

САМАРСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО  
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

**ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПРОЦЕССА  
ПЛАЗМЕННОГО  
НАПЫЛЕНИЯ**

Методические указания  
к лабораторной работе

Составители: А. Г. Цидулко, Л. А. Наумов

УДК 621.793.74

*Исследование процесса плазменного напыления:* Метод. указания к лабор. работе/Самар. авиац. ин-т; Сост. А. Г. Цидулко, Л. А. Наумов. Самара, 1992. 20 с.

Даны краткие сведения о сущности физико-химических основ и образования процесса плазменного напыления, изложены требования к последовательности выполнения работы и оформления отчета.

Предназначены для студентов I—IV факультетов 4-го и 5-го курсов. Составлены на кафедре производства летательных аппаратов.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени академика С. П. Королева

Рецензент В. Б. Хардин

Цель работы — практическое ознакомление с процессом плазменного напыления, оборудованием, технологическими параметрами процесса, формированием и свойствами напыленного слоя.

## СУЩНОСТЬ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

*Напыление* — процесс получения материала, при котором он формируется из нагретых и ускоренных дискретных частиц при их осаждении на твердую поверхность детали или технологической оснастки.

Группу методов, в которых нагрев и ускорение частиц осуществляется высокотемпературным потоком газа, составляют методы газотермического напыления. Классификация, возможности методов ГТН и области их применения определяются в первую очередь характеристиками используемого источника нагрева и газового потока.

*Плазменное напыление* — способ, при котором нагрев и ускорение частиц осуществляется плазменной струей, полученной нагревом потока инертного газа в сжатом электрическом дуговом разряде. Плазменное напыление является наиболее универсальным методом газотермического напыления. Это объясняется главным образом характеристиками плазменной струи: высокими энтальпией и температурой, скоростью, нейтральностью по отношению к напыляемым материалам.

Применением плазменной струи снимаются ограничения по температуре плавления материалов — они могут формироваться из любых материалов, в том числе наиболее тугоплавных металлов и керамики, не разлагающихся при нагреве (см. прил., табл. 1.2). Этим, а также рядом специфических особенностей процессов при формировании материалов определяются широкие возможности применения процесса для получения композиционных материалов, используемых как в качестве поверхностных слоев функционального назначения, так и композиционных материалов конструктивного назначения.

В первом случае материал формируется из приготовленной тем или иным методом композиции исходных компонентов, которые осаждаются на поверхность детали и обеспечивают функциональную защиту конструкционного материала от эксплуатационных воздействий (нагрева, эрозии, износа и т. п.). Наносимая композиция может быть несвязанной, используемой в виде механической смеси или индивидуально подаваемых компонентов, или связанной, в которой компоненты предварительно связываются в частицах методами порошковой металлургии, химической технологии.

Во втором случае напыление используется для формирования композиционного материала конструкционного назначения путем напыления матрицы на непрерывное волокно, уложенное заранее или в процессе его укладки (намотки). Совмещение процесса укладки (навивки) волокна с напылением открывает широкие возможности изготовления изделий сложной формы из композиционных материалов (рис. 1).

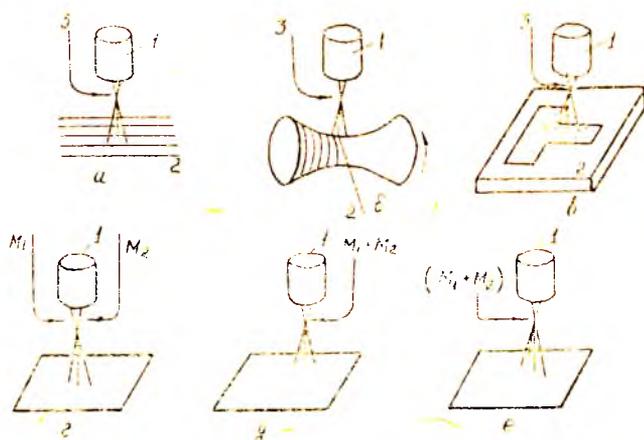


Рис. 1. Схема процессов плазменного напыления при получении композиционных материалов (а, б, в) и защитных покрытий (г, д, е): а — изготовление прирегов; б — изготовление деталей намоткой; в — напыление дискретных усев, уложенных в форму; г, д, е — напыление композиционных покрытий с использованием раздельного ввода компонентов, механических смесей, связанных композиций; 1 — плазматрон; 2 — волокно; 3 — материал матрицы;  $M_1$ ,  $M_2$  — компоненты композиционного покрытия;

Теоретически процесс получения волокнистых композиционных материалов должен в первую очередь обеспечить следующее: прочное сцепление волокна с матрицей с образованием между ними прочных химических связей; минимальное развитие диффузионных процессов и отсутствие образования новых хрупких фаз между

волоконном и матрицей; сохранение прочности волокна. Плазменное напыление матрицы позволяет наиболее просто решать эти задачи.

