеличило срок службы графитовых тиглей при плавке плутония и урана (1600—1700°C) в 3 раза и полностью исключило возможность загрязнения расплавляемых металлов углеродом. Фирма «Эвтектинг Велдинг» разработала плазменные износостойкие покрытия для ремонта изношенных поверхностей насосов из нержавеющей стали для масел и агрессивных жидкостей. Кермет на никелевой основе с карбидами хрома и бора увеличивает срок службы деталей в 2 раза. Окисью алюминия покрывают оболочки американского спутника связи «Телестар» для защиты от космического излучения.

Опишем некоторые применения способа на отечественных заводах.

Нанесение бронзы или стеллита на вентили кислородных магистралей повысило износостойкость и надежность уплотнения при работе вентильных задвижек и снизило себестоимость их на 40% (благодаря уменьше-

нию толщины покрытия до 0,8 мм — ранее наплавлялось сваркой).

Колпак конвертера диаметром 3 м и высотой 2 м из тонколистовой стали размещается над ковшем конвертера с жидким металлом и испытывает тепловые удары брызг стали, а также эрозионное воздействие горячих отходящих газов. Слой окиси циркония (0,4 мм) и карбида хрома на внутренней поверхности колпака увеличил срок его службы с 3 до 7 месяцев.

Плазменное покрытие на основе смеси окиси алюминия с никелем в 20 раз повысило срок службы литейных форм, на которые действуют агрессивные шлаковые расплавы при 1100—1400°C. Покрытие из окиси циркония испытано на хромомagneзитовых сводовых кирпичах в мартеновской печи. Кирпичи с напыленным слоем в 0,1—0,2 мм выдержали без разрушения 100 плавов, контрольные кирпичи без покрытия износились при этом на 100 мм.

На заводе «Уралэлектротяжмаш» им. В. И. Ленина внедрена разработанная в Уральском политехническом институте установка для плазменного напыления серебра на контактные поверхности деталей высоковольтной аппаратуры из алюминиевого сплава силумина. Напыление обеспечило минимальное и постоянное по величине переходное сопротивление контакта, высокую прочность сцепления напыленного слоя с силумином, надежную защиту области контакта от коррозии и значительную экономию серебра по сравнению с гальваническим методом. Толщина покрытия в пределах 20—30 мкм. Детали перед напылением подогреваются в электропечи до 230°C.

В том же институте разработана технология плазменного напыления разъемных, круглых и профильных матриц, пресс-шайб, прошивных игл, пресс-штуков и другого прессового инструмента. В качестве материалов напыления использованы тугоплавкие металлы и керамика; в частности при прессовании титановых сплавов, молибдена; стойкость таких матриц в 4—5 раз выше, чем новых из стали 3Х2В8Ф.

Слой окиси алюминия толщиной 0,6 мм на деталях насосов — валы, сальники, крыльчатки, втулки — гарантирует их твердость, химическую стойкость, низкий коэффициент трения, стойкость к термическим ударам.

Эффективно напыление окислов алюминия и цирко-

ния для защиты кокильных форм, частей турбореактивных двигателей, литейных ковшей, изложниц для литья бериллия и циркония. Плазменное покрытие форм выдерживает 200—300 заливок, в то время как защитная окраска возобновляется после каждой заливки.

На одном из отечественных заводов создан механизированный участок по нанесению плазменных покрытий на тела вращения с переменным диаметром сечения. Покрытие из порошка двуокиси циркония фракцией 30—100 мкм наносится по подслою из вольфрама на установке УПУ-3. Предварительно напыляемая поверхность обрабатывается порошком электрокорунда или карбида кремния при давлении воздуха 6 ат.

Можно еще долго перечислять примеры использования покрытий, нанесенных плазменным способом, но и сказанное убедительно говорит о его прогрессивности и технологической значимости.

Металлургия

В последние годы низкотемпературная плазма привлекает внимание металлургов как уникальный источник тепла и химическая активная среда для решения различных задач, таких, как восстановление металлов из окислов, рафинирование металлов, получение сплавов и т. п.

Высокая скорость процессов в плазме обеспечивает большую производительность при малых размерах реакционной зоны агрегата и простоте его конструкции. Отпадает необходимость в особо огнеупорных материалах для футеровки. Процессы можно осуществлять в камерах из обычной стали, стенки которых защищены от воздействия высоких температур слоем холодного газа или охлаждаются с помощью водяной рубашки. Удельная мощность плазменных печей (отнесенная к площади электрода) в тысячи раз превышает удельную мощность электролизных ванн.

Первая стадия металлургического процесса — вскрытие рудных материалов с отделением пустой породы (переводом ее в шлак) с тем, чтобы извлечь максимальное количество металла в полупродукт (черновой металл, чугун, ферросплавы и т. п.). Этот этап наиболее масштабный по количеству перерабатываемых материалов

и трудоемкий, однако его аппаратурное оформление в настоящее время не отвечает оптимальным требованиям. Наиболее современный агрегат — электропечь; она чувствительна к электропроводности и однородности состава шихты, требует специальных углеродистых электродных материалов и ограничена по мощности.

Плавка в шахтной печи связана со сжиганием углеродистого восстановителя; сочетание в одном агрегате двух противоположных процессов — целевого восстановительного и окислительного — затрудняет управление плавкой, приводит к нерациональному расходованию дорогостоящего кокса и необходимости работать с большими количествами газов, в том числе балластных.

Переработка рудного сырья плазменным способом возможна по двум схемам. Первая — дугой высокой интенсивности. Руду смешивают с углеродом, прессуют из смеси стержни и используют их в качестве расходных анодов. Материал анода испаряется, диссоциируя на окислы. При наличии в атмосфере восстановителя может происходить восстановление окислов до металла или карбида.

