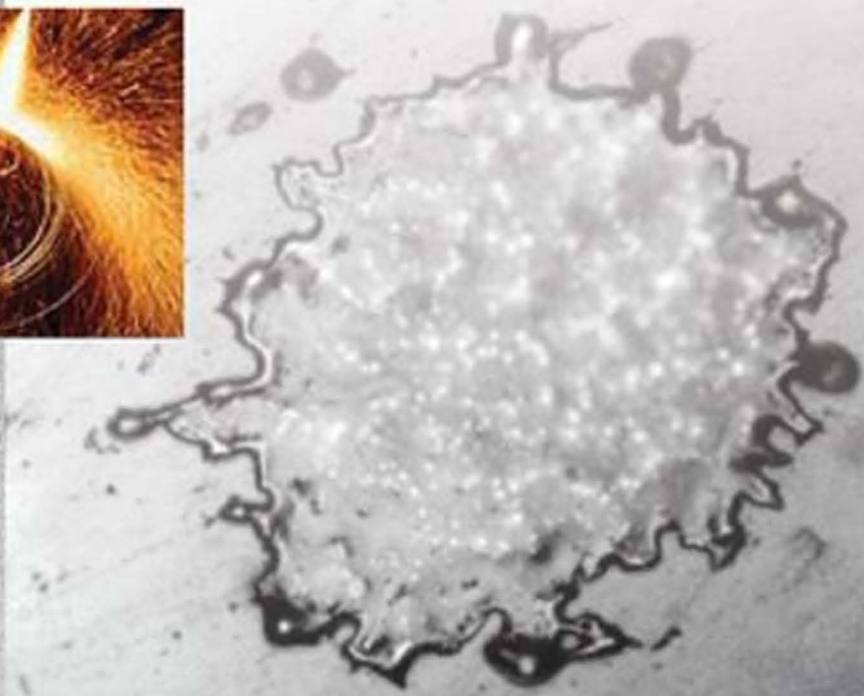




# ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
Институт порошковой металлургии

ПРОЦЕССЫ  
ФОРМИРОВАНИЯ  
ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ  
ПОКРЫТИЙ  
И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ



Минск  
«Беларуская навука»  
2011

**Процессы** формирования газотермических покрытий и их моделирование. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 357 с. – ISBN 978-985-08-1270-4.

Рассмотрены процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование для различных технологий, стадий напыления и последующей обработки нанесенных материалов. С учетом критериев работоспособности структуры покрытий и современных представлений о возможностях ее модифицирования должное внимание уделено моделированию формирования высокопрочных аморфных фаз при взаимодействии частицы расплава с твердой поверхностью при плазменном напылении.

Для специалистов предприятий практическую ценность имеет информация о примерах оптимизации технологий нанесения функциональных защитных покрытий. Указанные сведения могут быть приняты за основу при разработке технологических процессов на предприятиях, занимающихся восстановлением и упрочнением деталей, которые выходят из строя вследствие изнашивания, коррозии, теплового разрушения.

Предназначена для научных, инженерно-технических работников в области моделирования процессов и разработки технологии нанесения защитных покрытий, будет полезна аспирантам, студентам.

Табл. 50. Ил. 131. Библиогр.: 201 назв.

**А в т о р ы:**

А. Ф. Ильющенко, А. И. Шевцов, В. А. Оковитый, Г. Ф. Громыко

**Р е ц е н з е н т ы:**

доктор технических наук В. С. Ивашко,  
доктор физико-математических наук В. М. Волков

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Покрытия, полученные распылением материалов высокотемпературной газовой струей на подложку с последующей термической обработкой нанесенных материалов (газотермические покрытия), находят все более широкое применение. Практический опыт использования газотермических покрытий, накопленный за последние 20–30 лет в отраслях промышленности, показывает, что таким путем можно, как правило, в 2–5 раз уменьшить износ деталей машин, эксплуатирующихся в различных условиях. Эффективность технологии доказана также при защите изделий от коррозии и тепловых разрушений.

Работоспособность нанесенных материалов определяется их структурой, которая в значительной степени зависит от выбора состава материала, способа и режимов нанесения. Комплексное решение указанных вопросов с изучением механизма процессов формирования газотермических покрытий позволит создать научные основы технологии для успешного внедрения ее в производство. При этом возрастает значимость исследования процессов и оптимизации технологических параметров напыления и последующей обработки покрытий. Оптимизация проводится, как правило, по результатам экспериментов. Отечественный и зарубежный опыт свидетельствует о том, что затраты на эксперименты постоянно увеличиваются, что обусловлено повышением стоимости энергоносителей и применяемых материалов. Для снижения этих затрат при сохранении адекватности получаемой информации целесообразно моделирование процессов формирования газотермических покрытий.

