



2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

**ОБЗОР ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ
ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПЛАЗМОТРОНОВ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ
ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ
ПОКРЫТИЙ**

**OVERVIEW OF WAYS TO INCREASE
THE THERMAL EFFICIENCY
OF PLASMA TORCHES FOR
PLASMA COATING PROCESSES**

✉¹ **Кадырметов Анвар Минирович**,
д.т.н., профессор кафедры машиностроительных технологий, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

✉¹ **Kadyrmetov Anvar Minirovich**,
doctor of technical sciences, professor of the department of mechanical engineering technologies, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

Дроздов Игорь Геннадьевич,
д.т.н., профессор, проректор по взаимодействию с промышленными предприятиями, профессор кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

Drozдов Igor Gennadievich,
doctor of technical sciences, professor, vice-rector for cooperation with industrial enterprises, professor of the department of rocket engines, Voronezh state technical university, Voronezh.

Сухочев Геннадий Алексеевич,
д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: suhotchev@mail.ru

Sukhochev Gennady Alekseevich,
doctor of technical sciences, professor of the department of mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: suhotchev@mail.ru

Смоляникова Евгения Геннадьевна,
к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: sm.evgeniya@gmail.com

Smolyannikova Evgeniya Gennadyevna,
candidate of technical sciences, associate professor, department of mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, e-mail: sm.evgeniya@gmail.com

Попов Дмитрий Анатольевич,
к.т.н., доцент кафедры машиностроительных технологий, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Popov Dmitry Anatolyevich,
candidate of technical sciences, associate professor, department of mechanical engineering technology, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Пустовалов Алексей Сергеевич,
ассистент кафедры машиностроительных технологий Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Pustovalov Alexey Sergeevich,
assistant professor at the department of mechanical engineering technologies, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Попов Петр Николаевич,

аспирант, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж

Popov Petr Nikolaevich,

graduate student, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh

Аннотация. Представлен обзор вопросов энергетической эффективности электродуговых плазматронов линейной схемы для нанесения покрытий. Рассмотрены плазматроны с самоустанавливающейся длиной дуги, меньшей (с уступом) и большей самоустанавливающейся (с межэлектродными вставками) длины дуги. Показаны актуальность изучения и схемы плазматронов с многовводным введением порошка в канал плазматрона и плазменную струю, тенденция комбинирования многодуговых плазматронов из линейных модулей, позволяющих увеличить мощность плазматрона и уменьшить эрозию катодов. Представлена проблемность вопроса разработки методики выбора схемы и конструкции плазматрона.

Annotation. An overview of the issues of energy efficiency of electric arc plasma torches of a linear circuit for coating is presented. Plasma torches with a self-aligning arc length, shorter (with a ledge) and longer self-aligning (with interelectrode inserts) arc lengths are considered. The relevance of studying and schematics of plasma torches with multi-water injection of powder into the plasma torch channel and plasma jet, the tendency of combining multi-arc plasma torches from linear modules, allowing to increase the power of the plasma torch and reduce the erosion of cathodes, is shown. The problematic issue of developing a methodology for selecting a plasma torch circuit and design is presented.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАЗМОТРОН, ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ, КОМБИНИРОВАННЫЙ ПЛАЗМОТРОН, МИКРОПЛАЗМОТРОН, МНОГОВВОДНЫЙ ПЛАЗМОТРОН, МЕЖЭЛЕКТРОДНЫЕ ВСТАВКИ.

Keywords: ELECTRIC ARC PLASMA TORCH, THERMAL EFFICIENCY, COMBINED PLASMA TORCH, MICROPLASMA TORCH, MULTI-INPUT PLASMA TORCH, INTERELECTRODE INSERTS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Актуальность, постановка вопроса, план обзора

На поверхностях деталей машин в различных отраслях промышленности, транспортной, сельскохозяйственной, лесной, строительно-дорожной и др. техники используются различные защитные и функциональные покрытия. К прогрессивным методам получения таких покрытий относится широко используемые методы плазменного нанесения покрытий и, в частности, плазменное напыление, являющееся одним из наиболее универсальных методов и позволяющее наносить наиболее широкую номенклатуру материалов на различные детали. Объем мирового рынка технологии плазменного напыления непрерывно растет [1]. Вопросам совершенствования плазменного напыления покрытий и плазматронов как инструмента этого процесса посвящены многие работы ведущих зарубежных и российских научных школ: института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН [2-7], института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН [8-14], Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого [15-18], института металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН [19-20], Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана [21-23] и др.

Однако существенными недостатками данной технологии являются низкие тепловой и общий КПД процесса. Энергетическая эффективность плазменного нанесения покрытий определяется значениями теплового КПД плазматрона η_t , энергетическим КПД плазменного напыления η_p , коэффициентом использования материала η_m и общим энергетическим КПД $\eta_{\text{оэ}}$:

$$\eta_t = 1 - Q_{\text{п}} / E_{\text{д}}; \quad \eta_p = E_{\text{ч}} / E_{\text{д}}; \quad \eta_m = M_{\text{п}} / M_{\text{р}}; \quad \eta_{\text{оэ}} = \eta_p \cdot \eta_m; \quad Q_{\text{п}} = Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}} + Q_{\text{т}},$$

где $E_{\text{д}}$ – энергия, выделяемая дугой за время t ; $Q_{\text{п}}$ – суммарные тепловые потери в элементы плазматрона; $E_{\text{ч}}$ – энергия, передаваемая частицам за время t ; $M_{\text{п}}$, $M_{\text{р}}$ – масса покрытия и расходуемого порошка соответственно; $Q_{\text{л}}$, $Q_{\text{к}}$, $Q_{\text{т}}$ – тепловые потери в элементы плазматрона излучением дуги и нагретого газа, конвективным теплообменом между нагреваемым газом и поверхностями разрядной камеры и теплопроводностью в опорных пятнах дуги соответственно.

Известно, что лучистые потери $Q_{\text{л}}$ не превышают 2 %, кондуктивными потерями можно пренебречь при напряжениях дуги, меньших 200 В, и тепловой КПД плазматронов линейной схемы в основном определяется конвективным теплообменом [24].

Общий КПД процесса плазменного напыления до сих пор составляет всего лишь 3-5 %, что является его главной практической и научной проблемой. Это определяет цель информационного поиска, заключающегося в нахождении путей повышения энергетической и общей эффективности плазменного нанесения и упрочнения покрытий за счет совершенствования плазматрона путем повышения его энергетического КПД и развития в отношении увеличения количества одновременно вводимых компонентов в плазменный поток плазматрона (рис. 1) [15].

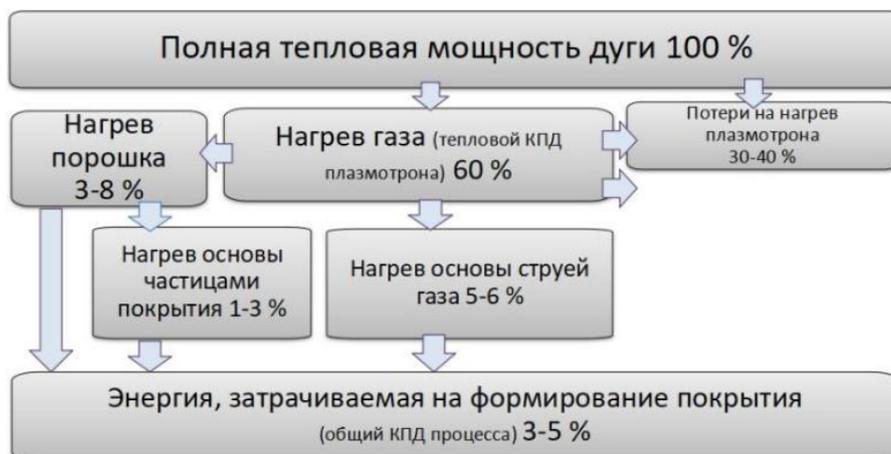


Рисунок 1 – Составляющие тепловой эффективности плазменного напыления

Решение данной проблемы обеспечивает актуальность решения проблемы и предполагает, прежде всего, выбор и оптимизацию типа и параметров конструкции плазматрона, чему посвящено множество исследований, анализ которых представлен ниже и соответствует плану информационного поиска:

- 1) Состояние проблемы тепловой эффективности дуговых плазматронов для плазменного напыления.
- 2) Анализ теплофизической эффективности схемных решений плазматронов для плазменного напыления и выбор оптимальных вариантов.
- 3) Исследования газодинамических процессов при модуляции электрических параметров.
- 4) Теплофизические вопросы повышения тепловой эффективности плазматронов.

2 Состояние проблемы эффективности плазмотронов для процессов плазменного нанесения покрытий

2.1 Состояние проблемы тепловой эффективности дуговых плазмотронов для плазменного напыления

Качество покрытий, получаемых плазменным напылением, и энергетическая эффективность плазменного напыления определяются множеством факторов, которые при прочих равных условиях в конечном итоге сводятся к конструктивным факторам плазмотрона и энергетическим факторам напыляемых частиц (температурам и скоростям) в момент удара их о подложку [25]. Общая схема структурно-следственной связи факторов и критериев плазменного нанесения и упрочнения покрытий, иллюстрирующая это, представлена на рис. 2. Согласно этой схеме роль плазмотрона состоит в формировании и упрочнении покрытия и реализуется в 1-м этапе – в формировании потока частиц с оптимальными выходными параметрами (скорости и температуры газовой и дисперсной фаз, энтальпии плазменной струи, структуры и химического состава частиц, их гранулометрического состава и концентрации в потоке). Выбор плазмотрона определяется, в первую очередь, схемным решением дуговых плазмотронов.

2.1.1 Анализ схемных решений дуговых плазмотронов для плазменного напыления

Генерация плазмы в плазмотронах с помощью нагрева электрической энергией по сравнению с другими видами нагрева газа, например, с помощью высокочастотного или сверхвысокочастотного излучения, оптического излучения, имеет ряд неоспоримых преимуществ [21]. В электродуговых плазмотронах для получения плазмы могут быть использованы практически любые вещества. Плазмотроны обладают широкими возможностями нагрева плазмы газов. Среднемассовая температура струи на выходе из плазмотрона составляет $(4 \dots 6) \cdot 10^3$ К для двухатомных и многоатомных газов и $(1 \dots 2) \cdot 10^4$ – для одноатомных газов [2]. Установки с плазмотронами относительно просты в обслуживании, их производство базируется на хорошо развитых отраслях электромашиностроения, что облегчает внедрение плазменных устройств в современную технику.

Многообразие существующих электродуговых плазмотронов образует и многообразие признаков классификации, каждый из которых характеризует особенности, свойства и эффективность плазмотрона. Классификация плазмотронов по схеме подачи плазмообразующего газа относительно дуги подразделяются на плазмотроны поперечных и осевых схем подачи газа (рис. 3) [2]. Плазмотроны поперечных схем для обеспечения равномерности прогрева газа работают при высокой частоте вращения дуги вокруг электрода и, как следствие, при высоком давлении, достигающем до 6,5 МПа и выше, что приводит к дополнительным сложностям в отношении практического применения технологии, обусловленным необходимостью использования дополнительных агрегатов высокого давления и обеспечения повышенных мер безопасности [26].

Вследствие указанной проблемы гораздо большее распространение получили плазмотроны осевых или линейных схем. Применение данных плазмотронов обусловлено также их преимуществами. Во-первых, такие плазмотроны позволяют переводить режимы их работы с горения косвенной дуги (режим плазменной струи) на режимы горения прямой дуги, либо на режимы горения двух дуг (прямой и косвенной) [2]. Во-вторых, данные плазмотроны обеспечивают возможность получения максимально возможного тепломассообмена между плазменной дугой и обдуваемым её газом, приводящем к максимальному тепловому КПД плазмотрона [2]. В-третьих, к числу достоинств плазмотронов линейной схемы относится возможность работы как на высоких мощностях, так и на малых, позволяющих проектировать миниатюрные плазмотроны – микроплазмотроны [27]. Последние позволяют минимизировать теплоподвод к деталям, что особенно актуально для малогабаритных деталей.

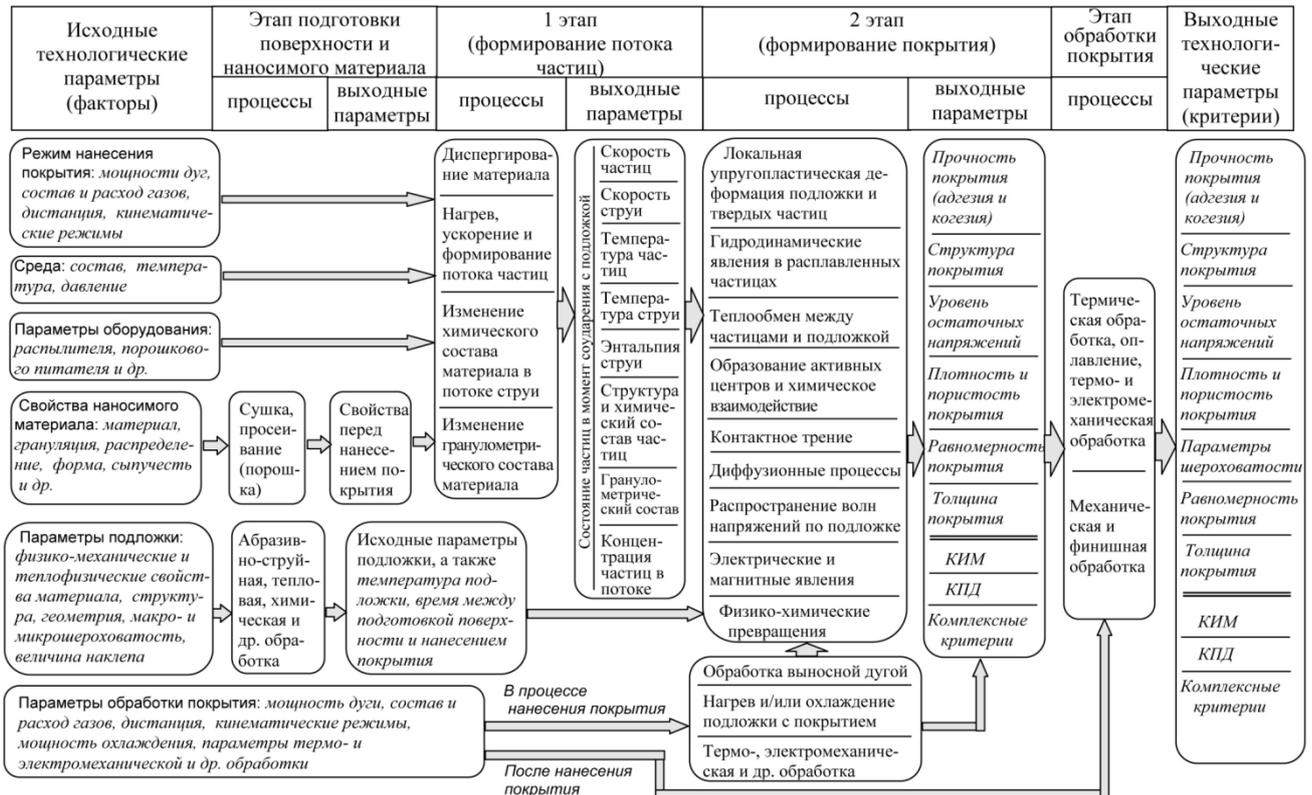
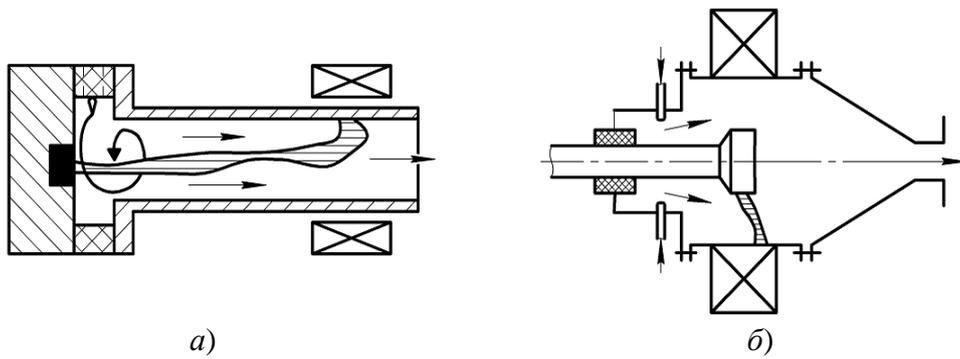


Рисунок 2 – Схема структурно-следственной связи факторов и критериев плазменного нанесения и упрочнения покрытий



а, б – продольная и поперечная подача газа соответственно

Рисунок 3 – Схемы подачи газа относительно дуги плазматрона

Линейные электродуговые генераторы плазмы обладают многообразием конструктивных схем. Выбор той или иной схемы плазматрона определяется критериями, которые к нему предъявляются, и влияющими на него факторами. К основным критериям относятся необходимая температура нагрева газа и степень чистоты потока плазмы, мощность дугового разряда, эффективность нагрева газа (тепловой КПД плазматрона) и напыляемых частиц (общий КПД процесса), ресурс работы, требования по пространственной и временной однородности плазменного потока, технологические и габаритные требования и др. [2]. К основным факторам относятся параметры конструкции плазматрона, род газа, свойства напыляемого материала, давление в разрядной камере, режимные параметры.