Вторая схема — рудный материал измельчается и полученный порошок подается в плазменную струю, где нагревается, диссоциирует и реагирует с плазмообразующим газом, образуя окислы или другие соединения, из которых легко извлекается чистый металл.

Дуга высокой интенсивности позволяет комплексно использовать руды, эффективно реализовывать энергию плазменного разряда, что подтверждено расчетами и промышленной проверкой. Например, этим методом получены карбид урана и его сплавы, металлический уран, окись урана, поликарбида урана и циркония, ниобия, тория и др.

При использовании плазменного нагрева принципиально иной характер приобретает шлакообразование, удаление серы и фосфора. Появляется возможность разделять продукты разложения руд исходя из магнитных свойств ионизированных частиц. При 10 тыс.°К окислы металлов диссоциированы нацело. Поскольку энергии ионизации кислорода и металла различны, в плазменной струе обязательно есть участок, где кислород существует в виде ионов, а металл — в виде нейтральных атомов. Накладывая на этот участок магнитное поле,

можно отделить кислород от металла. Такой процесс реализован в ФРГ.

Плазменно-дуговой переплав — эффективный способ рафинирования металла; основное технологическое средство воздействия на жидкий металл — газовая фаза.

Как правило, плазменно-дуговые печи бывают двух типов — с керамическим тиглем и водоохлаждаемым кристаллизатором. Первые весьма перспективны для массового производства высоколегированных сталей и сплавов. Вторые используют для получения слитков высококачественных сталей из порошков, кусковых материалов и штанг, т. е. для плазменно-дугового переплава. Принципиальная технологическая схема плазменно-дугового переплава, разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона, показана на рис. 3. Переплавляемая заготовка, два

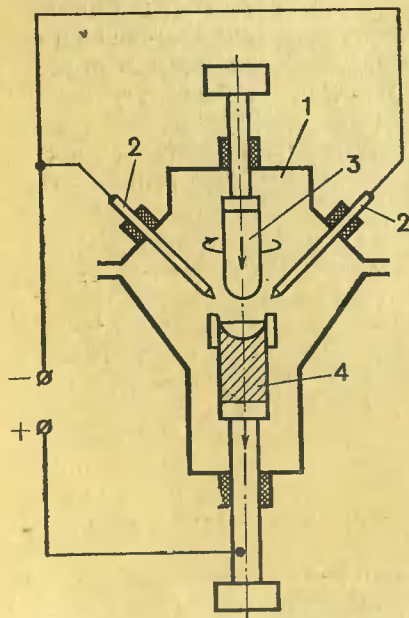


Рис. 3. Схема плазменно-дугового переплава:
1 — плазменно-дуговая печь; 2 — плазматрон; 3 — переплавляемая заготовка; 4 — готовый слиток

или несколько плазматронов, медный водоохлаждаемый кристаллизатор и получаемый в результате переплава слиток размещается в герметичной камере. Опыт эксплуатации установок с радикальным расположением

плазматронов показал, что, пользуясь возможностью регулирования обогрева плазматронами отдельных участков ванны, можно выплавлять слитки различного профиля.

Немаловажное преимущество радиальной схемы — частичное экранирование заготовкой излучения плазменных струй и ванны. Металлы и сплавы высокой теплопроводности плавятся при весьма малом промежутке между ванной и заготовкой.

Струи плазмы направлены на ванну жидкого металла в кристаллизаторе. Заготовка подается вниз с вращением. Входя в соприкосновение с плазменными струями, она плавится и металл по каплям перетекает в ванну. По мере наполнения ванны слиток вытягивается из кристаллизатора.

Плазматроны прямого действия имеют к.п.д. от 69 до 95% и устойчиво работают в интервале давлений от 10^{-2} мм рт. ст. до нескольких десятков атмосфер, благодаря чему появляется возможность «подавить» испарение из расплава элементов с высокой упругостью пара.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработано несколько конструкций плазменно-дуговых печей емкостью до 1 т. При скорости плавки 100 кг/ч печи выдерживают 200 плавов, а их производительность примерно в 5 раз выше, чем вакуумных индукционных.

Один из вариантов конструкции — печь с водоохлаждаемым кристаллизатором; в ней получают слитки диаметром 50—100 мм и длиной до 600 мм. Нагрев металла (плазматрон — прямого действия) осуществляется электронной бомбардировкой в анодном пятне и теплопередачей от плазменного факела. Доля энергии, рассеиваемой в анодном пятне, всего 15—25%. Следствие этого — отсутствие перегрева металлической ванны и избирательного испарения из сплавов легкокипящих компонентов, что открывает широкие возможности для повышения качества легированных и жаропрочных сталей и сплавов.

Установлено, что при плазменно-дуговой выплавке стали такие элементы, как хром, никель, кремний, молибден, бор, усваиваются полностью; вольфрам — на 97, марганец — на 96, ванадий — на 95, углерод — на 86, а титан — на 85—90%. Содержание кислорода в таких сталях составляет 0,001%, водорода 0,0001—0,0002, азота — 0,001—0,003, серы — 0,003%.

Плазменные источники тепла можно сочетать с химическими. В этом случае теплопередача от факела возрастает в 3 раза, средняя температура факела — на 26%, а энтальпия — на 50%. Способ особенно эффективен в доменном и мартеновском процессах, несмотря на то что для них нужны температуры более низкие, чем плазменные.