Предлагаемая монография учитывает изложенное выше и направлена на решение упомянутых проблематичных вопросов. Содержание монографии предусматривает анализ способов нанесения и критериев формирования работоспособной структуры газотермических покрытий. На примерах перспективных износостойких композиций типа связующее – твердая смазка – карбидная фаза рассмотрены экспериментальные исследования с оптимизацией технологических параметров их нанесения. При этом должное внимание уделено последующей упрочняющей обработке покрытий импульсами плазменной струи и лучом лазера. Отдельный раздел посвящен механизму процессов формирования газотермических покрытий с анализом основных закономерностей образования адгезионных связей и упрочненных структур.

Моделирование процессов получения газотермических покрытий охватывает все этапы технологии, включая напыление материалов на подложку, их последующую упрочняющую термообработку и заключительную механическую обработку шлифованием. Математическое описание процессов касается также размерного формообразования при напылении для получения покрытий требуемой толщины и достаточной точности, что существенно уменьшает припуск и трудоемкость механической обработки. С учетом критериев работоспособности структуры покрытий и современных представлений о возможностях ее модифицирования отдельный раздел посвящен моделированию формирования высокопрочных аморфных фаз при взаимодействии частицы расплава с твердой поверхностью при плазменном напылении.

В монографии приводятся расчетные данные и теоретические зависимости, построенные по уравнениям моделей с подстановкой в них требуемых экспериментальных величин. Эти зависимости представляют интерес для оптимизации технологии нанесения газотермических покрытий и сопоставления теоретических и экспериментальных данных о достигаемых показателях наносимых материалов (для анализа адекватности математических описаний). Вместе с тем такой подход требует соз-

дания базы экспериментальных данных для расчетных моделей, что нашло отражение в предлагаемой монографии.

Для специалистов предприятий практическую ценность имеет информация о примерах оптимизации технологий нанесения функциональных защитных покрытий. Указанные сведения могут быть приняты за основу при разработке технологических процессов на предприятиях, занимающихся восстановлением и упрочнением деталей, которые выходят из строя вследствие изнашивания, коррозии, теплового разрушения.

## СПОСОБЫ НАНЕСЕНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

### 1.1. Дуговая металлизация

Принципиальная схема процесса дуговой металлизации показана на рис. 1.1. Через два канала в горелке непрерывно подают две проволоки диаметром 1,5–7,0 мм, между концами которых возбуждается дуга и происходит расплавление проволоки. Расплавленный металл подхватывается струей сжатого воздуха, истекающего из центрального сопла электрометаллизатора, и в виде мельчайших частиц переносится на поверхность основного материала. Распыление и транспортирование расплавленного металла обычно осуществляются сжатым воздухом, хотя при напылении коррозионно-стойкой сталью и алюминиевыми сплавами используют азот. При дуговом напылении на постоянном токе процесс протекает стабильно, полученный слой покрытия имеет мелкозернистую структуру при высокой производительности процесса. Поэтому для дугового напыления используют

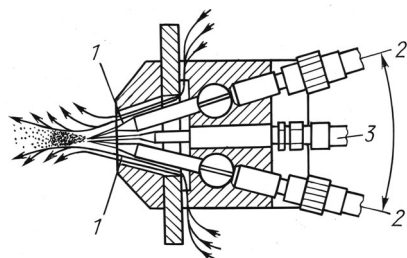


Рис. 1.1. Схема дугового напыления: 1 – насадка; 2 – место введения напыляемого материала (проволоки); 3 – место подачи сжатого воздуха

источники постоянного электрического тока со стабилизатором напряжения или с незначительно возрастающей вольт-амперной характеристикой.

Температура дуги зависит от вида транспортирующего газа, состава электродной проволоки, режимов напыления и других параметров. При использовании металлических

электродов и силе тока дуги 280 А достигается температура около  $6100 \pm 200$  К [1]. В процессе дуговой металлизации, протекающем при такой температуре, облегчается образование капель напыляемого материала.

Основными технологическими параметрами рассматриваемого способа напыления являются состав электродной проволоки, мощность дуги, расход распыляющего газа, диаметр электродной проволоки, скорость подачи проволоки, угол встречи потока частиц с поверхностью напыления, дистанция напыления и скорость перемещения пятна напыления.

С увеличением удельной мощности дуги возрастают потери перегретого металла на испарение, может наблюдаться его разбрызгивание при формировании покрытия. Однако повышение температуры частиц положительно влияет на качество покрытий. Экспериментально установлено, что при дуговом напылении алюминием увеличение удельной мощности от 3000 до 8500 кДж/кг (скорость подачи проволоки постоянна) вызывает повышение температуры напыляемых частиц от 1173 до 2173 К. Мощность дуги определяется величиной тока и напряжения. Последний параметр обычно является нерегулируемым. Необходимую мощность устанавливают путем изменения тока дуги. В практике дуговой металлизации используют мощность 5–20 кВт, силу тока 80–600 А и напряжение 18–35 В.