Для линейных плазматронов, предназначенных для плазменного напыления или же имеющих технологические возможности их переоборудования под напыление, классификацию

обычно представляют по признакам, определяющим основные характеристики организации процесса в плазмотроне, включая варианты рекуперации тепла при охлаждении плазмотрона, и характеристики ввода материала напыления. К признакам, определяющим основные характеристики организации процесса и тепловой КПД плазмотрона, относят (рис. 4, 5, табл. 1) [2]:

- длину дуги;
- способ пространственной стабилизации дугового разряда;
- условия, влияющие на интенсивность эрозии электродов в зоне действия опорных пятен дуги;
- место и конструктивные особенности ввода материала напыления.

По признаку стабилизации дуги плазмотроны можно разделить на группы:

- 1) со стабилизацией дуги стенками разрядной камеры;
- 2) с газовихревой стабилизацией дугового разряда;
- 3) со стабилизацией дуги внешним магнитным полем;
- 4) со стабилизацией дугового разряда электродами;
- 5) со стабилизацией по комбинированным схемам.

По признаку, связанному со снижением эрозии электродов, плазмотроны подразделяются на две группы:

- 1) с неподвижным опорным пятном дуги на горячем катоде;
- 2) с подвижными дуговыми пятнами, когда приэлектродные участки дуги перемещаются под действием аэродинамических или электродинамических сил (или обеих сил одновременно).

Данная классификационная схема дополняется другими определяющими признаками:

– род тока – постоянный или переменный промышленной частоты. Использование постоянного тока в плазмотронах объясняется, прежде всего, физической особенностью дуги, заключающейся в том, что на аноде дуги выделяется большее количество тепла, чем на катоде. Тепловая мощность, выделяемая в электроде плазмотрона, в отличие от плавящегося электрода сварочной дуги, является не только бесполезной, но и вредной. Наименьшую тепловую нагрузку при использовании постоянного тока несет электрод, являющийся катодом. Предельно допустимая токовая нагрузка на лантанированный вольфрамовый электрод на переменном токе примерно в два раза, а на обратной полярности при использовании постоянного тока, в десять раз ниже, чем на прямой полярности. Поэтому плазмотроны постоянного тока прямой полярности имеют наиболее высокий коэффициент использования полезной мощности [28] Столб интенсивно сжатой дуги должен быть жестко стабилизирован по оси электрода и сопла плазмотрона. При смене полярности электрода эта стабилизация нарушается, поэтому дугу переменного тока сжать труднее, чем дугу постоянного тока. Это обеспечивает важное преимущество плазмотронов постоянного тока по сравнению с плазмотронами переменного тока, заключающееся в высокой стабильности горения дуги. Прохождение тока через нуль при смене направления может вызвать погасание дуги, поэтому обычно напряжение холостого хода источника питания переменным током не менее чем вдвое превышает рабочее напряжение дуги. При питании плазмотронов постоянным током можно достичь отношения напряжения дуги к напряжению холостого хода U_d/U_{xx} , равного 0,8-0,9. Следовательно, при одинаковой мощности дуги установленная мощность и габариты источника постоянного тока меньше, чем мощность и габариты источника переменного тока. Кроме того, источник постоянного тока обеспечивает равномерную загрузку трехфазной сети. Плазмотроны переменного тока имеют существенные проблемы их использования, связанные с поджигом дуги и дальнейшим поддержанием горения, и особенно управлением процессами [29];

- род нагреваемого газа – инертный, восстановительный, окислительный;
- тип катода – горячий или холодный;
- технологическое назначение – прямого (одно опорное пятно дуги горит на обрабатываемом металле) и косвенного (генерация плазменной струи) действия.

или линейных схем. Для этих линейных схем плазмотронов просто реализуется работа в режимах косвенной и прямой дуги с возможностью работы в широком диапазоне мощностей от высоких до малых для микроплазмотронов и обеспечением высокого теплового КПД. Для линейных плазмотронов целесообразным по сравнению с переменным током является использование постоянного тока, обеспечивающего высокую стабильность горения дуги. Дальнейший выбор схемного решения плазмотрона определяется вариантом стабилизации дуги в работе, схемой подачи материала в плазменный поток или струю и др. параметров.

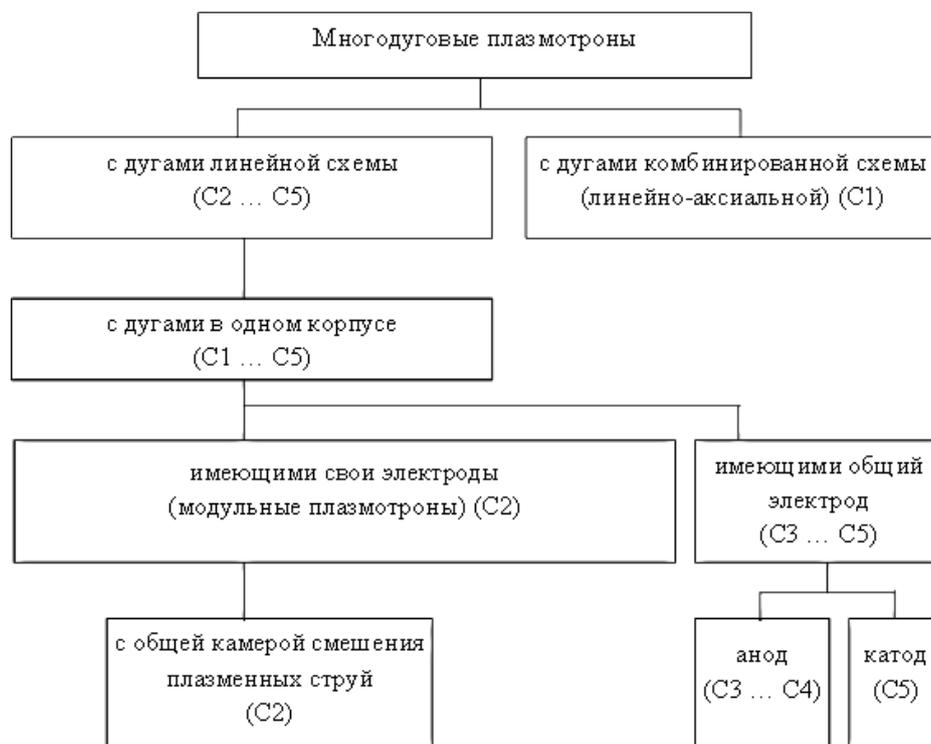


Рисунок 5 – Классификация многодуговых плазмотронов

Схемы плазмотронов с самоустанавливающейся длиной дуги (А) согласно рис. 4 представлены в табл. 1.

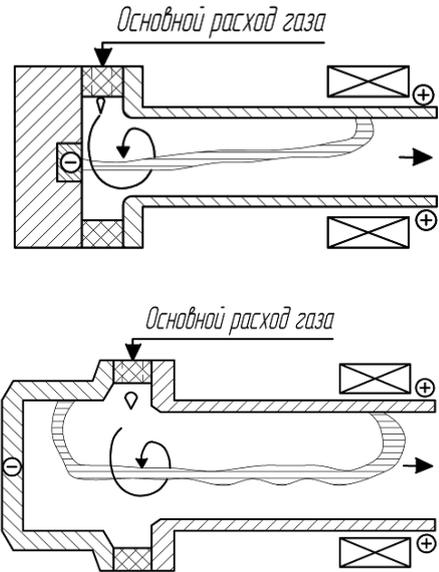
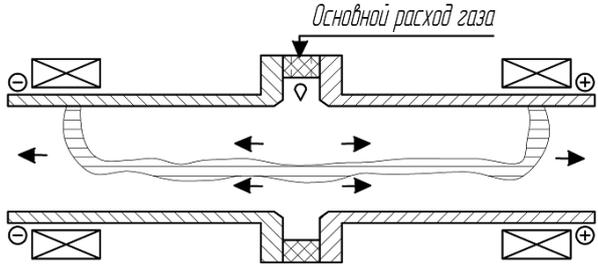
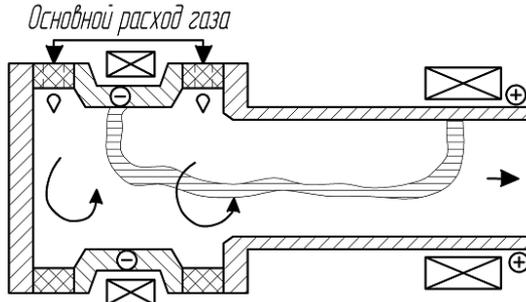
В большинстве случаев в плазмотронах данной группы для пространственной стабилизации дуги в разрядной камере используется закрученный поток газа, поэтому они называются плазмотронами с газовихревой стабилизацией дуги.

Таковыми плазмотронами оснащались серийные установки УПУ-3Д, УМП-5-68 (СССР), Metco (США, Германия, Италия), Plasmatechnik, Snesma (Швейцария), Plasmadyne, TAPA, Miller Thermal Inc. (США) и др.

Закрутка газового потока в таких плазмотронах осуществляется с помощью вихревой камеры (одной или нескольких), в которой вращательный импульс сообщается газу за счет его тангенциального ввода в разрядную камеру. Столб дуги стабилизируется по оси трубчатого электрода из-за градиента давления в вихре. С ростом тока длина дуги уменьшается. Напряжение на разряде для аргона невысокое – 30 ... 100 В. Вольтамперная характеристика (ВАХ) дуги имеет падающий вид [6]. Для получения мощности плазмотрона, достаточной для качественного напыления при использовании в качестве плазмообразующего газа аргона или азота, необходимы большие токи (300 ... 500 А) [30]. При этом ресурсы работы стержневого вольфрамового катода и выходного электрода-анода существенно уменьшаются. При использовании в качестве плазмообразующего газа воздуха и его смесей с углеводородными газами и при сопоставимой мощности дуги величина силы тока меньше (100 ... 200 А), однако в этом случае повышена скорость эрозии электродов вследствие окислительного воздействия на них

кислорода воздуха. В связи с этим в качестве материала катода используется цирконий или гафний, что позволяет повысить его ресурс [3].

Таблица 1 – Плазмотроны линейной схемы с самоустанавливающейся длиной дуги

Название плазмотрона, источник	Особенности, схема
<p>A1 Плазмотроны однокамерные (типа ЭДП-104, ЭДП-107 [30])</p>	
<p>A1.1 Плазмотроны двухстороннего истечения [3]</p>	
<p>A2 Плазмотроны двухкамерные (ПТ-74А, ПТ-84)</p>	

Однокамерные плазмотроны (схема A1, табл. 1), с несколькими камерами (схема A2, табл. 1) и плазмотроны двухстороннего истечения (схема A1.1 табл. 1) могут иметь в качестве катодов не только запрессованные в медную обойму стержни вольфрама, циркония, или гафния, но и полые медные электроды. Использование последних существенно уменьшает их ресурс, и поэтому требует интенсивного охлаждения, что приводит к низкой величине теплового КПД.

Таким образом, наибольшее распространение среди этой группы плазмотронов получила схема газовихревой стабилизации дуги. Выгодно использование газозвушных смесей с углево-

дородными газами с точки зрения энергетической эффективности с учетом дешевизны газов, простоты регулирования коэффициента избытка кислорода, высокой равномерности температурных и скоростных полей в поперечных сечениях плазменных потоков и струй, а также высокой степенью теплопередачи от газовой фазы к дисперсной [30]. Для этого требуются жаростойкие материалы катодов, такие как цирконий и гафний в виде вставок в медные втулки.

Схемы плазмотронов с фиксированной длиной дуги, меньшей самоустанавливающейся (Б) (см. рис. 4) представлены в табл. 2.

Плазмотронами группы Б (табл. 2) оснащались серийно выпускаемые комплектные установки для напыления типа УМП-7, УПУ-7 и Киев-7 (СССР). Для установок типа УМП-7, УПУ-7 в качестве плазмообразующих газов используются аргон, азот и смеси с добавлением водорода, для установок типа Киев-7 – воздух, природный газ и их смеси. В отличие от плазмотронов с самоустанавливающейся длиной дуги последние позволяют существенно (во много раз) снизить пульсации скорости и температуры плазменной струи [2]. Это наиболее простой способ поддержания необходимого напряжения на дуге.

Внезапное расширение канала создает условия преимущественного шунтирования дуги непосредственно за зоной срыва потока и обеспечивает постоянство ее средней длины в достаточно широком диапазоне изменения определяющих параметров, таких как ток дуги, расход газа и давление [30].

Качественно новой особенностью вольт-амперной характеристики по сравнению с дугой с фиксированной длиной является наличие наряду с падающей ветвью ещё и восходящей. Это обеспечивает устойчивое горение дуги в точке пересечения электрических характеристик дуги и источника питания без балластного сопротивления в цепи даже при «жесткой» характеристике источника питания. Вольт-амперная характеристика дуги, если не приняты особые меры, лежит, как правило, ниже вольт-амперной характеристики дуги, горящей в плазмотроне с самоустанавливающейся длиной дуги. Если элемент выходного электрода до уступа электрически изолировать от электрода большего диаметра, то часть восходящей ветви будет лежать над вольт-амперной характеристикой дуги с самоустанавливающейся длиной.

В подгруппе Б2.1 (табл. 2) отличием от других схем плазмотронов является то, что для зажигания дуги используется защитный пусковой электрод – диафрагма.

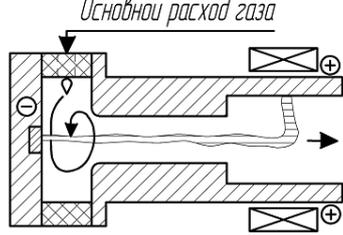
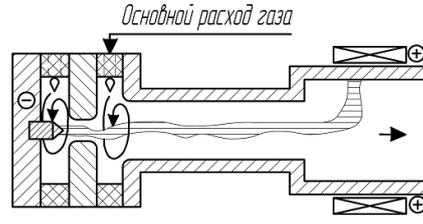
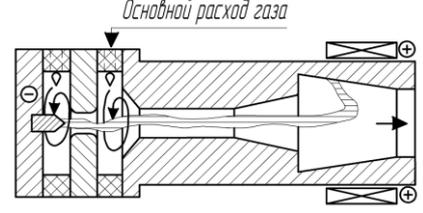
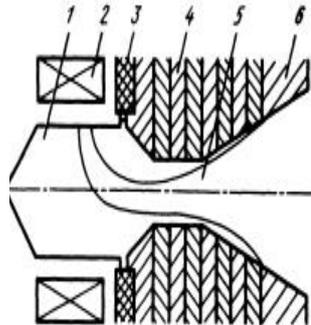
В схеме Б2.1.1 (табл. 2) возрастает эффективность воздействия на напряженность электрического поля, что позволяет формировать вольт-амперную характеристику дуги желаемой формы, что повышает эффективность нагрева конвертированного природного газа таким плазмотроном [30].