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ

*Плазменная струя* представляет собой поток частиц ионизированного газа, в котором концентрации положительно и отрицательно заряженных частиц (ионов и электронов) равны между собой. Получение высокотемпературной плазменной струи для целей напыления достигается нагревом потока газа в электрическом дуговом разряде. При этом используется сжатая дуга, возбужденная в цилиндрическом канале положительного электрода — анода (сопла). Сжатие дуги обеспечивает повышение ее температуры до 30000 К и превращает ее в эффективный концентрированный источник нагрева газа (температура в свободно горящей дуге около 6000 К).

Плазменная струя для целей напыления получается в дуговых плазменных горелках — плазмотронах (рис. 2). Электрическая дуга возбуждается между стержневым катодом 1 и кольцевым анодом-соплом 3, разделенных изолятором 2. Плазмообразующий газ 5 вводится в межэлектродное пространство и вытягивает дугу в цилиндрический канал анода (сопла), при этом достигается ее сжатие стенками канала и потоком газа, а также повышение температуры. Нагретый газ в виде частично ионизированной плазменной струи вытекает из канала сопла (анода). При обжатии дуги газом у стенок сопла течет слой относительно холодного газа, который стабилизирует дугу по оси канала и защищает канал сопла от разрушения. Выбор газов для плазменного напыления диктуется, с одной стороны, требованием к их инертности по отношению к электродам плазмотрона, с другой — к эффективности теплообмена с электрической дугой и распыленным материалом.

В качестве плазмообразующих газов используются в основном одноатомные аргон, гелий и двухатомные азот, водород.

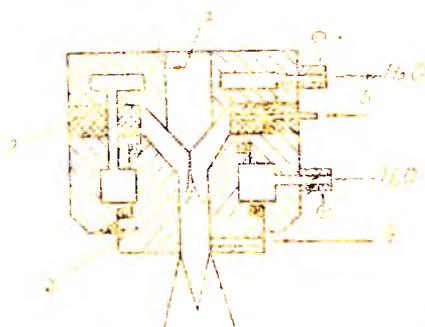


Рис. 2. Схема плазмотрона: 1 — электрод; 2 — изолятор; 3 — сопло-анод; 4 — ввод распыляемого материала; 5 — ввод плазмообразующего газа

Наименьшее разрушающее действие на электроды оказывает аргон, обладающий наряду с инертностью наименьшей теплопроводностью, что уменьшает теплопередачу в стенки сопла и повышает его стойкость. Высокая теплопроводность гелия и, особенно, водорода способствует эффективному теплообмену с электрической дугой, но отрицательно влияет на стойкость электродов.

Теплоудержание плазменной струи двухатомных газов (азот, водород) значительно больше (при одинаковой температуре), чем одноатомных благодаря процессу диссоциации их молекул, предшествующему ионизации (рис. 3). Они обладают также большой теплопроводностью.

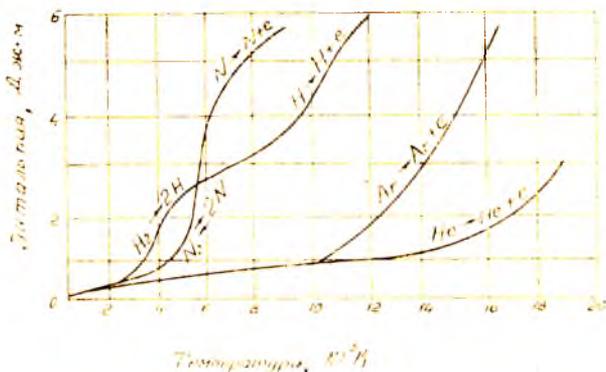


Рис. 3. Зависимость энтальпии газа от температуры

Изложенным выше, а также высокой стоимостью гелия и опасностью водорода определяется то, что для напыления чаще всего используются аргон и азот. Водород используется в качестве примеси к ним (до 25% об.). При этом аргон в основном используется при распылении материалов в виде проволоки. Порошковые материалы напыляются с использованием аргоно-водородных смесей, азота и смесей его с водородом, а также смесей аргона с азотом (до 50% об.).

Примеси двухатомных газов к аргону способствуют росту энтальпии и коэффициента теплообмена струи с распыляемым материалом, однако одновременно происходит снижение температуры струи. При некоторых составах смеси это приводит к снижению эффективности нагрева материала в струе, например при содержании водорода в смеси с аргонem свыше 20%.

Напыляемый материал вводится в плазменную струю в канале или на срезе сопла плазмотрона (А, рис. 2). Наибольшее применение для напыления в настоящее время находят однодуговые плаз-

мотроны постоянного тока с самоустанавливающейся длиной дуги (длина дуги определяется условиями замыкания дуги на стенку анода через пристеночный слой газа). Все большее применение получают плазмотроны с межэлектродной нейтральной вставкой, что позволяет увеличить и стабилизировать длину дуги.