Отличительная особенность плазменно-дугового переплава — интенсификация процессов взаимодействия плазмообразующих газов с металлическим расплавом. В частности, реакция растворения азота в жидком железе и его сплавах в плазменно-дуговых печах протекает со скоростями, на порядок большими, чем в других плавильных агрегатах. Интенсивное поглощение азота из плазмы жидким металлом позволило разработать технологию легирования сталей аргоно-азотной плазмой регулируемого состава и отказаться от применения дорогих азотированных ферросплавов. Стало возможным выплавлять стали, содержание азота в которых значительно превышает уровень, достигаемый при традиционных методах.

Как известно, в хромоникелевых сталях азот эффективный заменитель никеля. Введение в аустенитную нержавеющую сталь 0,15% азота эквивалентно 2—4% никеля, а 0,25% азота заменяет от 2,5 до 6% его. Этим объясняется стремление металлургов ввести в сталь возможно больше азота. Однако в обычных случаях верхний предел его содержания ограничивается уровнем стандартной растворимости в стали. В плазменно-дуговых печах с кристаллизатором можно выплавлять стали, содержание азота в которых в 2—4 раза выше значения стандартной растворимости.

Ведутся работы по плазменному восстановлению металлов. Так, бельгийская фирма Аркос разрабатывает плазменную установку мощностью 1200 кВт с тремя плазмотронами для восстановления и плавки медных, танталовых и титановых руд. В СССР, ГДР и ФРГ в настоящее время внедряются плазменно-дуговые печи с керамическим тиглем емкостью до 5 т для плавки шарикоподшипниковых сталей и сплавов сопротивления. Основной недостаток этих печей — значительный расход аргона — до 8 нм³/ч.

Одна из областей применения плазмы в металлургии — получение сферических порошков тугоплавких ма-

териалов. В современной технике различные фильтры, пористые катоды, «потеющие» изделия из металлокерамики изготавливаются из порошков с частицами в виде шариков; это позволяет добиться их равномерной проницаемости.

Плазменная сфероидизация предполагает первоначальное плавление и распыление частиц, а во второй фазе процесса — скругление их под действием поверхностного натяжения. Исходный материал можно вводить в плазму в виде проволоки, прутков или порошка. При распылении проволоки на нее, как правило, подается от источника положительный потенциал. Нагрев токоведущей проволоки и ее расплавление происходят за счет энергии дуги и джоулева тепла, выделяемого в металле. Размер частиц легко регулируется изменением режима дуги, расход газа и скорости подачи проволоки, а также диаметром проволоки и лежит в диапазоне 0,1—1,0 мм.

Метод токоведущей проволоки высоко производительен; так, при мощности дуги 20 кВт можно получить 12—15 кг/ч вольфрамового порошка. Выход сферических частиц более 90%.

Распыление прутков принципиально не отличается от распыления проволоки, но сферические частицы получаются сравнительно большого размера — 1,5—2,0 мм. Такой способ используют, если нужны шарики из окиси алюминия и двуокиси циркония.

Стандартные порошки в качестве исходного материала удешевляют процесс сфероидизации, а полученные частицы могут быть меньше 50 мкм. Наилучших результатов добиваются тогда, когда размер частиц исходного порошка около 5 мкм. При этом выход сферических частиц достигает 95%, средний размер — 3—5 мкм. С увеличением исходного размера выход сферических частиц быстро падает и при 30 мкм он составляет 40%. Материалы с большим поверхностным натяжением и большей теплопроводностью сфероидизируются лучше (вольфрам лучше, чем молибден). Существенное значение имеют упругость пара, обуславливающая тепло, и массообмен частиц со средой.

Производительность процесса плазменной сфероидизации порошка на установке с многосекционным плазмотроном мощностью 100 кВт — до 5 кг/ч для вольфрама и 1,5 кг/ч для окиси алюминия.

Время пребывания частиц в плазме — лимитирую-

щий фактор процесса. Частицы в зоне высоких температур находятся лишь в течение 0,5—4 мкс. Расчеты показывают, что для сфероидизации металлических порошков с размером частиц 400 мкм длительность пребывания в плазме должна быть не менее 5 мкс, а для керамических порошков с малой теплопроводностью — не менее 50 мкс. Такие условия могут быть реализованы лишь в высокочастотной безэлектродной плазме. Малая скорость плазменного потока, большой объем плазмы как в поперечном, так и в продольном сечении дают возможность сфероидизировать частицы различных тугоплавких материалов с высокой эффективностью. Порошок вводят по оси плазменного факела и используют энергию разряда на всем его протяжении. Введение порошка в центральную часть разряда не нарушает его стабильности, так как плотность тока по оси разряда равна нулю.

Производительность процесса сфероидизации частиц окиси алюминия в 63—100 мкм в ВЧ-плазме 1,5—2,0 кг/ч при мощности установки 6,5 кВт и скорости подачи порошка 10 г/мин; выход сферических частиц 95—97%. Размер исходных частиц может быть доведен до 600—800 мкм.

Выращивание кристаллов

В полупроводниковой и лазерной технике, точном машиностроении, в буровых инструментах широкое применение получили монокристаллы корунда, карбида кремния, тугоплавких боридов, двуокиси циркония, окиси иттрия, металлов — вольфрама, молибдена, рения и др. Монокристаллы карбидов и корунда весьма тверды и успешно заменяют дорогостоящие алмазы.

За последние годы резко возросла роль металлических монокристаллов. Это связано с рядом их преимуществ перед поликристаллами — высокой пластичностью, совместимостью с различными средами (парами щелочных металлов, металлическими расплавами, ядерным горючим), устойчивостью против рекристаллизации. К металлическим кристаллам предъявляются новые требования. Необходимы монокристаллы тугоплавких металлов высокой чистоты, с совершенной структурой, опре-

деленной кристаллографической ориентировкой, больших размеров и заданной геометрической формы.