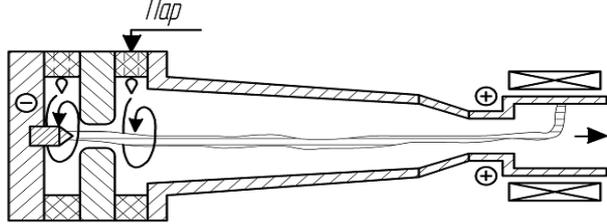
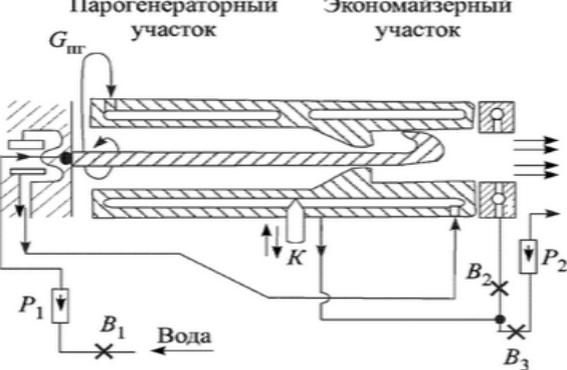
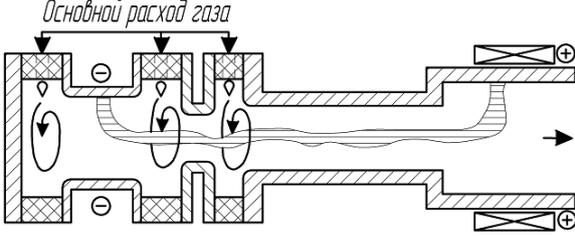
В схеме Б2.1.2 (табл. 2) используются сверхзвуковые плазмотроны [24]. Данная конструкция позволяет осуществлять диффузную привязку дуги на аноде. Проблемой является низкая температура частиц из-за малого времени пребывания в потоке. Плазмотроны подгруппы Б2.1.1 (табл. 2) имеют схемный аналог с профилированным анодным каналом – плазмотрон типа ПУН-1 (группа В2.5) (табл. 3) [25]. Плазмотрон ПУН-1 отличается от плазмотронов схемы Б2.1.1 наличием ступенчатого выходного электрода, имеющего сложную геометрию дугового канала со ступенчатым расширением и последующим сужением в его конце. Такая сложная геометрия разрядного канала способствует формированию восходящей вольт-амперной характеристики и диффузной привязки дуги на аноде (при наличии сверхзвукового течения газа) [24]. В другой конструкции [33] повышение энтальпии дуговой плазмы, снижение уровня турбулентности и аэродинамического шума достигается за счет сброса пристеночного непрогретого в дуге газа с большой окружной скоростью в атмосферу из прианодного участка канала большего диаметра. У такого плазмотрона газ не полностью используется по назначению, и это снизит общий КПД процесса напыления.

Паровихревые плазмотроны, схема которых представлена в группе Б2.2 (табл. 2) [3], предназначены для нагрева водяного пара и имеют трудности, связанные с некоторыми особенностями рабочего тела и, в первую очередь, с конденсацией его на относительно холодных

поверхностях начального участка электродугового канала. В данном случае требуются дополнительные исследования, т.к. водяная пленка будет забирать на себя тепло от лучистого теплового потока и преобразовывать эту энергию в парообразование, а это может повысить КПД. Наличие капель приводит к преждевременному шунтированию «дуга-стенка» и, следовательно, к значительным пульсациям напряжения и тока дуги, приводящим к повышенной эрозии электродов, уменьшению мощности дуги и т.д. Присутствие на начальном участке канала в виде межэлектродной вставки подождёт плазменный столб, отделит начальную часть дуги от жидкости, будет способствовать повышению температуры в потоке, что необходимо для предотвращения конденсации пара на начальном участке канала.

Таблица 2 – Плазмотроны линейной схемы с фиксированной длиной дуги, меньшей самоустанавливающейся

Обозначение плазмотрона согласно рис. 4	Схема
1	2
<p>Б1 Плазмотроны однокамерные с фиксацией длины дуги уступом (ЭДП-104А [30])</p>	
<p>Б2.1 Плазмотроны двухкамерные с защитным пусковым электродом (А. с. №170270; пат. США. №3676638)</p>	
<p>Б2.1.1 Плазмотроны двухкамерные со ступенчатым выходным электродом со сложной геометрией дугового канала [30]</p>	
<p>Б2.1.2 Сверхзвуковые плазмотроны [24]</p>	<p>Схема плазмотрона с электрической дугой в сверхзвуковом канале:</p> <p>1 – катод; 2 – соленоид; 3 – ввод рабочего газа; 4 – шайбы; 5 – дуга; 6 – анод-сопло</p> 

1	2
<p>Б2.2 Плазмотроны с паровихревой стабилизацией дуги (ЭДП-145 [30])</p>	
<p>Б2.2.1 Пароводяные автоплазмотроны [31; 32]</p>	
<p>Б3 Плазмотроны трехкамерные с фиксацией длины дуги уступом [3]</p>	

Здесь необходимы исследования о влиянии данной конструкции на снижение теплового КПД плазмотрона. Предположительно устранение этого недостатка достигается путем снижения теплосъёма охлаждающей жидкостью и увеличением теплового сопротивления стенки канала на некотором расстоянии от входа.

Для обеспечения стабильной работы паровихревых плазмотронов необходимо выполнение следующих требований [3]:

1. Пар должен быть сухим и перегретым до 250 ... 350 °С.
2. Пульсации расхода пара на входе в электродуговую камеру не должны превышать 5 %. Для этого подготовка водяного пара осуществляется в прямоточном парогенераторе, на выходе которого располагается демпфер.
3. Температура стенок вихревой и электродуговой камер должна быть выше температуры насыщения пара. Несоблюдение всех трех требований приводит к конденсации пара на поверхности разрядной камеры и нарушению режима горения дуги.
4. Перед работой на водяном паре плазмотрон должен быть прогрет до температур выше температуры насыщения пара. Прогрев конструкции осуществляется путем кратковременной работы плазмотрона на предварительно подогретых и неконденсирующихся при нормальных условиях газах.

Паровихревые плазмотроны предназначены, прежде всего, для подогрева большого количества газа и различных материалов. Из-за наличия внешнего источника пара общий КПД процесса ниже, чем у аналогичных плазмотронов, использующих плазмообразующие газы, из-за затрат большого количества энергии для перегрева пара и его транспортировки. Наряду с подачей сухого и перегретого пара в плазмотрон, существуют так называемые автоплазмотроны,

не требующие внешнего источника пара, и которые работают со встроенным в стенку парогенератором, вырабатывают плазмообразующий водяной пар за счет тепловых потерь [31].

К паровым плазмотронам также относятся жидкостные плазмотроны, производящие пар с помощью разогрева и испарения жидкости в электродуговой камере плазмотрона. В основном, они применяются для пайки, резки и сварки деталей из различных материалов. Примерами могут служить плазмотроны мобильных установок типа «Плазар», «Мультиплаз». Достоинством данных плазмотронов является возможность получать нужный состав плазмы путем ввода разнообразных растворов в плазмообразующую среду и создавать тем самым ещё и тонкие защитные пленки. Однако для напыления данные плазмотроны конструктивно не доработаны, и имеют недостаток, обусловленный высокой окисляющей активностью водяной плазмы по отношению к напыляемому материалу.

Пароводяные автоплазмотроны схемы Б2.2.1 (табл. 2) с внешним генератором пара представляют собой плазмотроны второго поколения [31-32]. Устранение внешнего парогенератора сильно упрощает эксплуатацию паровихревых плазмотронов. Полноту регенерации тепла характеризует коэффициент регенерации, представляющий собой отношение количества регенерируемой тепловой энергии ко всей энергии, излучаемой дугой в стенки камеры. Тепловой КПД автоплазмотрона с полной регенерацией тепла близок к единице. В таких автоплазмотронах система охлаждения полностью совмещена с системой парогенерации. Надежность охлаждения наиболее теплонапряженных электродных узлов требует принятия специальных приемов, например использования капиллярных структур. При работе плазмотрона в высокоэнтальпийных режимах одного регенеративного охлаждения может оказаться недостаточно; тогда необходимо дополнительно использовать и внешнее охлаждение.

Энтальпия водяной плазмы, генерируемая автоплазмотроном, зависит от теплового КПД (η), полноты регенерации и эффективности теплового охлаждения стенок электродуговой камеры. В любом случае тепловой КПД автоплазмотрона, работающего с регенерацией, всегда больше КПД плазмотрона без регенерации, но с идентичной проточной частью. Работа автоплазмотрона с заданным коэффициентом регенерации обеспечивается регулировкой системы подачи парогенераторной воды. Это очень важная проблема развития водяных автоплазмотронов.

Таким образом, плазмотроны схем с фиксированной длиной дуги, меньшей самоустанавливающейся, обеспечивают простой способ поддержания необходимого напряжения на дуге в достаточно широком диапазоне изменения определяющих параметров, таких как ток дуги, расход газа и давление. При этом в сравнении с плазмотронами схемы с самоустанавливающейся длиной дуги позволяют существенно (во много раз) снизить пульсации скорости и температуры плазменной струи. Схема позволяет реализовать сверхзвуковые плазмотроны. Паровихревые плазмотроны позволяют повысить КПД за счет использования воды в качестве охладителя стенок канала дуги с рекуперацией энергии на образование пара. Водяной пар позволяет получить высокую температуру плазмы до 50 тыс. градусов, что дает широкие технологические возможности использования такого плазмотрона. Однако у них есть и свои ранее отмеченные недостатки.

Схемы плазмотронов с фиксированной средней длиной дуги, большей самоустанавливающейся (В) (см. рис. 4) представлены в табл. 3

У плазмотронов подгруппы В1.1 межэлектродная вставка (МЭВ) набирается из секций (чаще всего медных), электрически изолированных друг от друга и от электродов. В силу этого все секции находятся под некоторым потенциалом относительно нейтрали, причем каждая секция имеет свой потенциал. Вдув газа в межсекционный зазор обеспечивает вентиляцию зазора и снижение тем самым тепловых потерь, защищает стенки камеры от конвективного теплового потока, увеличивает электроизоляционную прочность газового промежутка, устраняет при определенных условиях межсекционный пробой [2].

Распределение расхода газа по межсекционным зазорам может осуществляться разными способами – постановкой шайб с критическими сечениями или индивидуальным вдувом

через каждую щель или группу щелей. Конкретное решение определяется многими факторами, в том числе, и давлением в электродуговой камере.

Плазмотроны с МЭВ допускают управление напряжением дуги и турбулизацией потока газа на начальном участке канала. Вольт-амперная характеристика дуги может иметь как падающий, так и возрастающий участок [24].

У плазмотронов подгруппы В1.2 (табл. 3) МЭВ конструктивно выполнены в виде набора изолированных между собой коротких металлических охлаждаемых секций без вдува газа между ними. Система МЭВ эффективно работает в диапазоне токов дуги, при которых суммарная длина вставок больше длины самоустанавливающейся дуги. При этом, благодаря увеличению средней длины дуги падение напряжения на ней больше, чем в плазмотронах с самоустанавливающейся дугой при одинаковых расходе газа, силе тока разряда, давлении в камере и диаметре каналов. Это означает, что в дугу можно вложить большую мощность и получить более высокую температуру газа. Каждая секция МЭВ при горении дуги принимает потенциал, равный среднему потенциалу дуги в пределах длины секции. Недостатками могут служить повышенные тепловые потери в секциях при их большом количестве.

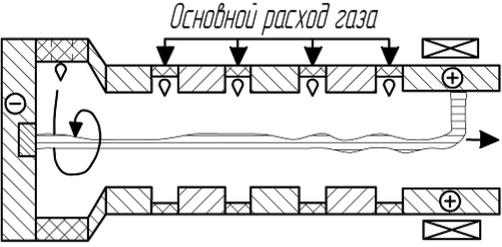
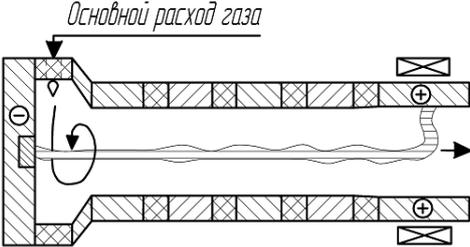
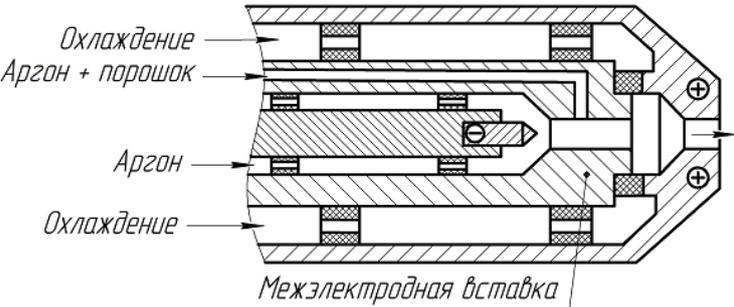
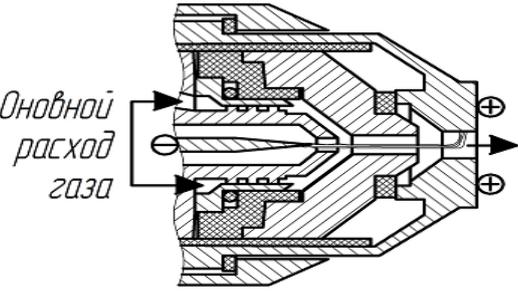
Плазмотроны подгруппы В1.3 (табл. 3) характеризуются наличием межэлектродной вставки с единичной секцией и острым вдувом плазмообразующего газа без его закрутки в камеру плазмотрона [34]. Данные плазмотроны применяются для напыления на тонкостенные детали тугоплавких пористых покрытий с использованием инертных газов, например, аргона. Преимущества – используют для особо тонких подложек и для получения покрытий с особыми свойствами. Недостатки – забивание сопла в зоне подачи порошка в канал плазмотрона, низкий тепловой КПД, низкий ресурс электродов из-за перегрева.

