

К. Д. А. В.
5435

**КУЙБЫШЕВСКИЙ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
имени С. П. КОРОЛЕВА**

В. И. Богданович

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
МЕХАНИЗМЫ
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ
МЕТОДОВ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ
В ПРОИЗВОДСТВЕ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ**

КУЙБЫШЕВ

1990

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

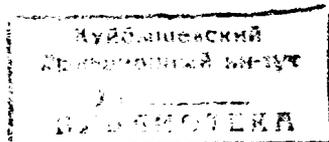
КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

КУАИГ
Б735

В. И. Богданович

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПРОИЗВОДСТВЕ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Учебное пособие



КУЙБЫШЕВ 1990

УДК 693.7

Физико-химические механизмы электрофизических методов, применяемых в производстве летательных аппаратов: Учеб. пособие / В. И. Богданович; Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1990. 54 с.

Излагаются физико-химические основы электрофизических методов обработки материалов, рассматривается структура, содержание и составляющие технологических методов, анализируется рабочий процесс и физико-химический механизм обработки.

Предназначено для студентов третьего и четвертого курсов, изучающих дисциплину «Физико-химические основы технологии».

Табл. 2. Ил. 21, Библиогр.: 5 назв.

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

Рецензенты: Б. И. Крамаровский, Г. Ф. Таран

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время все более широкое применение в машиностроении, в том числе и в производстве летательных аппаратов, находят электрофизические методы обработки материалов. Их используют для раскроя и прошивания материалов, снятия припуска, придания поверхности детали нужных механических и физико-химических свойств, а также нанесения покрытий. Особенно эффективным является применение электрофизических методов в сочетании с такими традиционными методами, как механическая, термическая и химико-термическая обработка.

В данном пособии, так же как и в пособии [1], основное внимание уделено рабочему процессу и физико-химическому механизму рассматриваемых технологических методов. Надо отметить, что некоторые из электрофизических методов не нашли отражения в пособии в связи с тем, что необходимый методический материал по этим технологическим методам был издан ранее на кафедре [2—4].

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Известно, что результатом электрофизической обработки является изменение формы, размеров или физико-химических свойств поверхности заготовки с применением электрических разрядов, электронного или оптического излучения, плазменной струи [1].

В связи с этим выделяют следующие способы обработки материалов: в электрических разрядах, лучевой и плазменный (табл. 1). В свою очередь, обработку в электрических разрядах подразделяют на электроэрозионную, электровзрывную, магнитно-импульсную и катодную (обработку в тлеющих разрядах). При такой обработке электромагнитная энергия вводится в зону обработки в неконцентрированном виде и возможность ее фокусирования практически отсутствует. К электрофизическим способам обработки с использованием концентрированных направленных потоков энергии относится светолучевой, электронно-лучевой, ионо-плазменный и плазменный. Сущность этих способов воздействия на материалы заключается в том, что энергия, переносимая концентрированным потоком, превращается в тепловую в зоне обработки. Однако конкретные виды обработки (см. табл. 1) различаются по способу подвода энергии и механизму ее преобразования в тепло. Кроме того, при воздействии электромагнитной энергии на материалы наблюдаются процессы нетермического происхождения, которые интенсифицируют превращения в материалах и открывают возможности для создания принципиально новых технологий.

Таблица I

Основные характеристики электрофизических методов

Способ обработки	Вид обработки	Технологическая среда	Основной физико-химический механизм обработки	Типичные технологические операции
В электрических разрядах	Электроэрозионная	Диэлектрическая жидкость	Эрозия в разрядах	Резание, прошивание, упрочнение
	В тлеющих разрядах	Газ при низком давлении	Распыление, внедрение, диффузионное насыщение, конденсация	Упрочнение поверхности, нанесение покрытий
	Электроискровая	Жидкость, газ	Пластическое деформирование, разрушение	Штамповка, упрочнение, нанесение покрытий
Лучевой	Магнитно-импульсная	Воздух	Пластическое деформирование, разрушение	Штамповка, обрезка, сварка
	Светолучевая (лазерная)	Воздух, жидкость, вакуум	Нагрев, плавление, испарение, конденсация	Резание, упрочнение, термообработка, нанесение покрытий
	Электроно-лучевая Ионно-лучевая Ионно-плазменная	Вакуум, газ при низком давлении То же То же	То же	То же
Плазменный		Воздух, контролируемая атмосфера	Нагрев, плавление, гидродинамический унос	Резание, упрочнение, нанесение покрытий

2. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

2.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Развитие электронной техники привело к созданию аппаратуры, позволяющей получать мощные электронные пучки, энергии которых достаточно для осуществления технологических процессов. В настоящее время электронно-лучевая технология сформировалась как самостоятельное, обладающее широкими технологическими возможностями, направление в области обработки материалов.

Электронный луч как технологический инструмент позволяет осуществить нагрев с целью упрочнения поверхностного слоя; термическую микро- и макрообработку; плавку; зонную очистку материалов; сварку, в том числе микросварку с очень малой зоной термического влияния и заварку глубоких трещин; кинжальное проплавление материала, характеризуемое отношением глубины шва к его ширине 10:1; испарение практически всех материалов; размерную обработку; нанесение покрытий; полимеризацию композитов без наведения в них термических и остаточных напряжений.

Электронно-лучевые установки мощностью до 30 кВт позволяют решить большинство сварочных задач для деталей из титана и алюминия толщиной от 0,5 до 50 мм, на которые падает основной объем сварочных работ. На диаграмме (рис. 1)

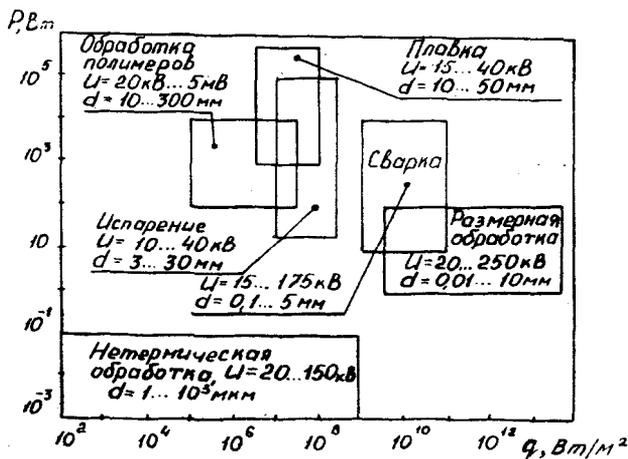


Рис. 1. Диапазоны параметров электронно-лучевых технологий

указаны мощности установок, плотности потоков энергии электронного пучка, ускоряющее напряжение U и диаметр пучка d в зоне обработки.

