

Н. А. Соснин, П. А. Тополянский,
Б. Л. Вичик

ПЛАЗМЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ
(технология и оборудование)



ОБЩЕСТВО «ЗНАНИЕ» РОССИИ
Санкт-Петербургская организация
ДОМ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОПАГАНДЫ

Н. А. Соснин, П. А. Тополянский, Б. Л. Вичик

ПЛАЗМЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ (технология и оборудование)

Concord, N.H., January 11, 1891.

ПРИЧЕМ ПОДАЧА ВОДЫ ПРОИЗВОДИЛАСЬ С ПОМОЩЬЮ ПОДВЕСНОГО ПОДАЧНОГО ТРУБОПРОВОДА.

卷之三

Серия — Прогрессивная технология сварочных процессов

卷之三

Санкт-Петербург
1992

УДК 621.745 : 533.9

БИБЛІОГРАФІЯ
ПІДСВІДОМОСТЬ ПОДСВІДОМОСТЬ
ПІДСВІДОМОСТЬ ПОДСВІДОМОСТЬ

Н. В. Соснин, П. А. Тополянский, Б. Л. Вичик

ПЛАЗМЕННЫЕ НАНОПОКРЫТИЯ
(специальные способы нанесения)

Соснин Н. А., Тополянский П. А., Вичик Б. Л.

Плазменные покрытия (технология и оборудование). — СПб: О-во «Знание» России, СПбО, ДНТП, 1992. — 28 с., ил.

ISBN 5-7320-0603-6

В брошюре рассмотрены основные схемы, параметры и особенности технологических процессов и устройств нанесения различных плазменных покрытий. Описаны результаты наплавки и напыления порошковых покрытий и финишного упрочнения с нанесением тонкопленочных покрытий при использовании универсального плазменного оборудования нового поколения.

Брошюра предназначена для инженерно-технических работников предприятий промышленности и научно-исследовательских институтов, специализирующихся в области нанесения различных плазменных покрытий.

ISBN 5-7320-0603-6

УДК 621.745 : 533.9

© О-во «Знание» России.
С.-Петербург. организация. ДНТП, 1992

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень технологий нанесения плазменных покрытий позволяет получить значительный технико-экономический эффект за счет повышения износостойкости, коррозионной стойкости, жаропрочности, ресурса работы деталей машин, аппаратов, инструмента и технологической оснастки, а также за счет экономии дефицитных материалов и трудовых ресурсов. Потенциально высокая гибкость и универсальность процессов плазменного воздействия на различные обрабатываемые изделия и материалы позволяют наносить покрытия разного функционального назначения в диапазоне толщин от миллиметров до 1—3 микрометров.

Исследованиями последних лет установлено, что универсальность плазменного оборудования может быть приближена к показателям лазерных установок при значительно меньших стоимости, габаритах и энергопотреблении. Гибкие модули плазменной обработки открывают возможности свободного выбора и оптимизации технологических процессов наплавки и напыления порошковых покрытий, финишного нанесения аморфных тонкопленочных износостойких покрытий, что дает возможность выбрать оптимальную для данного производства технологию.

Разработка и эксплуатация универсального оборудования и гибких модулей плазменной обработки требуют краткого изложения основных схем, параметров и особенностей технологических процессов и устройств нанесения различных плазменных покрытий.

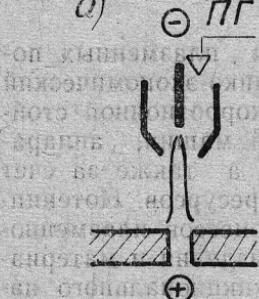
ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ И ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Источником тепла при плазменной обработке служит поток плазмы, который может быть получен с помощью электрического дугового разряда, высокочастотного разряда в электромагнитном поле, лазерного излучения. В настоящее время в технологии нанесения покрытий наибольшее распространение нашли способы генерации плазмы в специальных дуговых плазмотронах.

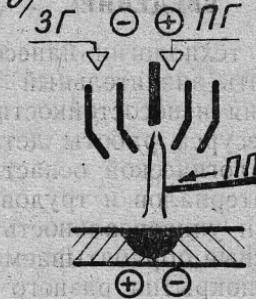
В зависимости от схемы включения в плазмотронах может использоваться прямая дуга, горящая между электродом и изделием, или косвенная дуга, замыкающаяся внутри плазмотрона на плазмообразующее или на специальное выходное сопло (рис. 1). При прямой дуге эффективный к. п. д. передачи тепла от дуги к изделию η_d значительно выше, чем при косвенной, и может достигать 50—80 %, что обусловлено большим тепловыделением в активном пятне дуги на изделии [1].

Прямая дуга

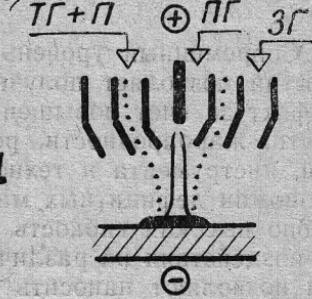
a) \ominus ПГ



б) ЗГ \ominus \oplus ПГ

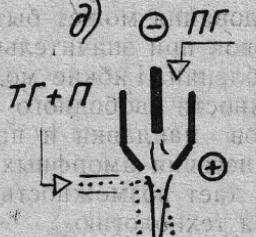


в) ТГ+П

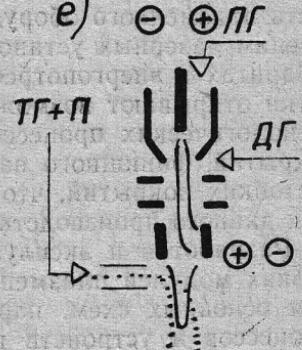


Косвенная дуга

г) \ominus ПГ



д) \ominus ПГ



е) \ominus \oplus ПГ

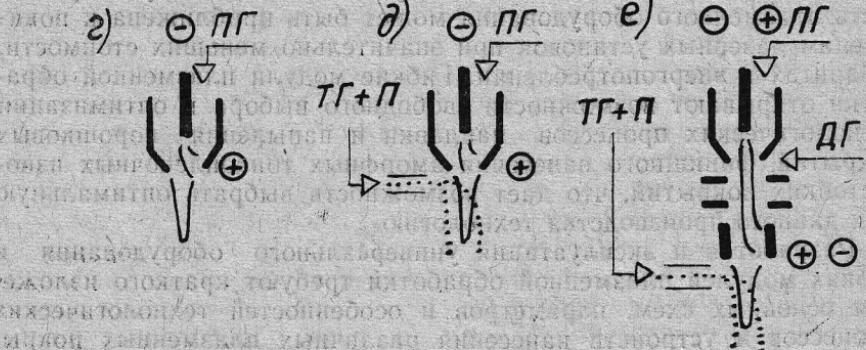


Рис. 1. Схемы плазмотронов: для резки, строжки, плазменно-механической обработки (*а*), сварки (*б*), наплавки (*в*), обработки изделия плазменной струей (*г*, *е*), напыления и нанесения покрытий (*д*, *е*). Газы: ПГ — плазмообразующий, ЗГ — защитный, ТГ — транспортирующий, ДГ — дополнительный, ПП — присадочная проволока, П — порошок

Поток плазмообразующего газа, проходя через узкое сопло, обеспечивает: *а)* пространственную стабилизацию и сжатие столба дуги; *б)* повышение эффективности конвективной теплопереда-

чи от столба дуги к изделию (при использовании газов с большим теплосодержанием — CO_2 , H_2 , воздух и т. д. — также за счет значительной энергии диссоциации этих газов); в) отеснение или выдувание расплавленного металла из-под основания дуги на изделие; г) разогрев и ускорение частиц, введенных в плазму (например, при напылении).

По мере интенсификации потока плазмообразующего газа прежде всего возрастает конвективная составляющая Q_p , которая может доминировать в эффективной мощности Q_e (значение последней тоже увеличивается, как правило), и растет силовое воздействие потока плазмы на обрабатываемые материалы.