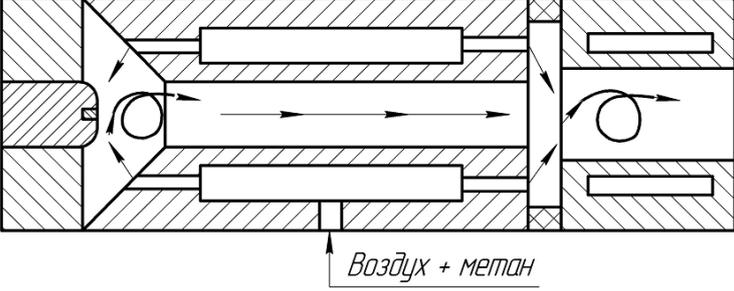
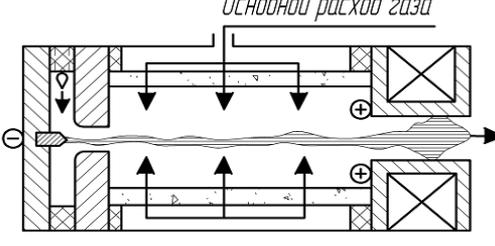
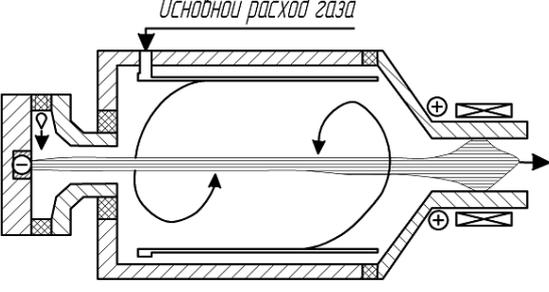
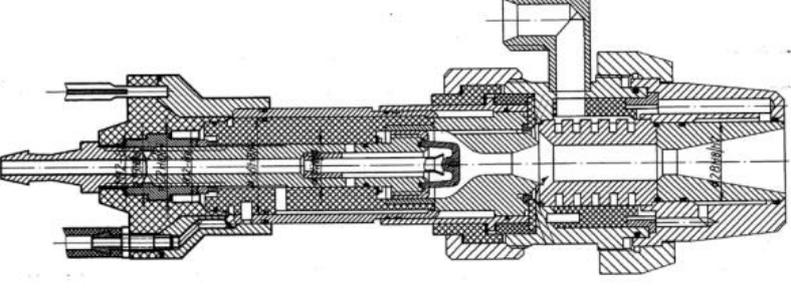
В группу В2 (табл. 3) входят плазмотроны с секционированной МЭВ (примеры - патент РФ №2225084, а.с.№503601). Характерной особенностью данных плазмотронов является, во-первых, наличие в их МЭВ двух электроизолированных от электродов секций, во-вторых, наличие узла подачи потока транспортирующего газа с порошком, предназначенным для напыления, через конусообразный канал, образованный между секциями межэлектродной вставки, в направлении к анодному узлу. Частицы порошка независимо от их размеров и массы попадают в центральную (приосевую) зону дугового разряда и захватываются плазменным потоком под действием вязкостных сил. В случае, если обрабатываемая деталь является анодом, то конечная секция МЭВ играет роль направляющего сопла и при этом возможен комбинированный процесс наплавки-напыления покрытий, что ещё раз подтверждает целесообразность выбора плазмотронов линейной схемы.

В схеме В2.1 (табл. 3) рекуперация тепла МЭВ позволяет поднять КПД плазмотрона до 90 %, такой плазмотрон наиболее эффективен при работе с выносной дугой на сверхзвуковом режиме [30].

Плазмотроны подгруппы В2.2 и В2.3 (табл. 3) исследовались в 1980-х годах и были отработаны под конкретные рабочие газы и заданный диапазон мощностей [2]. Основным достоинством данных плазмотронов является возможность полной рекуперации тепловой энергии. Недостатки данных плазмотронов, обусловленные использованием пористых материалов, заключаются в трудности их изготовления, в проблеме повторяемости результатов из-за сплавания и забивания пор, в необходимости использования высокого давления и расхода подачи плазмообразующих газов, в неравномерности расхода газа через вставку по ее длине. Все эти недостатки не позволяют сделать выбор в пользу транспирационной конструкции. Плазмотроны В2.2 с полной рекуперацией тепла имеют те же преимущества что и В2.3, но их использование приводит к технологическим и экономическим сложностям.

Таблица 3 – Плазмотроны линейной схемы с фиксированной длиной дуги, большей самоустанавливающейся

Обозначение плазмотрона согласно рис. 4	Схема
<p>1</p> <p>V1.1</p> <p>Однокамерные плазмотроны с фиксацией длины дуги МЭВ с межсекционным вдувом газа (ЭДП-119 [30])</p>	<p>2</p> 
<p>V1.2</p> <p>Плазмотроны с фиксацией длины дуги МЭВ без межсекционного вдува газа (тип - ПН-6)</p>	
<p>V1.3</p> <p>Однокамерные микроплазмотроны с фиксацией длины дуги одной секцией МЭВ [34]</p>	
<p>V2</p> <p>Двухкамерные плазмотроны с фиксацией длины дуги МЭВ, защитным пусковым электродом (и дополнительной камерой) (Патент RU 2225084)</p>	

1	2
<p>V2.1 Плазмотроны с рекуперативным охлаждением МЭВ [30]</p>	 <p style="text-align: center;"><i>Воздух + метан</i></p>
<p>V2.2 Плазмотроны с регенеративным охлаждением электродов [35]</p>	 <p style="text-align: center;"><i>Основной расход газа</i></p>
<p>V2.3 Плазмотроны с фиксацией длины дуги МЭВ из пористого материала и вдувом газа через него (тип – ППЭД-0,3)</p>	 <p style="text-align: center;"><i>Основной расход газа</i></p>
<p>V2.4 Плазмотроны с фиксацией длины дуги газодинамической МЭВ (тип - ЭДП-118Е [30])</p>	 <p style="text-align: center;"><i>Основной расход газа</i></p>
<p>V2.5 Плазмотрон с профилированным каналом ПУН-1 [30]</p>	

Плазмотроны подгруппы В2.4 (табл. 3) также имеют электродные узлы, аналогичные узлам плазмотронов групп, представленных выше. Отличительной особенностью данных плазмотронов является наличие в них вихревой камеры, в которой при определенных соотношениях газодинамических параметров подаваемых в плазмотрон газов, формируется газовихревой поток, в приосевой зоне которого образуется устойчивая цилиндрическая поверхность с нулевой радиальной скоростью ($v = 0$). Это означает отсутствие массообмена между приосевым течением газа и основным потоком, поэтому потери тепла в этой зоне определяются в основном излучением [3]. Диаметр такой поверхности может быть взят в качестве характерного диаметра электродуговой камеры, которая имеет достаточно большие габариты и не может быть использована в миниатюрных плазмотронах.

В схеме В2.5 (табл. 3) отличием плазмотрона ПУН-1 от плазмотронов схемы В2.1.1 (табл. 2) является наличие ступенчатого выходного электрода, имеющего сложную геометрию дугового канала со ступенчатым расширением и последующим сужением в его конце. Такая сложная геометрия разрядного канала способствует формированию восходящей вольт-амперной характеристики и диффузной привязки дуги на аноде (при наличии сверхзвукового течения газа) [24], что способствует повышению теплового КПД, однако низкое тепловложение в порошок (подача его под срез сопла) и потери тепла в стенки нивелируют данное повышение КПД.

Схемы многодуговых плазмотронов «С» (см. рис. 5) представлены в табл. 4.

В группе С1 (табл. 4) показана комбинированная схема многодугового плазмотрона с МЭВ, представляющая сочетание аксиальной и линейной схем плазмотрона в одном корпусе (А.с. №571174). Недостатком данной схемы является большой диаметральный размер плазмотрона в сравнении с плазмотронами линейной схемы, а преимуществом с точки зрения снижения интенсивности эрозии электродов является разделение суммарного тока на части, количество которых равно общему количеству катодов. Влияние на КПД то же самое, что и у плазмотронов с МЭВ без вдува.

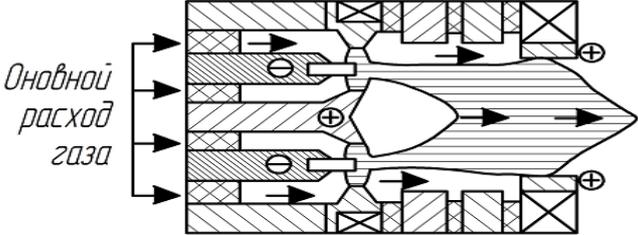
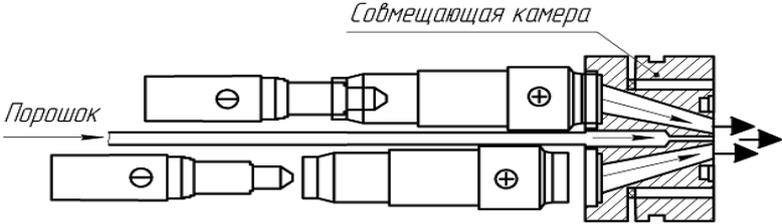
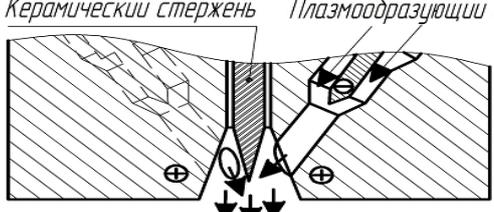
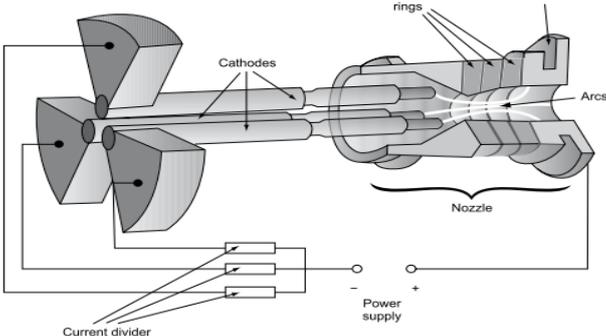
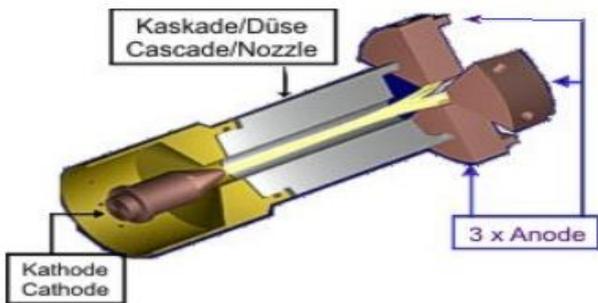
В подгруппе С2 (табл. 4) представлена схема плазмотрона с несколькими источниками плазмы, сводимой к общему центру от каждого источника. Примером такой схемы является система «Axial III™» фирмы Mettech [36]. Данные плазмотроны характеризуются более высоким уровнем скоростей плазменной струи по сравнению с плазмотронами схем А (табл. 1) и Б (табл. 2), а также более высоким качеством покрытий и возможностью увеличения диапазона регулирования суммарной электрической мощности дуг за счет использования одной, двух или трёх независимо горящих дуг. Особенностью данного плазмотрона является то, что он имеет конечное сопло – конвергентор, которое вмещает в себя три довольно протяженных отдельных сходящихся канала, а анодная привязка дуг осуществляется уступами, расположенными до этого сопла-смесителя. Плазменные струи в данной конструкции контактируют с напыляемым материалом за срезом сопла плазмотрона, что может ограничивать его использование для тугоплавких материалов.

В подгруппе С3 (табл. 4) показана схема разработанного в 1967 году стержневого трёхдугового распылителя (А. с. №288490), работающего на аргоне от установки УПУ-3Д и предназначенного для расплавления керамического стержня, и напыления полученного материала тремя сходящимися плазменными струями. Достоинствами данного плазмотрона являются высокая производительность напыления, оптимальная схема ввода сырья в высокотемпературную зону и простота регулирования мощности плазмотрона и производительности напыления. Недостатками данного плазмотрона являются высокие потери теплового КПД, обусловленные сбрасыванием плазменных факелов в индивидуальные сопла – аноды.

В подгруппе С4 (табл. 4) показана система «Триплекс» [37-38]. Данная схема схожа со схемами С2, С3 и С1 (табл. 4). Отличительной особенностью «триплексного» плазмотрона является принцип расположения нескольких катодных узлов в одном корпусе и горение дуг с этих катодов на один общий анод. Также, вместо газоразрядной камеры используется участок

большого диаметра с ребристой поверхностью по типу схемы С1 табл. 4, на котором осуществляется разрушение вихревого течения газа и, как следствие, происходит изменение характера теплообмена, что способствует повышению теплового КПД.

Таблица 4 – Многодуговые плазмотроны

Обозначение плазмотрона согласно рис. 5	Схема
<p>1</p> <p>C1 Комбинированная схема основной линейной схемы и аксиальной вспомогательной (Патент №571174)</p>	<p>2</p> 
<p>C2 Плазмотрон с несколькими источниками плазмы, сводимыми к общему центру, (система «Axial III» фирмы Mettech [36])</p>	
<p>C3 Трехдуговой плазменный распылитель с общим анодом (А. С. №288490)</p>	
<p>C4 Система TripleksPRO-210 (Sulzer Metco) [37]</p>	
<p>C5 GTV DELTA torch [38]</p>	

Положительным конструктивным фактором триплексного плазмотрона является распределение токовой нагрузки на три катода и более интенсивный теплообмен дуг с плазмообразующим газом (но при этом для снижения теплотерь необходимо уменьшать теплоотдачу от газа к стенкам). Негативным фактором является наличие фиксированной привязки анодного пятна к аноду, приводящей к его интенсивной эрозии и быстрому выходу из строя. Для предотвращения этого можно использовать магнитное вращение дуги или закрутку газа на начальном участке дуги. Для повышения электрического КПД триплексного плазмотрона, использующего магнитное вращение дуги, целесообразно ток дуги пропускать через соленоид. Однако на режимах малой мощности будет невысокая магнитная индукция, поэтому для данного случая можно рекомендовать использование регулируемого внешнего высоковольтного источника. Для снижения же окисления анода целесообразно использовать вставки или втулки из жаростойкого никеля или молибдена. Данные меры позволят «сканировать» поверхность анода с минимальными и необходимыми энергетическими затратами. Нельзя также исключить потери электрического КПД от применения внешних высоковольтных источников для обжатия дуги.

В схеме С5 плазмотрон DELTA «Дельта» [39] имеет одну стабилизированную дугу, которая работает между одним контактом охлаждаемого катода и распадается на три отдельных дуги на соответствующих сегментах анода. Колебания напряжения составляют всего $\pm 3\text{В}$. Негативным фактором является наличие фиксированной привязки анодных пятен к сегментированному аноду, приводящей к его интенсивной эрозии и быстрому выходу из строя.

Конструктивные варианты подачи напыляемого материала представлены в табл. 5.

Эффективность плазменного напыления в значительной мере определяется местом и способом ввода порошка в центральную приосевую зону плазменной дуги (струи) для получения равномерно распределенного потока частиц и эффективного использования энергии дуги. В настоящее время известны три способа ввода порошкового материала в плазмотрон для его обработки: точечный ввод (схемы 1-4, табл.5), аксиальный ввод (через катод, схемы 5-8, табл. 5), кольцевой ввод (схемы 9-10, табл. 5).

Точечный ввод порошкового материала осуществляется перпендикулярно или под углом к плазменному потоку либо на срезе сопла плазмотрона (схемы 1-2, табл.5) для легкоплавких материалов (пример – изобретение RU 2113775), либо в канале сопла в месте между его срезом и анодным пятном привязки дуги (схема 4, табл.5) для среднеплавких материалов (пример – изобретение RU 140498), либо в канале сопла до анодной привязки дуги (схема 3, табл.5) для тугоплавких материалов (пример - изобретение RU 159626).

Аксиальный ввод через катод (схемы 7-8, табл. 5) используется для подачи тугоплавких порошковых материалов в дугу (пример – изобретение RU 2328096). Для плазмотронов с несколькими источниками плазмы оптимальна схема осевой подачи порошка в трубке, соосной соплу (схема 5, табл. 5).

Кольцевой ввод порошковых материалов (схема 9, табл. 5) эффективен для подачи средне- и легкоплавких материалов в канале сопла на небольшом расстоянии от его среза после места привязки дуги на аноде (пример – изобретение RU 2474983) и может быть использован для подачи тугоплавких материалов в месте канала сопла до анодной привязки дуги, в том числе, с помощью вихревой подачи порошка совместно с плазмообразующим газом в межэлектродный промежуток. Также кольцевой ввод эффективен для подачи порошковых материалов в межэлектродные вставки (схема 10, табл. 5).

