

1549725

На правах рукописи

БУЛЫЧЕВ Всеволод Валериевич

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА НАПЫЛЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ
МАТЕРИАЛОВ ПЛАЗМОТРОНОМ С НАСАДКОЙ

05.03.06 - Технология и машины сварочного
производства

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

В.В. Булычев

Калуга - 1996

Работа выполнена в товариществе с ограниченной ответственностью
" В Е Л Д "

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Сагалеви́ч В.М.

Научный консультант - доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Неровный В.М.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Ямпольский В.М.
кандидат технических наук,
доцент Дружинин Н.В.

Ведущее предприятие - АО "Калугатехремонт"

Защита состоится "16" мая 1996 г. на заседании
диссертационного совета К.053.15.03 в Московском государственном
техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:
107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в 1 экз., заверенный печатью,
просим выслать по указанному адресу.

Д диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени
Н.Э. Баумана

Автореферат разослан "12" апреля 1996 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА

К.053.15.03
К.Т.Н., ДОЦЕНТ

ГИРШ В.И.

Подписано к печати 19.03.96г. Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ № 97 Типография МГТУ им. Н.Э.Баумана

Актуальность работы. Плазменное напыление порошковыми материалами в среде атмосферы является одним из прогрессивных методов восстановления геометрических размеров изношенных деталей. Вместе с тем, относительно невысокие значения коэффициента использования материала (КИМ), а также значительная неравномерность по напыленной поверхности прочности сцепления покрытия с основой являются сдерживающими факторами более широкого применения данной технологии в ремонтном производстве.

При напылении плазмотронами мощностью до 20...30 кВт одной из причин указанных недостатков является неравномерный нагрев порошкового материала по поперечному сечению струи из-за ее интенсивного охлаждения эжектируемым атмосферным воздухом.

На наш взгляд, одним из перспективных способов улучшения технологических свойств плазменной струи за счет изменений условий массо- и теплообмена между струей и атмосферой является применение насадок, закрепляемых у среза сопла плазмотрона. Однако проблема использования таких насадок с целью снижения тепловых потерь плазменной струи, повышения КИМ и прочности сцепления покрытия с основой мало изучена и для ее решения требуется проведение дополнительных исследований.

В связи с изложенным, совершенствование технологического процесса плазменного напыления порошковыми материалами в среде атмосферы на основе применения газодинамических насадок, закрепляемых у среза сопла плазмотрона, представляется важной и актуальной задачей.

Целью работы является повышение КИМ и равномерности прочности сцепления покрытия с основой по напыленной поверхности при напылении порошковых материалов в среде атмосферы плазмотронами мощностью до 20...30 кВт путем применения насадки, закрепляемой у среза сопла плазмотрона.

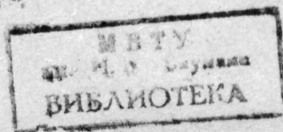
Методы исследования. Для решения задач, поставленных в работе, было проведено теоретическое исследование влияния насадки, теплофизических характеристик газа струи и газа затепленного

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1549725

Булычев В.В. Разработка пр



пространства (среды, в которую истекает струя) на эффективность нагрева порошкового материала в различных зонах плазменной струи.

Экспериментальное исследование процесса напыления плазмотроном с насадкой проводилось на установке УПУ-3Д с использованием метода планирования эксперимента.

Для исследования характера распределения порошкового материала по площади пятна напыления применялся индикатор ИЧ-10.

Прочность сцепления покрытия с основой определялась методом отрыва штифтов на разрывной машине Р-05.

Для анализа результатов эксперимента использовали статистическую обработку данных.

Научная новизна работы связана с раскрытием особенностей процесса плазменного напыления в атмосфере порошковых материалов турбулентными струями, генерируемыми плазмотронами мощностью до 20...30 кВт, в условиях применения насадки с углом раскрытия конического канала 40...50°. Показано, что:

- повышение КИМ и равномерности прочности сцепления покрытия с основой по площади пятна напыления обеспечивается, главным образом, выравниванием теплосодержания частиц по поперечному сечению струи за счет повышения эффективности нагрева (в 3...5 раз) периферийных частиц на дистанции 30...50 мм от среза сопла плазмотрона.