Увеличение давления и расхода газа приводит к повышению скорости струи и ее распыляющей способности. Необходимо стремиться к сверхзвуковому характеру истечения газа с минимальным перепадом давлений на срезе сопла. При этом облегчается перенос расплавленного металла с поверхности плавления проволоки, его диспергирование и возрастание скорости частиц. На практике давление распыляющего газа выбирают равным 0,35–0,55 МПа, расход его составляет 60–150 м<sup>3</sup>/ч.

С увеличением диаметра проволоки усиливается турбулизация распыляющей струи. Малые диаметры проволоки усложняют процесс, так как требуется высокая скорость подачи и наблюдается интенсивное блуждание плавящихся торцов проволоки.



Для заданного режима работы распылителя выбирают максимальную скорость подачи проволоки. Благодаря этому достигаются минимальные значения удельной мощности дуги. В практике дуговой металлизации скорость подачи проволоки 0,05–0,35 м/с, производительность распыления 2–50 кг/ч.

Угол, который составляет поток движущихся частиц с поверхностью напыления, равняется 65–90°. Минимальный угол соответствует 45°. Дистанция напыления 60–150 мм, скорость перемещения пятна напыления 0,5–0,8 м/с.

С учетом отработанных технологических параметров, в частности производительности процесса, можно ориентировочно оценить средний размер частиц расплавленного металла в момент диспергирования [2]:

$$d_4 = K_1 K_2 \sqrt[3]{G_H / \gamma \mu} \quad (1.1)$$

Здесь  $K_1$  – константа, зависящая от свойств распыляемого материала (для стали, алюминия, цинка и олова  $K_1$  соответственно равна 1,61, 1,45, 1,64, 0,85);  $K_2$  – константа, которая зависит от радиуса и формы сопла (для цилиндрических сопел  $K_2 = 3,75/r_c + 0,29$ );  $G_H$  – производительность распыления;  $\gamma$  – плотность распыляемого материала;  $\mu$  – коэффициент, учитывающий непрерывность горения ( $\mu_{\max} = 1$ ).

По результатам исследований, при распылении углеродистых сталей размер большинства частиц 30–50 мкм, для других металлов 10–100 мкм.

Скорость частиц достигает максимальных значений на расстоянии около 60 мм от сопла аппарата [3] (рис. 1.2). При удалении от очага плавления и распыления она снижается. Вблизи поверхности детали скорость газовой струи и потока напыляемых частиц приблизительно одинакова (50–150 м/с).

Распределение температуры частиц различных материалов на дистанции напыления показано на рис. 1.3 [4]. На расстоянии от сопла 25–75 мм температура частиц снижается достаточно интенсивно. Однако благодаря высокой скорости и перегреву металла при плавлении большинство частиц попадает на поверхность детали в расплавленном состоянии, особенно крупные

частицы размером 40–100 мкм. Процесс дуговой металлизации подробно описан в работах [5–8].

Для реализации принципиальной схемы процесса (см. рис. 1.1) необходимо оборудование, включающее дуговой металлизатор в виде распылительной головки, источник питания электрической дуги и пульт управления. Техническая характеристика дуговых металлизаторов, наиболее распространенных в странах СНГ и дальнего зарубежья, приводится в монографии [9].

Распылительные головки бывают двух видов: с центральным воздушным соплом и с охватывающим. В первом случае проволоочные электроды подаются в обход центрального распыляющего сопла, а точка их пересечения и плавления расположена на некотором удалении от его среза. При использовании дополнительных обжимающих струй достигается тонкое распыление. Такая схема позволяет независимо от проволоочных материалов применять ускоряющие сопла различной конструкции, а также дает возможность варьировать угол схождения электродов. Это, как свидетельствует практика, существенно влияет на процесс горения дуги и качество покрытия [10]. Во втором случае электроды подаются в отверстие распыляющего сопла. При некоторых преимуществах (возможность максимального приближения очага плавления электродов к срезу сопла, отклонение частиц к оси

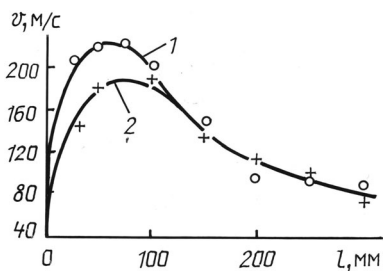


Рис. 1.2. Распределение скорости полета частиц алюминия и стали при дуговом напылении: 1 – алюминий; 2 – сталь

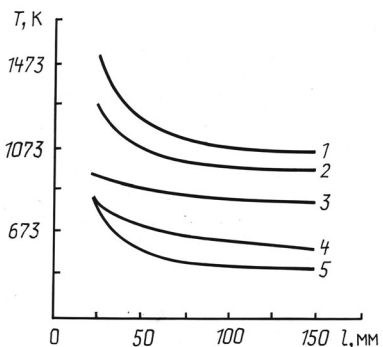


Рис. 1.3. Зависимость средней температуры частицы от расстояния между соплом аппарата и поверхностью детали: 1 – сталь; 2 – латунь; 3 – алюминий; 4 – цинк; 5 – олово

струи) эта схема имеет существенные недостатки: введение дополнительных возмущений в воздушный поток проволочными электродами приводит к нестабильности процессов плавления, диспергирования металла и полета частиц; ограничена возможность применения ускоряющих сопел из-за большого диаметра проволочных электродов при необходимости использования сопел малого диаметра; сопла выгорают и засоряются плавящимися электродами.