Таблица 5 – Схемы расположения ввода порошка в плазменную струю

Название способа	Схема	Название способа	Схема
1	2	3	4
Под срез сопла плазмотрона перпендикулярно или под углом к потоку			
1 Один ввод		2 Несколько вводов с кольцевой или трубчатым насадком	
В доанодную и заанодную зону привязки дуги			
3 В доанодную зону		4 В заанодную зону	
Аксиальная подача			
5 Случай с тремя источниками плазмы		6 Случай с одним источником плазмы	
7 Через полый катод		8 Через прикатодную кольцевую область	
Кольцевая подача			
9 В зону катодной струи (инжекция)		10 В межэлектродную вставку	
Многовводные схемы подачи порошка (схема 11)			
			<p>1, 2 и 3 – туго-, средне- и легкоплавкие порошки соответственно</p>

Наиболее простым и универсальным способом ввода туго-, средне- и легкоплавких порошков является точечный ввод в до-, послеанодную зону канала плазмотрона и на срезе его сопла. Для получения многокомпонентных покрытий из 7 ... 9 и более компонентов необходимо нанесение плазменным напылением одновременно легкоплавких материалов с температурой плавления $T_{пл}$ до 600 °С, среднеплавких – с $T_{пл}$ 600 ... 1600 °С и тугоплавких – с $T_{пл}$ более 1600°С. При этом тугоплавкие керамические материалы имеют и невысокую теплопроводность. Для тугоплавких материалов увеличение продольной координаты x места ввода порошка в плазмотрон приводит к существенному снижению коэффициента использования порошка (КИП) и эффективного КПД его нагрева (рис. 6).

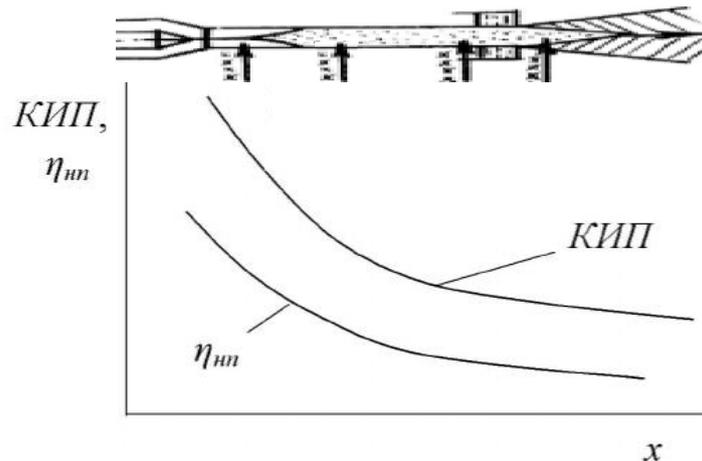


Рисунок 6 – Влияние места ввода тугоплавкого порошка (продольной координаты x) на коэффициент использования порошка (КИП) и эффективный КПД нагрева порошка $\eta_{нп}$

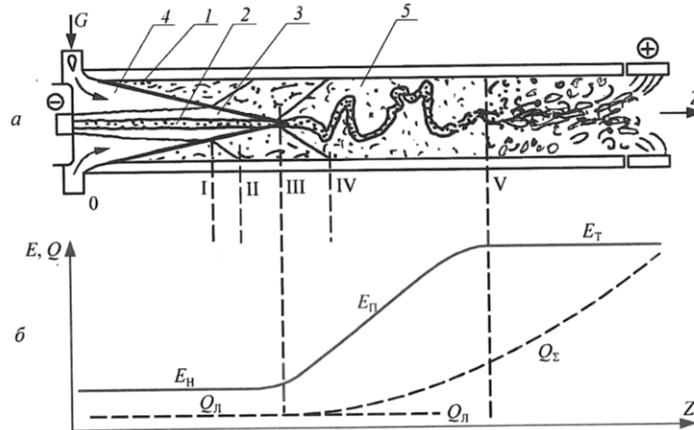
Для решения проблемы одновременного напыления многокомпонентных материалов с разными теплофизическими свойствами целесообразно использовать многовводные схемы порошка (схема 11, табл. 5) [40].

2.1.2 Анализ теплофизической эффективности плазмотронов линейной схемы для плазменного напыления

Энергетическая эффективность электродуговых плазмотронов определяется геометрией разрядной камеры плазмотрона и сложными физическими процессами электромагнитной, тепловой и газодинамической природы в приэлектродных областях дугового разряда, на поверхностях электродов, столбе разряда и канале с соплом [2, 4, 5]. Взаимодействие дуги с потоком газа и стенками разрядной камеры определяет структуру течения газа и электрической дуги вдоль канала, распределение напряженности электрического поля, тепловых потерь и других параметров плазмотрона. Тепловой поток в стенку канала на начальном участке практически постоянен и определяется в основном излучением дуги (рис.7) [2]. Затем он начинает возрастать, так как к потоку излучения добавляется тепловой поток, определяемый конвективным теплообменом и теплопроводностью [2, 41].

Тепловой КПД плазмотрона, определяющий эффективность нагрева газа, определяется отношением тепла, уносимого газом из плазмотрона в единицу времени, к мощности дуги. Величина η зависит от тепловых потерь в стенки разрядной камеры: $\eta = 1 - Q_{п} / (UI)$. Здесь $Q_{п}$ – суммарные тепловые потери в элементы плазмотрона; U, I – напряжение и сила тока соответственно. В качестве меры тепловой эффективности плазмотрона часто используется коэффициент тепловых потерь $\tilde{\eta}$ – отношение тепловых потерь в плазмотроне к теплосодержанию плазменной струи: $\tilde{\eta} = (1 - \eta) / \eta$. Основной экспериментальный метод определения тепловых

потерь в плазмотроне – калориметрический, для которого не важно, какую физическую природу имеют тепловые потери: конвективную, кондуктивную или излучательную.



1 – пограничный слой; 2 – дуга; 3 – тепловой слой дуги; 4 – невозмущенное течение; 5 – переходный участок течения; I – сечение встречи турбулентного пограничного слоя 1 с тепловым слоем 3 дуги 2; II – сечение разрушения теплового слоя дуги; III – сечение начала взаимодействия дуги с турбулентным потоком газа; IV, V – сечения начала и завершения формирования развитого турбулентного течения; $Q_{л}$, $Q_{с}$ – лучистый и суммарный тепловой поток в стенку камеры соответственно; $E_{л}$, $E_{п}$, $E_{т}$ – напряженность электрического поля дуги в начальном, переходном и турбулентном участках канала плазмотрона соответственно

Рисунок 7 – Структура течения газа с электрической дугой (а) и распределение параметров вдоль цилиндрического канала плазмотрона (б) [2]

Для плазмотронов линейной схемы с самоустанавливающейся длиной дуги и с длиной, меньшей самоустанавливающейся, излучательная и кондуктивная составляющие потерь энергии незначительны и тепловой КПД в значительной степени определяется конвективными тепловыми потерями [2]. В связи с этим эффективной мерой снижения тепловых потерь в плазмотроне с самоустанавливающейся дугой и дугой с уступом является оптимизация длины канала выходного электрода, связанная с расчетом протяженности начального участка и зоны шунтирования (участок 0-V, рис 7) [2].

Многочисленные исследования таких плазмотронов показали, что в общем виде их тепловая характеристика может быть записана зависимостью основных критериальных комплексов, в которой длина канала выходного электрода l входит в безразмерный комплекс [2, 4]:

$$\tilde{\eta} = \frac{1-\eta}{\eta} = A \left(\frac{I^2}{Gd}\right)^{\alpha} \left(\frac{G}{d}\right)^{\beta} (pd)^{\gamma} \left(\frac{l}{d}\right)^{\delta}, \quad (1)$$

где A , α , β , γ , δ – эмпирические безразмерные коэффициенты геометрически подобных плазмотронов каждой схемы; I – сила тока дуги, А; G – расход плазмообразующего газа, кг/с; d – диаметр канала плазмотрона, м; p – давление в камере горения дуги, Па; l – длина канала плазмотрона, м.

Для однокамерных, двухкамерных воздушных плазмотронов постоянного и переменного тока с выходными электродами цилиндрической формы без уступа и с уступом зависимость (1) имеет вид (с точностью $\pm 10\%$) [2-4]:

$$\tilde{\eta} = \frac{1-\eta}{\eta} = (5,82 \cdot 10^{-5} \dots 1,08 \cdot 10^{-4}) \psi, \quad (2)$$

где

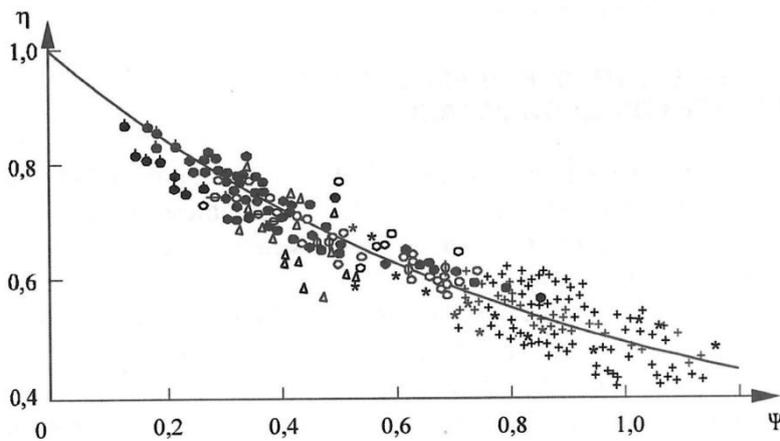
$$\psi = \left(\frac{I^2}{Gd}\right)^{0,27} \left(\frac{G}{d}\right)^{-0,27} (pd)^{0,3} \left(\frac{l}{d}\right)^{0,5}.$$

Зависимость получена при значениях комплексов в интервалах:

$$\frac{I^2}{Gd} = 5(10^6 \dots 10^9) \text{ A}^2 \cdot \text{c}/(\text{кг} \cdot \text{м}); \quad \frac{G}{d} = 0,5 \dots 56 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м});$$

$$pd = 1 \cdot 10^3 \dots 8 \cdot 10^5 \text{ Н}/\text{м}; \quad \frac{l}{d} = 5 \dots 40.$$

График зависимости (2) имеет вид, представленный на рис. 8.



сплошная линия – расчет по формуле (2) при $A = 1,08 \cdot 10^{-4}$;
 экспериментальные точки – данные различных работ, полученные в интервалах параметров:
 $I = 50 \dots 3600 \text{ A}$; $G = 1 \cdot 10^{-3} \dots 2,2 \text{ кг}/\text{с}$; $d = 1 \cdot 10^{-3} \dots 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Рисунок 8 – Тепловая характеристика двухкамерного воздушного плазмотрона переменного и постоянного тока [2]

Принципиальным отличием данных плазмотронов от плазмотронов с фиксированной длиной дуги, большей самоустанавливающейся (плазмотронов с МЭВ), состоит в механизме управления мощностью дуги. При заданных значениях расхода газа, давления и других определяющих параметров повышение энтальпии нагреваемого газа в первых типах плазмотронов возможно только за счет увеличения тока дуги. Но при этом возрастает и скорость разрушения (эрозия) электродов. Схема же плазмотрона с МЭВ позволяет регулировать мощность разряда не только увеличением тока дуги, но и с помощью напряженности электрического поля дуги за счет увеличения длин МЭВ [5]. Однако если не принять специальных мер, то суммарные тепловые потоки в стенки разрядной камеры могут быть значительно большими (а тепловой КПД меньшим), чем в плазмотронах первого и второго типа, так как на участке турбулентного течения быстро достигается предельное значение тепловых потерь (локальный тепловой КПД равен нулю).

Средством снижения теплопотерь здесь является заградительное охлаждение методом вдува части рабочего газа в межсекционные зазоры или через пористую вставку в пристеночный пограничный слой цилиндрической поверхности МЭВ и выходного электрода [2, 13 25, 42-44, 45]. Вниз по потоку охлаждающее действие завесы постепенно снижается в результате

турбулентного перемешивания холодного и горячего газов. Поэтому в длинных каналах необходимо применять многощелевую завесу. Данный способ снижения тепловых потерь в стенки МЭВ наиболее эффективен на переходном и турбулентном участках канала.

Эффективность заградительного охлаждения стенок МЭВ определяется коэффициентом

$$\theta' = \frac{\theta_i - \theta_{is}}{\theta_i - \theta_l}, \quad (3)$$

где θ_i , θ_{is} – тепловые потоки в i -тую шайбу мерной секции при отсутствии и наличии вдува газа соответственно; θ_l – лучистый тепловой поток, определяемый на начальном участке канала.

На длине 2...3 калибра от места вдува потери в стенку снижаются почти вдвое. Экспериментальные результаты, полученные при исследовании газовой завесы секции в плазмотроне с МЭВ при температуре газового потока 3300 К представляются в виде зависимости θ' от безразмерного параметра вдува K в интервале $K = 0,2 \dots 1,5$ при ширине щели $S = 1,3 \dots 4,2$ мм зависимостью (рис. 9) [2]:

$$\theta' = (1 + 0,24K)^{-0,8} (1 + K^2)^{-0,14}, \quad (4)$$

$$\theta' = (1 + 0,24K)^{-0,8}, \quad (5)$$

где $K = (z' - z'_0)Re_s^{-0,25}/(m_s S)$; $m_s = (\rho v)_s/(\rho v)_0$; $Re_s = (\rho v)_s S/\mu_0$; ρ, v – плотность и скорость газа соответственно, μ_0 – динамическая вязкость газа при среднемассовой температуре; z'_0 – координата конца участка с абсолютной завесой.

Видно, что в цилиндрической разрядной камере при наличии закрутки потока эффективность тепловой завесы хуже, особенно при больших K . Обусловлено это цилиндричностью канала и большим углом вдува ($\gamma = 75$ и 90°).

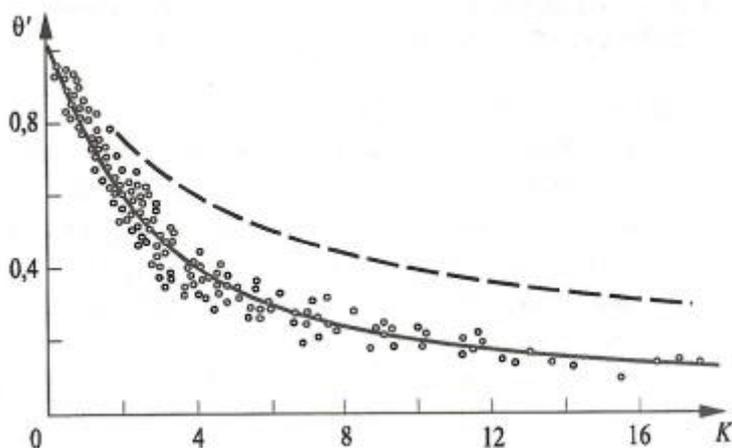
Для плазмотронов с длинным цилиндрическим каналом с секционированной МЭВ получить единую аналитическую зависимость КПД от определяющих параметров не представляется возможным. Это связано с тем, что при отыскании зависимости $\eta = f(I^2/G_d, \dots)$ к уже использованным критериям необходимо добавить критерии, учитывающие заградительное охлаждение, возможность управления длиной участка развитого турбулентного течения при постоянной длине МЭВ и т.д. Поэтому КПД плазмотрона с МЭВ необходимо рассчитывать поэлементно.

При вдуве заградительного газа пористую вставку охлаждение стенок разрядной камеры является разновидностью регенеративного охлаждения. В этом случае значительная часть теплового потока, в том числе и лучистого, возвращается в основной турбулентный поток. Эффективность метода создания заградительного потока существенно зависит от параметра вдува газав межсекционные зазоры или через пористую стенку, от физических свойств охлаждающей среды и основного потока. В случае, если вдув газа через пористую стенку выше критического, наблюдается режим полного оттеснения пограничного слоя, обеспечивающий абсолютную завесу стенки ($\theta' = 1$).