- насадка снижает интенсивность конвективного теплообмена между газом, находящимся в канале насадки, и воздушной средой вне насадки, что ведет к формированию в плазменной струе более равномерных поперечных профилей температур и скоростей за счет повышения температуры эжектируемого струей атмосферного воздуха и снижения его количества.

- оценку технологических свойств турбулентных плазменных струй в рассматриваемых условиях ведения процесса напыления можно с достаточной точностью производить на основе допущения о нормальном законе распределения объемной доли плазмообразующего газа в поперечных сечениях струи, что позволяет учесть влияние соотношения теплофизических параметров газа окружающей среды и газа струи на распределение в ней температур, скоростей и концентрации газа окружающей среды.

Практическая ценность. Разработана конструкция насадки и определены основные параметры режима процесса, позволяющие при на-

пылении, в частности, порошков на основе никеля плазматроном ПП-25 повысить КИМ на 10...15 %, увеличить прочность сцепления покрытия с основой на периферии пятна напыления в 1,2...1,5 раза.

Разработана методика расчета осесимметричных турбулентных струй, истекающих в затопленное пространство с иными теплофизическими параметрами, позволяющая достаточно просто оценить технологические свойства плазменных струй в рассматриваемых условиях ведения процесса напыления.

Предложен и опробован комплекс технологических приемов повышения прочности сцепления покрытия с основой.

Даны технологические рекомендации по напылению изношенных деталей плазматроном с насадкой.

Реализация работы. Разработанный процесс внедрен в ТОО "Белд" при восстановлении изношенных деталей номенклатуры, в частности АО "ОКАЗ", АО "Калугатехремонт" АО "Калугапутьмаш". Экономический эффект от внедрения в 1995 году составил 96 млн. рублей.

Апробация работы. Основные положения работы доложены на региональной научно-технической конференции "Повышение качества изготовления деталей машин методами отделочно-упрочняющей обработки" (г.Пенза, 1991 г.); Российской научно-технической конференции "Автоматизация исследования, проектирования и испытания сложных технических систем" (г.Калуга, 1993 г.); на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МГТУ им. Н.Э.Баумана (г.Москва, 1995 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Она изложена на 193 страницах машинописного текста, содержит 24 рисунка и 43 таблицы. Список литературы включает 98 наименований.

На защиту выносятся. Новые представления о механизме влияния насадки с углом раскрытия канала 40...50° на осаждение напыляемого порошкового материала на подложке и заключающиеся в том, что увеличение КИМ и выравнивание прочности сцепления покрытия с основой по площади пятна напыления достигаются повышением эффективности нагрева периферийных частиц напыляемого материала на дистанции до 30...50 мм от среза сопла плазматрона.

В связи с этим, следующим положением, выносимым на защиту,

является теоретическое исследование влияния теплосиловых параметров газа струи и газа затопленного пространства на распределение температурных и скоростных полей в струе, эффективность нагрева частиц напыляемого материала.

Основное содержание работы.

Во введении дано обоснование актуальности работы. Кратко сформулированы основные проблемы и результаты практического применения.

В главе 1 рассмотрены факторы, определяющие КИМ при плазменном напылении в среде атмосферы порошковых материалов. Показано, что одной из основных причин невысокого уровня КИМ является неравномерность нагрева частиц напыляемого материала по поперечному сечению струи, в результате чего периферийные частицы не достигают необходимого для закрепления на подложке уровня термической энергии, а некоторая часть присоединяемых частиц испаряется и разрушается вследствие перегрева.

Проанализированы конструктивные решения и технологические приемы, позволяющие достичь более равномерного нагрева напыляемого материала. Показано, что данная техническая задача в настоящее время решается следующими основными способами:

- оптимизацией условий ввода порошкового материала в плазменную струю, позволяющей достичь более равномерной ее загрузки;
- выравниванием поперечных профилей температур и скоростей плазменного потока в выходном канале плазмотрона.

Однако, обеспечиваемое данными мероприятиями повышение КИМ невелико и не превышает 3...6%.

На основе анализа условий истечения горячих турбулентных струй в затопленное пространство показано, что основной причиной высокой неравномерности поперечных профилей температур и скоростей в струе является ее смешение с газом затопленного пространства.