Покрытие высокого качества можно получить при использовании источников постоянного тока с жесткой вольт-амперной характеристикой: ВС-300, ВДГ-302, ВС-600, ВДГ-601, ВДУ-504, ВДУ-1001 и др.

Применение мощных электрометаллизационных установок позволяет значительно повысить производительность процесса и сократить затраты времени. Например, при силе тока 750 А можно напылять стальное покрытие с производительностью 36 кг/ч, а при 500 А – цинковое покрытие (1,2 кг/мин), что в несколько раз превышает производительность газопламенного напыления. По сравнению с газопламенным напылением при использовании электрометаллизации можно получать более прочные покрытия, которые лучше соединяются с основой. Применяя в качестве электродов проволоку из двух различных металлов, можно получить покрытие из их сплава. Такие сплавы называют псевдосплавами. Эксплуатационные расходы при электрометаллизации небольшие. При нанесении покрытия распылением двух электродов из разнородных материалов желательно применять такие электрометаллизаторы, которые позволяют регулировать скорость подачи каждого электрода.

Способ дуговой металлизации получил широкое распространение. Однако в этой технологии заложена опасность перегрева и окисления напыляемого материала при низких скоростях подачи распыляемой проволоки. Кроме того, большое количество теплоты, выделяющейся при горении дуги, приводит к значительному выгоранию легирующих элементов, входящих в напыляемый сплав (например, содержание углерода в материале покрытия снижается на 40–60%, а кремния и марганца – на 10–15%).

Для совершенствования процесса дугового напыления необходимо улучшить имеющиеся аппараты и создать принципиально новые, например металлизаторы, предусматривающие распыление проволоки не сжатым газом, а электромагнитным полем. Необходимы новые проволочные материалы, в том числе композиционные, к которым относится порошковая проволока. Она состоит из металлической оболочки (например, кобальтовая или никелевая лента) и порошкового сердечника (например, карбид вольфрама или хрома). Перспективным является нанесение износостойких покрытий с применением композиционных волокнистых проволок из никеля и алюминия. Необходимо разрабатывать новые способы обработки металлопокрытий.

## 1.2. Плазменное напыление

Схема процесса образования плазмы показана на рис. 1.4. При температуре около абсолютного нуля молекулы газа, состоящие из двух атомов (водорода, азота и т. д.), которые имеют вид гантели (а), совершают параллельное перемещение по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ ; при температуре 10 К также возникают вращательные движения. При дальнейшем повышении температуры, например до 1000 К, отмечены колебания атомов (б). Интенсивные столкновения молекул вызывают их диссоциацию (распад на атомы) (в). Температура перехода в атомарное состояние зависит в основном от вида газа и его парциального давления. Для кислорода она составляет 3000 К, для азота — приблизительно 4500 К.

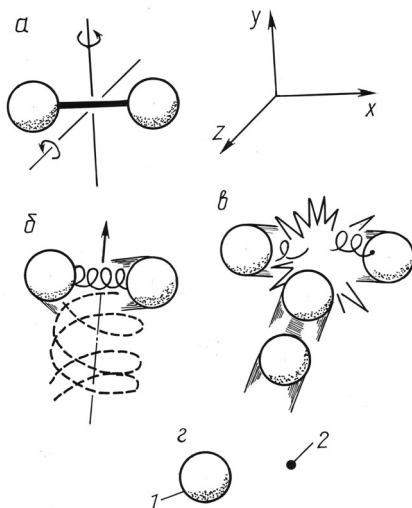


Рис. 1.4. Механизм образования плазмы: 1 – положительный ион; 2 – электрон

Необходимую для распада молекул энергию диссоциации выражают обычно в электрон-вольтах (эВ) в расчете на одну молекулу (табл. 1.1) [11].

*Таблица 1.1. Энергия диссоциации молекул различных газов, эВ\**

Молекула	Энергия распада
Водород H <sub>2</sub>	4,477
Азот N <sub>2</sub>	9,76
Кислород O <sub>2</sub>	5,08
Оксид углерода CO	11,11
Оксид азота NO	6,48
Гидроксил OH	4,37
Диоксид углерода CO <sub>2</sub>	16,56

\* 1 эВ = 1,602·10<sup>-19</sup> Дж.

При повышении температуры развивается процесс ионизации газов, который состоит в том, что атомы теряют электроны (рис. 1.4, з). Достаточно полная ионизация кислорода при атмосферном давлении происходит при 10 000 К. Энергию ионизации выражают в электрон-вольтах в расчете на один атом (табл. 1.2) [12].