Надо отметить, что несмотря на широкие технологические возможности электронного луча как источника энергии, его использование не везде получило широкое применение. Причиной этого является прежде всего высокая стоимость оборудования, необходимость высокой квалификации обслуживающего персонала, сложность средств обеспечения безопасности. Кроме того, применение лазера позволяет решать аналогичные технологические задачи не в вакууме, а в атмосфере, что в ряде случаев значительно упрощает организацию процесса.

Однако проведение процесса в вакууме гарантирует стабильность свойств и высокое качество материалов после обработки. Кроме того, на высоте свыше 200 км над поверхностью Земли давление составляет около 10^{-4} Па, и становится возможным проведение электронно-лучевых процессов в естественных условиях. Такие эксперименты были проведены впервые в 1969 году на космическом корабле «Союз-6», а также в 1973 году на американской станции «Скайлэб». Эксперименты показали, что электронный луч можно рассматривать как один из основных инструментов для проведения технологических работ в космосе.

2.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Формирование электронного луча для технологических целей проходит следующие стадии: получение свободных электронов; ускорение и формирование электронного пучка; фокусировка электронного пучка; сканирование электронного пучка по заданной траектории.

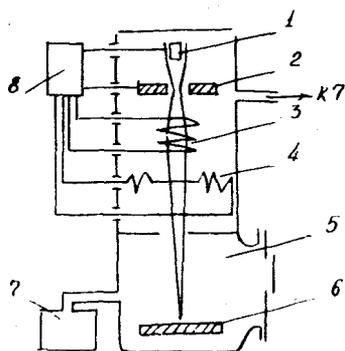


Рис. 2. Схема электронно-лучевой установки

Для формирования электронного луча используются специальные устройства — электронные пушки (рис. 2). Источником электронов в электронных пушках обычно является термоэмиссионный катод 1 из вольфрама, тантала или гексаборида лантана.

Явление термоэлектронной эмиссии основано на испускании

Электронів твердими нагрітими тїлами. Електрони в металлах розполагаються на визначених енергетических уровнях, займаючи при $T = 0$ все квантові стани з енергією не вище енергії Фермі. Причєм, величина енергії Фермі менше, чєм величина енергії покаящегося електрона вне твердого тїла. Різниця мєжду енергією покаящегося електрона вне твердого тїла и его енергією на уровне Фермі получила названіе *работы выхода электрона* из твердого тїла. Таким образом при $T = 0$ електрони в твердом тїле находятся внутри потенціальной ямы. При нагрєваніи металла електрони проводимости получают допільнительную енергію и переходят в квантові стани с бїлее высокой енергією. Как тїлько величина енергії, полученной електронем, достигаєт значєния, равного работе выхода, електрону становится енергетически бїлее выгодным покинуть твердое тїло. Чем выше температура твердого тїла, тем бїльшая часть електронів проводимости получает енергію, равную работе выхода, и тем бїльшая часть их покидаєт твердое тїло. Плотность тока термоэлектронной эмиссии определяется уравнєнием Ричардсона-Дїшмана

$$j = AT^2 \exp \{-e\phi / kT\},$$

где T — температура тїла, $e\phi$ — работа выхода електрона, k — постоянная Больцмана, $A = (3 \dots 12) 10^5 \text{ A/m}^2 \text{ K}^2$ — эмиссионная постоянная, зависящая от свойств материала и стана поверхности.

Из приведенного уравнєния видно, что для данного материала плотность тока термоэлектронів растет с ростом температуры тїла, а для тїл, нагрєтых до одной температуры, плотность тока бїльше у тех материалов, которые имеют меньшую работу выхода. Расчеты показывают, что для получения плотностей тока на катоде $(0.1 \dots 1.5) 10^{-4} \text{ A/m}^2$ необходимо нагрєть катод с работой выхода $e\phi \cong 4.3 \text{ эВ}$ до температур порядка $2400 \dots 2700 \text{ K}$ — поэтому для катодів применяют тугоплавкие материалы с высокой температурой плавления. Чем выше температура катода, тем меньше срок его службы. Так, вольфрамовые и молибденовые катоды имеют срок службы несколько десятков часов. Замена катода електронной пушки требует ее последующей регулировки и настройки, поэтому основные усилия разработчиков направлены на увеличение срока службы катода. В последние годы были разработаны катоды из гексаборида лантана LaB_6 и торированного вольфрама с работой выхода порядка 2.6 эВ , что позволило снизить рабочие температуры до $1600 \dots 2000 \text{ K}$ без снижения плотности тока и существенно увеличить срок службы катода.

На некотором расстоянии от катода находится анод 2 (см. рис. 2), выполненный в виде массивной детали с отверстием. Между катодом и анодом от специального высоковольтного источника питания, входящего в состав блока питания 8, прикладывается ускоряющее напряжение U от 15 до 150 кВ. В результате такого ускорения электроны приобретают кинетическую энергию $E_k = eU = 15...150$ кэВ и очень высокую скорость. Например, электроны, прошедшие разность потенциалов в 1 В, приобретают уже скорость $v = 593$ км/с.

Ускоренный электронный пучок, прошедший отверстие в аноде 2, попадает в фокусирующую систему 3, состоящую из диафрагм и магнитных линз. Магнитная линза представляет собой соленоид с магнитопроводом, создающий магнитное поле B , которое при взаимодействии с движущимся электроном смещает его траекторию в направлении оси системы. Сфокусированный электронный луч в промышленных технологических установках может иметь минимальный диаметр фокального пятна до 0,01 мм и плотность энергии до 10^{12} Вт/м².

В конструкцию электронной пушки входит также отклоняющая система 4, служащая для перемещения электронного луча по обрабатываемой поверхности. Перемещение луча осуществляется за счет его взаимодействия с поперечным магнитным полем.

В рабочем пространстве электронной пушки необходим высокий вакуум, чтобы молекулы остаточных газов не препятствовали свободному прохождению электронов. Кроме того, условия работы подогреваемого катода также требуют его защиты от взаимодействия с атмосферными газами. Обычно давление в камере электронной пушки не превышает $10^{-3}...10^{-4}$ Па. При ухудшении вакуума происходит пробой между катодом и анодом пушки, что может привести к выходу из строя высоковольтного выпрямителя.