Массо- и теплообмен между плазменной струей и затопленным пространством может быть значительно снижен путем реализации ламинарного режима истечения. Однако, напыление ламинарными плазменными струями в условиях ремонтного производства затруднено следующими обстоятельствами:

- необходимость ввода порошкового материала в струю с минимальным количеством транспортирующего газа или совсем без него

под действием силы тяжести позволяет лишь горизонтальное расположение струи и дает возможность напылять только вертикально расположенные поверхности;

- возникновение потоков воздуха, обусловленных наличием местной и общей приточно-вытяжной вентиляции производственного помещения, приводит к турбулизации плазменной струи.

На наш взгляд, наиболее целесообразным техническим решением, позволяющим снизить интенсивность охлаждения плазменной струи атмосферным воздухом является применение насадок, закрепляемых у среза сопла плазмотрона.

Проблеме применения насадок в технике плазменного напыления посвящены работы В.В.Кудинова, Е.М.Иванова, П.Ю.Пекшева и др.

Наиболее широко освещен вопрос использования насадок с целью осаждения местной газовой защитной среды при напылении химически активных материалов. При этом в канал насадки подается защитный газ, формирующий спутный поток и вытесняющий из канала насадки атмосферный воздух. В.В.Максимовым установлено, что состав газа спутного потока влияет на геометрическую структуру плазменной струи и протяженность ее высокотемпературной зоны. Определение возможности применения таких насадок с целью повышения КИМ сводится, таким образом, к исследованию влияния соотношения теплофизических характеристик газа струи и газа затопленного пространства на эффективность нагрева порошкового материала. Данный вопрос, однако, является малоизученным и требует дополнительного рассмотрения.

Известны попытки достичь повышения эффективности нагрева порошкового материала и КИМ применением насадки без формирования в ее канале спутного газового потока. Данный способ не получил своего завершения по причине осаждения напыляемого материала на стенках насадки и, обусловленным этим, нарушением стабильности процесса напыления.

В результате проведения предварительных экспериментов выявлена возможность разработки насадки, обеспечивающей повышение КИМ при отсутствии осаждения на ее стенках напыляемого материала без формирования спутного газового потока, что указывает на перспективность продолжения работ в данном направлении.

В работах В.В.Кудинова, В.С.Белашенко, Д.А.Харламова и др. показано, что прочность сцепления частицы с основой возрастает с

увеличением температуры и скорости частицы. Поэтому выравнивание энергетического состояния частиц по поперечному сечению струи, повышение температуры и скорости периферийных частиц должно увеличить равномерность данного показателя по площади пятна напыления и напыленной поверхности в целом. Для выявления степени влияния насадки на прочность сцепления покрытия с основой необходимо провести дополнительные эксперименты.

В связи с изложенным были сформулированы следующие задачи работы:

1. Провести теоретическое исследование влияния насадки, теплофизических характеристик газа струи и газа затопленного пространства на эффективность нагрева порошкового материала в пламенных струях.

2. Провести экспериментальное исследование влияния профиля насадки на степень осаждения на ее стенках напыляемого материала и КИМ, разработать промышленный образец насадки.

3. Провести экспериментальное исследование влияния насадки на КИМ и прочность сцепления покрытия с основой в центре и на периферии пятна напыления.

4. Разработать технологические рекомендации по напылению изношенных деталей плазмотроном с насадкой.

Глава 2 посвящена теоретическому исследованию влияния насадки, соотношения теплофизических характеристик газа струи и газа затопленного пространства на эффективность нагрева порошкового материала в пламенных струях.

На основе рассмотрения процесса теплообмена между плазменной струей и атмосферой показано, что насадка препятствует конвективному теплообмену между затопленным пространством, находящимся в канале насадки, и атмосферой. В результате этого часть тепловой энергии, теряемой плазменной струей в атмосферу, локализуется в данном ограниченном объеме затопленного пространства, приводя к повышению его температуры. Расчеты, проведенные с помощью составленного уравнения теплового баланса, показали, что при длине насадки до 30...50 мм и варьировании угла раскрытия ее канала от 40 до 50° может иметь место повышение среднemasсовой температуры затопленного пространства до 0,2...0,4 от начальной температуры струи.

Фотографии процесса истечения плазменной струи (плазмообра-

ающий газ - смесь аргона и азота, напряжение на дуге 40 В, ток дуги - 300 А) на насадки длиной 50 мм и углом раскрытия канала 45° показали наличие у торца насадки светящегося потока протяженностью 20...30 мм. Аналогично выполненные фотографии при отсутствии насадки свечения газовой струи на соответствующем удалении от среза сопла плазмотрона не выявили. Данный результат подтверждает значительное влияние насадки с углом раскрытия канала до 50° на распределение температурных полей в струе.