Основными параметрами плазменной струи являются энтальпия (температура) газа и скорость истечения. Эти параметры определяются в первую очередь электрической мощностью, подведенной к дуге, составом и расходом плазмообразующего газа.

Эффективность нагрева газа в дуговом плазмотроне определяется его термическим КПД  $\eta_T$ :

$$\eta_T = \frac{N_d - N_s}{N_d} = \frac{UI - m_w c_w \Delta t}{UI}, \quad (1)$$

где  $N_d$  — электрическая мощность дуги;  $N_s$  — потери в электроды с охлаждающей водой;  $U$  — напряжение на дуге;  $I$  — сила тока;  $m_w$  — массовый расход охлаждающей воды;  $c_w$  — теплоемкость воды;  $\Delta t$  — разность температуры воды на выходе и входе в плазмотрон.

Следует отметить, что электрические параметры неоднозначно влияют на величину  $\eta_T$  — с ростом напряжения она растет, с ростом тока снижается. Поэтому применение двухатомных газов (смесей) и обусловленное этим увеличение напряжения горения дуги повышает термический КПД. Этому же способствует увеличение длины дуги при применении в плазмотронах межэлектродных вставок. Термический КПД плазмотронов в зависимости от рода применяемого газа находится в пределах от 0,4 (аргон) до 0,8 (азот).

Среднемассовая энтальпия плазменной струи  $\Delta H_c$  определяется мощностью дуги  $UI$ , термическим КПД  $\eta_T$  и массовым расходом газа  $G_T$ :

$$\Delta H_c = \eta_T (UI/G_T). \quad (2)$$

Температура плазменной струи связана с энтальпией соотношением

$$\Delta T_c = \Delta H_c / c_p,$$

где  $c_p$  — изобарная теплоемкость.

Влияние рода газа на энтальпию (теплосодержание) струи определяется прежде всего напряжением горения дуги в данном газе, а также потерями в электроды, зависящими от теплопроводности газа. Увеличение напряжения дуги при использовании двухатомных газов позволяет получить более высокие значения энтальпии при меньших токах.

Нагрев и расширение газа в сопле плазмотрона позволяют получить высокотемпературную плазменную струю со скоростями

истечения, приближающимся к скорости звука и превышающим ее. Средняя скорость струи на срезе сопла плазматрона может быть определена из соотношения

$$V_c = RT_c G_0 / \Delta r_c^2 p, \quad (3)$$

где  $R$  — газовая постоянная;  $r_c$  — радиус сопла плазматрона;  $p$  — давление окружающей среды.

Особенностью плазменной струи является наличие значительных градиентов температуры и скорости истечения по сечению и вдоль оси струи. В плазменной струе два характерных участка — начальный, равный длине ядра струи, и основной, расположенный за ним. Начальный участок включает ядро струи, в котором энтальпия, температура и скорость остаются примерно постоянными, и зону смещения, в которой начальные значения параметров убывают до значений окружающей среды.

Наиболее высокотемпературным участком струи является ее ядро. Нагрев и ускорение частиц распыляемого материала в основном осуществляется в пределах ядра струи. Введенный в струю напыляемый материал, будучи распределен в ней, движется на различных расстояниях от оси струи. При этом продолжительность пребывания частиц в ядре струи оказывается различной. В результате температура нагрева и скорость частиц оказываются различными в зависимости от траектории их движения (рис. 4). Нагрев

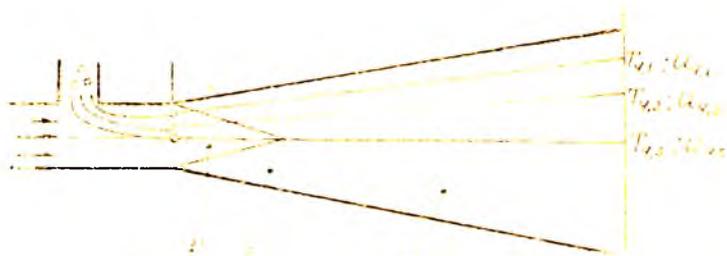


Рис. 4. Схема движения частиц в плазменной струе: 1 — ядро струи; 2 — зона смещения; 3 — основной участок;  $T_{c1}, U_{c1}$  — температура и скорость частиц соответственно;  $T_{c1} < T_{c2} < T_{c3}$ ;  $U_{c1} < U_{c2} < U_{c3}$

частиц и их ускорение определяется в первую очередь теплофизическими свойствами газа и напыляемого материала, размером его частиц.

Движение частицы вдоль оси струи и под действием динамического напора газа описывается уравнением

$$m \frac{dV}{dt} = \pm C_1 S \frac{\rho(V_{c0} - V)^2}{r}, \quad (4)$$

где  $\rho$ ,  $U_{пл}$  — плотность и скорость плазмы;  $m$ ,  $S$ ,  $c$  — масса, площадь миделевого сечения и коэффициент лобового сопротивления частицы;  $V_{пл}$  — скорость частицы вдоль оси струи.