Электронная пушка обычно выполняется в виде функционального блока, который или неподвижно крепится к рабочей камере 5, или перемещается внутри ее с помощью специальных механизмов. Обрабатываемая заготовка 6 помещается в рабочую камеру 5, снабженную иллюминатором для наблюдения за процессом обработки. Откачка рабочей камеры производится системой вакуумных насосов 7.

2.3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ВЕЩЕСТВОМ

В основе физико-химического механизма электронно-лучевой обработки материалов лежат процессы взаимодействия электронов луча с веществом. Интенсивность этих процессов опреде-

ляется энергией электрона, а реализуемый механизм обработки зависит от плотности потока энергии электронного луча. В связи с тем, что основным параметром электронно-лучевых установок является мощность потока энергии электронного луча $P = U \cdot I$, а механизм обработки определяется плотностью потока энергии электронного луча $q = dP/dS$, удобно представить технологические процессы на диаграмме с осями P и q (см. рис. 1). Там же приведены значения ускоряющих напряжений U и величина диаметра пучка в зоне обработки.

Электронный луч представляет собой поток электронов, имеющих неравномерное распределение плотности тока и энергии по радиусу луча и также неравномерное распределение электронов по энергиям.

Исследованиями установлено, что плотность тока $j(r)$ и плотность потока энергии сфокусированного электронного луча в зависимости от радиуса близки к нормальному распределению:

$$\begin{aligned} j(r) &= j_0 \exp(-kr^2), \\ q(r) &= q_0 \exp(-k_q r^2), \end{aligned}$$

где j_0 и q_0 — максимальные значения плотности тока и плотности потока энергии на оси луча соответственно; k и k_q — коэффициенты сосредоточенности электронного луча, характеризующие вид распределения. С ростом k и k_q распределение становится более узким, и степень концентрации тока и энергии в луче возрастает.

В связи со сложностью распределения электронов по энергиям обычно в качестве характеристики энергии электрона используют ее среднее значение.

При прохождении электронного пучка через газовую среду пучок рассеивается, и распределение плотности тока в зависимости от пройденного расстояния x описывается экспоненциальной зависимостью $j(x) = j_0 \exp(-\alpha \rho x)$, где j_0 — плотность тока при $x = 0$, ρ — плотность газа, α — коэффициент поглощения. Коэффициент поглощения зависит от энергии электрона E и в диапазоне энергий от 20 до 200 кэВ определяется соотношением $\alpha(E) = 2,4 \cdot 10^5 E^{-2}$, где E выражено в электровольтах, а α в метрах квадратных на килограмм.

Электронный луч, попадая на поверхность изделия, частично отражается, а другая его часть проходит внутрь объема изделия, вызывая нагрев материала. Доля отраженных электронов может достигать 40% и увеличивается при отклонении оси пучка от нормали к поверхности — поэтому обработку всегда целесообразно вести лучом, перпендикулярным поверхности.

При прохождении электронов с относительно малыми энер-

гиями ($E \sim 100$ кэВ) через вещество имеет место их упругое и неупругое рассеяние. Упругое рассеяние электронов происходит при их столкновении с ядрами атомов. При этом энергия налетающего электрона и энергия атомного ядра практически не изменяются, а изменяется лишь направление движения электрона. Неупругое взаимодействие электронов пучка происходит с электронами атомов кристаллической решетки, которое приводит к потере энергии электрона пучка, его рассеянию и возбуждению (ионизации) атома вещества. Часть энергии электрона при его прохождении через твердое тело теряется на возбуждение колебаний решетки, т. е. идет на образование фононов. Однако потери на электронно-фононные воздействия на три—четыре порядка ниже ионизационных и ими можно пренебречь.

Таким образом, практически вся энергия быстрого электрона передается электронам твердого тела, а не его атомам. Вследствие большой разницы между массами электронов и ядер вначале наступает термодинамическое равновесие внутри электронной подсистемы и лишь затем вступают в действие процессы, ведущие к выравниванию температур между электронной и ионной подсистемами. Следовательно, при взаимодействии электронного пучка с металлом существует промежуток времени, в котором электроны металла нагреты и имеют высокую температуру, а ионы кристаллической решетки еще холодные. Поскольку время, за которое электрон передает свою кинетическую энергию среде за счет электрон-электронных взаимодействий ($\tau_{ee} \sim 10^{-12} \dots 10^{-14}$ с), много меньше характерного времени нагрева ионной подсистемы, связанного электрон-решеточным взаимодействием ($\tau_{ei} \sim 10^{-10}$ с), налетающий электрон в тепловых задачах можно рассматривать как мгновенный источник тепла.

Надо отметить, что возбужденные атомы вещества, переходя в основное энергетическое состояние, испускают тормозное рентгеновское излучение. Хотя доля энергии излучения в энергетическом балансе невелика, в целях безопасности обслуживающего персонала принимают специальные меры.

Электроны пучка, внедряясь в вещество, тормозятся и, пройдя некоторое расстояние, полностью теряют свою кинетическую энергию. Максимальная глубина проникновения электрона в вещество (путь, на котором электрон теряет свою первоначальную энергию) описывается соотношениями

$$\delta = 2,35 \cdot 10^{-11} (U^2/\rho), \quad (10 \text{ кВ} \leq U \leq 100 \text{ кВ}),$$

$$\delta = 6,67 \cdot 10^{-10} (U^{5/3}/\rho), \quad (100 \text{ кВ} \leq U \leq 1 \text{ МВ}),$$

где U — ускоряющее напряжение, ρ — плотность вещества.

Например, для стали ($\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) при размерной обработке ($U = 100 \text{ кВ}$) $\delta = 27 \text{ мкм}$. Следовательно, энергия электронного пучка выделяется в очень тонком поверхностном слое. При отверждении полимерных композиций (см. рис. 1) используются более высокие энергии электронов при гораздо меньшей плотности потока q . В этом случае, например для полиэтилена ($\rho = 0,94 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) и $U = 1 \text{ МэВ}$, получаем $\delta = 7 \text{ мм}$.

Однако электрон, попадая в вещество, движется не по прямой вглубь материала, а рассеивается во все стороны (рис. 3). Поэтому мощность, поглощаемая единицей объема вещества, является функцией расстояния от поверхности. Исследованиями установлено, что на расстоянии h от поверхности, примерно равном $\delta/3$, поглощаемая мощность достигает максимума и затем спадает до нуля на расстоянии, равном δ .