Распределение по радиусу r плоского пятна нагрева удельного теплового потока q удовлетворительно описывается законом нормального распределения Гаусса. Аналогично изменяются плотность тока j и давление p (рис. 2, а — ток $I=120 \text{ A}$, диаметр сопла $d_c=2,2 \text{ mm}$, расход плазмообразующего аргона $G_{\text{пг}}=3,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{c}$).

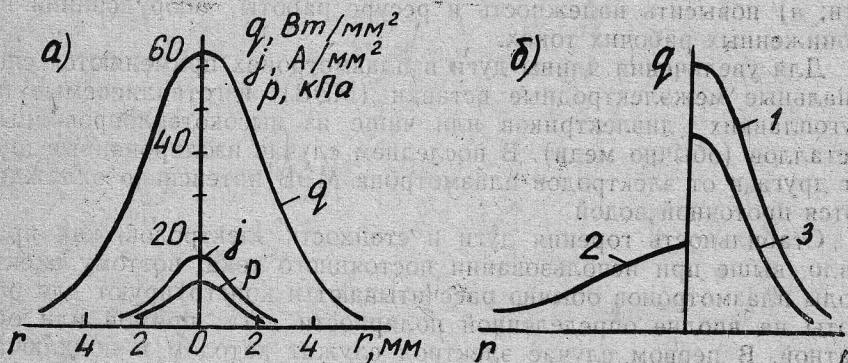


Рис. 2. Радиальное распределение удельного теплового потока q , плотности тока j и давления p в пятне нагрева сжатой дуги, 1 и 2 — сжатая и свободная дуга при $I=\text{Const}$; 3 и 2 — то же при $Q_e=\text{Const}$.

Увеличение расхода газа при плазменной обработке переводит режим наплавки в режим сварки и далее в режим резки, что связано не столько с увеличением концентрации тепловвода, сколько с усилением давления потока плазмы.

Возрастание концентрации ввода тепла (уменьшение эффективного радиуса R_q) наблюдается прежде всего при уменьшении диаметра плазмообразующего сопла d_c , а также (в меньшей степени) — с уменьшением тока и длины дуги.

Вследствие сжатия столба дуги в плазмотронах падение напряжения на единицу длины дуги может быть в несколько раз выше, чем в свободно горящих дугах, и достигать 2—3 В/мм и более. Повышенное напряжение сжатой дуги, особенно в высокотемпературном

энтальпийных молекулярных плазмообразующих газах, требует применения специальных источников питания с увеличенным рабочим напряжением (например, при резке или напылении по схемам рис. 1, а, е — до сотен вольт). Только использование в качестве плазмообразующего газа аргона дает возможность питать относительно слабо сжатую дугу от обычных источников тока, предназначенных для дуговой сварки. Так можно реализовать процессы плазменной сварки, наплавки и напыления по схемам рис. 1, б, в, г, д при напряжении холостого хода источника питания до 90—120 В.

Следует отметить, что возможность при плазменной обработке снижения рабочих токов без уменьшения эффективной мощности Q_e за счет искусственного увеличения длины дуги и ее напряжения может дать следующие преимущества: а) повысить стабильность и эффективность теплового и силового воздействия плазмы на обрабатываемые материалы; б) увеличить гибкость регулирования режимов, в частности, путем уменьшения расхода газа и скорости плазменной струи без снижения тепловой мощности; в) повысить надежность и ресурс работы оборудования на пониженных рабочих токах.

Для увеличения длины дуги в плазмотронах применяются специальные межэлектродные вставки (МЭВ), изготавливаемые из тугоплавких диэлектриков или чаще из высокотеплопроводных металлов (обычно меди). В последнем случае изолированные друг от друга и от электродов плазмотрона МЭВ интенсивно охлаждаются проточной водой.

Стабильность горения дуги и стойкость электродов, как правило, выше при использовании постоянного тока, поэтому электроды плазмотронов обычно рассчитывают и конструируют для работы на вполне определенной полярности дуги: прямой или обратной. В первом случае электрод служит катодом и подключается к отрицательному полюсу источника питания, во втором — анодом, подключенным к положительному полюсу. При смене полярности дуги необходимо, как правило, заменять электрод на другой тип.

В зависимости от полярности тока и рода плазмообразующей среды применяются электроды различных конструкций (рис. 3). Наибольшей стойкостью в инертных газах, а также в присутствии водорода и азота обладают катоды из вольфрама, работающие в режиме термоэлектронной эмиссии. Предпочтительнее использовать вольфрам с добавками иттрия или лантана. Однако для снижения эрозии катода в азотной и водородной среде целесообразно увеличить его охлаждение за счет сокращения вылета вольфрамового стержня из обоймы до нуля (по аналогии с рис. 1, в) [2].

Значительное выделение мощности на аноде требует интенсивного отвода тепла от активного анодного пятна, что обеспечивается при использовании чистых металлов, имеющих высокую теп-

лопроводность (обычно — медь МО), и мощном водяном охлаждении электрода. При работе на токах больших 300 А целесообразно применение медно-вольфрамовых анодов, повышающих стабильность горения дуги в плазмотроне и ресурс работы (см. рис. 3, б).

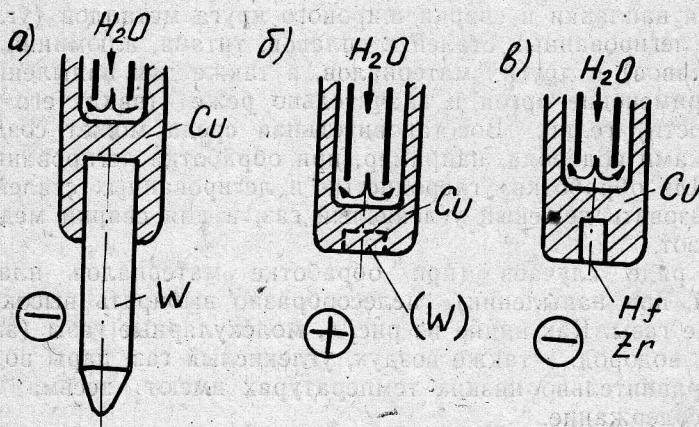


Рис. 3. Электроды плазмотронов для инертных (а, б) и кислородсодержащих газов (в)

Использование дешевых окислительных газов — воздуха, углекислого газа, обладающих значительным теплосодержанием, привело к созданию термохимических катодов, работа которых основана на образовании в катодном пятне термически стойких окислов гафния или циркония (см. рис. 3, в) [3]. Надежность работы таких катодов возрастает при улучшении охлаждения активной вставки, что достигается обеспечением хорошего контакта вставки с обоймой и интенсивным охлаждением электрода. Ресурс термохимического катода снижается с увеличением тока свыше 150—200 А и, особенно, с возрастанием числа включений дуги, что связано с динамическими процессами выхода холодного катода на рабочий режим. Обычно стойкость термохимических катодов не превышает десятков часов.

Повышение работоспособности и удешевление катода при использовании для плазмообразования углекислого газа или воздуха возможно путем создания на эмиттирующей поверхности условий динамического равновесия между термическим уносом и осаждением (в виде ионов) углерода из газовой фазы дуги. Это достигается при изготовлении активной вставки в катоде по схеме рис. 3, в из графита и добавлении в плазмообразующий газ углеводородов, например, природного газа (содержащего до 98 % метана CH₄) или ацетилена (C₂H₂) [4].

Вид плазмообразующего газа выбирается в общем случае с учетом следующих факторов: а) условий химического взаимодействия с обрабатываемым материалом; б) стоимости; в) энергетических характеристик плазмы — теплосодержания и температуры; г) стойкости электродов и необходимого ресурса работы плазмотрона; д) рабочего напряжения дуги.