Оценка нагрева частиц может быть выполнена на основе уравнения теплового баланса

$$\Delta Q_T = \alpha F (T_{пл} - T_0) \tau, \quad (5)$$

где  $\Delta Q_T$  — количество тепла, приобретенное частицей в процессе ( $\Delta Q_T = cmT_0$ ),  $\alpha$  — коэффициент теплообмена;  $F$  — поверхность частицы;  $T_{пл}$  — температура плазмы;  $T_0$  — средняя температура частицы;  $\tau$  — время нагрева;  $c$ ,  $m$  — теплоемкость и масса частицы.

Расчет оценки скорости и температуры частиц представляет собой сложную задачу, что объясняется непрерывным изменением параметров газа, режима обтекания частицы, теплофизических свойств материала частицы, изменением ее агрегатного состояния в процессе движения в струе.

Скорость истечения плазменной струи плазматронов достигает 1500 м/с. При этом скорость частиц напыляемого материала находится в пределах 20...150 м/с в зависимости от траектории движения, размера частиц и плотности материала. Время пребывания частиц в пределах ядра струи и их нагрева составляет  $10^{-9}$ ... $10^{-4}$  с. Кратковременность нагрева объясняется низким КПД нагрева материала  $\eta_n = 0,02$ ... $0,05$ . Увеличение длительности нагрева материала и  $\eta_n$  может быть достигнуто вводом порошка в зону дугового разряда, концентрацией его в приточной зоне струи.

Таким образом, температура, агрегатное состояние частиц и их скорость зависят от комплекса параметров:

- силы тока и напряжения дуги,
- состава и расхода плазмообразующего газа,
- траектории движения в струе,
- размера частиц напыляемого материала,
- места ввода частиц в плазменную струю.

Очевидно, что при формировании частиц в покрытие их температура, агрегатное состояние и скорость определяются также удалением напыляемой поверхности от плазматрона — дистанцией напыления.

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ НАПЫЛЯЕМОГО СЛОЯ

*Напыленный слой* представляет собой своеобразный материал, сформированный из дискретных частиц, связанных с поверхностью основы и между собой по поверхностям контактов.

В слое могут быть выделены границы трех типов: между час-

тицами и основным материалом, между частицами и между слоями. Появление межслойных границ объясняется тем, что время между наложением слоев исчисляется десятками секунд и на несколько порядков больше времени между наложением частиц в слое, полученном за один проход. По этой причине межслойные границы выделяются повышенным содержанием окислов, пылевидных фракций и сконденсированной паровой фазы наиболее близких частиц.

Прочность сцепления частиц с подложкой (адгезия  $\sigma_{ад}$ ) и прочность соединения их в слое покрытия (когезия  $\sigma_k$ ) определяются главным образом силами химической связи. Силы механического сцепления невелики и нестабильны. Химические связи возникают на поверхностях контакта, формирующегося при деформации и растекании частицы, осаждаемой на поверхность при определенных условиях.

Таким образом, процесс образования прочной связи частиц с подложкой может рассматриваться как поверхностная химическая реакция (гомохимическая реакция), протекающая в две стадии: образование физического контакта, сближение атомов на расстояния, достаточные для образования химических связей;

активация атомов и образование химических связей между ними.

Формирование частиц в слое происходит, как показывают опыты, при их нагреве до оплавления или полного расплавления. В этом случае образование физического контакта не лимитирует развитие реакции, так как частица быстро растекается и деформируется на поверхности. Время образования физического контакта значительно меньше, чем длительность химической стадии, приводящей к привариванию частиц. Скорость химической стадии с некоторыми допущениями может быть представлена уравнением

$$\frac{dx}{dt} = (N_0 - x) \nu \exp\left(-\frac{E_a}{kT_K}\right), \quad (6)$$

где  $N_0$  — число атомов на поверхности, находящихся в физическом контакте;  $\nu$  — частота собственных колебаний атомов;  $E_a$  — энергия активации реакции;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T_K$  — температура контакта;  $x$  — число атомов, прореагировавших за время  $t$ .

Из уравнения (6) интегрированием можно получить соотношение, связывающее длительность реакции  $t$  с числом прореагировавших атомов  $N_t$  и относительной прочностью соединения:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_{\max}} = \frac{N_t}{N_0} = 1 - \exp\left[-\frac{\nu t}{\exp(E_a/kT_K)}\right], \quad (7)$$

где  $\sigma_t$  — прочность, достигнутая за время  $t$ ;  $\sigma_{\max}$  — максимально возможная прочность при завершении процесса. Величина энергии

активации  $E_a$  близка к половине энергии связи атомов в решетке материала подложки.

Таким образом, уровень прочности сцепления определяется температурой в контакте между частицей и подложкой и длительностью ее поддержания на уровне, достаточном для протекания реакции.