На рис. 4 (кривая 2), показано распределение удельной объемной мощности тепловой энергии, выделяемой пучком, в зависимости от расстояния от поверхности. Кривая 1 соответст-

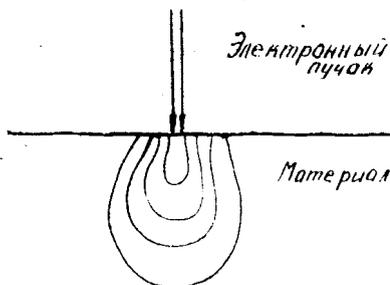


Рис. 3. Область рассеивания электронных пучков с различной энергией

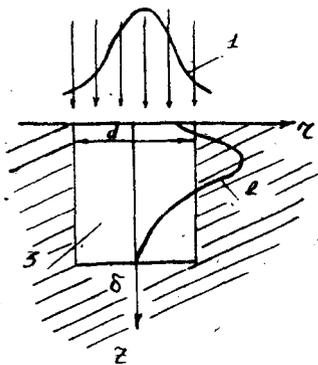


Рис. 4. Схема теплового источника

ует распределению поверхностной плотности теплового потока в зависимости от расстояния r .

Часто для анализа технологических процессов используют усредненные энергетические характеристики. Мощность пучка определяется как $P = UI$, где U — ускоряющая разность потенциалов, I — ток пучка. Поверхностная плотность теплового потока определяется соотношениями

$$q = \frac{P}{S} = \frac{4 UI}{\pi d^2} = Uj,$$

где S — площадь поперечного сечения пучка, d — ее диаметр,

j — плотность тока электронов. Удельная объемная мощность тепловой энергии, выделяемая пучком в объеме δ (см. рис. 4), описывается выражением

$$q_V = \frac{P}{V} = \frac{UI}{S\delta} = \frac{Uj}{\delta}$$

Используя соотношение для δ , получаем

$$q_V = \frac{10^{11}}{2,35} \cdot \frac{j\rho}{U}$$

Следовательно, хотя с ростом U полная мощность энергии, выделяемой в веществе, растет, мощность же энергии, выделяемой в единице объема в диапазоне от 10 кВ до 100 кэВ, уменьшается за счет увеличения объема, в котором выделяется эта мощность.

В зависимости от параметров электронного луча зона обработки материала может иметь различный вид (рис. 5). При невысокой величине q зона проплавления имеет вид (1). Этот режим обработки получил название «мягкого». С ростом q зона обработки изменяется (2) и при больших величинах наблюдается «кинжальное» проплавление (3). При кинжальном про-

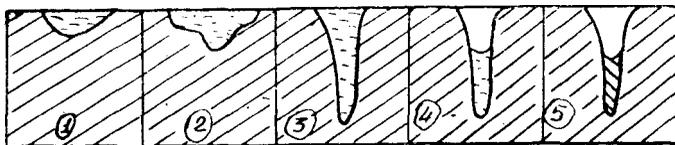


Рис. 5. Схематическое изображение поперечных сечений зон обработки

плавлении материал не только испаряется, но и наблюдается вскипание материала и его выброс (4) с образованием отверстия (5). Формирование отверстия в обрабатываемом материале объясняется закономерностями взаимодействия луча с веществом. Например, при $U = 20$ кВ и удельной поверхностной энергии пучка $q = 10^{10}$ Вт/м² за время $\tau = 10^{-5}$... 10^{-6} с в поверхностных слоях различных материалов развиваются следующие температуры [5] (в скобках указаны температуры кипения, К); алюминий (2593)...4423; титан (3773)...5313; сталь (3323)...5373; вольфрам (5673)...15873.

Таким образом, в основе физико-химического механизма размерной электронно-лучевой обработки лежит сьем материала за счет его испарения и взрывного вскипания, а в основе механизма термообработки и сварки лежат процессы нагрева и

плавления материала. Однако в технологии используются не только термические процессы, протекающие при выделении энергии электронного луча в веществе, а также и нетермические. Как уже отмечалось, при взаимодействии электронных пучков с веществом происходит возбуждение и ионизация атомов и молекул. Следствием этих процессов являются химические реакции с нетермической активацией образования химических соединений. Эти реакции начинаются с возбуждения атомов в молекулах полимеров и образования свободных радикалов, которые затем, вступая во взаимодействие между собой, приводят к полимеризации, сополимеризации, образованию пространственных полимеров. При этом повышается механическая прочность, термостойкость, улучшается поведение полимеров при усадке, а в композиционных полимерных материалах существенно снижаются термические и остаточные напряжения, возникающие при их отверждении. В последние годы такие процессы находят все более широкое применение в технологии получения пластмасс, пресс-материалов и композитов с полимерным связующим.

3. ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

3.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИХРОМАТИЧЕСКИХ И ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Обычное световое излучение (полихроматический свет) состоит из набора электромагнитных волн с частотами, лежащими в диапазоне видимой части спектра. Излучение возникает при переходе электронов в атоме или молекуле к более энергетическим квантовым состояниям в менее энергетические. При таком переходе электрона система излучает фотон (квант электромагнитной волны) с энергией $\varepsilon = h\nu$, где h — постоянная Планка, ν — частота излучения. Возбуждение атомов, т. е. перевод его электронов из стационарного квантового состояния в состояние, характеризующееся большей энергией, можно проводить различными способами. Наиболее широко известным способом является нагрев тела.

Большинство твердых и жидких тел имеют сплошные спектры излучения (поглощения), т. е. излучают (поглощают) энергию всех длин волн. К твердым телам, имеющим сплошной спектр, относятся диэлектрики, полупроводники и металлы с окисленной шероховатой поверхностью. Металлы с полированной поверхностью и молекулярные газы имеют полосатый

спектр, а атомарные газы — линейчатый. Интенсивность излучения зависит от природы тела, его температуры, длины волны, состояния поверхности, а для газов — еще от толщины слоя и давления. С увеличением температуры тела энергия излучения увеличивается и изменяется спектральный состав излучения. Максимум энергии излучения с повышением температуры перемещается в более коротковолновую область. Для сплошного спектра серого тела плотность потока энергии с учетом всех длин волн излучения (интегральная плотность потока излучения) определяется законом Стефана-Больцмана $q = \epsilon \sigma T^4$, где σ — постоянная Стефана-Больцмана, ϵ — коэффициент теплового излучения, T — температура тела. Коэффициент теплового излучения ϵ изменяется от 0 до 1 и зависит от природы тела, температуры, состояния поверхности и в большинстве случаев определяется экспериментально.