*Таблица 1.2. Энергия ионизации для различных элементов, эВ*

Элемент	Энергия ионизации		Элемент	Энергия ионизации	
	1	2		1	2
Алюминий	5,984	18,823	Азот	14,54	29,605
Аргон	15,755	27,62	Кислород	13,614	35,146
Кальций	6,111	11,87	Платина	(8,9)	18,5
Углерод	11,264	24,376	Калий	4,339	31,81
Церий	3,893	25,1	Кремний	8,149	16,34
Гелий	24,580	54,400	Серебро	7,574	21,48
Водород	13,595	–	Натрий	5,138	47,29
Железо	7,90	16,18	Стронций	5,692	11,027
Криптон	13,99	24,56	Титан	6,83	13,63
Магний	7,644	15,03	Вольфрам	7,94	–
Ртуть	10,44	18,8	Ксенон	12,13	21,2
Ниобий	6,77	14			

**Примечание.** В графе 1 приведены значения энергии, необходимой для отрыва одного электрона, в графе 2—для отрыва двух электронов.

Газ, в котором значительная часть атомов или молекул ионизирована, а концентрация электронов и отрицательных ионов равна концентрации положительных ионов, называется плазмой. Плазма, которая в целом является квазинейтральной, не имеет электрического заряда. Отличительная черта плазмы – высокая электропроводность. Обычная электрическая дуга также находится в плазменном состоянии.

На рис. 1.5 показана зависимость энтальпии от температуры для аргона, водорода и азота. При ионизации и диссоциации азота и водорода, а также при ионизации аргона происходит поглощение энергии. При охлаждении диссоциированного и ионизированного высокотемпературного газа наблюдается обратный процесс: соединение электронов с ионами и атомов в молекулы. При этом выделяется энергия рекомбинации, равная энергии диссоциации молекул и энергии ионизации атомов. При одинаковой температуре двухатомные газы обладают более высокой энтальпией, чем одноатомные.

Процесс напыления с использованием плазменной струи показан на рис. 1.6. Между катодом из вольфрама или с добавлением 2% тория и медным водоохлаждаемым соплом, которое служит анодом, возникает дуга, которая нагревает поступающий в сопло горелки рабочий газ, истекающий из сопла в виде плазменной струи. В каче-

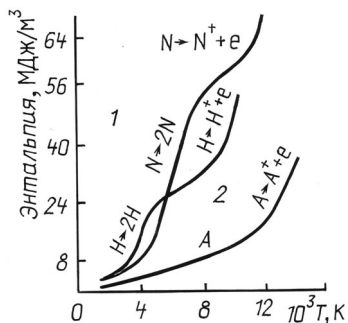


Рис. 1.5. Зависимость энтальпии (МДж/м<sup>3</sup>) от температуры для аргона, водорода и азота: 1 – область диссоциации; 2 – ионизации

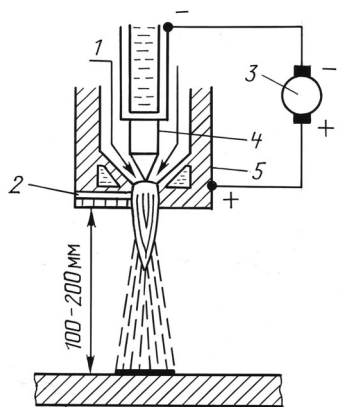


Рис. 1.6. Схема плазменного напыления: 1 – плазмообразующий газ; 2 – место введения напыляемого материала; 3 – источник питания; 4 – катод; 5 – анод

стве рабочего газа применяют аргон или азот, к которым иногда добавляют водород. Порошковый материал подается в сопло струей транспортирующего газа, нагревается плазмой и с ускорением переносится на поверхность основного материала для образования покрытия.

Основными технологическими параметрами рассматриваемого способа напыления являются состав порошкового материала, мощность дуги, расход плазмообразующего газа, расход газа на подачу порошка, скорость подачи порошка, размер его частиц, угол встречи потока частиц с поверхностью напыления, дистанция напыления, скорость перемещения пятна напыления.

С увеличением мощности дуги интенсивно возрастают температура и энтальпия плазменной струи как на срезе сопла, так и в других ее сечениях. Мощность дуги определяется напряжением и силой тока. Напряжение зависит от длины дуги, что, в свою очередь, определяется конструкцией распылителя, видом и расходом плазмообразующего газа. При реализации заданной мощности дуги необходимо выбирать режим работы с максимальным напряжением. Зависимость эффективности напыления порошков самофлюсующихся сплавов от мощности дуги показана на рис. 1.7.