В контакте между расплавленной и деформирующейся частицей и подложкой устанавливается некоторая контактная температура  $T_k$ . Термический цикл в контакте состоит из двух явно выраженных этапов: 1 — затвердевание частицы за время  $t_0$ , в течение которого над поверхностью кристаллизации частицы сохраняется расплав при  $T_m$  (контактная температура при этом сохраняется постоянной); 2 — охлаждение частицы до температуры подложки. На стадии затвердевания частицы в контакте сохраняется постоянная температура

$$T_k = \frac{T_m k_1}{k_1 + \Phi(\alpha)}, \quad (8)$$

где  $k_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}$  — критерий тепловой активности частицы по отношению к подложке;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — коэффициенты теплопроводности;  $a_1$  и  $a_2$  — коэффициенты температуропроводности частицы и подложки;  $\Phi(\alpha)$  — функция интеграла вероятности;  $\alpha$  — корень уравнения  $k_2 + \Phi(\alpha) = k_1 e^{-\alpha^2}$ ;  $k_2 = cT_m/1,77L$  — критерий, оценивающий скрытую теплоту плавления  $L$  частицы;  $c$  — теплоемкость.

Как было установлено, при контактировании частиц, нагретых до температуры плавления, температура контакта соответствует твердому состоянию

$$T_n \ll T_k \ll T_m,$$

где  $T_n$  и  $T_m$  — температура подложки и плавления материала частицы соответственно. Время затвердевания частиц ( $t_0$ ) составляет  $10^{-6}$ ... $10^{-8}$  с. После затвердевания температура контакта быстро падает. Частицы полностью остывают за время  $t_{ост} = 100 t_0$ .

Можно считать, что условием соединения частицы с подложкой с относительной прочностью  $\sigma_t/\sigma_{max}$  является касание кривой термического цикла  $T_k = (t, T_m)$  и кривой, выражающей зависимость длительности протекания реакции образования межатомных связей в зависимости от температуры для данного уровня относительной прочности  $\sigma_t/\sigma_{max} = N_t/N_0$  (рис. 5).

При анализе кривых видно, что уровень прочности определяется длительностью кристаллизации частицы расплавленного материала. Регулирование термического цикла контакта может осуществляться за счет температуры (энтальпии) частиц, температуры подложки, а также условий теплоотвода от поверхности контакта, в частности ее микрогеометрии.

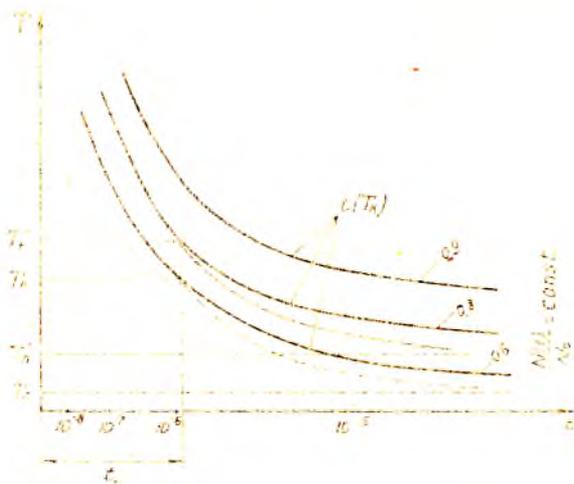


Рис. 5. Схема, поясняющая влияние температуры в контакте частица—подложка  $T_k$  на величину относительной прочности соединения  $N(t)/N_0$ .

Подгрев подложки приводит к росту прочности связи как за счет увеличения  $T_k$ , так и длительности кристаллизации частицы. При ударе о поверхность кинетическая энергия частиц приводит к их деформации и возникновению давления в зоне контакта. В гидродинамике рассматриваются две составляющие такого давления: ударное или импульсивное  $p_v$ , обусловленное явлением гидравлического удара, и напорное  $p_n$ , обусловленное движением потока жидкости.

Максимальное значение импульсивного давления

$$p_v = (\mu/2) \gamma_{ж} c V, \quad (9)$$

где  $\mu$  — коэффициент жесткости частицы, зависящий от ее формы и скорости;  $\gamma_{ж}$  — плотность жидкости;  $c$  — скорость звука в жидкости;  $V$  — скорость частицы. Величина  $p_v$  для случаев напыления может достигать 500 ... 1000 МПа, а время действия —  $10^{-8}$  ...  $10^{-9}$  с. Образование межзатомных связей определяется действием напорного давления  $p_n$ :

$$p_n = \gamma V^2. \quad (10)$$

Величина  $p_n$  может достигать 50 ... 100 МПа, а длительность действия —  $10^{-7}$  ...  $10^{-7}$  с.

Следовательно, процесс соединения осуществляется при действии значительных давлений. Действуя в начальный момент деформации частицы ( $10^{-9}$  с) при ударе, импульсное давление способствует очистке поверхности в месте удара и обеспечивает обра-

зование физического контакта. Образование химических связей обеспечивается папорным давлением  $p_n$ , действующим в течение всего времени затвердевания частиц.