В плазмотроне с газовихревой МЭВ тепловые потери на участке межэлектродной вставки определяются незначительным лучистым теплообменом. Например, при токе 600 А они не превышают 2 % от полного теплового потока.

Из применяемых в практике к наиболее эффективным плазмотронам по критериям эффективности, на наш взгляд, в большей степени относится плазмотрон ПНК-50, разработанный в институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН совместно с Сибирским государственным университетом водного транспорта [8-13]. Его достоинствами являются возможности выбора схемы: с межэлектродными вставками со сверхзвуковым соплом, с кольцевой подачей порошка в рабочий канал плазмотрона, с модулями для нанесения тугоплавкой керамики, для напыления дисперсных материалов в суспензиях и

эмульсиях. Данных по энергетической эффективности (КПД, КИМ) данного плазмотрона в печати обнаружить не удалось.



точки и сплошная кривая – экспериментальные данные и расчетная зависимость по формуле (4) при угле вдува $\gamma = 75$ и 90° ; штриховая кривая – расчетная зависимость при вдуве вдоль поверхности стенки (угол вдува $\gamma = 0^\circ$) по формуле (5)

Рисунок 9 – Эффективность заградительного охлаждения [2]

Краткий анализ ресурсов повышения эффективности плазмотронов, включая схему многовводного одновременного введения в них разных по теплофизическим свойствам порошков представлен в работах [46-48]. Для многомодульной схемы плазмотрона может быть представлено перспективное решение с модулями-микроплазмотронами, в которых охлаждение катодов осуществляется плазмообразующим газом (с рекуперацией энергии) [49]. Другим вариантом микромодуля для данного многодугового плазмотрона может быть вариант рекуперации передачей тепла от нагреваемой стенки анода охлаждающему плазмообразующему газу в канале, заполненном термонакопительными шариками [50].

2.2 Анализ газодинамических процессов при неуправляемых пульсациях и модуляции параметров

Шунтирование дуги и пульсации параметров разряда

Одним из фундаментальных электрофизических процессов в камере горения дуги, определяющих электрические, пульсационные и эрозийные характеристики плазмотрона, является шунтирование – электрический пробой между столбом дуги и стенкой канала. Шунтирование дуги в канале плазмотрона в большинстве случаев снижает его эффективность вследствие неуправляемых пульсаций температуры и скорости плазменной струи. Это происходит из-за стохастического изменения параметров системы дуги с окружающим ее газом, вызывающей пульсационное изменение тока и напряжения. Для самоустанавливающейся дуги пульсации мощности дуги находятся в области частот 1-20 кГц и вызывают флуктуации длины дуги в канале анода, создавая этим большой вклад в пульсации скорости (до 50 %) и температуры (до 20 %) плазменной струи на срезе сопла плазмотрона [9, 52]. Однако есть и исключение, например, в плазмотроне с выходным ступенчатым электродом за счёт фиксации средней длины дуги возрастает тепловой КПД (0,8–0,85) по сравнению с плазмотронами с трубчатыми электродами (0,7–0,75) [6]. В плазмотронах с МЭВ пульсации мощности и вызванные этим перемещения дуги вдоль канала по аноду, малы по величине. В частности, это характерно для всех режимов работы плазмотрона типа ПНК-50 с фиксацией длины дуги с помощью МЭВ, при этом большая часть спектральной мощности пульсаций была сосредоточена в области до 20 кГц [9].

Модуляция параметров плазменного напыления

В плазменном напылении порошков доля энергии плазменной дуги, передаваемой напыляемым частицам, составляет всего лишь 1...3 %. Интенсификация газодинамических процессов передачи энергии напыляемым частицам для повышения этой доли представляет собой важную проблему. По данной теме представлен обзор работ за период 1957-1995 гг [52], в котором рассмотрены некоторые результаты влияния на параметры плазменного напыления акустического воздействия [53] и импульсно модулированной электрической мощности плазматрона [54]. В последующем также были получены результаты повышения эффективности энергопередачи дисперсной фазе при использовании модуляции электрических параметров [55, 56].

Изучению некоторых вопросов изменения параметров плазменной струи при модуляции параметров уделяли внимание отечественные ученые Н. Н. Рыкалин и В. В. Кудинов (институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН) [19, 20, 57, 58], А. Ф. Пузряков (МВТУ им. Н. Э. Баумана) [59, 60], М.Ф. Жуков (ИТ СО РАН) [3, 4, 51]. Исследование вопросов акустического воздействия на плазменные струи проводилось учеными института тепло- и массообмена имени А. А. Лыкова (НАН Беларуси) [53, 61]. В данных публикациях и в работе [56] представлены некоторые результаты исследований плазменного напыления с модуляцией параметров, в основном, в аспекте изучения качества напыляемых покрытий. Показано, что модуляция тока косвенной дуги плазматрона приводит к генерации слабых ударных волн внутри канала плазматрона, усиливает межфазный теплообмен в гетерогенной плазменной струе за счет более интенсивной турбулизации струи и ускоряет движение и нагрев напыляемых частиц на величину до 40-50 %. Это происходит за счет повышения энергетического уровня напыляемых частиц при модуляции мощности косвенной дуги. Это позволило улучшить физико-механические и триботехнические свойства покрытий (повысить прочность соединения покрытия с основой на 20...23 МПа, квазитвердость до 40...45 HRC, износостойкости покрытий до двух раз и более) [55].

3 Обобщение результатов исследований

Анализ информационных источников показывает, что вследствие сложности применения плазматронов поперечной или аксиальной схем подачи газа основной схемой конструкции плазматронов для напыления покрытий остается линейная схема. Это также обусловлено простотой реализации работы в режиме косвенной и прямой дуги, возможностью работы в широком диапазоне мощностей от высоких до малых для микроплазматронов и высоким тепловым КПД. Для линейных плазматронов целесообразным по сравнению с переменным током является использование постоянного тока, обеспечивающего высокую стабильность горения дуги.

Линейные схемы плазматронов включают варианты самоустанавливающейся дуги, дуги с длиной, меньшей самоустанавливающейся (с уступом), и дуги с длиной, большей самоустанавливающейся (с межэлектродными вставками). С точки зрения теплового КПД плазматрона наиболее целесообразными являются схемы с МЭВ и с уступом. Схема с МЭВ имеет ограничение по оптимальной длине МЭВ, определяющей приемлемые тепловые потери в стенку канала с учетом использования заградительного охлаждения методом вдува части рабочего газа в межсекционные зазоры или через пористую вставку в пристеночный пограничный слой. Данная схема также обеспечивает заданную мощность дуги при меньших токах в сравнении с другими схемами и приводит к меньшей эрозии электродов плазматрона с помощью регулирования напряженности электрического поля дуги за счет увеличения длин МЭВ. Плазматрон с секционированной МЭВ применительно для микроплазменных устройств предпочтительнее конструкции с уступом выходного анода, поскольку при одной и той же подводимой мощности ток меньше, что уменьшает эрозию электродов и тепловой поток на обрабатываемые детали. Недостатком схемы плазматрона с МЭВ является сложность его конструкции в сравнении с плазматроном со схемой канала с уступом, тепловая эффективность которого может быть сопоставима с таковой у плазматронов с МЭВ.

Для схем с самоустанавливающейся длиной дуги наибольшее распространение получила схема стабилизации дуги газовихревой стабилизацией. Выгодно использование газоздушных смесей с углеводородными газами с точки зрения энергетической эффективности с учетом дешевизны газов, простоты регулирования коэффициента избытка кислорода, высокой равномерности температурных и скоростных полей в поперечных сечениях плазменных потоков и струй, а также высокой степени теплопередачи от газовой фазы к дисперсной. Для этого требуются жаростойкие материалы катодов, такие как цирконий и гафний в виде вставок в медные втулки.

Плазмотроны схем с фиксированной длиной дуги, меньшей самоустанавливающейся с помощью МЭВ, обеспечивают простой способ поддержания необходимого напряжения на дуге в достаточно широком диапазоне изменения определяющих параметров, таких как ток дуги, расход газа и давление. При этом в сравнении с плазмотронами схемы с самоустанавливающейся длиной дуги плазмотроны с МЭВ позволяют существенно (во много раз) снизить неуправляемые пульсации скорости и температуры плазменной струи.

Высокую тепловую эффективность достигают паровихревые плазмотроны, которые позволяют повысить КПД за счет использования воды в качестве охладителя стенок канала дуги с рекуперацией энергии на образование пара. Водяной пар позволяет получить высокую температуру плазмы до 50 тыс. градусов, что дает широкие технологические возможности использования такого плазмотрона. Однако у них есть и свои ранее отмеченные недостатки.

Общий КПД плазменного напыления, включающий эффективность передачи энергии напыляемым частицам определяется их нагревом и ускорением. Это может быть реализовано модуляцией параметров мощности плазмотрона и с помощью организации сверхзвукового потока плазменной струи использованием сверхзвукового профиля сопла плазмотрона для повышения скорости и температуры частиц. Эффективность нагрева напыляемых частиц определяется местом ввода порошка в канал плазмотрона или на его срезе с учетом теплофизических гранулометрических характеристик порошка, определяющих время нагрева до заданной температуры или до плавления без перегрева и испарения. Для использования легко-, средне- и тугоплавких порошков в плазмотроне должны быть предусмотрены вводы в разных местах вдоль оси плазмотрона при отдельном их использовании или при одновременном для напыления многокомпонентных составов порошков.

Выделяются следующие резервы и тенденции путей повышения эффективности процесса плазменного напыления за счет использования и совершенствования плазмотронов на основе линейной схемы: оптимизация длины выходного электрода; заградительное ограждение стенок вдувом рабочего газа; осесимметричный ввод порошка; комбинирование свойств разных схем плазмотронов, включая варианты многодуговых плазмотронов; уменьшение эрозии катодов путем увеличения количества горящих дуг либо с общим анодом, либо в одной общей камере; перспективность использования плазмотронов, использующих режимы работы с импульсно-модулированным током, генерирующих импульсную плазму в качестве инструмента воздействия на различные поверхности и позволяющих произвести нужное количество энергии, подвести ее к нужному количеству порошка и, тем самым, обеспечить высокий КПД плазмотронов.

Плазменно-детонационные установки, использующие похожий эффект, характеризуются малой производительностью процесса. Комбинированные лазерно-микроплазменные устройства в основном применяются для дальнейшего повышения качества наносимых слоёв при сохранении преимуществ лазерной порошковой наплавки. Их недостатком является повышение температуры в рабочей зоне вследствие значительного повышения погонной энергии процесса по сравнению с чисто лазерной наплавкой или последующим оплавлением. Применяются для ряда промышленных задач, требующих получения прочности сцепления, максимально приближенного к прочности основного металла.

Проведенный анализ показывает, что в качестве прототипа микроплазмотрона для модульного плазмотрона целесообразно взять схему В1.3 (табл. 1) с пусковой межэлектродной вставкой,

причем катод плазмотрона изготавливать из лантанированного вольфрама в случае использования инертных плазмообразующих газов. Применение вольфрама связано с его высоким ресурсом при частых пусках плазмотрона и относительно небольшой стоимостью. При возможности контакта катода с плазмообразующим воздухом и газоздушными смесями необходимый ресурс может быть обеспечен циркониевыми или гафниевыми электродами. В качестве конечного модульного плазмотрона целесообразно взять схему С2 и С3 (табл. 4). Также необходимо предусмотреть рекуперацию тепла с электродных узлов для дальнейшего повышения теплового КПД.

4 Формулирование научно-технического проблемного вопроса дальнейших исследований, концепции и задач исследования

Имеется широкий спектр вариантов плазмотронов линейной схемы и многодуговых для плазменного напыления покрытий. Выбор рациональной или оптимальной схемы варианта плазмотрона определяется многими конструктивными параметрами плазмотрона и режимными параметрами процесса плазменного напыления, которые, в свою очередь, определяются задачами эксплуатационного назначения покрытий по их свойствам, технологическими задачами по производительности и локальности напыления покрытий, объемом работ (определяющим необходимость использования специального или универсального плазмотрона). Это составляет научно-техническую проблемность вопроса разработки *методики выбора схемы и конструкции плазмотрона* в зависимости от задач эксплуатационного назначения покрытий, технологических задачи и объема производства. Эта проблема заключается, во-первых, в исследовании неизученных термогазодинамических процессов тепломассообмена, в том числе, в исследовании одновременной многорядной подачи порошков с разными свойствами в канал плазмотрона и плазменную струю. Во-вторых, для решения данной проблемы необходимо разработать математические модели термогазодинамических процессов в канале плазмотрона и в плазменной струе при раздельной или одновременной подаче в них порошков с разными свойствами для вариантов плазмотронов обобщенной линейной схемы и многодуговых схем. В-третьих, реализация математического моделирования потребует разработки программного обеспечения в виде приложения, учитывающего все варианты схем плазмотронов с учетом эксплуатационных и технологических требований к покрытию и объему производства.

Однако можно предположить, что использование изложенных путей повышения энергетической эффективности при использовании усовершенствованных плазмотронов не позволит кардинально повысить общий КПД плазменного напыления от существующих существенно низких значений 3-5 %. Это потребует, видимо, использования новых принципиальных путей совершенствования плазмотронов с использованием новых вещественно-полевых ресурсов в соответствии с методикой теории решения изобретательских задач.

Список литературы

1 Коробов, Ю.С. Активированная дуговая металлизация – эффективный метод нанесения защитных покрытий [Электронный ресурс] / Ю.С. Коробов // Энциклопедия технологий ремонта, восстановления и упрочнения 2001-2008 г.г. – Электрон. текстовые, граф. дан. и прикладная прогр. (290 МБ). – СПб: НПФ «Плазмацентр», 2008.

2 Чередниченко, В.С. Плазменные электротехнологические установки [Текст] : учебник для вузов / В.С. Чередниченко, А.С. Аньшаков, М.Г. Кузьмин. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2011. – 602 с.

3 Жуков, М.Ф. Электродуговые плазмотроны [Текст] : Рекламный проспект / М.Ф. Жуков. – Новосибирск, 1980.

4 Жуков, М.Ф. Электродуговые генераторы термической плазмы / И.М. Засыпкин, А.Н. Тимошевский и др. – Новосибирск: Наука, 1999. – 712 с.

5 Радько, С.И. Устройство электродугового плазмотрона и моделирование его энергетических характеристик / С.И. Радько, Э.К. Урбах // Доклады ТУСУРа. - 2012. –Ч.1, № 1 (25). – С. 212-215.