При расходе плазмообразующего газа выше оптимальных значений существенно снижается плотность покрытий, уменьшается коэффициент использования порошка и другие пока-

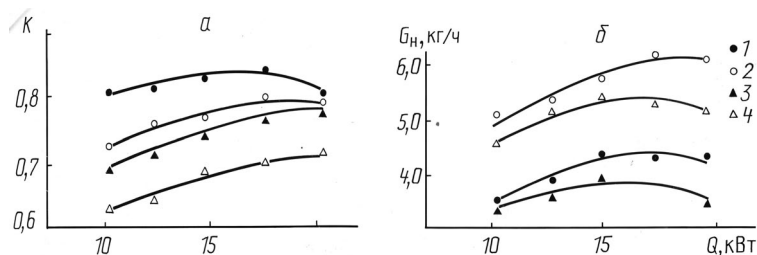


Рис. 1.7. Зависимость коэффициента использования порошкового материала  $K$  и производительности процесса напыления  $G_n$  от мощности дуги плазмотрона: 1 –  $d = 160\text{--}200$  мкм, расход плазмообразующего газа  $0,001$  м<sup>3</sup>/с; 2 –  $160\text{--}200$ ,  $0,0012$ ; 3 –  $250\text{--}300$ ,  $0,001$ ; 4 –  $d = 250\text{--}300$  мкм, расход плазмообразующего газа  $0,0012$  м<sup>3</sup>/с

затели эффективности напыления. С увеличением расхода плазмообразующего газа повышаются распыляющая способность плазменной струи, ее скорость и соответственно скорость напыляемых частиц, температура которых снижается. При распылении проволоки увеличение расхода плазмообразующего газа способствует образованию более дисперсного потока материала, наносимого на деталь. При плазменном напылении объемный расход плазмообразующего газа составляет 2,0–4,0 м<sup>3</sup>/ч, массовый – 1,8–7,2 кг/ч.

Большое влияние на теплофизические характеристики плазменной струи в условиях теплообмена порошкового напыления оказывает вид газа. Несмотря на высокую температуру, аргонная струя слабо разогревает порошковые частицы. Это обусловлено малой величиной критерия Био и укороченной высокотемпературной зоной плазменной струи. Большая степень прогрева напыляемых частиц достигается при использовании азота и водородсодержащих газов. При добавлении водорода к аргону и азоту можно получить плазменную струю, в которой интенсифицируется теплообмен между порошком и плазмой. Кроме того, зона нагрева водородсодержащих струй является достаточно протяженной. Увеличивается время нагрева напыляемых частиц и соответственно их энтальпия.

Расход газа на подачу порошка составляет около 10% расхода плазмообразующего газа. Возрастание расхода транспортирующего газа облегчает и стабилизирует подачу порошка. Вместе с тем наблюдается смещение потока частиц относительно плазменной струи. При этом резко снижается температура, уменьшаются скорость движения частиц и коэффициент использования порошкового материала.

Скорость подачи порошка обычно оценивают по его расходу, она составляет 0,9–7,2 кг/ч. Повышенное количество порошка, подаваемого в плазменную струю, уменьшает тепловую энергию для нагрева напыляемой частицы. При этом снижается эффективность процесса. Для подачи порошка используют газы, аналогичные плазмообразующим. Можно использовать и другие газы с различными физико-химическими свойствами.



Для плазменного напыления применяют порошок со средним диаметром частиц 10–200 мкм. С увеличением их размера возникают трудности при нагреве до температуры плавления. Особенно сложно проплавливать крупные частицы тугоплавких материалов с низкой теплопроводностью или малой плотностью, например оксидов циркония, магния, карбида титана. В результате ухудшаются показатели процесса напыления. Однако напыление крупных фракций позволяет снизить угар легирующих элементов при нанесении покрытия. Это подтверждено экспериментальными исследованиями [13]. Полученные данные представлены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Изменение содержания легирующих элементов исходного состава порошка при напылении покрытия

Диаметр напыляемых частиц, мкм	Содержание В, мас.%			Содержание Si, мас.%		
	до напыления	после напыления	угар	до напыления	после напыления	угар
100–160	2,80	2,49	11,1	3,85	3,46	10,1
200–250	2,80	2,53	9,6	3,85	3,53	8,3
250–300	2,80	2,57	8,2	3,85	3,62	5,6

Для плазменного напыления оптимальная дистанция составляет 50–300 мм. Чрезмерно малые дистанции напыления, близкие к длине начального участка плазменной струи, не всегда обеспечивают прогрев

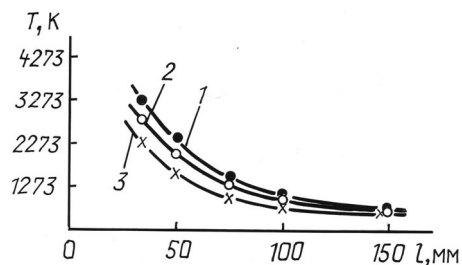


Рис. 1.8. Кривые распределения температуры плазменной струи по дистанции напыления: 1 – сила тока дуги 500 А; 2 – 455; 3 – сила тока дуги 300 А (рабочий газ – аргон ( $1,8 \text{ м}^3/\text{ч}$ ))