Исследование влияния соотношения теплофизических характеристик газа струи и газа затопленного пространства на распределение в струе температурных и скоростных полей было проведено на основе метода интегральных соотношений. Струя при этом полагалась изобарической. Процессами диссоциации, рекомбинации, ионизации, излучения пренебрегалось. Теплофизические коэффициенты во всем диапазоне изменения температур полагались постоянными. Получены следующие зависимости для определения скорости V и температуры T струи

$$V = V_0 \sqrt{\frac{T}{T_0[1 + ((1-k_1)/k_1)R]}}$$

$$T = \frac{cT_0 + ((1-k_1)/k_1)RT_0}{c + ((1-k_1)/k_1)R}$$

где c - относительная теплоемкость плазмообразующего газа;

R - относительная газовая постоянная плазмообразующего газа;

V_0, T_0 - скорость и температура струи на срезе сопла;

T_0 - температура затопленного пространства;

k_1 - объемная доля плазмообразующего газа в струе.

Обоснована гипотеза о нормальном законе распределения параметра k_1 по поперечному сечению струи. На основании данной гипотезы, а также в допущении наличия в струе только начального и основного участков, были получены следующие выражения для определения k_1

$$k_1 = k_{1m} \exp \left[-N_1 \left(r/r_{gp} \right)^{N_2} \right]$$

$$N_1 = -\ln(k_{1gp}/k_{1m})$$

$$r_0^2 - r_1^2 = 2 \int_{r_1}^{r_{gp}} \exp \left[-N_1 \left(r/r_{gp} \right)^{N_2} - N_1 \left(r/r_{gp} \right)^{N_2} \right] r dr$$

$$k_{1m} = \frac{r_0^2}{2 \int_0^{r_{gp}} \exp \left[-N_1 \left(r/r_{gp} \right)^{N_2} \right] r dr}$$

где r_{gp} - радиус внешней границы струи;

r_1 - радиус ядра струи (на основном участке $r_1=0$);

r_0 - радиус сопла;

r - радиальное расстояние;

k_{1gp} - значение k_1 на условной границе струи;

k_{1m} - осевое значение k_1 .

Для упрощенного определения параметра k_{1m} было получено следующее выражение

$$k_{1m} = \frac{r_0 X}{X_H} \left(\frac{X_H}{X} + 0,732 \right)$$

где X - осевое расстояние;

X_H - протяженность начального участка струи.

Расчеты, выполненные по полученным зависимостям, показали, что повышение относительной теплоемкости плазмообразующего газа приводит к увеличению геометрических размеров высокотемпературной зоны струи. Полученные результаты объясняют ранее упомянутый факт влияния состава спутного потока на параметры плазменной струи, а также известный факт более интенсивного падения в осевом и ради-

альном направлениях температуры и скорости в плазменных струях одноатомных газов по сравнению со струями многоатомных газов.

Предложена и обоснована целесообразность использования для оценки эффективности нагрева q_n порошкового материала в различных зонах плазменной струи следующего выражения

$$\eta_n \sim \frac{T(X) - T_{пл}}{V_{ср} X}$$

где $T_{пл}$ - температура плавления материала частиц;

$T(X)$ - температура газа струи в рассматриваемой зоне струи;

$V_{ср}$ - среднее арифметическое на дистанции X значение скорости струи.

Расчеты, выполненные с использованием данного выражения, показали, что на дистанции 30...50 мм от среза сопла плазмотрона повышение температуры затопленного пространства до (0,2...0,4) T_0 , приводит в присоевых зонах струи к увеличению параметра q_n в 1,1...1,7 раза, а на радиальном расстоянии (0,5...0,7) $r_{гр}$ - в 3...5 раза.

Таким образом, проведенные теоретические исследования указывают на возможность преимущественного повышения эффективности нагрева периферийных частиц по сравнению с присоевыми путем применения насадки и, тем самым, более равномерному нагреву частиц по поперечному сечению струи.