В промышленности находят применение различные методы выращивания монокристаллов — метод Вернейля, способ Чохральского, зонная плавка, метод движущейся зоны растворителя, метод растворов в расплавах, электролиз. Наряду с ними в последние годы начали все шире применять плазменные способы.

Для выращивания монокристаллов могут быть использованы как плазменные горелки электродного типа, так и индукционные безэлектродные плазмотроны. Параметры факела должны обеспечить низкую скорость струи, что можно достичь при использовании больших диаметров столба разряда (25—35 мм) и при малом расходе плазмообразующего газа (20—40 л/мин).

Технологическая схема выращивания монокристаллов в электродуговых плазмотронах такова. Порошок подается в плазменную струю, плавится и осаждается на холодном держателе. Держатель, на котором растет монокристалл, движется параллельно своей оси со скоростью 5 мм/ч (скорость роста кристалла). Плазмообразующий газ — аргон, гелий, водород или их смеси — вводится в разрядную камеру вдоль катода параллельно его оси. Для выращивания кристаллов наиболее удобны плазмотроны с горизонтальным расположением плазменной струи.

Безэлектродные высокочастотные плазмотроны дают очень чистую струю, поскольку не имеют изнашивающегося электрода. Малая скорость газа вблизи места формирования кристалла позволяет получить большое сечение факела, обволакивающего растущий кристалл. В индукционных плазмотронах получены монокристаллы сапфира, ниобия, окиси циркония и др. Диаметр их 5—15 мм, длина 30—90 мм при скорости роста 20—55 мм/ч.

Применение плазменного нагрева в технике выращивания монокристаллов тугоплавких металлов привело к решению проблемы получения крупных монокристаллов вольфрама, молибдена, рения и др. Разработанный в Имет АН СССР метод позволил выращивать монокристаллы вольфрама диаметром до 50 мм и весом более 40 кг, причем эти размеры не предельные. Сравните: электронно-лучевая зонная плавка дает возможность по-

лучать монокристаллы вольфрама не более 15—20 мм и молибдена не более 20—25 мм.

Выращивание монокристаллов с использованием плазменно-дугового нагрева сопровождается эффективной очисткой от различного рода примесей благодаря избирательному испарению и взаимодействию с компонентами плазмообразующего газа. Температура расплава на торце растущего кристалла вольфрама достигает 4500—5000°C. При такой температуре многие примеси удаляются из-за высокого давления пара.

На интенсивность очистки вольфрама и молибдена от углерода влияют температура плазменной дуги и состав плазмообразующего газа. Температура дуги увеличивается, если к аргону добавить гелия, и уменьшается при добавлении водорода. Удаляют углерод из вольфрамового и молибденового расплавов прямым испарением с поверхности и через промежуточную реакцию с кислородом или водородом в плазмообразующем газе. Образующиеся при этом продукты испаряются, а затем частично или полностью диссоциируют над поверхностью ванны и уносятся потоком газа. Сравнительный анализ содержания примесей в вольфраме разных марок показывает, что новый метод получения монокристаллов позволяет наиболее полно очистить их от примесей, особенно от углерода.

Качество структуры монокристаллов вольфрама и молибдена, полученных плазменным нагревом и электронно-лучевой зонной плавкой, примерно одинаково.

Крупные монокристаллы вольфрама характеризует высокая технологическая пластичность. Образцы при испытании на сжатие при комнатной температуре выдерживали без разрушения 35%-ную деформацию. Они прокатывались в пластины при 500°C, деформация за один проход составляла 30%. К их достоинствам следует отнести и сравнительную легкость обработки резанием.

Таким образом, применение плазменного нагрева для выращивания монокристаллов тугоплавких металлов позволило получить качественно новый материал, необходимый современной технике.

Плазмохимия

Плазменной струей можно нагревать реагенты со скоростями до 10^6 — 10^8 град/с. Скорости химических реак-

ций резко возрастают, так что продолжительность контакта реагентов может быть менее одной тысячной доли секунды (10^{-3} — 10^{-5} с), что позволяет значительно уменьшить размеры реакционных аппаратов. Вообще плазмохимические процессы характеризуются, как правило, высоким выходом, возможностью полной автоматизации, малой чувствительностью к составу исходных продуктов.

В последние десять лет исследования высокотемпературных химических процессов шли настолько интенсивно и успешно, что некоторые из них уже сегодня способны конкурировать экономически с рядом классических химических производств. Так возникла новая область химии — плазмохимия.

Любой плазмохимический процесс состоит из трех последовательных стадий — генерации плазмы, собственно химической реакции и закалки продуктов. Плазмохимические реакции так скоротечны, что сохранить нужные продукты — один из основных вопросов в организации плазмохимической технологии. Задача закалки — фиксация промежуточных или охлаждение конечных продуктов с такой скоростью, чтобы они не успели разложиться при переходе к нормальным температурам. Причем место закалки в плазмохимическом процессе строго регламентировано и нарушение ее режима или пространственного положения снижает выход желательных продуктов. Так, опоздание с закалкой в процессе превращения метана в ацетилен на две тысячные доли секунды снижает выход последнего с 15,5 до 10%, а уменьшение скорости закалки окислов азота в плазмохимической реакции между азотом и кислородом с 10^8 до 10^7 град/с снижает выход окиси азота с 9,6 до 6,4%.