Влияние величины  $p_n$  на прочность соединения частиц объясняется его влиянием на величину энергии активации  $E_a$ , которая с увеличением  $p_n$  снижается. В результате этого с ростом  $p_n$  увеличивается прочность соединения. Таким образом, образование прочных химических связей при взаимодействии частиц с подложкой определяется в первую очередь температурой частиц и их скоростью при осаждении на подложку.

Практически условия для химического взаимодействия реализуются на незначительной поверхности ( $D_n$ ) вблизи центра деформированных частиц, в основном нагретых до температуры плавления. В связи с изложенным адгезионная и когезионная прочности папыляемого слоя значительно ниже прочности компактных материалов. Адгезионная прочность покрытий ниже когезионной, так как термический цикл на межчастичных контактах более благоприятен для образования химических связей.

В зависимости от траектории движения в плазменной струе в пределах пятна напыления осаждаются частицы с различными температурой, агрегатным состоянием и скоростью. Количество частиц, закрепляющихся на поверхности, в силу этого убывает от центра к периферии, а распределение материала в пятне описывается законом Гаусса.

Из изложенного выше следует важность знания энергетических параметров плазменной струи — ее энтальпии и скорости — при назначении технологических параметров процесса напыления, основными из которых являются напряжение и сила тока дуги, расход и состав плазмообразующего газа. Необходимо отметить, что степень нагрева частиц при напылении определяет также экономические показатели процесса: его производительность и использование распыляемого материала. Это связано с тем, что слабонагретые частицы не закрепляются на подложке, отскакивают и уносятся отраженным газовым потоком.

Производительность процесса напыления оценивается массой слоя, напыленного в единицу времени, а коэффициент использования материала (КИМ) — отношением массы напыляемого слоя  $G_m$  к массе материала  $G_c$ , введенного в плазменную струю в единицу времени, %:

$$\text{КИМ} = \frac{G_m}{G_c} \cdot 100.$$

В связи с этим при выборе режимов напыления на первом этапе определяются параметры, при которых обеспечивается достаточно высокая величина КИМ. В дальнейшем проводится оптимизация

режимов для достижения требуемого уровня прочности и эксплуатационных характеристик слоя.

Анализ соотношений (1) и (9) позволяет выявить влияние основных параметров режима работы плазмотрона на энтальпию и скорость струи. При этом регулируются сила тока и расход (состав) газа. Напряжение на дуге устанавливается в зависимости от этих факторов и самостоятельному регулированию не поддается. Из анализа следует, что при сохранении постоянной величины энтальпии скорость газа возрастает с увеличением расхода.

Скорость струи оказывает неоднозначное влияние на формирование напыленного слоя. С одной стороны, с ее ростом уменьшается время пребывания частиц в высокотемпературной зоне струи и эффективность их нагрева, с другой — увеличивается давление в контакте при осаждении частиц. Чрезмерный нагрев частиц увеличивает потери распыляемого материала из-за испарения и, особенно, разбрызгивания при осаждении на подложку. В технологии для определения энтальпии плазменной струи используется метод калориметрирования. При этом считают, что приращение энтальпии газа в плазмотроне соответствует электрической мощности дуги за вычетом потерь с охлаждающей водой, отнесенная к расходу газа.

Для определения энтальпии газа установка снабжается прибором измерения температуры охлаждающей воды на входе в плазмотрон и выходе из него, расхода охлаждающей воды и плазмобразующего газа, силы тока и напряжения на дуге (рис. 6).

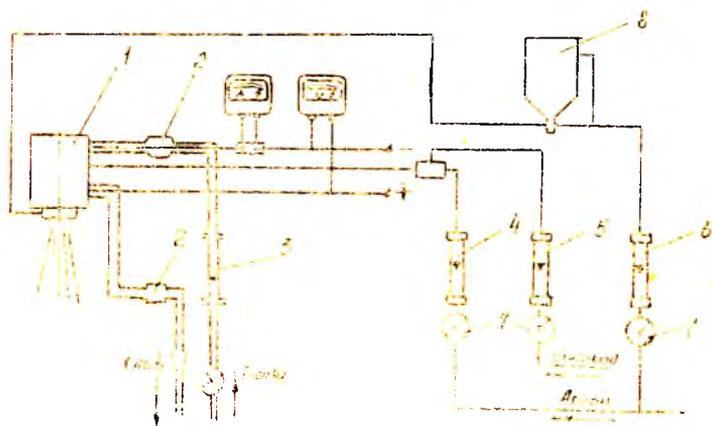


Рис. 6. Схема измерений для определения среднечисловой энтальпии струи на срезе сопла: 1 — плазмотрон; 2 — датчик температуры; 3 — расходомер охлаждающей воды; 4, 5, 6 — расходомеры плазмобразующих и транспортирующего газов; 7 — материалодозатор; 8 — дозатор напыляемого материала

## ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИИ

Функциональная схема оборудования представлена на рис. 7. Оборудование разделяется на собственно установку для плазменного напыления и механическое оборудование для осуществления взаимного перемещения плазмотрона и изделия. В состав установки плазменного напыления входят источник энергопитания, система газопитания, плазмотрон-распылитель, устройство подачи распыляемого материала, система охлаждения, пульт управления. Источником энергопитания служат выпрямители постоянного тока. Газопитание обеспечивается от баллонов со сжатыми газами (150 атм). Охлаждение установки обеспечивается от цеховой сети водоснабжения или специальных замкнутых систем, заполненных дистиллированной водой. Подача порошковых материалов осуществляется из бункеров, снабженных различными дозирующими устройствами. Проволочные материалы подаются роликовыми механизмами. Пульт управления обеспечивает включение установки, регистрацию и регулирование параметров процесса, а также защитные блокировки.