Глава 3 посвящена экспериментальному исследованию процесса напыления порошковых материалов плазмотроном с насадкой. В качестве напыляемого материала использовались порошки на основе никеля. В качестве плазмообразующего газа применялись аргон, азот и их смеси в различных пропорциях. Мощность плазменной струи регулировалась напряжением на дуге плазмотрона U_d , устанавливаемым изменением состава плазмообразующего газа при постоянном значении тока дуги $I_d=300$ А.

Для исследования влияния профиля канала насадки на степень осаждения частиц на ее стенках был изготовлен комплект насадок длиной $L_n = 70$ мм и различными углами раскрытия конического канала $\beta_n = 30...50^\circ$ (рис.1). Установлено, что стабильное отсутс-

твие осаднения порошка на стенках канала насадки достигается при β_n не менее $45...50^\circ$. Во всех дальнейших экспериментах использовались насадки с углом раскрытия канала 45° .

Статистическая обработка результатов экспериментов, проведенных по двухфакторному плану на двух уровнях позволила установить, что в диапазоне варьирования напряжения на дуге от 25 до 75 В изменение длины насадки от 40 до 100 мм и дистанции напыления от 70 до 110 мм (длина насадки 50 мм) не оказывает существенного влияния на КИМ.

Для оценки влияния насадки на КИМ были проведены эксперименты по определению зависимости КИМ от напряжения на дуге при напылении плазматроном с насадкой и при ее отсутствии. Установлено, что для всех случаев напыления данная зависимость носит нелинейный характер (рис.2). Наличие насадки приводит к повышению максимально достигаемых значений КИМ для порошка ПН70Ю30 в среднем с 63 до 76%, порошка ПН85Ю15 - с 62 до 76%, порошка ПХ20Н80 - с 63 до 72%.

Исследование топографии пятна напыления показало, что распределение толщины покрытия, как при отсутствии насадки, так и при ее использовании, близко к закону ошибок Гаусса. Установлено, что применение насадки приводит к увеличению дисперсии распределения порошкового материала по площади пятна напыления в среднем с 13...16 до 17...22, что свидетельствует о повышении теплоемкости периферийных частиц.

Для оценки влияния насадки на прочность сцепления покрытия с основой $\sigma_{сц}$ был применен метод отрыва штифтов. Установлено, что в центре пятна напыления наличие насадки практически не приводит к повышению $\sigma_{сц}$ (38...45 МПа). В то же время, на удалении 15 мм от центра пятна напыления прочность сцепления повышается для порошка ПН70Ю30 с 14,0 до 21,5 МПа, ПН85Ю15 - с 23,1 до 29,7 МПа, ПХ20Н80 - с 16,3 до 23,2 МПа, что составляет 10...19 % от прочности сцепления в центре пятна напыления.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают основные теоретические положения, полученные в главе 2, согласно которым применение насадки с углом раскрытия канала $40...50^\circ$ приводит к повышению КИМ и равномерности прочности сцепления покрытия с основой по площади пятна напыления за счет повышения эффективности нагрева периферийных частиц на дистанции до 30...50 мм

10

от среза сопла плазмотрона.

Глава 4 посвящена разбору отечественных технологических рекомендаций по плазменному напылению изношенных деталей плазмотроном с насадкой. Рассмотрены основные параметры процесса напыления плазмотроном с насадкой. Показано, в частности, что при напылении порошковых материалов на основе никеля температура поверхности подложки возрастает на 4...8 %, а увеличение дисперсии распределения порошкового материала по площади пятна напыления позволяет в 1,1...1,4 раза ускорить продольную подачу плазмотрона без увеличения разнотолщинности покрытия.

Показана целесообразность использования насадки при напылении легкоплавких и тугоплавких материалов. Расчетным путем подтверждено, что для порошковых материалов с температурами плавления от 800 К до 2500 К применение насадки приводит к выравниванию теплоемкости частиц по поперечному сечению струи. Установлено, что при напылении бронзы БрАЖНц 8,5-4-5-1,5 КМ возрастает с 73...78 до 82...86 %, при напылении оксида алюминия с 18...23 до 25...30 %.

Показано, что применение насадки возможно и целесообразно совмещать с применением других известных технических решений, способствующих повышению прочности сцепления покрытия с основой.

Разработана конструкция анода к плазмотрону ПП-25, позволяющая осуществить многоканальный ввод порошкового материала в плазменную струю с одновременным его предварительным подогревом.