Для наплавки и сварки широкого круга металлов (углеродистых и легированных сталей и сплавов, титана, алюминия, меди и их сплавов) и других материалов, а также для напыления находит применение аргон и значительно реже (ввиду его высокой стоимости) гелий. Восстановительная среда может создаваться добавками водорода, например, при обработке легированных сталей. Для обработки углеродистых и легированных сталей можно использовать дешевый углекислый газ, а для сварки меди — чистый азот.

В ряде случаев (при обработке материалов плазменной струей, при напылении) целесообразно выбирать высокоэнталпийные газы. Как видно из рис. 4, молекулярные газы (азот, кислород, водород, а также воздух, углекислый газ, пары воды) уже при сравнительно низких температурах имеют весьма высокое теплосодержание.

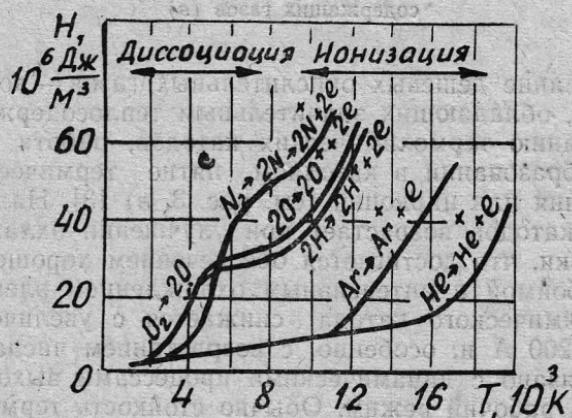


Рис. 4. Зависимость энталпии различных газов от температуры при диссоциации и ионизации

В табл. 1 приведены для сравнения типичные характеристики плазмы различных газов, полученной при сходных условиях и одинаковом токе (схема плазмотрона по рис. 1, г).

Использование молекулярных газов (азота, водорода и других) обеспечивает значительное повышение эффективности теплопередачи от плазмы к обрабатываемому материалу, а за счет

высокой напряжённости электрического поля в дуге при неизменном токе можно получить существенно большие мощности плазмотрона. Следует отметить, что в отличие от аргона плазменная струя молекулярных газов является более протяженной и спад температуры от среза сопла менее интенсивен.

Таблица 1

Сравнительные характеристики плазмы различных газов технологического плазмотрона

Параметр	Плазмообразующий газ			
	Аргон	Гелий	Азот	Водород
Температура плазмы, К	14000	20000	7000	5000
Теплосодержание, 10^6 Дж/м ³	30	50	45	30
Напряжение дуги, В	30	60	70	110
Оптовая цена газа, руб./м ³	0,9	10,0	0,065	0,2

Водородная или гелиевая плазма, имеющая наибольшую теплопроводность, приводит к перегреву плазмотрона и снижению ресурса его работы, поэтому данные газы, как правило, применяются в смеси с азотом или аргоном (для напыления покрытий, резки металлов и т. д.).

Воздух как плазмообразующий газ широко используется для резки, строжки, плазменно-механической обработки, а также в плазмотронах с косвенной дугой — для напыления покрытий, оплавления диэлектрических материалов [5].

В среднем напряжение дуги в плазмотронах, работающих на воздухе, азоте, углекислом газе (или на основе этих газов), приблизительно в 2,5 раза выше, чем при использовании аргона (считая ток, длину и степень сжатия дуги неизменными). Это учитывается при выборе источника питания.

Кроме плазмообразующего газа, при наплавке и сварке подается, как правило, концентрический поток защитного газа (Аг, $\text{Ar} + \text{H}_2$, $\text{Ar} + \text{He}$, N_2 , CO_2 — в зависимости от свариваемого металла). Подача порошковых материалов в зону обработки обычно ведется с помощью транспортирующего газа (аргона, воздуха) от специальных порошковых питателей. Иногда используются дополнительные газы, например, молекулярные в сочетании с инертным плазмообразующим газом, защищающим электрод плазмотрона (см. рис. 1, e).

Вид обрабатываемого материала определяет не только выбор газов (и, соответственно, конструкцию плазмотрона и параметры источников питания), но и полярность дуги. Работа на обратной полярности (при использовании инертного газа и электрода по

рис. 3, б) позволяет: а) обеспечить качественную катодную очистку поверхности металла от пленок и окислов, включая такие тугоплавкие, как оксид алюминия, при наплавке; б) получить менее концентрированный тепловвод в изделие, при наплавке практически исключить подплавление основы и уже в первом слое достичь требуемых характеристик наплавленного металла без разбавления его основным.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) сжатой дуги при плазменной обработке, как правило, возрастающие или жесткие. Слабо падающий вид могут иметь ВАХ дуги в плазмотронах с самонаводящейся (нефиксированной) длиной косвенной дуги (см. рис. 1, д). При напылении покрытий, если ВАХ дуги имеет падающий или жесткий вид, необходимо работать на круто падающем участке внешней характеристики источника питания. Возрастающая ВАХ дуги в плазмотронах с межэлектродными вставками, где длина дуги фиксирована, позволяет эффективно использовать полого падающий участок внешней характеристики источника и при меньшем токе получить большие мощности. В качестве источников питания в настоящее время используют выпрямители на управляемых вентилях с падающими внешними характеристиками.

Возбуждение дуги в плазмотроне производится с помощью осциллятора, генерирующего высокочастотный искровой разряд между электродом и плазмообразующим соплом, где загораетсядежурная дуга при токе до 20—40 А. Факел дежурной дуги закорачивается на изделие (или на выходное сопло по схеме рис. 1, е), при этом самостоятельно зажигается основная дуга.

Технологические процессы плазменной обработки характеризуются значительным числом параметров. Основные параметры режима: род газа, полярность дуги, ток I , диаметр плазмообразующего сопла d_s , скорость перемещения плазмотрона v , расход плазмообразующего газа $G_{нг}$, расстояние от среза сопла до изделия l . Дополнительные параметры: расход защитного газа $G_{зг}$, а также транспортирующего $G_{тг}$ и дополнительного $G_{дг}$ газов, скорость подачи или расход присадочного материала, геометрические размеры и расположение рабочих элементов плазмотрона (электрода, сопла, МЭВ и т. д.), состояние обрабатываемого изделия (температура, состояние поверхности, положение в пространстве, способ, точность и жесткость закрепления), взаимное расположение плазмотрона, изделия и устройства подачи присадки, точность сохранения всех установленных параметров.

Выходные параметры процесса служат критериями оптимизации. К ним относятся в первую очередь показатели качества: а) при наплавке — геометрия наплавленного валика; отсутствие пор, трещин, несплавлений, прожогов и других дефектов; размеры, химический и структурный состав наплавки и зоны термического влияния; температурные поля в изделии при обработке; служебные характеристики наплавки (механические, коррозион-

ные и др.); термические напряжения и деформации изделия; б) при напылении порошковых и нанесении тонкопленочных покрытий — толщина, ее равномерность и шероховатость покрытия; прочность сцепления с подложкой; плотность покрытия; пористость покрытия; другие показатели по аналогии с п. а).

К вспомогательным параметрам, рассматриваемым при расчете режимов и анализе технологического процесса, относятся: напряжение дуги U_d , эффективный η_e и термический η_t к. п. д., характеристики дуги, плазмы и обрабатываемых материалов.

Наряду с перечисленными параметрами процессов плазменной обработки в ряде случаев необходимо учитывать временные факторы (например, длительность импульса и паузы при периодическом изменении отдельных параметров режима, фазовый сдвиг параметров), возможности и состояние оборудования и оснастки, степень автоматизации процесса и другие показатели.

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ, НАПЫЛЕНИЯ И ФИНИШНОГО УПРОЧНЕНИЯ

Технологии плазменных покрытий различаются прежде всего по степени нагрева основы и толщине получаемых покрытий (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение технологий плазменных покрытий

Технология	Толщина покрытия, мм	Размер наносимых частиц, мм	Интегральная температура основы, °C	Класс чистоты поверхности сохраняется
Наплавка	1—4	0,04—0,30	до 200—1000	Нет
Напыление	0,1—1,0	0,02—0,05	до 100—200	Нет
Упрочнение	0,001—0,003	к·10 ⁻⁷	до 100—200	Да

При наплавке жидкий металл покрытия сплавляется с металлом основы; нагрев изделия — высокий, но зато прочность связи покрытия с основой — максимальная. Поверхность под наплавку, как правило, не требует особой обработки, особенно при обратной полярности дуги. Достаточно очистить изделие от окалины и поверхностных загрязнений (органических пленок, смазки и т. д.).