Применение световой энергии для технологических процессов требует фокусировки светового луча. Фокусировка светового луча ограничивается полихроматичностью света, хроматической абберацией, дифракционными явлениями и конечными размерами светящегося тела. Например, система линз диаметром 75...120 мм обычно не позволяет получить в фокусе пятно диаметром менее 1 мм, а сферическое зеркало диаметром 1 м фокусирует солнечные лучи в пятно диаметром не менее 20 мм. В результате максимальная плотность энергии в пятне нагрева не превышает 10^7 Вт/м².

В промышленности используют световую энергию специальных высокоинтенсивных источников света в виде ламп накаливания или дуговых газоразрядных ламп для сушки и термообработки изделий, пайки, сварки материалов. Принципиально новые возможности для использования светового излучения в технологии появились с созданием лазеров — оптических квантовых генераторов (ОКГ). Работа ОКГ основана на индуцированном (вынужденном) излучении возбужденного атома под действием внешнего электромагнитного поля. Основной особенностью излучения лазера является то, что оно является монохроматичным и когерентным.

Любой ОКГ независимо от конструктивного выполнения содержит следующие основные элементы: рабочее тело, состоящее из «ансамбля» атомов и молекул, для которых может быть создана инверсия населенности уровня; система, позволяющая осуществить инверсию (система накачки); оптический резонатор, который служит для осуществления взаимодействия излучения с рабочим веществом и в котором происходит отбор энергии от генерирующих частиц; устройство для вывода энергии из резонатора; система управления концентрацией энергии и пространственным положением пучка.

Для создания инверсии населенности в ОКГ применяют следующие виды накачки: *оптическую*, осуществляемую за счет облучения вещества мощным световым потоком; *электрическую*, осуществляемую при прохождении через вещество электрического тока; *химическую*, осуществляемую за счет химической реакции, в которой принимает участие рабочее вещество.

В зависимости от режима работы ОКГ делятся на устройства, работающие в непрерывном и импульсно-периодическом режимах. По типу применяемого рабочего вещества различают твердотельные, газовые, жидкостные и полупроводниковые генераторы. В твердотельных ОКГ в качестве рабочего вещества используют твердые тела (синтетический рубин, иттриево-алюминиевый гранат, неодимовое стекло).

Синтетический рубин представляет собой искусственно выращенный кристалл оксида алюминия Al_2O_3 , в который введены и равномерно распределены по объему атомы хрома в количестве 0,05% массы кристалла. Примесь хрома придает рубину характерный розово-красный цвет. Атомы хрома в кристалле рубина являются оптически активными элементами и генерируют когерентное излучение в видимой части спектра с длиной волны $\lambda = 0,6943$ мкм (красный цвет).

Иттриево-алюминиевый гранат — синтетический кристалл, который в качестве оптически активных атомов содержит примеси неодима, хрома, туллия и гольмия. В зависимости от природы примеси он генерирует излучение в инфракрасной области с длинами волн 1,06 мкм, 2,0132 мкм и 2,123 мкм.

Неодимовое стекло представляет собой аморфное стекло, в котором равномерно распределены атомы неодима. ОКГ на неодимовом стекле генерирует излучение с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм.

Схема твердотельного ОКГ приведена на рис. 6. Стержень 2, изготовленный из рабочего вещества, помещается между двумя зеркалами 1, 4. Зеркало 1 полностью отражает все падающие на него лучи, а зеркало 4 является полупрозрачным. Для накачки энергии используется газоразрядная лампа 3, которая для большей эффективности облучения кристалла помещается вместе с ним внутри отражающего кожуха 5 с поперечным сечением в форме эллипса. Питание лампы-вспышки обычно осуществляется от специальной высоковольтной батареи конденсаторов 6.

При разряде батареи конденсаторов лампа дает интенсивную вспышку полихроматического света. Световое излучение воздействует на активные атомы оптического резонатора, которые, поглощая энергию накачки, возбуждаются и затем при

переходе на низшие энергетические уровни генерируют собственное излучение.

Для рубинового ОКГ схема энергетических уровней хрома в оксиде алюминия приведена на рис. 7. При оптической накачке происходит поглощение зеленого и голубого цветов в до-

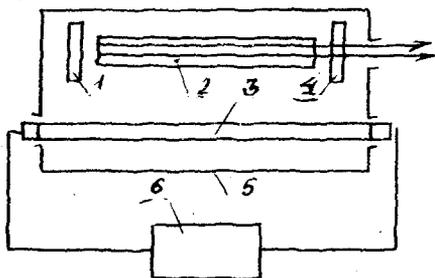


Рис. 6. Схема твердотельного ОКГ

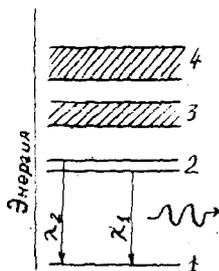


Рис. 7. Схема энергетических уровней рубинового лазера

вольно широкой полосе частот на уровнях 3 и 4 и последующий переход возбужденных атомов в более низкое энергетическое состояние на уровень 2. Время жизни уровней 3 и 4 значительно меньше времени жизни уровня 2, поэтому все атомы хрома после возбуждения задерживаются некоторое время ($\sim 3 \cdot 10^{-3}$ с) на метастабильном уровне 2, что обеспечивает инверсию населенностей между уровнями 1 и 2. При переходе с уровня 2 на стабильный уровень 1 происходит генерация когерентного излучения в видимой красной части спектра с длинами волн $\lambda_1 = 0,6929$ мкм и $\lambda_2 = 0,6943$ мкм. Такая схема генерации получила название трехуровневой.

Начавшееся в рабочем теле ОКГ излучение распространяется по всему объему стержня-резонатора и из-за многократного отражения от зеркал вовлекает в процесс генерации когерентного излучения все оптически активные атомы. Часть когерентного излучения выходит через полупрозрачное зеркало из резонатора. Диаметр светового пучка примерно равен диаметру резонатора.

Генерация излучения твердотельным ОКГ будет длиться при облучении его лампой-вспышкой до тех пор, пока мощность энергии накачки не станет меньше порогового значения, необходимого для поддержания генерации (рис. 8). Излучение ОКГ имеет сложную структуру, а интенсивность излучения состоит

из множества отдельных импульсов длительностью до 10^{-6} с с интервалами $3 \cdot 10^{-6} \dots 3 \cdot 10^{-5}$ с.