Предложена конструкция защитного экрана, закрепляемого на насадке и служащего для улавливания периферийных слабопрогретых частиц.

Разработано приспособление для совмещенной с процессом напыления послероботки напыляемого покрытия вращающимися металлическими щетками, в результате чего происходит избирательное удаление с поверхности детали слабоакрепившихся частиц и повышение прочности сцепления покрытия с основой и самого покрытия.

Применение насадки улучшает условия труда, так как насадка экранирует световое и ультрафиолетовое излучения плазменной струи.

К недостаткам напыления плазмотроном с насадкой следует отнести увеличение массы и габаритных размеров плазмотрона, необходимость подвода сжатого воздуха для охлаждения насадки.

Разработанные технологии были опробованы и внедрены в ТОО "Велд" при восстановлении изношенных и бракованных деталей номенклатуры, в частности, АО "ОКАЗ", АО "Калугапутьмаг", АС "Калугатехремонт". Внедрение технологий позволило повысить производительность труда на 10...15 %, снизить расход порошковых материалов на 13...16 %, повысить эксплуатационную надежность восстановленных деталей.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. При напылении порошковых материалов в воздушной среде плазмотронами мощностью до 20...30 кВт одной из основных причин относительно невысоких значений КИМ и пониженной прочности сцепления покрытия с основой на периферии пятна напыления является интенсивная эжекция турбулентной плазменной струей холодного атмосферного воздуха. Одним из перспективных способов улучшения технологических свойств плазменной струи за счет изменений условий массо- и теплообмена между струей и атмосферой представляется применение насадки, закрепленной у среза сопла плазмотрона.

2. Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в работе, позволили раскрыть особенности процесса плазменного напыления в атмосфере порошковых материалов турбулентными струями, генерируемыми плазмотронами мощностью до 20...30 кВт, в условиях применения насадки с углом раскрытия конического канала 40...50°. Установлено, что:

- повышение КИМ и равномерности прочности сцепления покрытия с основой по площади пятна напыления обеспечивается, главным образом, выравниванием теплового содержания частиц по поперечному сечению струи за счет повышения эффективности нагрева (в 3...5 раза) периферийных частиц на дистанции 30...50 мм от среза сопла плазмотрона;

- насадка снижает интенсивность конвективного теплообмена между газом, находящимся в канале насадки, и воздушной средой вне насадки, что ведет к формированию в плазменной струе более равномерных поперечных профилей температур и скоростей за счет повышения температуры эжигируемого струей атмосферного воздуха и сни-

жения его количества;

- оценку технологических свойств турбулентных плазменных струй в рассматриваемых условиях ведения процесса напыления можно с достаточной степенью точности производить на основе допущения о нормальном законе распределения объемной доли плазмообразующего газа в поперечных сечениях струи, что позволяет учесть влияние соотношения теплофизических параметров газа окружающей среды и газа струи на распределение в ней температур, скоростей и концентрации газа окружающей среды.

3. На основе метода интегральных соотношений разработана методика расчета осесимметричных турбулентных струй, истекающих в затопленное пространство с иными теплофизическими параметрами. Показано, что:

- распределение температур и скоростей в струе обуславливается, главным образом, характером распределения объемной концентрации плазмообразующего газа и соотношением теплофизических параметров газа струи и газа затопленного пространства;
- распределение в струе объемной концентрации плазмообразующего газа с достаточной точностью может быть рассчитано на основе легко определяемых геометрических параметров струи.

4. Эксперименты по напылению порошковых материалов ПН70Ю30, ПН85Ю15, ПХ20Н80 (размер частиц - 60...100 мкм, плазмообразующий газ - аргон, азот и их смеси, ток дуги - 300 А) позволили установить следующее:

- а) отсутствие осаждения частиц на стенках насадки достигается при угле раскрытия канала 45° и более;
- б) максимальные значения КИМ (до 75%) достигаются при напряжении на дуге $U_d = 50...70$ В и на 10...15% превышают КИМ по сравнению с напылением плазмотроном без насадки;
- в) увеличение длины насадки свыше 50 мм не приводит к дальнейшему повышению КИМ;
- г) наличие насадки практически не влияет на прочность сцепления покрытия с основой в центре пятна напыления, но повышает прочность сцепления на его периферии в 1,2...1,5 раза;
- д) распределение толщины покрытия по площади пятна напыления близко к нормальному закону, и при использовании насадки значение дисперсии увеличивается с 13...16 до 17...22.