Применение плазменно-порошковой наплавки дает возможность существенно снизить долю основного металла и получить заданный состав наплавленного металла уже в первом слое. Тип наплавленного металла выбирается в зависимости от условий эксплуатации поверхностей наплавляемых деталей [7]. Весьма эффективно использование малогабаритных универсальных плазмотронов, рассчитанных на любую полярность дуги и допускающих

выполнение прецизионной наплавки на ограниченных поверхностях как в автоматическом, так и в ручном режимах (установки типа УПНС-304, УПО-302 производства ленинградского завода «Электрик»). В качестве базы для расчета режимов целесообразно использовать тепловые расчеты Н. Н. Рыкалина [8]. При оптимизации режимов возможна минимизация погонной энергии, что улучшает структуру наплавки и снижает деформации изделия.

Проведенные исследования показали, что при нормальном законе распределения плотности теплового потока $q(r)$ эффективный диаметр D_q при наплавке связан с диаметром плазмообразующего сопла d_c соотношением $D_q/d_c \approx 2,8$ при малом влиянии тока и расхода плазмообразующего газа. Пятно тепловвода в основном ограничивается диаметром порядка $5d_c$ (для расстояния до изделия порядка $1,5d_c$), и соответствует размерам зоны катодной эрозии для дуги обратной полярности. Для типичных режимов ($I=50-200$ А; $d_c=2-5$ мм; $G_{\text{гр}}=1-3$ л/мин; $v=5-40$ м/ч; $l=3-15$ мм) основным фактором, определяющим ширину зоны катодной эрозии при наплавке, является d_c . Дистанция l влияет на размеры этой зоны в основном при использовании сопел минимального диаметра 2–3 мм и до значений l меньших 6–10 мм. Взаимосвязь ширины (диаметра) зоны катодной эрозии D при плазменной наплавке, диаметра сопла ($d_c \leq 5$ мм) и дистанции ($l < 20$ мм) можно выразить следующим эмпирическим соотношением:

$$D = \left(21 - \frac{l}{3} \right) \left(\frac{l}{18 - 3d_c} \right)^{\frac{1}{d_c}},$$

где D, l, d_c — в мм; $d_c > 1$ мм.

Для $l < 100(d_c - 1)$ ориентировочная оценка плотности теплового потока (Вт/мм²) в изделие дает

$$q(r) \approx \frac{1,8I(30 + 0,03l)}{D^2} \cdot \exp\left(-\frac{11r^2}{D^2}\right).$$

При наплавке на обратной полярности зона термического воздействия сжатой дуги на изделие при соизмеримом токе сравнительно с прямой полярностью шире, а общее тепловложение в изделие может быть несколько больше, в частности, за счет более высокого напряжения дуги. Это может способствовать уменьшению склонности наплавленного слоя к образованию трещин.

Изучение микроструктуры наплавки, например, быстрорежущей стали Р9М4К8 (основной металл — сталь Ст3) [9] показало, что при любой полярности на малых скоростях наплавки в основном металле имеется развитая зона термического влияния с характерной структурой перегрева: перлит и игольчатый феррит; размер зерна увеличен до № 5, 6, 4 (по ГОСТ 5639–65). При повышенных скоростях наплавки нагрев основы меньше

и зерно более мелкое. Наплавленный металл представляет собой литую дендритную структуру, состоящую из легированного аустенита и карбидной эвтектики (ледебурит). Твердость наплавленного металла 62—63 HRC₀, после стандартной термообработки (закалка и трехкратный отпуск) — до 65—68 HRC₀, в случае наплавки на обратной полярности. При наплавке на прямой полярности граница соединения менее ровная и четкая, чем на обратной полярности, глубина проплавления основы местами достигает 0,5 мм и более. На обратной полярности в широком диапазоне режимов не наблюдается проплавления основного металла; зона взаимного перемешивания не обнаруживается, несмотря на большее тепловложение. Зона соединения металла наплавки и основы при прямой и обратной полярности имеет соизмеримую толщину — в пределах от 8 до 25 мкм (рис. 5). В первом случае на гра-

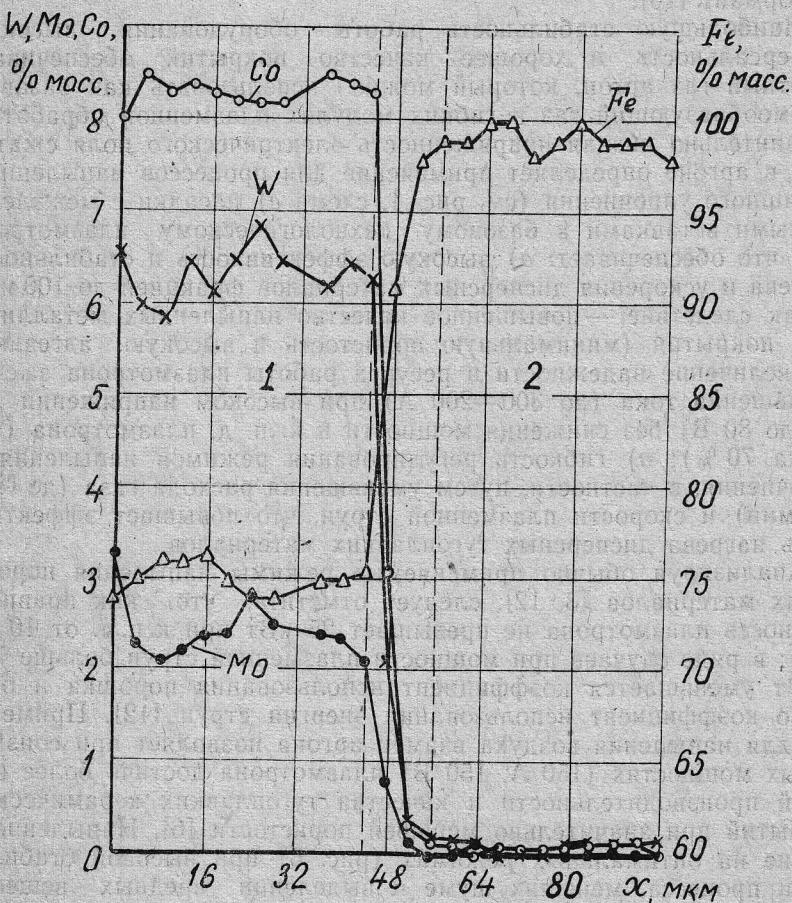


Рис. 5. Распределение элементов в зоне сплавления стали Р9М4К8 со сталью Ст3: 1 — зона наплавки; 2 — основной металл

нице соединения иногда наблюдаются участки химической и структурной неоднородности, чего нет при обратной полярности. На оптимальных режимах влияние полярности дуги на микроструктуру и содержание элементов в наплавке незначительно. Во всех случаях в металле наплавки и по границе соединения отсутствуют такие дефекты, как трещины, поры, несплавления или отслоения. Наплавленный металл однородный, плотный, имеет гладкую поверхность без следов окисления. Размеры валиков при однопроходной наплавке легко варьируются в сравнительно широких пределах: по ширине 5—14 мм, по высоте — 1—4 мм.

Плазменно-порошковая наплавка позволяет получать в наплавленном слое композиционные сплавы на основе Ni-Cr-B-Si-сплавов с упрочняющей составляющей из карбидов хрома, вольфрама и других. Стойкость наплавленных композиционных сплавов в условиях абразивного износа в 1,2—2 раза выше, чем сплава сормайт [10].