Для рубина поглощающая кристаллом мощность накачки составляет примерно 2 кВт на 1 см^3 объема кристалла. Коэффициент использования световой энергии лампы-вспышки составляет 10...15%. Суммарная мощность ОКГ при энергии

импульса лампы до нескольких десятков джоулей и частоте их повторения до нескольких десятков герц может достигать десятков киловатт при длине стержня 200...250 мм и его диаметре 15 мм.

Значительная часть мощности лампы-вспышки превращается в теплоту и идет на нагрев рабочего тела. При нагреве рабочего тела изменяются энергетические уровни активных атомов, и по достижении некоторой предельной температуры генерация когерентного излучения прекращается. Кроме того, нагрев стержня приводит к возникновению в нем термических напряжений, из-за чего может произойти его разрушение. Поэтому в большинстве конструкций твердотельных ОКГ предусматривается охлаждение рабочего тела.

Лазеры с рабочим телом на неодимовом стекле получили более широкое распространение благодаря высокой технологичности их изготовления. В связи с тем, что неодимовое стекло имеет меньшую, чем рубин, теплопроводность, ОКГ на неодимовом стекле требуют эффективных систем охлаждения. Наиболее высокой удельной мощностью излучения обладают иттриво-алюминиевые генераторы, которые могут работать как в импульсно-периодическом, так и непрерывном излучении.

В газовых ОКГ в качестве рабочего тела используются газообразные вещества, причем накачка, как правило, осуществляется за счет эффектов, связанных с прохождением электрического тока через газ. В качестве активных газов в ОКГ применяют аргон, неон, криптон, ксенон, смеси гелия и неона, углекислый газ с примесью азота и гелия. Газовые ОКГ подразделяют на лазеры, работающие на атомных, ионных и молекулярных переходах.

Наибольшую мощность и КПД имеют газовые ОКГ, генерирующие колебания на молекулярных переходах. К этой группе относятся ОКГ, изготовленные на основе углекислого газа. Такие лазеры позволяют развивать в непрерывном режиме мощность до 50 кВт.

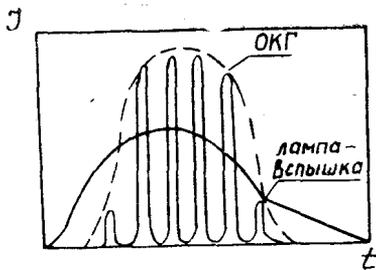


Рис. 8. Интенсивность излучения ОКГ в зависимости от времени действия лампы-вспышки

3.2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ОКГ С ВЕЩЕСТВОМ

При воздействии луча ОКГ на поверхность вещества часть энергии луча поглощается поверхностью, а другая часть отражается. Доля отраженной энергии зависит от длины волны излучения и состояния поверхности вещества. В табл. 2 приведены значения коэффициентов отражения для неокисленных полированных поверхностей различных материалов. Как видно, значительная доля светового потока отражается от поверхности, и КПД передачи энергии потоком света значительно меньше, чем КПД передачи энергии электронным лучом.

Для поверхностей, покрытых окислами и имеющих большую шероховатость, значение коэффициента отражения уменьшается. Можно добиться того, что от 20 до 40% энергии светового потока будет поглощено веществом. Еще большего поглощения энергии можно добиться нанесением на поверхность веществ с малыми коэффициентами отражения (сажа, краска). В этом случае, однако, возможно взаимодействие нанесенного вещества с основным материалом, что не всегда допустимо.

Т а б л и ц а 2

*Коэффициенты отражения лазерного излучения
чистой поверхностью металла*

Рабочее тело ОКГ, длина волны, мкм	Ag	Cu	Al	Cr	Fe	Ni
Аргон, $\lambda=0,488$	0,952	0,437	—	—	—	0,597
Рубин, $\lambda=0,6943$	0,961	0,831	—	0,555	0,575	0,676
Неодимовое стекло $\lambda=1,06$	0,964	0,901	0,733	0,570	0,650	0,741
Углекислый газ, $\lambda=10,6$	0,989	0,984	0,970	0,930	0,924	0,941

Исследованиями установлено, что при прохождении света через вещество интенсивность светового потока (плотность потока энергии) убывает по экспоненциальному закону

$$q = q_0 \exp(-\kappa l),$$

где q_0 — плотность потока энергии на входе в поглощающий слой, l — толщина поглощающего слоя, κ — коэффициент поглощения. Это соотношение носит название закона Бугера.

Коэффициент поглощения κ зависит от длины волны падающего излучения и свойств поглощающего вещества. У веществ, атомы которых практически не взаимодействуют друг с другом (газы и пары металлов при невысоком давлении), коэффициент поглощения для большинства волн близок к нулю и лишь для

Узких спектральных областей обнаруживает резкие максимумы (линейчатые спектры поглощения). Газы при высоких давлениях, а также жидкости и твердые тела дают широкие полосы поглощения (полосатые и сплошные спектры поглощения). Наличие спектров поглощения объясняется взаимодействием фотонов с электронами атомов. У изолированных атомов энергетические уровни вырожденные, поэтому электрон может взаимодействовать только с фотоном определенной энергии, соответствующей определенной длине волны падающего света. У взаимодействующих атомов вырождение энергетических уровней снижается и энергетические уровни трансформируются в энергетические зоны, которым и соответствуют сплошные участки спектров. Так, у металлов всегда существуют электроны в энергетической зоне проводимости, поэтому они практически непрозрачны для света. Для металлов коэффициент поглощения имеет величину более 10^6 м^{-1} , т. е. плотность потока энергии света уменьшается в e раз на глубине менее 1 мкм. Для сравнения укажем, что у стекла (диэлектрик) $k \approx 1 \text{ м}^{-1}$.

В металле энергия световых квантов передается электронам проводимости, в результате чего температура электронного газа в металле растет, а температура решетки остается практически неизменной. Это связано с тем, что выравнивание температуры газа электронов происходит за время порядка $10^{-13} \dots 10^{-14} \text{ с}$, а выравнивание температур электронного газа и решетки происходит за время около 10^{-11} с . Расчеты показывают, что, например, при плотности потока тепловой энергии $q = 10^{14} \text{ Вт/м}^2$, длительности импульса излучения $\tau = 1 \text{ мс}$ максимальная разность температур между электронной и ионной подсистемами составляет не более одного градуса. В то же время при $q = 10^{17} \text{ Вт/м}^2$ и $\tau = 10^{-8} \text{ с}$ эта разность температур достигает двух тысяч градусов. Обычно в технологических процессах лазерной обработки параметры q и τ такие, что разницей температур можно пренебречь и рассматривать поток фотонов как источник теплоты, выделенной в очень узком поверхностном слое.