Параллельно с разработкой технологии плазмохимических процессов шло создание специального оборудования, способного длительное время работать при температурах в несколько тысяч градусов. Плазмохимический агрегат — один или несколько плазмотронов, камера смешения реагентов с плазменной струей, реактор, закалочные камеры для «замораживания» продуктов реакции, теплообменник для снижения температуры отходящих газов и утилизации их тепла и ловушки для выделения целевых продуктов из общего потока.

Конкретные схемы плазмохимических агрегатов создаются с учетом метода получения плазменной струи, фа-

зового состояния компонентов, вида и особенностей химических реакций. К настоящему времени известно более 160 плазмохимических процессов (в различной степени готовности — от лабораторного исследования до промышленного внедрения).

Плазмохимические процессы (так же, как химические) бывают двух типов — гомогенные и гетерогенные. В гомогенных реагирующие вещества и продукты реакции находятся в одной фазе, в гетерогенных — в разных. К наиболее изученным гомогенным плазмохимическим процессам относится выделение ацетилена из метана (природного газа).

Ацетилен — исходный продукт получения огромного количества органических веществ — полимеров, растворителей, уксусной кислоты и многих других. Поэтому процессы его получения непрерывно совершенствуются.

В настоящее время имеется возможность получать ацетилен при помощи плазмы из любых углеводородов — от метана до нефти, а также из пылевидного и древесного угля. Известно о промышленной реализации процесса получения ацетилена пиролизом природного газа.

Из гомогенных неорганических процессов наиболее хорошо исследован и находится в стадии опытно-промышленной отработки плазмохимический синтез окислов азота из воздуха с последующим получением азотной кислоты. Интерес к проблеме непосредственной фиксации азота из воздуха плазмохимическими методами обусловлен важным промышленным значением химически связанного азота. Плазменные методы имеют существенное преимущество перед классическим аммиачным способом получения азотной кислоты — практически неисчерпаемые запасы дешевого сырья. Кроме того, плазменные установки весьма компактны и требуют значительно меньших капитальных затрат, чем реакторы синтеза аммиака.

Из других подробно исследованных гомогенных плазмохимических процессов следует упомянуть получение синильной кислоты и дициана с последующей их переработкой в цианамид кальция или в нитрилакриловую кислоту, фторидов азота, а также процесс пиролиза хлоруглеводородов.

В последние годы возрос интерес к гетерогенным плазмохимическим процессам, в которых исходное сырье

поступает в плазму в виде мелкодисперсной твердой или жидкой фазы, а при реакции образуются газообразные продукты, которые при закалке конденсируются.

Среди таких процессов прежде всего следует отметить процесс получения двуокиси титана окислением тетрахлорида титана в плазменной струе. Кислород, плазмообразующий газ, поступает из плазмотрона в реактор, где перемешивается с парами $TiCl_4$ (реакция с образованием двуокиси титана и хлора). Продукты реакции проходят через бункер, в котором двуокись титана осаждается на фильтре. Хлор поступает в систему поглощения. Конечный продукт процесса — порошок двуокиси титана с частицами размером менее 1 мкм, содержащий 40—60% рутила, с высокими пигментными свойствами и по своим физико-техническим характеристикам удовлетворяющий требованиям промышленности. При реализации способа значительно упрощается конструктивное оформление процесса, отпадает необходимость предварительного подогрева $TiCl_4$, возможна организация замкнутого цикла с возвратом полученного хлора на обработку исходного титаносодержащего сырья. В качестве источника плазмы для данного процесса наиболее целесообразно использовать безэлектродный высокочастотный плазмотрон.

Процесс плазмохимического получения двуокиси титана из хлоридов в промышленном масштабе реализован в США, а в ФРГ, Англии, Франции работают полупромышленные установки. Аналогичный процесс получения двуокиси кремния окислением четыреххлористого кремния был исследован авторами этой книги. Были найдены оптимальные условия осуществления процесса, определены последовательность введения реагентов в плазменную струю, параметры закали. Результаты показали, что реакция окисления проходит достаточно глубоко за время $\sim 10^{-3}$ с, максимальная степень превращения достигается при температуре $\sim 2000^\circ K$. Техно-экономические расчеты свидетельствуют о преимуществах плазменного способа перед традиционными методами получения кремнеземных порошков — снижении капитальных затрат на 20% и стоимости целевого продукта на 10%.

В Имст им. Байкова изучен плазмохимический способ получения монооксида кремния, которая используется в электронной и некоторых других отраслях промыш-

ленности. Для выделения монооксида из потока отходящих газов был предложен металлокерамический фильтр. Доказана техническая и экономическая перспективность способа.

Сравнительно новое направление в развитии плазмохимической технологии — термическая переработка фосфатов для получения фосфора, пятиоксида фосфора и других фосфорсодержащих соединений. Необходимость изыскания новых способов переработки фосфоритных руд — в постоянно возрастающей потребности в фосфорной кислоте и различных фосфорсодержащих продуктах на ее основе.

Для гетерогенных плазмохимических процессов перспективны циклонные реакторы и реакторы с многоструйной камерой смешения.

Во всех описанных выше процессах речь шла об использовании тепловой энергии плазмы. В то же время плазма — мощный источник излучения, которое может быть использовано для фотохимических процессов. Специальное оборудование для них выпускается серийно. Регулировку интенсивности излучения в нужном диапазоне частот осуществляют сменой плазмообразующего газа и режима разряда. Интенсивное излучение в ультрафиолетовой области наблюдается при использовании аргона, в инфракрасной — неона. Подобрав необходимое соотношение газов (аргон + ксенон), можно получить источник света, почти не отличающийся по спектру от солнечного. Подобные плазменные генераторы, работающие при давлении до 17 ат, среднемассовой температуре 7000°K, дают поток излучения 31% от общей мощности в разряде, в том числе в ультрафиолетовой области примерно 11%. Максимальная мощность фотохимических плазмотронов 250 кВт.