порошковых частиц и необходимую скорость их движения. Вместе с тем возрастает опасность недопустимого нагрева изделия. С увеличением дистанции резко снижаются температура и скорость плазменной струи на основном участке (рис. 1.8). Наблюдается снижение температуры и скорости на-

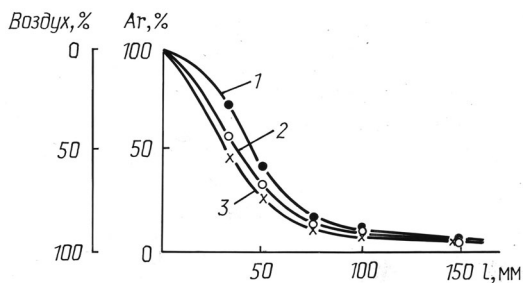


Рис. 1.9. Кривые распределения содержания воздуха в плазменной струе по дистанции напыления: 1 – сила тока дуги 500 А; 2 – 455; 3 – сила тока дуги 300 А (рабочий газ – аргон ( $1,8 \text{ м}^3/\text{ч}$ ))

пыляемых частиц. Наибольшие дистанции напыления выбирают при использовании ламинарной плазмы или в том случае, когда процесс протекает в низком вакууме. Существенно возрастает дистанция напыления с увеличением мощности дуги при использовании газов с высокой энтальпией.

В процессе нанесения покрытия отмечена интенсивная инжекция воздуха в струю плазменной горелки. Кривые распределения содержания воздуха в плазменной струе по дистанции напыления представлены на рис. 1.9. На рисунке видно, что на расстоянии 50 мм от среза сопла количество воздуха в струе достигает 55–60%, а при 100 мм – 90%.

Для реализации этого способа нанесения покрытий используют установки, включающие необходимый комплект оборудования и приспособлений (рис. 1.10). В странах СНГ используют установки, техническая характеристика которых приведена в монографии [9]. Применяют также установки зарубежных фирм «Sulzer Metco» (США), «Plasma-Technik» (Швейцария), «Plasma-dain» (США) и др.

Основным компонентом оборудования и технологии плазменно-дугового напыления покрытий являются плазмотроны. Плазмотроны, применяемые в СНГ и за рубежом, отличаются системой охлаждения электродов и местом введения порошка в плазменную струю (рис. 1.11) [14].

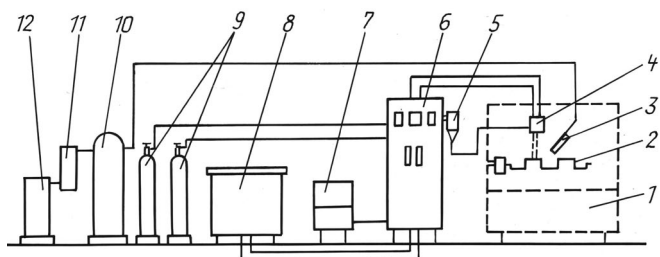


Рис. 1.10. Схема установки для плазменного напыления: 1 – вытяжной шкаф; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – насадка подачи сжатого воздуха для охлаждения детали; 4 – плазмотрон; 5 – порошковый питатель; 6 – пульт управления; 7 – устройство подачи охлаждающей воды; 8 – источник питания; 9 – баллоны с газами; 10 – ресивер; 11 – масловодоотделитель; 12 – компрессор

Главная часть плазмотрона – сопловой (анодный) узел, включающий системы охлаждения и введения порошка в плазменную струю. Через электроизоляционный блок сопловой узел стыкуется с катодным, который представляет собой стержневой электрод, изготовленный из вольфрама с добавками, и систему его охлаждения. Плазмотрон может быть выполнен в виде пистолета (рис. 1.11, а) или с насадкой в виде пистолета с удлиненным стволом (рис. 1.11, в). Выбор конструкции плазмотрона определяется конфигурацией детали и формой поверхности, на которую наносят покрытие.

Наибольшему износу подвергается сопло плазмотрона, поэтому его делают сменным. Срок службы сопла зависит от режима эксплуатации плазмотрона, вида рабочего газа, системы охлаждения и составляет 15–100 ч.