Большинство технологических процессов с применением излучения ОКГ основывается на тепловом воздействии лазерного излучения на непрозрачные среды. Процесс взаимодействия излучения лазера с веществом достаточно хорошо изучен и в широком диапазоне плотностей потоков (вплоть до 10^{17} Вт/м^2) удовлетворительно описывается тепловой моделью. Согласно этой модели в воздействии луча лазера на непрозрачные среды условно можно выделить несколько характерных стадий:

поглощение светового потока и передача его энергии тепловым колебаниям решетки;
 нагревание вещества без его разрушения;
 развитие испарения вещества в зоне воздействия луча лазера и разлет продуктов разрушения;
 остывание вещества после окончания действия лазерного излучения.

Процесс формирования лунки в материале под действием лазерного излучения приведен на рис. 9. Излучение с небольшой плотностью энергии вызывает лишь проплавление поверхностного слоя материала незначительной глубины (рис. 9,а). При

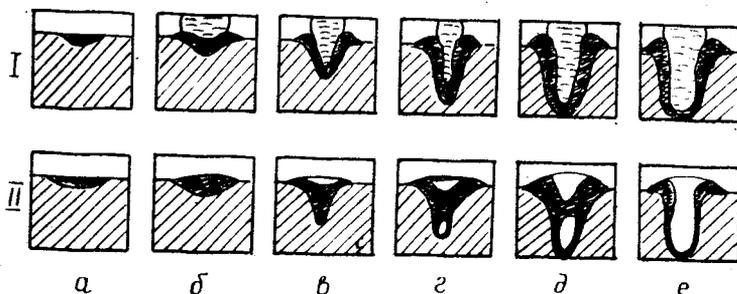


Рис. 9. Влияние изменения плотности потока энергии излучения на профиль лунки в течение времени облучения (I) и после окончания процесса (II)

большей плотности потока начинается испарение материала в центре фокального пятна (где температура выше) и под действием избыточного давления образующихся паров происходит искривление границы расплава так, как показано на рис. 9,б. Еще большие плотности потока вызывают существенный рост лунки в глубину и по диаметру вследствие испарения и вытеснения расплава из зоны воздействия (рис. 9,в—е). Не успевший остыть расплав после окончания импульса стекает в лунку и после кристаллизации образует зону переплавленного металла. При больших плотностях потока возможно неполное заплывание лунки после остывания (рис. 9,г,д). Исследованиями установлено, что только при плотностях потока выше $5 \cdot 10^{15}$ Вт/м² получается лунка без заплывания жидким расплавом (см. рис. 9,е). Таким образом, дно лунки при лазерной обработке формируется в основном за счет испарения, а боковые стенки за счет плавления материала и вытекания жидкости при избыточном давлении паров в полости отверстия. Геометрическая форма отверстия существенно зависит от места расположения

фокального пятна относительно поверхности детали. На рис. 10 показаны различные формы отверстия при изменении фокусировки (фокус лазерного луча расположен вдоль линии 1).

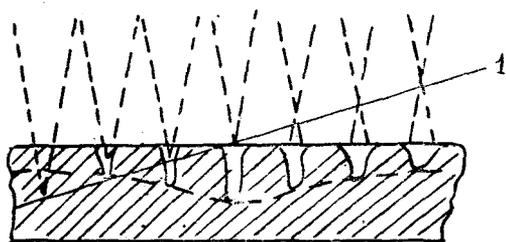


Рис. 10. Геометрические размеры лунки проплавления в зависимости от места расположения фокального пятна относительно поверхности детали

Одновременно с указанными стадиями проходят диффузионные и химические процессы, а также фазовые превращения, оказывающие существенное влияние на характер воздействия излучения на материал.

Исследованиями установлено, что в зависимости от вида материала и параметров облучения, даже если не наблюдается оплавление поверхности, происходит изменение микротвердости материала по глубине. Типичные кривые распределения микротвердости по толщине материала для двух плотностей потока показаны на рис. 11,а и 11,б.

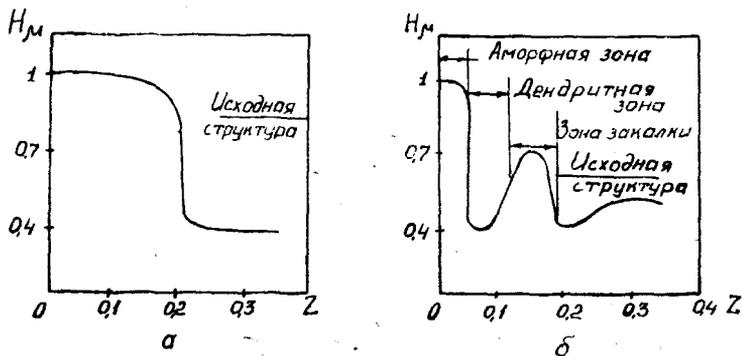


Рис. 11. Распределение микротвердости материала по глубине для двух значений плотности потока энергии

Надо отметить, что при повышении плотности потока энергии луча до максимально достижимого уровня (примерно 10^{17} Вт/м²) для некоторых веществ возможно сублимационное испарение, т. е. переход из твердого состояния сразу в парообразное. Кроме того, при этих плотностях энергии в фокальном пятне луча ОКГ может возникнуть «лазерная искра», связанная с образованием в зоне обработки плазмы паров металла. Неравномерность распределения по объему плазмы заряженных частиц приводит к электрическому пробое, сопровождающемуся яркой вспышкой. В ряде случаев «лазерная искра» нарушает ход технологического процесса.

3.3. ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Первоначально когерентное излучение ОКГ рассматривалось в технике как средство для получения и передачи информации. Мощность излучения, используемая для этих целей, невелика—от нескольких милливольт до нескольких ватт. В этом случае применяют маломощные газовые, твердотельные или полупроводниковые ОКГ сравнительно небольших размеров.

Перспективы технологического применения лазерного излучения привели к созданию ОКГ (в основном газовых и твердотельных, имеющих мощность непрерывного излучения до сотен киловатт и энергию отдельного импульса до нескольких сотен джоулей. Хотя эти системы имеют большие габариты, потребляют значительную мощность, сложны в изготовлении, использование ОКГ дает целый ряд технологических преимуществ, что и определяет их широкое применение.