Из перспективных фотохимических процессов следует указать на изготовление капролактама, конверсию сернистого ангидрида в серный, получение акрилонитрила из пропилена и аммиака в присутствии кислорода, прямое окисление бензола в фенол. Существуют предложения о комплексном использовании энергии плазмы — тепловой процесс проводится в плазменной струе, а фотохимический — с наружной стороны стенок плазмотрона.

В последние годы большой интерес проявляется к термическому способу разрушения горных пород, который по всем показателям более эффективен, чем механический, особенно при обработке крепких и весьма крепких пород. Способ нашел промышленное применение в США, Канаде, СССР и других странах, где бурят граниты, кварциты, таконитовые руды и др.

Термический способ применяют в нашей стране на Янцевском, Емельяновском и других месторождениях для резки гранитных блоков из массива и на Московском камнеобрабатывающем комбинате для их чистовой обработки.

Каковы же механизмы разрушения изверженных пород при помощи тепла? Резкие тепловые напряжения в породе вызывают растрескивание поверхностного слоя, скол, отрыв и шелушение горной массы. Но оплавления не происходит. Скорость же обработки крепких пород по сравнению с механическими способами значительно повышается. Однако разрушающее действие термической струи ограничено ее максимальной температурой 3500°K.

Последнее обстоятельство делает весьма перспективным использование плазменной струи — наиболее концентрированного и высокотемпературного источника тепла (температура нагретого газа 5000—7000°K). Естественно, что плазменная резка и обработка горных пород более эффективна, чем огневая. В бурении используют напряженное состояние породы при одностороннем воздействии плазменной струи. В общем, решаются следующие задачи:

- резка блоков из массива;
- разрушение негабаритов нерудных материалов, образующихся при взрывной добыче;
- чистовая (фактурная) обработка блоков и плит;
- декоративная обработка камня — нанесение рельефных изображений;
- бурение шпуров и взрывных скважин.

В настоящее время разработан ряд конструкций плазменных горелок для этих целей. Плазмобуровая горелка ПБ-40 предназначена для бурения шпуров, прорезания щелей и обработки поверхности. Диаметр горелки 40 мм, длина с буровой штангой 2000 мм, полезная

мощность 10—120 кВт, расход воздуха 4—20 г/с. Горелка состоит из выходного диафрагмированного и внутреннего стержневого электродов, разделенных изолятором — завихрителем. Выходной электрод заканчивается сопловым аппаратом. Сжатый воздух от компрессора или баллонов подается через завихритель в разрядную камеру, образованную электродами. Между электродами ВЧ-пробоем возбуждается электрическая дуга, которая растягивается вихрем поступающего воздуха и стабилизируется в разрядном канале выходного электрода. Струя воздушной плазмы формируется сопловым аппаратом. Запуск и вывод плазмобура на рабочий режим занимает не более 5—10 с. Ресурс конструкции, определяемый наиболее изнашивающейся деталью — внутренним стержневым электродом, около 40 ч; при работе на меньших токах он больше.

При бурении горелкой ПБ-40 шпуров диаметром 50—60 мм в крепких роговиках Кривого Рога показана скорость до 25 м/ч, что в 1,5—2 раза выше скорости бурения кислородокеросиновыми горелками.

Плазменный струйный генератор ПГК-40 предназначен для использования в комбинированных термомеханических породоразрушающих органах буровых и проходческих агрегатов. Полезная мощность его 60—120 кВт, расход воздуха 15—20 г/с, диаметр 40 мм, ресурс работы катода свыше 30 ч. Проходческий комбайн с термомеханическим породоразрушающим органом, оснащенный генератором ПГК-40, позволяет в 1,7 раза увеличить скорость проходки, в 1,4 раза снизить себестоимость, а экономическая эффективность его применения 8 тыс. руб. в год.

Плазменный расширитель РПС-150 используется для расширения взрывных скважин, выполненных механическими буровыми органами, и образования в них полостей различной конфигурации для размещения зарядов взрывчатого вещества. Он расширяет сетку взрывных скважин, сокращает затраты на бурение, улучшает дробление горной массы. Мощность генератора до 300 кВт, диаметр 150 мм, диаметр разбуриваемого котла до 350 мм.

Одна из конструкций плазмобура предусматривает воздушную вихревую стабилизацию дуги и воздушное охлаждение электродов. Дуга горит вдоль оси цилиндрической полости дуговой камеры из двух медных труб-

чатых электродов, разделенных изолирующим керамическим кольцом с тангенциальными отверстиями. Снаружи оба медных электрода имеют ребра для охлаждения. Источник питания постоянного тока с напряжением холостого хода до 1200 В, ток до 160 А, мощность до 190 кВт. В процессе исследований установлено, что при работе плазмобура в пробуренной скважине блоки горных пород легко разрушаются. Это может быть использовано для дробления негабаритов. Линейная скорость бурения 2,5—4,5 м/ч при диаметре скважин 50—130 мм. Температура забоя, измеренная полупроводниковыми термосопротивлениями, в пределах 345—563°K в зависимости от типа пород, режима работы горелки, расстояния до забоя и времени воздействия теплового потока на породу. Выбуренный в единицу времени объем породы пропорционален мощности горелки.

Анализ продуктов разрушения показал, что основная масса их остается неизменной независимо от режима терморазрушения и способа охлаждения. На производительность в основном влияет суммарное содержание хрупких и пластичных минералов: повышение доли хрупких минералов и снижение пластичных ведет к росту скорости разрушения.