Наибольшую стабильность работы оборудования, высокую универсальность и хорошее качество покрытий обеспечивает инертный газ аргон, который можно использовать как базовый плазмообразующий газ в гибких модулях плазменной обработки. Сравнительно низкая напряженность электрического поля сжатой дуги в аргоне определяет применение для процессов напыления и финишного упрочнения (см. рис. 1, схема *в*) насадки с межэлектродными вставками к базовому технологическому плазмотрону [11], что обеспечивает: *а*) высокую эффективность и стабильность нагрева и ускорения дисперсных материалов фракцией до 100 мкм и, как следствие, — повышенное качество напыленных металлических покрытий (минимальную пористость и высокую адгезию); *б*) увеличение надежности и ресурса работы плазмотрона за счет уменьшения тока (до 300—200 А) при высоком напряжении дуги (до 80 В) без снижения мощности и к. п. д. плазмотрона (порядка 70 %); *в*) гибкость регулирования режимов напыления и упрочнения, в частности, путем уменьшения расхода газа (до 18—6 л/мин) и скорости плазменной струи, что повышает эффективность нагрева дисперсных тугоплавких материалов.

Анализируя обычно применимые режимы напыления порошковых материалов [3, 12], следует отметить, что, как правило, мощность плазмотрона не превышает 25 кВт при к. п. д. от 10 до 70 %; в ряде случаев при мощности плазменной струи больше 7—9 кВт уменьшается коэффициент использования порошка и особенно коэффициент использования энергии струи [12]. Применение для напыления воздуха взамен аргона позволяет при соизмеримых мощностях (150 А, 150 В) плазмотрона достичь более высокой производительности и качества тугоплавких керамических покрытий при значительно меньшей пористости [6]. Напыление в аргоне на оптимальных режимах (рис. 6) при высокой стабильности процесса, меньших шуме и выделении вредных веществ обеспечивает высокое качество покрытий (табл. 3): прочность

сцепления металлических покрытий с основой достигает 50—60 МПа при пористости до 1 %.

Типичная подготовка поверхности деталей перед напылением порошковых покрытий — обезжиривание и последующая абразив-

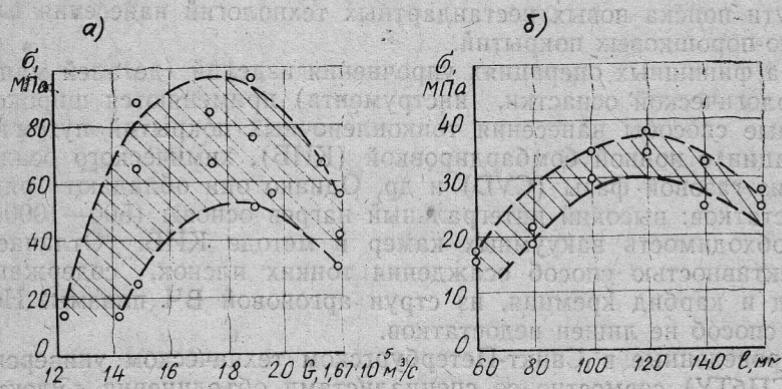


Рис. 6. Оптимизация напыления порошкового покрытия ПГ-ХН80СР3 (размер частиц 50 мкм; ток 240 А; толщина покрытия 0,6—0,7 мм): а) — при $l = 120$ мм; б) — при $G = 37 \cdot 10^{-5}$ м³/с

но-струйная или дробеструйная очистка. Порошковые материалы, применяемые для напыления, подвергают сушке при температуре 150—200 °C в течение 2—3 ч, а керамические порошки прокаливают при 600—800 °C.

Таблица 3
Напыление порошковых покрытий в аргоне по схеме *e*, рис. 1

Напыляемый материал	Средний размер частиц, мкм	Ток дуги, А	Толщина покрытия, мм	Прочность сцепления, МПа
ПН85Ю15	50	240	0,5	31—41
ПГ-ХН80СР3	50	240	0,5	45—54
В3К*	50	250	0,7	41—60
Al*	50	240	0,5	28—45
Al ₂ O ₃ *	28	300	0,5	19—34

* По подслою ПН85Ю15 толщиной 0,05—0,10 мм.

Существенно меньший по сравнению с наплавкой интегральный нагрев изделий при напылении покрытий исключает значительные термические деформации (хотя надо учитывать, что проч-

ность сцепления покрытий, не подвергнутых оплавлению, невысокая).

Свободный выбор схем технологических процессов (см. рис. 1) и параметров нагрева основного и присадочного материалов снижает ограничения на реализацию режимов в диапазоне между порошковым напылением и порошковой наплавкой, что открывает пути поиска новых нестандартных технологий нанесения плазменно-порошковых покрытий.

На финишных операциях упрочнения изделий (деталей машин, технологической оснастки, инструмента) применяются широкоизвестные способы нанесения тонкопленочных покрытий путем конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ), химического осаждения из газовой фазы (CVD) и др. Однако они обладают рядом недостатков: высокий интегральный нагрев основы (500 — 1000 °C) и необходимость вакуумных камер в методе КИБ. Отличается эффективностью способ осаждения тонких пленок, содержащих оксид и карбид кремния, из струи аргоновой ВЧ плазмы. Но и этот способ не лишен недостатков.

Проведенные в Санкт-Петербургском техническом университете (СПбТУ) совместно со специалистами объединения «Электросила» и завода «Электрик» исследования показали возможность и целесообразность использования универсального дугового плазмотрона для финишного поверхностного упрочнения изделий с нанесением тонких кремнийуглеродсодержащих пленок [13]. Преимущества данной технологии: *а*) возможность локальной обработки (автоматически или вручную) поверхностей сложной конфигурации за счет маневренности дугового плазмотрона и высокой концентрации энергии в струе дуговой плазмы; *б*) сравнительно дешевое технологическое оборудование; *в*) высокая универсальность и гибкость технологии и оборудования. В качестве реагентов плазмохимических реакций используются пары кремнийорганических соединений, выбранных по условиям их достаточно высокой летучести, нетоксичности и доступности.

Активация плазменной аргоновой струей дугового плазмотрона на поверхности основы (при низком интегральном нагреве изделия до 100 — 200 °C) и относительно малая концентрация реагентов (Si, C) в высокотемпературной газовой фазе повышает вероятность протекания реакций синтеза SiC и других соединений непосредственно на поверхности изделия в момент конденсации на ней реагентов или промежуточных продуктов, находящихся в газообразном состоянии. Образование твердых соединений в газовой фазе в зонах пониженных температур (меньших 3000 °C) приводит к осаждению ультрадисперсных частиц в виде легко удалляемого пылеобразного налета. В общем случае при формировании тонкопленочного покрытия могут иметь место оба механизма образования кремнийсодержащих соединений, но качественные покрытия получаются, когда существенно доминирует процесс на поверхности.

Пленочное покрытие ограниченной толщины (1—3 мкм) имеет слоистую структуру и характеризуется отсутствием несплошностей и пор, не наблюдавшихся на поперечных шлифах при увеличении до $\times 30000$ на растровом электронном микроскопе. Анализ распределения атомов элементов по толщине нанесенной пленки, проведенный с помощью Оже-электронной спектроскопии, позволяет условно выделить три зоны (рис. 7) [14]. В поверхностной зоне протяженностью 0,05—0,5 мкм наблюдаются значительные колебания концентрации углерода, кислорода и кремния, что может характеризовать не только неоднородность состава, но и некоторую шероховатость поверхности пленки. Вторая зона наиболее стабильна по составу. Соотношение концентраций атомов Si, C и O и анализ спектров углерода указывают на то, что около 20—30 % кремния может быть связано в соединение SiC, а около 70—80 % — в SiO_2 (с некоторым отличием от стехиометрического состава). В третьей, переходной зоне наблюдается плавное снижение концентрации элементов покрытия. Ширина этой зоны порядка 0,5 мкм.