5. Применение насадки длиной 50 мм и углом раскрытия канала

45° при напылении порошка Al_2O_3 привело к повышению КИМ с 18...23% до 25...40%, а при напылении порошка бронзы марки БРАЖМц 8,5-4-5-1,5 - с 73...78% до 82...88%.

6. Разработаны элементы оборудования и технологические рекомендации по напылению порошковых материалов плазмотроном с насадкой. Показано, что применение насадки возможно и целесообразно совмещать с использованием других технических решений, способствующих повышению прочности сцепления покрытия с основой: предварительным подогревом напыляемого порошка, реализацией многоканального ввода напыляемого порошка в плазменную струю, улавливанием периферийных частиц защитными экранами, совмещенной с напылением послойной обработкой покрытия расщепляющимися металлическими щетками.

7. Проведенные исследования позволили разработать технологические процессы напыления, позволяющие снизить себестоимость восстановления изношенных и бракованных деталей различного назначения, повысить их эксплуатационную надежность.

Экономический эффект от внедрения в ТОО "Велд" разработанных технологических процессов восстановления деталей, в частности, номенклатуры АО "Калугапутьмаш", АО "ОКАЗ", АО "Калугатехремонт" в 1995 году составил 96 млн. рублей за счет экономии порошковых материалов и повышения производительности труда.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Царьков А.В., Дубровский В.А., Булычев В.В. Анализ параметров технологической плазменной струи // Прогрессивные материалы, технологии и конструкции в машино- и приборостроении: Тезисы докл. региональной науч. тех. конф. - Калуга, 1990. - С. 31-32.

2. Царьков А.В., Дубровский В.А., Булычев В.В. Инженерная методика расчета технологической плазменной струи // Прогрессивные материалы, технологии и конструкции в машино- и приборостроении: Тезисы докл. региональной науч. тех. конф. - Калуга, 1990. - С. 32-33.

3. Булычев В.В., Дубровский В.А. Повышение производительности процесса плазменного напыления порошком путем его предварительного подогрева // Повышение качества изготовления деталей машин методами отделочно-упрочняющей обработки: Тезисы докл. региональной науч. тех. конф. - Пенза, 1991. - С. 12-13.

4. Будычев В.В. Исследование процесса плазменного напыления порошковыми материалами газотронами с защитными насадками // Автоматизация исследования, проектирования и испытания сложных технических систем: Тезисы докл. Всероссийской науч. тех. конф. - Кадуга, 1993. - С.90.

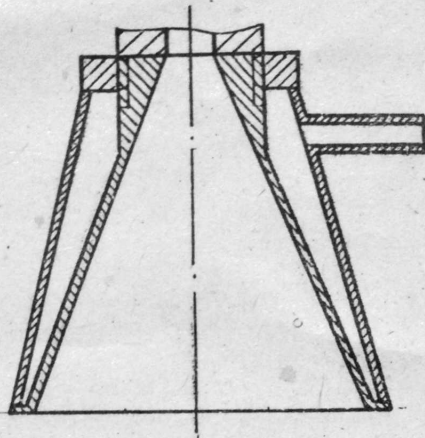


Рис.1. Насадка к плазматрону

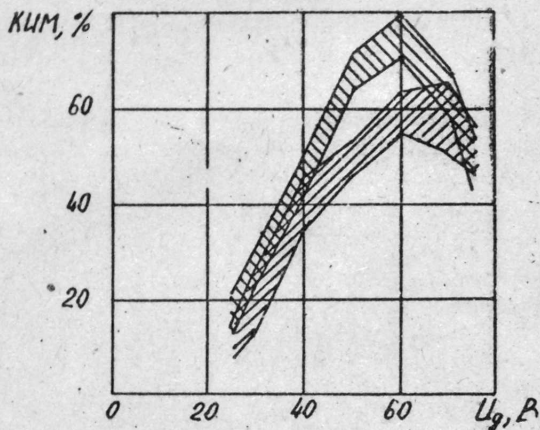


Рис.2. Зависимость КИМ от напряжения на дуге при напылении порошковых материалов на основе Ni:

- /// - область разброса экспериментальных данных при напылении плазматроном без насадки;
- \\\\ - область разброса экспериментальных данных при напылении плазматроном с насадкой.