Плазменная обработка изделий из гранита основана на том же механизме разрушения породы, что и плазменное бурение. Наиболее энергоемка чистовая обработка. Технология требует применения плазмотронов средней мощности и одновременной работы нескольких горелок.

Описан процесс обработки гранитов двумя плазмотронами по 85 кВт каждый, питающимися от одного источника с напряжением холостого хода 510—580 В. Высокочастотный осциллятор обеспечивает последовательный запуск. Тепловой поток превышает $2 \cdot 10^5$ Вт/см². Плазменную горелку ПКР-30 использовали для крупного сбоя, грубой тески и чистовой обработки гранита Курдайского месторождения. При мощности 55 кВт и расходе воздуха 10 г/с производительность сбоя 43,2 кг/ч.

Для повышения эффективности разрушения в плазменную струю впрыскивают углеводороды. Такая плазма — перегретая смесь воздуха с углеводородом — при температуре 3900—4200°K становится термодинамически активной. Остывание смеси при взаимодействии с по-

верхностью разрушения сопровождается повышенной теплопередачей и значительным динамическим действием струи. Термодинамически активная плазма повышает интенсивность отделения частиц с увеличением их толщины при оптимальной дистанции 8—10 см. Максимальная производительность обработки отмечена при мощности горелки 65 кВт и расходе воздуха 10 г/с. При меньшей дистанции порода перегревается и снижается производительность, при большей снижаются удельный тепловой поток и соответственно производительность.

Плазмой можно обрабатывать плоские и фигурные поверхности блоков горных пород и деталей архитектурных памятников, сверлить отверстия, прорезать щели в породах и т. д.

Известны два способа разрушения горных пород: отрыв из-за растягивающих напряжений и выражающийся в образовании трещины, перпендикулярной главной оси растяжения; скалывание (или срез) из-за касательных напряжений, выражающееся в образовании трещин, ориентированных в направлении максимальных касательных напряжений. При термическом разрушении наблюдается главным образом скалывание.

С увеличением расхода плазмообразующего газа происходит более интенсивное разрушение поверхности кварцитов благодаря шелушению; при этом нет оплавления породы, скалывание частиц и их разлет более энергичны. При обработке гранитов наряду со скалыванием мелких зерен наблюдается оплавление. Установлено, что эффективность разрушения зависит главным образом от минерального состава породы и определяется содержанием кварца и биотита, тогда как все остальные минералы оказывают менее существенное влияние. Повышение содержания биотита резко снижает скорость хрупкого разрушения гранитов. Изменения минералогического состава гранита не наблюдали, поверхность воздействия покрывается тонким слоем стеклообразной фазы толщиной 10—30 мкм.

Плазменная обработка кварцитов и гранитов при оптимальных режимах дает хорошо выровненную поверхность образцов, что позволяет образовывать на ней своеобразную фактуру и орнаментальные рисунки.

Прочие применения плазменной струи

Наряду с вышеуказанными возможностями использования плазмы можно отметить еще некоторые. С плазменной струей связывают создание методов непосредственного превращения тепловой энергии в электрическую. Установку, построенную для этой цели, называют магнитогидродинамическим генератором. Основная идея, на которой основано использование плазменных процессов для безмашинного преобразования энергии, проста. Струя ионизированного газа проходит через магнитное поле наперерез силовым линиям. При пересечении силовых линий в плазменной струе появляется электродвижущая сила индукции. Под действием индуцированного электрического поля в плазме возникает электрический ток, перпендикулярный к направлению плазменного потока и силовым линиям поля. Он замыкается через внешнюю нагрузку, присоединяемую к электродам, которые находятся в контакте с плазменной струей. Электроэнергия (выделяющаяся во внешней цепи генератора) образуется благодаря уменьшению кинетической энергии плазменной струи. Поток плазмы тормозится вследствие взаимодействия между током в плазме и магнитным полем. Плазменная струя должна быть хорошим проводником тока, что зависит от количества в ней заряженных частиц.

Магнитогидродинамический преобразователь по принципу действия — обратимое устройство. Он может превращать кинетическую энергию плазмы в электрическую или, напротив, ускорять плазму с помощью электродинамических сил, потребляя энергию от внешнего источника. В последнем случае — это ускоритель, или инжектор плазмы, который можно использовать в качестве основы для реактивного плазменного движителя.

В настоящее время исследовательские работы по изучению МГД-эффекта интенсивно осуществляются советскими учеными совместно с американскими исследователями.

Плазменные печи могут быть использованы для плавки высокоогнеупорных материалов. Французскими исследователями создан процесс плавки огнеупоров, стойких при 1700°C в окислительной и при 2000°C в восста-

новительной или нейтральной атмосфере и в вакууме. В нашей стране проводятся работы по обезуглероживанию бакора, применяемого в стекольной промышленности для кладки бассейнов стекловаренных печей. а также по получению кварцевого стекла особой чистоты.

Плазменная струя может быть использована для поверхностной закалки металлов. При мощности ее 20—50 кВт вращающийся стальной валик диаметром 25 мм закаливается на глубину 0,25 мм при расходе плазмообразующего азота 1,1—3,4 м³/ч.

Кроме того, она прекрасный источник возбуждения для эмиссионного спектрального анализа различных материалов. Для этой цели используют ВЧ- и СВЧ-плазмотроны. Исследуемый материал вводят в рабочий газ в виде аэрозоля.