Кинематика и устройство оборудования для взаимного перемещения плазмотрона и изделия зависят от формы изделия.

Нанесение слоя на плоские поверхности осуществляется продольным перемещением плазмотрона ( $V_{\parallel}$ ) и поперечным смещением на шаг ( $S_{\perp}$ ) после каждого хода. При нанесении слоя на тела вращения изделиям придается вращательное движение, а плазмотрону — движение продольной или поперечной подачи.

### ЗАДАНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ И ПОРЯДОК ЕЕ ВЫПОЛНЕНИЯ

В процессе лабораторной работы необходимо:

1. Изучить схему процесса и влияние параметров режима плазмотрона на энтальпию плазменной струи.

2. Изучить механизм соединения напыляемых частиц с подложкой.

3. Изучить основные факторы, определяющие прочность соединения напыляемых частиц с подложкой.

4. Изучить методику определения среднemasсовой энтальпии плазменной струи на срезе сопла в зависимости от режима работы плазмотрона.

5. Определить энтальпию плазменной струи в зависимости от параметров режима работы плазмотрона: силы тока, напряжения на дуге, расхода и состава плазмообразующего газа.

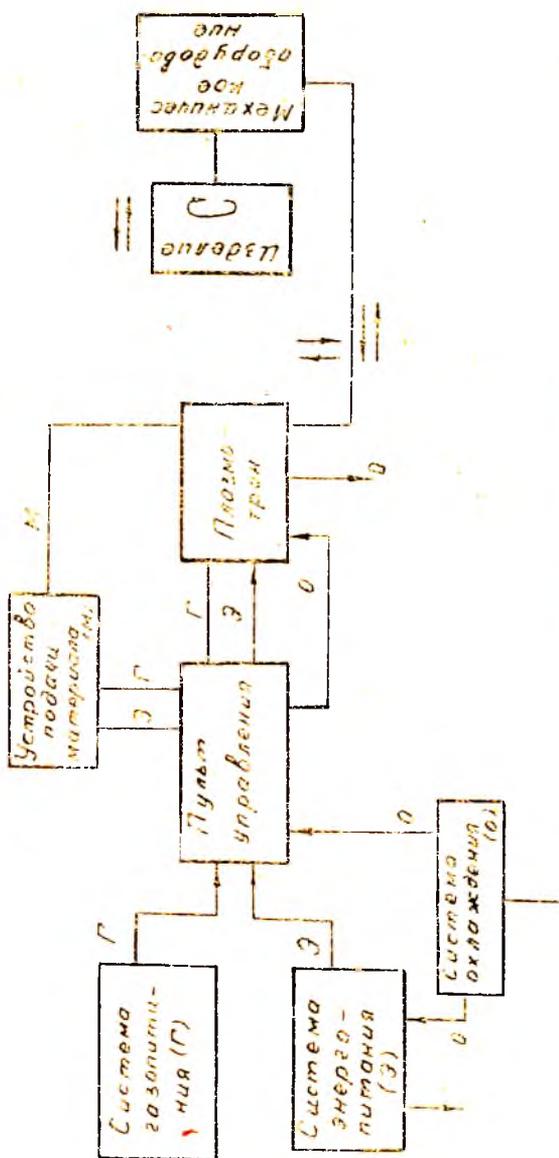


Рис. 7. Функциональная схема устройства для безынерционного плавления

6. Определить влияющие параметры работы плазматрона и энтальпии плазменной струи на коэффициент использования напыляемого материала.

К работе допускаются студенты, изучившие предложенный теоретический материал и прошедшие инструктаж по правилам техники безопасности. Порядок выполнения лабораторной работы следующий:

Изучить особенности и основные параметры процесса плазменного напыления физико-химические основы формирования напыленного слоя; структурную схему оборудования для плазменного напыления.

Изучить методику определения энтальпии плазменной струи и величины коэффициента использования напыляемого материала (КИМ).

Изучить основные правила безопасности.

Включить установку, установить режим работы плазматрона (выполняет лаборант) при различных значениях тока, расхода газа, состава газа. Зафиксировать значения параметров для определения энтальпии.

Взвесить образцы для напыления. Установить расход материала через дозатор. Провести напыление материала на образцы на установленных ранее режимах (2—3 опыта).