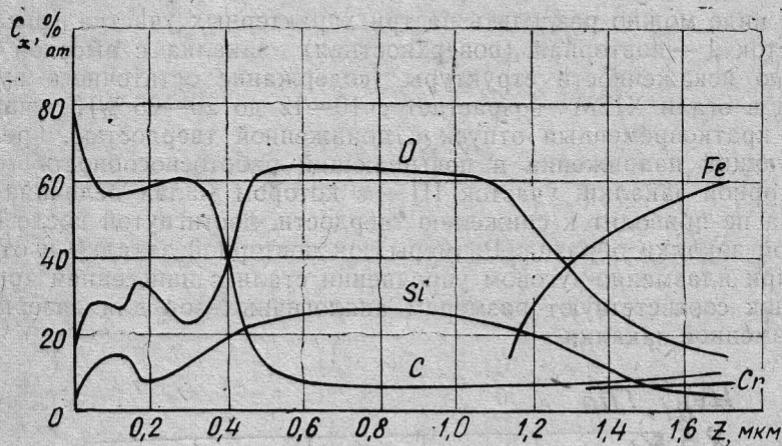


Рис. 7. Профили распределения атомов элементов по толщине тонкопленочного покрытия (Оже-электронная спектроскопия)

Профилометрические исследования стальной поверхности до и после нанесения пленки показали, что при толщине пленки до 3 мкм исходная шероховатость поверхности не ухудшается (табл. 3).

Рентгеноструктурный анализ обработанных образцов из стали Х12М с тонкопленочным покрытием (толщиной до 5 мкм) не выявил дополнительных пиков, не принадлежащих стали образца Х12М. Это может указывать на значительную искаженность

структуры покрытия, что приближает его к дисперсному аморфному материалу.

Термическое воздействие плазменной струи приводит к изменению структуры в поверхностных слоях основы, которые в об-

Таблица 4

Зависимость шероховатости поверхности от толщины тонкопленочного покрытия при финишном упрочнении

Толщина покрытия, мкм	R_z , мкм	
	Образец 1	Образец 2
0	1,59	1,70
1	1,36	2,00
3	1,60	1,80
5	2,50	2,60

шем виде можно разделить на три характерных участка (рис. 8): участок I — повторная (поверхностная) закалка с высокой степенью искаженности структуры (содержание остаточного аустенита в стали X12M возрастает с 10—12 до 20—25 %); участок II — кратковременный отпуск с пониженной твердостью, релаксирующий напряжения и повышающий работоспособность слоя повторной закалки; участок III — в котором малая величина нагрева не приводит к снижению твердости, достигнутой после объемной закалки образца. Размеры зон повторной закалки и отпуска при плазменно-дуговом упрочнении стали с нанесением тонких пленок соответствуют размерам аналогичных зон для лазерной и плазменной закалки.

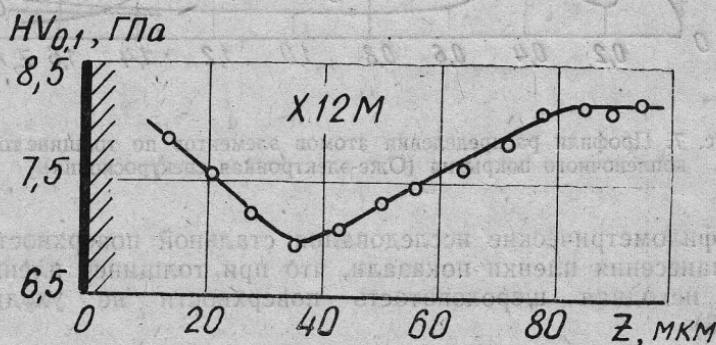


Рис. 8. Изменение микротвердости по глубине зоны термического влияния плазменной струи в предварительно закаленном образце из стали X12M

Микротвердость композиции покрытие-стальная основа (Х12М) достигает 14—16 ГПа, причем, как показали исследования, основной вклад в повышение микротвердости вносит тонкопленочное покрытие. С увеличением числа циклов-проходов (при скорости перемещения плазмотрона 1—2 мм/с) микротвердость повышается, что определяется ростом толщины покрытия и влиянием структурных изменений в приповерхностном слое за счет повторных термических воздействий. Ограничение роста микротвердости композиции (при числе циклов более 5—7) может быть связано с образованием более рыхлых слоев покрытия с низкой когезионной прочностью сцепления, а также с окончанием диффузионных процессов и стабилизацией содержания высоколегированного остаточного аустенита в поверхностном слое.

Относительное влияние параметров технологического процесса на микротвердость композиции покрытие-подложка при финишном упрочнении малогабаритной оснастки (объемом порядка 800 мм³) из стали Х12М с исходной средней микротвердостью 8200 МПа характеризует следующее уравнение регрессии:

$$\frac{\Delta H_u}{H_u} = -0,013 \frac{\Delta I}{I} + 0,073 \frac{\Delta l}{l} + 0,122 \frac{\Delta G_{kp}}{G_{kp}} + 0,014 \frac{\Delta G_{yr}}{G_{yr}} - \\ - 0,038 \frac{\Delta G_{pr}}{G_{pr}} + 0,056 \frac{\Delta n}{n} + 0,064 \frac{\Delta t_u}{t_u},$$

где G_{kp} , G_{yr} — соответственно, расход аргона через кремний- и углеродсодержащую жидкости; n — количество циклов-проходов; t_u — длительность цикла.

Микротвердость растет с уменьшением тока, расхода плазмообразующего газа и с увеличением дистанции обработки; все это уменьшает тепловложение в изделие. Увеличение расхода газа через кремний- и углеродсодержащую жидкости, количества циклов и длительности цикла обработки способствует росту толщины покрытия и микротвердости композиции. Сила влияния каждого из параметров технологического процесса на микротвердость пропорциональна коэффициентам регрессии уравнения, которое можно использовать для регулирования и оптимизации технологического процесса.

Размеры изделий, подвергаемых финишному плазменно-дуговому упрочнению, практически не ограничены. Ширина зоны, упрочняемой за один проход, — 10—15 мм. Потребляемая мощность не превышает 10—12 кВт, что значительно меньше, чем при ВЧ-плазменном упрочнении на установке, например, типа «Плазма-403»; почти на порядок меньше расход аргона и охлаждающей воды.

В соответствии с молекулярно-механической теорией повышению износостойкости поверхностей способствуют: а) увеличение

твёрдости трущихся поверхностей; б) предотвращение образования прочных адгезионных связей в паре трения. Наносимое из плазмы кремнийсодержащее покрытие, являясь диэлектриком, образует пленочный барьер, препятствующий схватыванию трущихся поверхностей, кроме того, может выполнять функции коррозионно-и жаростойкого защитного покрытия. Последнее подтверждается длительными испытаниями образцов на воздушную коррозию при температурах 600—850 °С.

Ресурс работы штамповой оснастки, подвергнутой финишному плазменному упрочнению с нанесением тонкопленочных кремнийсодержащих покрытий, возрастает в 1,5—6 раз в зависимости от условий работы. В парах трения при наличии смазки износостойкость деталей может возрасти многократно. Таким образом, данный технологический процесс, реализуемый с помощью маневренных дуговых плазмотронов при атмосферном давлении, позволяет: а) в ряде случаев заменить дорогостоящий процесс луцевой поверхностной закалки или аморфизации сталей и исключить применение вакуумных камер; б) использовать технологию на финишных операциях обработки при низком интегральном нагреве изделий (до 200 °С) без изменения их размеров и класса чистоты поверхности; в) повысить износостойкость и жаростойкость обработанных изделий; г) реализовать упрочнение штампов, технологической оснастки, режущего инструмента и различных деталей с помощью универсального плазменно-дугового оборудования, обеспечивающего при необходимости наплавку и напыление плазменных покрытий.

Годовой экономический эффект от применения технологий нанесения плазменных покрытий универсальным оборудованием достигает 1 млн руб. в год на один пост.

УНИВЕРСАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

В настоящее время промышленность выпускает в основном специализированное оборудование: отдельно — для наплавки, напыления и т. д. Это может быть оправдано его относительно высокой производительностью в крупносерийном и массовом производстве. В то же время опыт использования плазменных технологий показывает, что во многих случаях весьма эффективным могло бы быть универсальное плазменное оборудование, построенное по принципу унификации технологий и аппаратуры. Такое оборудование: а) позволяет выбрать оптимальную технологию (наплавку, напыление или финишное упрочнение), что особенно важно в условиях мелкосерийного и опытного производства, в частности, при изготовлении оснастки, инструмента, штампов, также в условиях ремонтного производства; б) значительно упрощает эксплуатацию, обслуживание и ремонт унифицированного плазменного оборудования; в) облегчает проведение исследователь-

ских работ как в лабораторных, так и в производственных условиях [15].

Санкт-Петербургским заводом «Электрик» выпускается гибкий технологический модуль плазменной обработки УПО-302, расчетанный на выполнение, кроме плазменной сварки изделий толщиной от 0,5 до 5–8 мм, порошковой наплавки и напыления покрытий, финишного упрочнения с нанесением тонкопленочного аморфного покрытия, а также поверхностной закалки (см. табл. 2). Модуль предназначен для работы с ручным или автоматическим осуществлением операций. Предусмотрена работа модуля УПО-302 в составе роботизированных комплексов. Модуль плазменной обработки включает источник питания, блок управления, универсальный малогабаритный плазмотрон с комплектом сменных насадок, вспомогательную аппаратуру (питатели, газовая аппаратура и т. д.), (рис. 9 и 10).

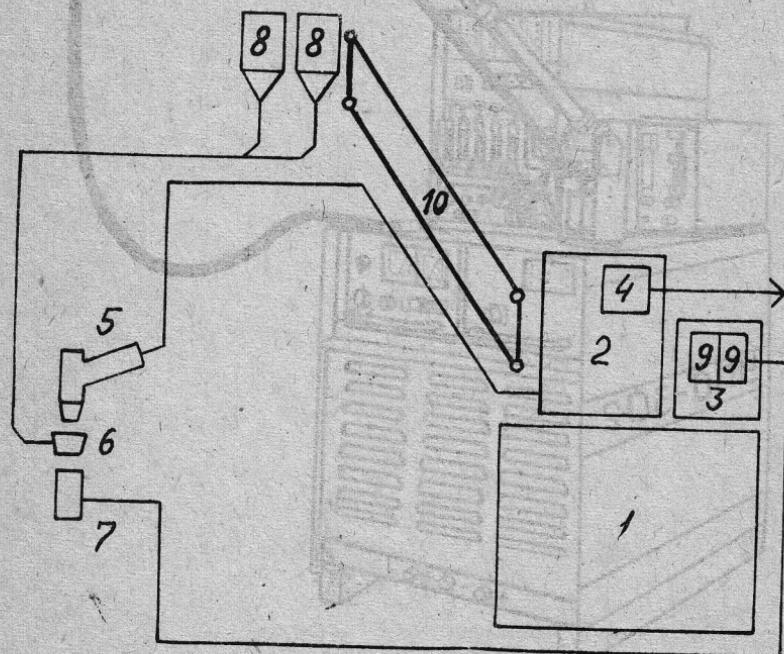


Рис. 9. Блок-схема универсальной установки нанесения плазменных покрытий: 1 — блок питания; 2 — базовый блок управления; 3 — блок аппаратуры; 4 — устройство сопряжения с ЭВМ; 5 — плазмотрон; 6 — насадка для наплавки; 7 — насадка для напыления-упрочнения; 8 — порошковые питатели; 9 — парогазовые питатели; 10 — стрела-балансир

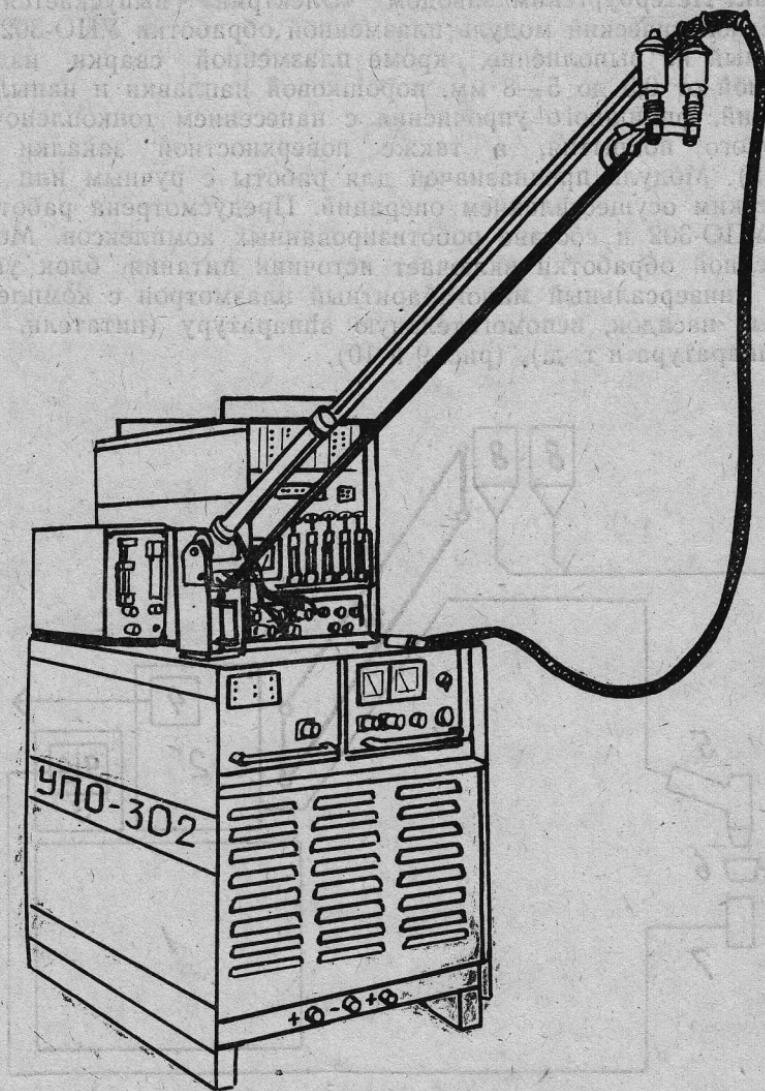


Рис. 10. Общий вид гибкого технологического модуля плазменной обработки УПО-302

**Техническая характеристика гибкого технологического модуля
плазменной обработки УПО-302**

Ток сжатой дуги непрерывный или импульс-	
ный, А	30—315
Рабочее напряжение, В	20—80
Потребляемая мощность, кВА	до 40
Продолжительность включения, %	100
Частота импульсов тока, Гц	0,25—5
Расход при плазменной обработке:	
аргона, л/мин	3—20
порошка, кг/ч	до 3
кремнийорганики, г/ч	до 0,5
охлаждающей воды, л/ч	250—600
Радиус рабочей зоны, м	до 4
Габариты, мм	1200×700×2600
Масса, кг	400

Блок согласования модуля УПО-302 с внешним управляющим устройством имеет на входе: 6 каналов регулирования временных параметров технологических процессов, 2 канала регулирования тока, 2 релейных канала; на выходе: канал измерения тока, 6 релейных каналов контроля оборудования и хода технологических процессов. В качестве внешней аппаратуры может использоваться разработанная в СПбТУ система управления производственными модулями (включая роботы и манипуляторы), обладающая повышенной надежностью и открывающая возможность устанавливать режимы плазменной обработки с учетом их оптимизации.

Гибкий технологический модуль плазменной обработки УПО-302 относится к новому поколению универсального плазменного оборудования и кроме производственной аппаратуры, может снабжаться пакетом алгоритмов для реализации оптимальных режимов основных технологических процессов. Режимы обработки обеспечивают минимальные значения погонной энергии и термического воздействия на обрабатываемые изделия, минимальные термические деформации изделий, относительно низкое экологическое загрязнение среды, экономию дефицитных материалов и трудовых ресурсов. Аналогичные технологические и аппаратные разработки в России и за рубежом пока отсутствуют.