- 6 Аньшаков, А. С. Влияние уступа в выходном электроде на эффективность работы двухкамерного плазмотрона / А.С. Аньшаков, Э.К. Урбах и др. // Теплофизика и аэромеханика. – 2006. – Т. 13, № 3. – С. 493-500.
- 7 Аньшаков, А. С. Электродуговые плазмтроны [Текст] / А. С. Аньшаков, Г. Н. Дандарон, В. П. Ефремов и др. – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1980. – 84 с.
- 8 Тамбовцев, А. С. Нанесение защитных покрытий для топливно-энергетического комплекса методом плазменного напыления / А.С. Тамбовцев, П.А. Тырышкин, В.И. Кузьмин, И.П. Гуляев // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 71. – С. 156-166.
- 9 Тарасенко, Ю. П. Структура и физико-механические свойства жаростойкого интерметаллидного покрытия «Ni-Co-Cr-Al-Y», полученного на модернизированном плазменном оборудовании / Ю.П. Тарасенко, И.Н. Царева, О.Б. Бердник, Я.А. Фель, В.И. Кузьмин, А.А. Михальченко, Е.В. Картаев // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21. – № 5. – С. 671-680.
- 10 Кузьмин, В. И. Повышение эффективности плазменного напыления порошковых покрытий / В. И. Кузьмин, Е. В. Картаев, С. П. Ващенко, Д. В. Сергачёв, Е. Е. Корниенко // Вестник югорского государственного университета. – 2014. – Выпуск 2 (33). – С. 7–14.
- 11 Кузьмин, В. И. Плазменное напыление износостойких покрытий из порошков самофлюсующихся сплавов / В. И. Кузьмин, С. П. Ващенко, И. П. Гуляев, Е. В. Картаев, Д. В. Сергачёв, Е. Е. Корниенко, А. В. Долматов // Вестник югорского государственного университета. – 2015 г. – Выпуск 2 (37). – С. 45–52.
- 12 Абдуев, А. Х. Синтез керамики на основе TiOx методом плазменного напыления / А.Х. Абдуев, А.К. Ахмедов, А.Ш. Асваров, К.Ш. Рабаданов, Р.М. Эмиров, С.П. Ващенко, И.П. Гуляев, В.И. Кузьмин, Д.В. Сергачёв // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24. – № 4. – С. 639-646.
- 13 Патент №2474983 Российская Федерация, МПК H05B 7/22 (2006/01) Узел кольцевого ввода порошковых материалов электродугового плазмотрона: №2011128160/07: заявл. 07.07.2011: опубл.10.02.2013 Бюл.№4 / Кузьмин В.И., Михальченко А.А., Картаев Е.В.; заявитель ФГБУ науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН. – 8 с.
- 14 Тарасенко Ю.П., Царева И. Н., Бердник О. Б., Фель Я. А. Способ высокоэнергетического плазменного напыления теплозащитного покрытия на лопатки турбин газотурбинного двигателя и оборудование для его реализации. Патент РФ №2567764. БИМП №12, 27.04.2015 г. - 11 с.
- 15 Соснин, Н. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров / Н. А. Соснин, С. А. Ермаков, П. А. Тополянский. - СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 406 с.
- 16 Донской, А.В.. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении / А. В. Донской, В. С. Клубникин – Л.: Машиностроение. – 1979. – 221 с.
- 17 Лукьянов, Г.А. Сверхзвуковые струи плазмы / Г. А. Лукьянов. – Л.: Машиностроение. – 1985.– 264 с.
- 18 Фролов, В.Я., Клубникин В.С., Петров Г.К., Юшин Б.А. Техника и технологии нанесения покрытий / В. Я. Фролов, В. С.– Клубникин, Г. К. Петров, Б. А. Юшин. – СПб.: Изд-во Политехнического университета. – 2008. – 387 с.
- 19 Кудинов, В.В. Плазменные покрытия / В.В. Кудинов; кол. авт. Институт металлургии имени А. А. Байкова (Москва). – Москва: Наука, 1977. – 184 с.
- 20 Кудинов, В. В. Нанесение покрытий плазмой / В. В. Кудинов, П. Ю. Пекшев, В. Е. Белашенко и др. ; [отв. ред. Л. В. Коваленко] ; АН СССР, Ин-т металлургии им. А. А. Байкова. - Москва : Наука, 1990.– 406 с.
- 21 Клименко, Г.К. Конструкции электродуговых плазмтронов [Электронный ресурс] / Г. К. Клименко, А.А. Ляпин // электронное учебное издание, учебное пособие по дисциплине «Генераторы плазмы». – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010.
- 22 Пузряков, А. Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: Учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозитов» [Текст] / А. Ф. Пузряков. 2-е изд., перереб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 360 с.
- 23 Кравченко, И. Н. Ресурсосберегающие плазменные технологии при ремонте перерабатывающего оборудования: Монография / И. Н. Кравченко; Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева. – 1. – Москва: ООО "Научно-издательский центр ИНФРА-М", 2021. – 200 с.
- 24 Коротеев, А.С. Плазмтроны. Конструкции, характеристики, расчёт [Текст] / А.С. Коротеев, В.М. Миронов, Ю.С. Свирчук. – М.: Машиностроение, 1993. — 296 с.
- 25 Анциферов, В. Н. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: Учебник для вузов [Текст] / В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин и др. – М. : Металлургия, 1987. – 792 с.

- 26 Кручинин, А.М. Плазменные промышленные установки. Промышленные плазмотроны [Текст] / А.М. Кручинин, В.П. Цишевский. – М.: Изд-во МЭИ, 1991. – 104 с.
- 27 Патон, Б.Е. Микроплазменная сварка [Текст] : Монография / Б.Е. Патон, В.С. Гвоздецкий, Д.А. Дудко [и др.]. – Киев: Наука думка, 1979. – 248 с.
- 28 Лаборатория плазменных технологий – ПермГТУ: [Разновидности плазменных процессов. Конструкции дуговых плазмотронов] / ответственный: Ю. Д. Щицын. – 2025. – Текст. Изображения: электронные // Кафедра «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» ПермГТУ: официальный сайт. – URL: <http://svarka.perm.ru/plasma/kp.htm> (дата обращения: 28.11.2025).
- 29 Электродуговые, топливно-дуговые нагреватели газа и электрогазовые горелки / Литвинов В.К., Ясько О.И. / ПГУ им. С. Торайгырова / Учеб. пособие. – М.: УПИ, 1982. – 84 с.
- 30 Петров, С.В. Плазменное газоздушное напыление [Текст] : Монография / С.В. Петров, И.Н. Карп. – Киев, 1993 г.
- 31 Михайлов, Б.И. Возможность регенерации тепла в электродуговых паровихревых плазмотронах // IX Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы: Тез. докл. Фрунзе, 1983. С. 336 – 337.
- 32 Михайлов, Б.И. Электродуговые генераторы пароводяной плазмы. Ч. 2 // Теплофизика и аэромеханика. – 2003. – Т. 10, № 4. – С. 637– 657.
- 33 Повышение эффективности работы электродуговых плазмотронов для обработки материалов / К.А. Корсунов, Р.Н. Брожек / Успехи прикладной физики, 2013, том 1, №2, 161-166 С.
- 34 Дюмин, М.И. Численное моделирование динамики нагрева порошковых материалов в технологическом микроплазматроне [Текст] / М.И. Дюмин Н.П. Козлов, В.И. Суслов // Вестник МГТУ им Н. Э. Баумана – 2003. – №3 – С. 3-11.
- 35 Карабут, А.Б. Плазмотроны со стабилизацией разряда вдувом через пористую стенку [Текст] / А.Б. Карабут, Ю.В. Курочкин, Г.Н. Мельников, А.В. Пустогаров // ТВТ, 17:3 (1979). – С. 618–625.
- 36 Axial III™ Spray System - Advanced Coating Solutions. https://www.mettech.com/assets/pdf/brochure_axial_III.pdf . - Текст. Изображения: электронные // Mettech: официальный сайт. - URL <https://www.mettech.com> (дата обращения 12.12.2025).
- 37 Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings / Wiley. – 1998. – 626 p.
- 38 Официальный сайт «Sulzer Ltd» [Электронный ресурс] // Strong Partners for Higher Productivity and Cost – TriplexPro™-210, загл. с экрана: <http://www.sulzer.com/>.
- 39 Плазменное напыление, плазмотроны Delta [Электронный ресурс] // фирма «Плакарт», загл. с экрана: <http://www.plackart.com>
- 40 Кадырметов, А. М. Обоснование конструкции и параметров специального плазматрона для напыления многокомпонентных покрытий / А. М. Кадырметов, Д. А. Попов, А. И. Усков, В. Р. Фатхулин // Современные технологии производства в машиностроении : межвузовский сборник научных трудов / редкол.: В. Г. Грицюк [и др.]. – Воронеж : Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2023. – 160 с. – Выпуск 16. – ISBN 978-5-4446-1769-4. – Текст : непосредственный. – С. 117-126.
- 41 Тазмеев Г.Х., Тазмеев Х.К. Исследование характеристик дугового плазматрона: учебно-методическое пособие к лабораторному практикуму по дисциплине «Плазменные системы в нанотехнологии». – Набережные Челны: НЧИ КФУ, 2021 – 16 с.
- 42 Коновалов, Д. А Численное моделирование нестационарного теплообмена в задачах пористого охлаждения плазматрона / Дмитрий Альбертович Коновалов // Автореферат канд.техн.наук по спец. 01.04.14. – Воронеж, 2002. – 179 с.
- 43 Д. А. Коновалов Моделирование нестационарного теплообмена в пористых элементах систем тепловой защиты с использованием программного комплекса flowvision / Д. А. Коновалов, Д. П. Шматов, И. Г. Дроздов, С. В. Дахин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – № 4. – С. 143-147.
- 44 Гильфанов, Р. Н. Тепловая защита окружающего пространства вдувом через перфорированные экраны / Р. Н. Гильфанов, А. Г. Каримова, С. Г. Дезидерьев, И. Ш. Зарипов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева.– 2013. – № 3. – С. 20-23.
- 45 Патент №2474983 Российская Федерация, МПК H05B 7/22 (2006/01) Электродуговой плазматрон и узел кольцевого ввода исходных реагентов в плазматрон: №2023118621: заявл. 13.07.2023: опубл.25.04.2024 Бюл.№12 / Леончиков А. М., Прохоров В П.; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Кедр» (RU). – 11 с.
- 46 Кадырметов, А. М. Условия и результаты повышения теплового КПД электродугового плазматрона для плазменного напыления покрытий региона [Электронный ресурс] / А. М. Кадырметов, А. С. Пустовалов, Е. В. Снятков // Воронежский научно-технический вестник. – 2017. – Т. 4, № 4 (22). – С. 89-98.

47 Кадырметов, А. М. Обзор вопросов эффективности плазменного напыления [Электронный ресурс] / А. М. Кадырметов, Е. В. Снятков, А. С. Пустовалов // Воронежский научно-технический вестник. – 2017. – Т. 3, № 3 (21). – С. 11-22.

48 Кадырметов, А. М. Обоснование конструкции и параметров специального плазматрона для напыления многокомпонентных покрытий / А.М. Кадырметов, Д.А. Попов, А.И. Усков, В.Р. Фатхулин // Современные технологии производства в машиностроении. межвузовский сборник научных трудов. – Воронеж, 2023. – С. 117-126.

49 Кадырметов, А. М. Анализ перспективных конструктивных решений электродугового плазматрона для плазменного напыления [Электронный ресурс] / А. М. Кадырметов, А. С. Пустовалов, В. О. Никонов, А. Ф. Мальцев // Воронежский научно-технический вестник. – 2015. – Т. 1, № 1 (11). – С. 62-67.

50 Патент №159626 Российская Федерация, МПК H05H 1/00 (2006.01) Плазматрон для напыления: №2015146941/07: заявл. 30.10.2015: опубл.2.02.2016 Бюл.№5 / Кадырметов А. М., Пустовалов А. С., Снятков Е. В., Никонов В. О.; заявитель ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – 5 с.

51 Жуков, М.Ф. Электродуговые генераторы с межэлектродными вставками / М. Ф. Жуков М.Ф., А. С. Анышаков, И. М. Засыпкин. – Новосибирск: Изд-во «Наука» –1981. – 219 с.

52 Кадырметов, А. М. Воздушно-плазменное напыление при модуляции электрических и газодинамических параметров: Обзор по данным отечественной и зарубежной печати за 1957-1995 г.г. [Текст] / А.М. Кадырметов; ВГЛТА. – Воронеж, 1996.– 60 с.: ил. – Библиогр.: с. 51-59. Деп. в ВИНТИ 30.05.96, N1799 -B96.

53 Лизунков, Г. П. Интенсификация плазменного напыления при воздействии акустических и электрических колебаний на гетерогенную струю / Г.П. Лизунков, В.Д. Шиманович, И. С. Буров, А.Ф. Ильющенко // Инженерно-физический журнал. – 1984. – №5. – С. 812-816.

54 Гутман, Б. Е. Влияние модуляции плазменного дуги на адгезию и газопроницаемость порошковых покрытий / Б. Е. Гутман, М. Х. Шоршоров // Физика и химия обработки материалов. – 1986. – №6. – С. 61-64.

55 Кадырметов, А. М. Управление технологическим обеспечением процессов плазменного нанесения покрытий в режиме модуляции электрических параметров / А. М. Кадырметов. – Воронеж: Научная книга, 2013. – 260 с.

56 Кадырметов, А. М. Перспективные направления совершенствования технологии плазменного напыления с импульсной модуляцией тока дуги / Кадырметов А.М., Снятков Е.В., Плахотин А.А., Мандрыкин И.А., Буренко Н.С. // Воронежский научно-технический Вестник. -2022. – Т. 1. – № 1 (39). – С. 3-14.

57 Рыкалин, Н. Н. Тепловые основы сварки. Ч. 1. Процессы распространения тепла при дуговой сварке [Текст] / Н. Н. Рыкалин. – М.: Изд-во АН СССР, 1947. – 272 с.

58 Рыкалин, Н. Н. Энергетические характеристики дугового плазматрона в импульсном режиме при модуляции тока [Текст] / Н. Н. Рыкалин, А. В. Николаев, А. Н. Асонов // Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы: Тр. IV Всесоюз. конф. по физике и генераторам низкотемпературной плазмы. – Алма-Ата, 1970. – С. 500-504.

59 Пузряков, А. Ф. Влияние колебаний электрических параметров плазматрона на теплообмен в двухфазной плазменной струе [Текст] / А. Ф. Пузряков, А. В. Новоселов, В. И. Иванов, В. А. Сологуб // VII Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы: Тез. докл. июнь 1980 г.: В 3 ч. – Новосибирск, 1980. – Ч. 3. – С. 275-287.

60 Пузряков, А. Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: Учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозигов» [Текст] / А. Ф. Пузряков. 2-е изд., перереб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 360 с.

61 Ажаронок, В. В. Влияние внешнего акустического поля на температуру плазмы дугового разряда / В.В. Ажаронок, Н.Ф. Алешин, В. А. Губкевич, Г. П. Лизунков, Н. И. ЧуКубрик, В. Д. Шиманович // Инженерно-физический журнал. – 1986. – №3. – С. 481-485.

References

1 Korobov, Yu.S. Activated arc metallization – an effective method of applying protective coatings [Electronic resource] / Yu.S. Korobov // Encyclopedia of repair, restoration and strengthening technologies 2001-2008. – Electronic text, graphic data and applied software (290 MB). – St. Petersburg: NPF "Plasmacenter", 2008.

2 Cherednichenko, V.S. Plasma electrotechnological installations [Text]: a textbook for universities / V.S. Cherednichenko, A.S. An'shakov, M.G. Kuzmin. – Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2011. – 602 p.