Рассчитать энтальпию плазменной струи.

Определить величину КИМ.

Занести результаты в протокол отчета и провести анализ полученных результатов.

### Отчет о лабораторной работе

Содержание отчета определяется заданием на выполнение работы. Отчет должен включать:

- функциональные схемы процессов и оборудования,
- результаты выполненных экспериментов,
- краткие выводы.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сущность и применение процесса плазменного напыления.
2. Плазменная струя и ее характеристики.
3. Основные параметры, определяющие характеристики плазменной струи.
4. Основные параметры, определяющие ускорение и нагрев частиц материала в плазменной струе.

5. Особенности формирования напыленного слоя.
6. Основные факторы, определяющие уровень прочности соединения напыленного слоя с подложкой.
7. Термический цикл контакта при осаждении частицы на подложку.
8. Давление в контакте при осаждении частицы на подложку.
9. Влияние основных характеристик плазменной струи на прочность соединения и производительность напыления слоя.
10. Методика определения энтальпии плазменной струи.
11. Методика определения КИМ.
12. Структурная схема установки для напыления.

#### *БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК*

1. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: Учебник для вузов / Г. В. Бобров и др. М.: Металлургия, 1987. 792 с.
2. Барвинок В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.
3. Кудинов В. В. Плазменные покрытия. М.: Наука, 1977. 184 с.

# ПРИЛОЖЕНИЕ

## Таблица 1

Физико-химические характеристики плазмобразующих газов

Характеристики	Аргон	Лазер	Водород	Гелий
Атомный или молекулярный вес	39,94	28,0016	2,016	4,0024
Плотность, * кг/м <sup>3</sup>	1,78	1,25	0,084	0,1785
Теплоемкость, ккал/кг·град.	0,125	0,250	3,408	1,251
Коэффициент теплопроводности* × 10 <sup>3</sup> , ккал/м·час·град	14	20,9	150	130
Теплоудержание плазмы, ккал/кг	4670	9950	76600	51100
Энергия диссоциации, ккал	—	170200	103800	—
Температура плазмы, К	11000	7300	5100	20000
Мощность, подводимая к дуге, кВт	48	65	129	50
КПД нагрева газов, %	40	60	80	48

\* — при 0°С и атмосферном давлении

Таблица 2

Характеристики и применение некоторых материалов для плазменного напыления

Материал	Температура плавления, К	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент термического расширения, 10 <sup>6</sup> К <sup>-1</sup> (при 7, К)	Теплопроводность, кал/см <sup>2</sup> × сек × град (при 7, К)	Область применения
Алюминий	927	2,7	23,8 (298—373)	0,503 (373)	Матрица КМ* Al—В, антикоррозионное покрытие
Никель	1726	8,9	13,3 (298—373)	0,198 (373)	Матрица КМ и износостойких КП**
Хромоникелевый сплав X20180	1693	8,8	14,2 (298—873)		Матрица высокотемпературных КМ и КП, жаростойкое покрытие
Молибден	2883	10,2	4,7 (293)	0,328 (293)	Износостойкое покрытие
Вольфрам	3653	19,3	4,82 (293)	0,4 (293)	Эрозионно стойкое покрытие в нейтральной среде
Оксид алюминия	2315	3,97	8,4 (293—1273)	0,1 (310)	Теплоизолирующее покрытие, твердая фаза износостойких и термостойких КП, электроизоляция
Диоксид циркония	2963	5,53	5,3 (293—1673)	0,004 (373)	То же
Карбид вольфрама	3248	15,63	0,49 (293—1773)	0,47 (293)	Твердая фаза износостойких КП до 732 К
Карбид титана	3423	4,92	8,5 (293—2773)	0,087 (293)	То же до 873 К
Карбид хрома	1895	6,68	11,7 (293—1373)	0,046 (293)	То же до 1073 К

\* КМ — композиционный материал;

\*\* КП — композиционное покрытие.

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

Сущность и области применения плазменного напыления . . . . .	3
Основные характеристики плазменной струи . . . . .	5
Физико-химические основы формирования напыляемого слоя . . . . .	9
Оборудование для плазменного напыления покрытий . . . . .	15
Задание к лабораторной работе и порядок ее выполнения . . . . .	15
Контрольные вопросы . . . . .	17
Библиографический список . . . . .	18
Приложение . . . . .	19

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Составители: Цидуляко Аркадий Григорьевич  
Наумов Лев Александрович

Редактор Н. Д. Чайникова  
Техн. редактор Е. А. Усачева

Сдано в набор 30.01.92 г. Подписано в печать 18.02.92 г.  
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная.  
Гарнитура литературная. Печать высокая.  
Усл. печ. л. 1,2. Усл. кр.-отт. 1,3. Уч.-изд. л. 1,23.  
Тираж 500 экз. Заказ 61. Бесплатно.

Самарский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С. П. Королёва,  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

Тип. ЭОЗ Самарского авиационного института,  
443001 Самара, ул. Ульяновская, 18.