В настоящее время в народном хозяйстве есть большое количество установок для плазменной сварки типа УПС-301 производства завода «Электрик», что создает возможность силами потребителей модернизировать эти установки с целью реализации процессов плазменного нанесения покрытий. При этом изготавливаются дополнительные насадки на штатный сварочный плазмотрон для наплавки, напыления и финишного упрочнения и парогазовый питатель для нанесения аморфных тонкопленочных покрытий. Для получения порошковых покрытий целесообразно брать готовые порошковые питатели (однако не исключается их изготовление у потребителя). При необходимости могут также ис-

пользоваться серийные сварочные выпрямители с падающей внешней характеристикой типа ВД-303, ВД-306, ВДУ-504 и др.

Универсальное оборудование для получения различных плазменных покрытий наряду с перечисленными выше преимуществами отличается: возможностью обработки вручную или автоматически деталей любых габаритов; отсутствием вакуумных систем; незначительным потреблением энергии, инертного газа и воды; экономным расходованием порошков и реагентов; минимальной стоимостью и малыми габаритами; простотой обслуживания.

Перечисленные технологические процессы плазменного нанесения покрытий применяются в промышленности, в частности: на Канонерском судоремонтном заводе — при восстановлении лопастей винтов и при наплавке корабельной арматуры; в ПЭО «Электросила» — при напылении фrettингостойких покрытий на клинья токоподвода турбогенераторов и кавитационностойких покрытий на полюса роторов электрических машин; финишное упрочнение технологической оснастки и инструмента с нанесением тонкопленочных покрытий используется в ПЭО «Электросила», ПО «Большевик», ПО «Ремпутьмаш» и на ряде других предприятий; разрабатывается технология наплавки распределов в ПО «Ленавторемонт».

В случае необходимости определения эффективности применения различных технологий и универсального плазменного оборудования заинтересованные организации могут обратиться в СПбТУ на кафедру сварки для нанесения плазменных покрытий на свои типовые образцы и детали.

Л и т е р а т у р а

1. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. — М.: Изд-во иностр. литер., 1961. — 372 с.
2. Жуков М. Ф., Смоляков В. Я., Урюков Б. А. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны). — М.: Наука, 1973. — 232 с.
3. Донской А. В., Клубникин В. С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. — Л.: Машиностроение, 1979. — 221 с.
4. Фридлянд М. Г., Ермаков С. А., Соснин Н. А. и др. О возможности восстановления катода в процессе работы плазмотрона. // Автоматическая сварка, 1982, № 11 (356). — С. 54—59.
5. Бурьяненко В. Д., Донской А. В., Клубникин В. С. и др. Промышленное применение процессов плазменного напыления. — Л.: ЛДНТП, 1982. — 24 с.
6. Клубникин В. С., Донской А. В., Карасев М. В. и др. Промышленное применение процессов воздушно-плазменного напыления покрытий. — Л.: ЛДНТП, 1987. — 24 с.
7. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
8. Соснин Н. А., Ермаков С. А., Вичик Б. Л. Технологическое и алгоритмическое обеспечение плазменной сварки и наплавки для гибких производств // Сварочное производство, 1986, № 7. — С. 1—2.
9. Соснин Н. А., Вичик Б. Л., Ермаков С. А., Цветова Н. Б., Чижикова Л. И. Прецизионная плазменно-порошковая наплавка бысторежущей стали // Сварочное производство, 1988, № 9. — С. 8—9.
10. Поздеев Г. А., Олейник В. А., Ханкин А. Б., Розенберг М. Г. Плазменная наплавка композиционных сплавов на основе Ni-Cr-B-Si-сплава // Сварочное производство, 1988, № 9. — С. 7—8.
11. Ермаков С. А., Соснин Н. А., Тополянский П. А. Напыление порошковых материалов универсальными плазмотронами с межэлектродными вставками // Труды ЛПИ, № 417. — Л.: ЛПИ, 1986. — С. 99—102.
12. Кудинов В. В., Иванов В. М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. — М.: Машиностроение, 1981. — 192 с.
13. Райчук Д. Ю., Ермаков С. А., Соснин Н. А., Тополянский П. А. Поверхностное упрочнение стали методом плазменной закалки с нанесением покрытия карбида кремния // Повышение качества, надежности и долговечности изделий из конструкционных, жаропрочных, порошковых и инструментальных сталей и сплавов. — Л.: ЛДНТП, 1986. — С. 73—77.
14. Башенко В. В., Соснин Н. А. Поверхностное упрочнение стали с нанесением тонких пленок плазменной струей при атмосферном давлении // II Международная конференция по электроннолучевым технологиям — ЭЛТ-88. — Варна (Болгария), 1988. — С. 823—828.
15. Соснин Н. А. Технологические аспекты создания гибких модулей плазменной обработки // Ресурсосберегающие прогрессивные технологии в сварочном производстве для машиностроительного комплекса. — М.: МДНТП, 1989. — С. 39—42.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Основные схемы и параметры технологических процессов	3
Основы технологии плазменной наплавки, напыления и финишного упрочнения	11
Универсальное оборудование плазменной обработки	20
Литература	25

Николай Алексеевич СОСНИН, Павел Абрамович ТОПОЛЯНСКИЙ,
Борис Львович ВИЧИК

Плазменные покрытия (технология и оборудование)

Ответственный за подготовку материалов к изданию
методист Л. Б. Тихонова, тел. 210-45-26

Научный редактор докт. техн. наук, проф. В. В. Башенко

Редактор Т. Р. Шумкова

Технический редактор О. И. Примакова

Корректор В. В. Фесенко

Сдано в набор 04.03.92.

Подписано в печать 22.04.92.

Формат 60×90¹/16.

Бумага газетная.

Гарнитура лигатурная.

Печать высокая.

Усл. печ. л. 1,75.

Усл. кр.-отт. 1,93.

Уч.-изд. л. 1,4.

Тираж 3000 экз.

Изд. № 467.

Заказ № 183.

Цена договорная.

Дом научно-технической пропаганды (ДНТП)
191011, Санкт-Петербург, Невский пр., 58

Типография ДНТП

ПЛАЗМАЦЕНТР

(научно-производственная фирма)

разрабатывает и предлагает

ТЕХНОЛОГИИ ОБОРУДОВАНИЕ ОБУЧЕНИЕ СЕРВИС

в области плазменной сварки

наплавки

напыления

упрочнения

закалки

Многолетний опыт и высокая квалификация специалистов ПЛАЗМАЦЕНТРА обеспечивают комплексное решение проблем с внедрением новых технологий «под ключ».

ВЫ СТАВИТЕ ЗАДАЧИ — МЫ ИХ РЕШАЕМ

ПЛАЗМАЦЕНТР осуществляет:

разработку оптимальных технологических процессов плазменной обработки различных изделий

разработку, изготовление, поставку и запуск специализированного плазменного оборудования, адаптированного к конкретным условиям

упрочнение партий режущего инструмента, штампов, пресс-форм и деталей машин

нанесение защитных покрытий различного назначения методами плазменного напыления и наплавки

восстановление инструмента, технологической оснастки и деталей машин

оснащение и запуск стационарных и передвижных ремонтных мастерских автотехники и сельскохозяйственных машин

создание технологических и исследовательских центров плазменной обработки

поставку и запуск универсального плазменного оборудования с разработкой технологических процессов по требованию заказчика

обучение, консультации, маркетинг, экономические расчеты, организацию международных контактов и реализацию коммерческих проектов

193167, Санкт-Петербург, Невский пр., 176, а/я 783

Телефоны: 552-63-87, 552-73-73, 294-16-95. Телефакс: (812) 527-41-40

ПЛАЗМАЦЕНТР