Для получения покрытий из порошков тугоплавких материалов ( $Al_2O_3$ , вольфрам, карбиды и т. д.) применяют импульсный плазмотрон, в котором подвижный катод и анод образуют запорный клапан для газа [15]. Аргон с порошком наносимого материала поступает в дуговую камеру под давлением 2 МПа. Для питания используют высоковольтный источник (1 кВ, 20 кА). Плотность тока дуги –  $20 \text{ кА/см}^2$ , скорость плазменной струи – до нескольких тысяч метров в секунду, длительность импульса – 5–10 мс, пауза – 100 мс.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	3
<b>Глава 1. Способы нанесения газотермических покрытий</b> .....	6
1.1. Дуговая металлизация .....	6
1.2. Плазменное напыление .....	11
1.3. Подводное плазменное напыление .....	21
1.4. Плазменное напыление при пониженном давлении .....	30
1.5. Газопламенное напыление .....	34
1.6. Детонационно-газовое напыление .....	42
1.7. Импульсно-плазменная обработка покрытий .....	52
1.8. Лазерная обработка покрытий .....	63
<b>Глава 2. Критерии формирования работоспособной структуры газотермических покрытий</b> .....	69
2.1. Требования к структуре износостойкого покрытия .....	69
2.2. Требования к структуре коррозионно-стойкого покрытия .....	79
2.3. Требования к структуре теплозащитного покрытия .....	83
<b>Глава 3. Исследование процессов и оптимизация технологических параметров нанесения газотермических покрытий</b> .....	93
3.1. Оптимизация технологических параметров плазменного напыления с управлением напряженным состоянием покрытий .....	93
3.2. Оптимизация технологических параметров плазменного напыления с управлением процессами формирования аморфизированных и нанокристаллических структур .....	106
3.3. Оптимизация последующей импульсно-плазменной обработки покрытий .....	111
3.4. Оптимизация последующей лазерной обработки покрытий .....	119
3.5. Исследование и оптимизация режимов шлифования композиционного плазменного покрытия .....	129
<b>Глава 4. Механизм процессов формирования газотермических покрытий</b> .....	136
4.1. Формирование сцепления покрытия с основным материалом .....	136
4.2. Улучшение формирования покрытий при воздействии ультразвуком .....	142
	355

4.3. Формирование упрочненной структуры покрытий после импульсно-плазменной обработки . . . . .	147
4.4. Формирование упрочненной структуры покрытий после лазерной обработки . . . . .	154
<b>Глава 5. Моделирование процессов газотермического напыления покрытий . . . . .</b>	<b>159</b>
5.1. Математические основы для описания напряженно-деформированного состояния материалов при формировании покрытий . . . . .	159
5.2. Математические основы для описания тепловых процессов с учетом температурного расширения . . . . .	171
5.3. Моделирование движения и нагрева частиц порошка в плазменной струе . . . . .	175
5.4. Моделирование тепловых процессов и термических напряжений в системе покрытие – подложка . . . . .	186
5.5. Математическое описание растекания расплавленной частицы после соударения с твердой подложкой . . . . .	206
5.6. Моделирование размерного формообразования при нанесении покрытий . . . . .	222
5.7. Исследование и моделирование адгезионной прочности покрытий с учетом химических связей напыляемого материала . . . . .	238
<b>Глава 6. Моделирование процессов ультразвукового плазменного напыления . . . . .</b>	<b>247</b>
6.1. Предпосылки методического подхода . . . . .	247
6.2. Математическое описание процессов формирования объемной пористости покрытий при ультразвуковом напылении . . . . .	254
6.3. Математическое описание процессов формирования микрорельефа поверхности покрытий при ультразвуковом напылении. . . . .	261
<b>Глава 7. Моделирование процессов формирования аморфизированных структур при взаимодействии частицы расплава с твердой поверхностью при плазменном напылении . . . . .</b>	<b>268</b>
7.1. Математическое описание процессов формирования центров кристаллизации (аморфизации) в композиционных плазменных покрытиях . . . . .	268
7.2. Моделирование влияния на склонность к аморфизации соотношения между размерами атомов элементов покрытий . . . . .	273
7.3. Математическое описание перспектив аморфизации за счет процессов формирования полей температур и скоростей охлаждения из расплава распыленных плазмой композиционных частиц на подложке . . . . .	276

<b>Глава 8. Моделирование процессов последующей обработки газотермических покрытий</b> . . . . .	284
8.1. Математическое описание процессов передачи энергии импульса плазменной струи в покрытие . . . . .	284
8.2. Математическое описание процессов нагрева покрытия энергией импульса плазменной струи. . . . .	287
8.3. Моделирование процессов передачи напорного давления импульса плазменной струи в покрытие . . . . .	292
8.4. Моделирование деформационных процессов покрытия, обусловленных ударно-волновым воздействием напорного давления импульса плазмы . . . . .	295
8.5. Моделирование формирования покрытия при обработке напыленного материала импульсами лазерного луча, полученными в режиме свободной генерации . . . . .	302
8.6. Математическое описание процессов нагрева газотермического покрытия при его шлифовании . . . . .	309
<b>Глава 9. Исследования для создания базы экспериментальных данных для расчетных моделей</b> . . . . .	315
9.1. Анализ современных методик экспериментального исследования процессов формирования газотермических покрытий . . . . .	315
9.2. Исследование параметров прочности распыленных композиционных материалов . . . . .	324
9.3. Исследование параметров напряженного состояния в системе напыленная частица–подложка . . . . .	327
9.4. Исследование термофизических характеристик материалов газотермических покрытий . . . . .	330
9.5. Экспериментальное исследование параметров формирования элементов неравновесных аморфизированных структур композиционных плазменных покрытий. . . . .	335
<b>Литература</b> . . . . .	343