- 3 Zhukov, M.F. Electric arc plasma torches [Text]: Advertising brochure / M.F. Zhukov. - Novosibirsk, 1980.
- 4 Zhukov, M.F. Electric arc generators of thermal plasma / I.M. Zasyplin, A.N. Timoshevsky, et al. - Novosibirsk: Nauka, 1999. - 712 p.
- 5 Radko, S.I. The design of an electric arc plasma torch and modeling its energy characteristics / S.I. Radko, E.K. Urbach // TUSUR Reports. - 2012. - Part 1, No. 1 (25). - P. 212-215.
- 6 An'shakov, A.S. Influence of a step in the output electrode on the efficiency of a two-chamber plasma torch / A.S. An'shakov, E.K. Urbach et al. // Thermophysics and Aeromechanics. - 2006. - Vol. 13, No. 3. - P. 493-500.
- 7 An'shakov, A. S. Electric arc plasma torches [Text] / A. S. An'shakov, G. N. Dandaron, V. P. Efremov, et al. - Novosibirsk: Institute of Thermal Physics, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1980. - 84 p.
- 8 Tambovtsev, A. S. Application of protective coatings for the fuel and energy complex by plasma spraying / A. S. Tambovtsev, P. A. Tyryshkin, V. I. Kuzmin, I. P. Gulyaev // Bulletin of PNRPU. Aerospace engineering. - 2022. - No. 71. - P. 156-166.
- 9 Tarasenko, Yu. P. Structure and physicomechanical properties of heat-resistant intermetallic coating "Ni-Co-Cr-Al-Y" obtained on modernized plasma equipment / Yu. P. Tarasenko, I. N. Tsareva, O. B. Berdnik, Ya. A. Fel, V. I. Kuzmin, A. A. Mikhailchenko, E. V. Kartaev // Thermophysics and Aeromechanics. - 2014. - Vol. 21. - No. 5. - Pp. 671-680.
- 10 Kuzmin, V. I. Improving the efficiency of plasma spraying of powder coatings / V. I. Kuzmin, E. V. Kartaev, S. P. Vashchenko, D. V. Sergachev, E. E. Kornienko // Bulletin of Yugra State University. - 2014. - Issue 2 (33). - P. 7-14.
- 11 Kuz'min, V. I. Plasma spraying of wear-resistant coatings from self-fluxing alloy powders / V. I. Kuz'min, S. P. Vaschenko, I. P. Gulyaev, E. V. Kartaev, D. V. Sergachev, E. E. Kornienko, A. V. Dolmatov // Bulletin of Yugra State University. - 2015. - Issue 2 (37). - P. 45-52.
- 12 Abduyev, A. Kh. Synthesis of TiO_x-based ceramics by plasma spraying / A. Kh. Abduyev, A. K. Akhmedov, A. Sh. Asvarov, K. Sh. Rabadanov, R. M. Emirov, S. P. Vaschenko, I.P. Gulyaev, V.I. Kuzmin, D.V. Sergachev // Thermophysics and Aeromechanics. - 2017. - Vol. 24. - No. 4. - Pp. 639-646.
- 13 Patent No. 2474983 Russian Federation, IPC H05B 7/22 (2006/01) Unit for annular input of powder materials of an electric arc plasma torch: No. 2011128160/07: declared 07.07.2011: published 10.02.2013 Bulletin No. 4 / Kuzmin V.I., Mikhailchenko A.A., Kartaev E.V.; applicant Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Theoretical and Applied Mechanics named after S.A. Khristianovich, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. - 8 p.
- 14 Tarasenko Yu.P., Tsareva I.N., Berdnik O.B., Fel Ya.A. Method of High-Energy Plasma Spraying of a Thermal Protective Coating on Gas-Turbine Engine Turbine Blades and Equipment for Its Implementation. Russian Federation Patent No. 2567764. BIMP No. 12, April 27, 2015. - 11 p.
- 15 Sosnin, N.A. Plasma Technologies. A Guide for Engineers / N.A. Sosnin, S.A. Ermakov, P.A. Topolyansky. - St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University, 2008. - 406 p.
- 16 Donskoy, A.V. Electroplasma Processes and Installations in Mechanical Engineering / A. V. Donskoy, V. S. Klubnikin - L.: Mechanical Engineering. - 1979. - 221 p.
- 17 Lukyanov, G.A. Supersonic Plasma Jets / G. A. Lukyanov. - L.: Mechanical Engineering. - 1985. - 264 p.
- 18 Frolov, V.Ya., Klubnikin V.S., Petrov G.K., Yushin B.A. Coating Application Techniques and Technologies / V. Ya. Frolov, V.S. Klubnikin, G.K. Petrov, B.A. Yushin. - St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University. - 2008. - 387 p.
- 19 Kudinov, V.V. Plasma Coatings / V.V. Kudinov; coll. of authors. A. A. Baikov Institute of Metallurgy (Moscow). - Moscow: Nauka, 1977. - 184 p.
- 20 Kudinov, V.V. Plasma Coating Application / V.V. Kudinov, P.Yu. Pekshev, V.E. Belashchenko, et al.; [ed. L.V. Kovalenko]; USSR Academy of Sciences, A.A. Baikov Institute of Metallurgy. - Moscow: Nauka, 1990. - 406 p.
- 21 Klimenko, G.K. Designs of Electric Arc Plasmatrons [Electronic resource] / G.K. Klimenko, A.A. Lyapin // electronic textbook, textbook on the subject "Plasma Generators". - M.: Bauman Moscow State Technical University, 2010.
- 22 Puzryakov, A. F. Theoretical Foundations of Plasma Spraying Technology: Textbook for the Course "Technology of Metal-Composite Structures" [Text] / A. F. Puzryakov. 2nd ed., revised and enlarged. - M.: Bauman Moscow State Technical University, 2008. - 360 p.

- 23 Kravchenko, I. N. Resource-saving plasma technologies in the repair of processing equipment: Monograph / I. N. Kravchenko; Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev. - 1. - Moscow: Scientific Publishing Center INFRA-M, LLC, 2021. - 200 p.
- 24 Koroteev, A.S. Plasmatrons. Designs, characteristics, calculations [Text] / A.S. Koroteev, V.M. Mironov, Yu.S. Svirchuk. – M.: Mashinostroenie, 1993. – 296 p.
- 25 Antsiferov, V. N. Powder metallurgy and sprayed coatings: Textbook for universities [Text] / V. N. Antsiferov, G. V. Bobrov, L. K. Druzhinin, etc. - M.: Metallurgy, 1987. - 792 p.
- 26 Kruchinin, A.M. Plasma industrial installations. Industrial plasmatrons [Text] / A.M. Kruchinin, V.P. Tsishevsky. – Moscow: MPEI Publishing House, 1991. – 104 p.
- 27 Paton, B.E. Microplasma Welding [Text]: Monograph / B.E. Paton, V.S. Gvozdetsky, D.A. Dudko [et al.]. – Kyiv: Nauka Dumka, 1979. – 248 p.
- 28 Plasma Technology Laboratory – PermSTU: [Types of Plasma Processes. Designs of Arc Plasmatrons] / responsible: Yu. D. Shchitsyn. – 2025. – Text. Images: electronic // Department of Welding Production and Technology of Structural Materials, PermSTU: official website. – URL: <http://svarka.perm.ru/plasma/kp.htm> (accessed: 28.11.2025).
- 29 Electric arc, fuel-arc gas heaters and electric gas burners / Litvinov V.K., Yas'ko O.I. / PSU named after S. Toraighyrov / Textbook. - M.: UPI, 1982. - 84 p.
- 30 Petrov, S.V. Plasma gas-air spraying [Text]: Monograph / S.V. Petrov, I.N. Karp. - Kyiv, 1993
- 31 Mikhailov, B.I. Possibility of heat regeneration in electric arc vortex-steam plasma torches // IX All-Union Conf. on Low-Temperature Plasma Generators: Abstracts of Reports. Frunze, 1983. pp. 336 - 337.
- 32 Mikhailov, B.I. Electric arc generators of steam-water plasma. Part 2 // Heat Physics and Aeromechanics. – 2003. – Vol. 10, No. 4. – Pp. 637– 657.
- 33 Improving the Efficiency of Electric Arc Plasma Torches for Materials Processing / K.A. Korsunov, R.N. Brozhko / Uspekhi Applied Physics, 2013, Vol. 1, No. 2, 161-166 Pp.
- 34 Dyumin, M.I. Numerical Modeling of the Heating Dynamics of Powder Materials in a Technological Microplasma Torch [Text] / M.I. Dyumin, N.P. Kozlov, V.I. Suslov // Bulletin of Bauman Moscow State Technical University – 2003. – No. 3 – Pp. 3-11.
- 35 Karabut, A.B. Plasmatrons with Discharge Stabilization by Injection through a Porous Wall [Text] / A. B. Karabut, Yu. V. Kurochkin, G. N. Melnikov, A. V. Pustogarov // TVT, 17:3 (1979). – P. 618–625.
- 36 Axial III™ Spray System - Advanced Coating Solutions. https://www.mettech.com/assets/pdf/brochure_axial_III.pdf. – Text. Images: electronic // Mettech: official website. – URL <https://www.mettech.com> (date of access 12.12.2025).
- 37 Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings / Wiley. – 1998. – 626 p.
- 38 Official website of "Sulzer Ltd" [Electronic resource] // Strong Partners for Higher Productivity and Cost – TriplexPro™-210, title from the screen: <http://www.sulzer.com/>.
- 39 Plasma spraying, Delta plasma torches [Electronic resource] // company "Pla-kart", title from the screen: <http://www.plackart.com>
- 40 Kadyrmetov, A. M. Justification of the design and parameters of a special plasmatron for spraying multicomponent coatings / A. M. Kadyrmetov, D. A. Popov, A. I. Uskov, V. R. Fatkhulin // Modern production technologies in mechanical engineering: interuniversity collection of scientific papers / editorial board: V. G. Gritsyuk [et al.]. – Voronezh: Publishing and Printing Center "Scientific Book", 2023. – 160 p. – Issue 16. – ISBN 978-5-4446-1769-4. – Text : direct. – Pp. 117-126.
- 41 Tazmeev G.Kh., Tazmeev H.K. Study of characteristics of an arc plasma torch: a teaching aid for laboratory practical training on the discipline "Plasma systems in nanotechnology". – Naberezhnye Chelny: KFU Scientific Research Institute, 2021 – 16 p.
- 42 Konovalov, D.A. Numerical modeling of unsteady heat transfer in problems of porous cooling of a plasma torch / Dmitry Albertovich Konovalov // Abstract of Cand. Sci. (Eng.) in the specialty. 01.04.14. – Voronezh, 2002. – 179 p.
- 43 D. A. Konovalov, Modeling of Non-Stationary Heat Transfer in Porous Elements of Thermal Protection Systems Using the Flowvision Software Package / D. A. Konovalov, D. P. Shmatov, I. G. Drozdov, S. V. Dakhin // Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2011. – Vol. 7. – No. 4. – Pp. 143-147.
- 44 Gilfanov, R. N. Thermal Protection of the Ambient Space by Blowing Through Perforated Screens / R. N. Gilfanov, A. G. Karimova, S. G. Dezideryev, I. Sh. Zaripov // Bulletin of the Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev. – 2013. – No. 3. – P. 20-23.

- 45 Patent No. 2474983 Russian Federation, IPC H05B 7/22 (2006/01) Electric arc plasma torch and annular input unit for initial reagents into the plasma torch: No. 2023118621: declared 13.07.2023: published 25.04.2024 Bulletin No. 12 / Leonchikov A. M., Prokhorov V. P.; applicant Limited Liability Company "Kedr" (RU). – 11 p.
- 46 Kadyrmetov, A. M. Conditions and results of increasing the thermal efficiency of an electric arc plasma torch for plasma spraying of regional coatings [Electronic resource] / A. M. Kadyrmetov, A. S. Pustovalov, E. V. Snyatkov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. - 2017. - Vol. 4, No. 4 (22). - P. 89-98.
- 47 Kadyrmetov, A. M. Review of issues of the effectiveness of plasma spraying [Electronic resource] / A. M. Kadyrmetov, E. V. Snyatkov, A. S. Pustovalov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2017. – T. 3, No. 3 (21). – pp. 11-22.
- 48 Kadyrmetov, A. M. Justification of the design and parameters of a special plasma-matron for spraying multicomponent coatings / A. M. Kadyrmetov, D.A. Popov, A.I. Uskov, V.R. Fatkhulin // Modern production technologies in mechanical engineering. interuniversity collection of scientific works. – Voronezh, 2023. – pp. 117-126.
- 49 Kadyrmetov, A. M. Analysis of promising design solutions for an electric arc plasma torch for plasma spraying [Electronic resource] / A. M. Kadyrmetov, A. S. Pustovalov, V. O. Nikonov, A. F. Maltsev // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. - 2015. - Vol. 1, No. 1 (11). - Pp. 62-67.
- 50 Patent No. 159626 Russian Federation, IPC H05H 1/00 (2006.01) Plasmatron for spraying: No. 2015146941/07: declared. 30.10.2015: published 2.02.2016 Bulletin No. 5 / Kadyrmetov A. M., Pustovalov A. S., Snyatkov E. V., Nikonov V. O.; applicant FGBOU VO "VSTU". - 5 p.
- 51 Zhukov, M. F. Electric arc generators with interelectrode inserts / M. F. Zhukov M. F., A. S. An'shakov, I. M. Zasytkin. - Novosibirsk: Publishing house "Nauka" - 1981. - 219 p.
- 52 Kadyrmetov, A. M. Air-plasma spraying with modulation of electrical and gas-dynamic parameters: Review based on data from the domestic and foreign press for 1957-1995 [Text] / A. M. Kadyrmetov; VGLTA. – Voronezh, 1996.– 60 p.: ill. – Bibliography: pp. 51-59. Dep. in VINITI 30.05.96, N1799-B96.
- 53 Lizunkov, G. P. Intensification of plasma spraying under the influence of acoustic and electrical vibrations on a heterogeneous jet / G. P. Lizunkov, V. D. Shimanovich, I. S. Burov, A. F. Ilyushchenko // Engineering Physics Journal. – 1984. – No. 5. – P. 812-816.
- 54 Gutman, B. E. Effect of Plasma Arc Modulation on Adhesion and Gas Permeability of Powder Coatings / B. E. Gutman, M. Kh. Shorshorov // Physics and Chemistry of Materials Processing. - 1986. - No. 6. - Pp. 61-64.
- 55 Kadyrmetov, A. M. Control of Technological Support of Plasma Coating Processes in the Mode of Electrical Parameter Modulation / A. M. Kadyrmetov. - Voronezh: Nauchnaya kniga, 2013. - 260 p.
- 56 Kadyrmetov, A. M. Promising Directions for Improving Plasma Spraying Technology with Pulse Arc Current Modulation / Kadyrmetov A. M., Snyatkov E. V., Plakhotin A. A., Mandrykin I. A., Burenko N. S. // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. - 2022. - Vol. 1. - No. 1 (39). - Pp. 3-14.
- 57 Rykalin, N. N. Thermal Fundamentals of Welding. Part 1. Heat Propagation Processes during Arc Welding [Text] / N. N. Rykalin. - Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1947. - 272 p.
- 58 Rykalin, N. N. Energy Characteristics of an Arc Plasma Torch in Pulsed Mode with Current Modulation [Text] / N. N. Rykalin, A. V. Nikolaev, A. N. Asonov // Physics, Technology, and Application of Low-Temperature Plasma: Proceedings of the IV All-Union Conf. on Physics and Generators of Low-Temperature Plasma. - Alma-Ata, 1970. - Pp. 500-504.
- 59 Puzryakov, A. F. Influence of Oscillations of Electrical Parameters of a Plasmatron on Heat Transfer in a Two-Phase Plasma Jet [Text] / A. F. Puzryakov, A. V. Novoselov, V. I. Ivanov, V. A. Sologub // VII All-Union Conf. on Low-Temperature Plasma Generators: Abstract of Report. June 1980: In 3 Parts. – Novosibirsk, 1980. – Part 3. – Pp. 275-287.
- 60 Puzryakov, A. F. Theoretical Foundations of Plasma Spraying Technology: Textbook for the Course "Technology of Metal-Composite Structures" [Text] / A. F. Puzryakov. 2nd ed., revised and enlarged. – Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. N. E. Bauman, 2008. – 360 p.
- 61 Azharonok, V. V. Influence of an external acoustic field on the temperature of arc discharge plasma / V. V. Azharonok, N. F. Aleshin, V. A. Gubkevich, G. P. Lizunkov, N. I. Chu-Kubrik, V. D. Shimanovich // Engineering Physics Journal. – 1986. – No. 3. – P. 481-485.

© Кадырметов А. М., Дроздов И. Г., Сухочев Г. А., Смольяникова Е. Г.,
Попов Д. А., Пустовалов А. С., Попов П. Н., 2025