Описано использование плазменной струи для получения супертонкой минеральной ваты. В УралНИИстром-проекте создана опытная установка на базе серийной УПУ-3М. Показана возможность производства супертонкой стеклянной ваты с диаметром волокон 1,5—3,0 мкм, причем резко возрастает скорость раздува первичных нитей и производительность процесса, так как возможен раздув первичных штабиков диаметром 2—4 мм вместо 100—150 мкм по существующей технологии. Высокая температура плазменной струи позволяет также изготавливать вату из металлургических шлаков и горных пород и высокоогнеупорную кварцевую вату.

Плазменная струя применяется и для испытаний материалов и конструкций на жаропрочность, в аэродинамических трубах — для обдувки ракет и космических аппаратов (дуговые плазмотроны мощностью 10—20 МВт). Небольшие плазмотроны используются на спутниках для корректировки положения на орбите.

* * *

Рассказ о способах и областях применения плазменной техники можно продолжать практически бесконечно. Но когда-то надо ставить точку. И если читатель, закрыв книжку, будет убежден в том, что в мире техники плазма занимает достойное место, авторы сочтут свою задачу выполненной.

Литература

Бергман Э. Д., Покровский Г. Н. Термическое разрушение горных пород плазмобурами. Новосибирск, «Наука», 1971.

Быховский Д. Г. Плазменная резка. Л., «Машиностроение», 1972.

Вайнерман А. Е., Шоршоров М. Х., Веселков В. Д., Новосадов В. С. Плазменная наплавка металлов. Л., «Машиностроение», 1969.

Готлиб Л. И. Плазменное напыление. М., ЦИНТИХимнефтемаш, 1970.

Использование плазмы в химических процессах. Под ред. проф. Л. С. Полака. Пер. с англ. Ф. Б. Вурзеля и А. А. Овсянникова, М., «Мир», 1970.

Краснов А. Н., Зильберберг В. Г., Шаривкер С. Ю. Низкотемпературная плазма в металлургии. М., «Металлургия», 1970.

Кулагин И. Д. Плазменная обработка материалов. М., «Машиностроение», 1969.

Моссэ А. Л., Печковский В. В. Применение низкотемпературной плазмы в технологии неорганических веществ. Минск, «Наука и техника», 1973.

Низкотемпературная плазма. Материалы симпозиума при XX Международном конгрессе по теоретической и прикладной химии. М., «Мир», 1967.

Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов. Под ред. акад. Б. Е. Патона. М., «Наука», 1973.

Плазменные процессы в сварочном производстве. Под ред. проф. В. В. Степанова. Свердловск, 1971.

Получение покрытий высокотемпературным распылением. Под ред. Л. К. Дружинина и В. В. Кудинова. М., Атомиздат, 1973.

Самсонов Г. В., Эпик А. П. Тугоплавкие покрытия. М., «Металлургия», 1973.

Эсибян Э. М. Плазменно-дуговая аппаратура. Киев, «Техника», 1971.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Генераторы низкотемпературной плазмы	6
Резка металлов	12
Сварка металлов	18
Наплавка металлов и сплавов	26
Напыление порошков	33
Металлургия	42
Выращивание кристаллов	48
Плазмохимия	50
Плазма в горном деле	55
Прочие применения плазменной струи	59
Литература	61

ДОЛГОПОЛОВ Нифонт Николаевич,
ФРИДМАН Вили Исаакович

ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНИКА

Редактор Г. И. Флюорент
Обложка В. Б. Лукин
Худож. редактор Т. И. Добровольнова
Техн. редактор А. М. Красавина
Корректор Т. Ю. Дорогова

А08308. Индекс заказа 55003. Сдано в набор 8/1 1975 г. Подписано к печати 6/1 1975 г. Формат бумаги 84×108/32. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0. Усл. печ. л. 3,36. Уч. изд. л. 3,28. Тираж 68 040 экз. Издательство «Знание». Москва, 101835, Центр, проезд Серова, д. 3/4. Заказ 46. Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4. Цена 11 коп.

Издательство «Знание» выпускает серию научно-популярных брошюр «Промышленность», освещающих направления технической и экономической политики КПСС в промышленности, а также практический опыт отраслей промышленности и отдельных предприятий в деле выполнения пятилетних планов развития народного хозяйства.

Брошюры серии рассчитаны на руководителей предприятий, инженерно-технических работников, экономистов. Они также будут полезны широкому кругу партийно-хозяйственного актива, пропагандистам, лекторам и другим читателям, интересующимся вопросами совершенствования отечественной промышленности.

Всего в этой серии выходит 12 номеров в год, по одной брошюре в месяц. Причем брошюры Вы сможете получить прямо на дом, подписавшись в любом отделении связи или у общественного распространителя печати по месту Вашей работы или учебы. Это будет удобнее для Вас, тем более что не все брошюры серии поступают в розничную продажу.

В каталоге «Союзпечати» Вы найдете эту серию в разделе «Научно-популярные журналы» под рубрикой «Брошюры издательства «Знание». Индекс серии в каталоге «Союзпечати» — 70097. Подписная цена на год — 1 руб. 32 коп., на полугодие — 66 коп., на квартал — 33 коп.

В 1975 году подписчики серии «Промышленность» получают, в частности, следующие брошюры:

О. И. Волков, д-р экон. наук. Совершенствование управления экономикой.

Г. А. Васильев, канд. экон. наук. Технический прогресс и комплексная автоматизация.

И. А. Кантор, канд. экон. наук. Планирование и экономическое стимулирование в научно-производственных комплексах.

А. А. Невелев, канд. экон. наук. Автомобильное производство в США.

О. А. Перелешина, канд. экон. наук. Новые задачи старого района (о комплексном развитии промышленности Урала) и ряд других брошюр.