К таким преимуществам относятся следующие:

1. Энергию в виде светового луча можно передавать на расстояния через прозрачные среды или по специальному волноводу.

2. Технологический процесс можно вести в любой оптически прозрачной среде.

3. Метод обработки является бесконтактным.

4. Концентрацию энергии в зоне обработки можно плавно изменять в широких пределах (вплоть до 10^{17} Вт/м²).

5. Размеры зоны обработки можно изменять плавно в широких пределах. Минимальные размеры зоны обработки могут достигать 5 мкм.

6. Обработку можно вести как в импульсном режиме (вплоть до 10^{-9} с), так и в непрерывном.

Методы лазерной обработки образуют группы, основанные на нагреве, плавлении и ударном нагружении материала. Каж-

дая из этих групп характеризуется своим диапазоном плотности потока энергии лазерного луча и диапазоном времени его воздействия (рис. 12).

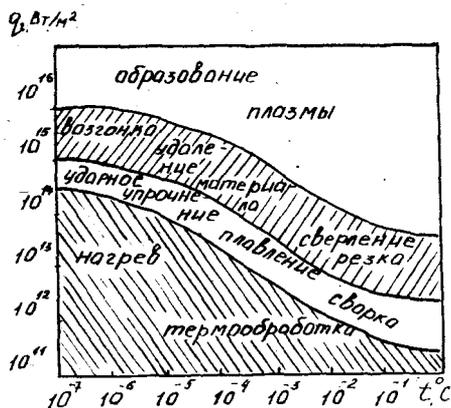


Рис. 12. Диаграмма параметров лазерных технологий

В настоящее время лазерную технику применяют для термообработки, локального плавления и переплава, сварки, резки и размерной обработки материала. Нагрев излучением ОКГ можно проводить в широком диапазоне температур и удельных тепловых потоков. При этом круг возможностей ОКГ шире, чем у электронного луча. Однако специфика самого процесса получения когерентного излучения и сложность мощных ОКГ привели к тому, что использование лазеров для энергоемких процессов, например, плавки, не получило распространения. В таких случаях в основном применяют более простые по оборудованию электронно-лучевой и плазменный методы, имеющие, кроме того, более высокие КПД.

Поверхностную термообработку с использованием ОКГ можно проводить для отдельных зон поверхности с последующим их охлаждением с помощью практически любых охлаждающих сред. По сравнению с закалкой токами высокой частоты здесь не требуется изготавливать для каждого изделия специальный индуктор.

Локальный переплав поверхностных слоев обрабатываемого материала осуществляется с целью повышения их эксплуатационных характеристик. Нагрев излучением ОКГ до плавления и затем быстрое охлаждение и кристаллизация небольших объе-

мов металла приводит к образованию структур, которые в обычных условиях получить нельзя.

Лазерная сварка как технологический процесс, связанный с локальным плавлением, находит все более широкое применение, конкурируя как с традиционными способами сварки, так и с электронно-лучевой сваркой. Особенно эффективна лазерная сварка в тех случаях, когда важно получить шов с минимальной зоной термического влияния. Экспериментально установлено, что для стали толщиной 5 мм требуется 1 кВт мощности излучения на 1 мм глубины проплавления. При большей толщине свариваемых кромок зависимость мощности от глубины проплавления становится нелинейной, а для сварки деталей толщиной более 20 мм требуется ОКГ, потребляющий сотни киловатт. В этом случае электронно-лучевая сварка имеет преимущества и позволяет сваривать за один проход кромок значительно большей толщины (до 200 мм) при меньшей потребляемой мощности.

Резка и размерная обработка с использованием излучения ОКГ является наиболее распространенной в промышленности группой технологических процессов, основанных на применении энергии когерентных потоков. Резка материалов может быть основана на локальном плавлении материала и его дальнейшем удалении под действием силы тяжести, конвективного потока или струи газа. Эффективность резки может быть значительно повышена за счет введения в зону обработки кислорода. Экзотермическая реакция между разрезаемым материалом и кислородом значительно увеличивает выделение энергии в зоне обработки. Максимальная толщина заготовок при такой газолазерной резке ОКГ непрерывного действия на CO_2 мощностью 5 кВт составляет 10 мм, 6 мм, 5 мм и 10 мм для низкоуглеродистых сталей, легированных сталей, никелевых и титановых сплавов соответственно.

Получение отдельных отверстий и каналов осуществляется чаще всего с помощью импульсных твердотельных ОКГ за один или несколько импульсов. По сравнению с механической обработкой лазерное прошивание обладает следующими преимуществами: можно обрабатывать любые материалы, можно получать отверстия малых диаметров ($d < 0,1$ мм) с большим отношением глубины к диаметру, отсутствует механический силовой контакт между инструментом и материалом, можно получать отверстия, ось которых наклонена под углом к обрабатываемой поверхности, увеличивается точность расположения осей отверстий на обрабатываемой заготовке благодаря высокой точности систем наводки луча. В связи с этими преимуществами лазерная обработка находит широкое применение для рас-

кроя различных материалов по специальным программам для ЭВМ, встроенных в обрабатывающую систему.

Съем материала за счет его испарения излучением ОКГ применяют при различных доводочных и балансировочных работах. При балансировке роторов высокоскоростных двигателей, гироскопов и других вращающихся деталей импульсное излучение ОКГ используется для съема материала непосредственно на вращающемся изделии, что значительно ускоряет процесс балансировки и повышает его точность.

4. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

4.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫХ МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) основана на явлении электрической эрозии, т. е. разрушении контактов двух электродов под действием электрических разрядов. В частности, такие разряды (искровые и дуговые) возникают при разрыве контактов в электрической цепи. В зависимости от вида разряда ЭЭО имеет два режима — электроискровой и электроимпульсный (электродуговой). Различие этих режимов связано с длительностью времени поддержания разряда. В первом случае длительность разряда короткая (10^{-5} ... 10^{-7} с) — между контактами проскакивает искра, а во втором — длительность разряда определяется временем действия специально созданного импульса (10^{-4} ... 10^{-1} с).

ЭЭО применяется для прошивания различных по профилю отверстий, разделения заготовки на части, получения непрямолинейного контура и упрочнения поверхности. Этот метод используется при обработке труднообрабатываемых материалов (твердые сплавы, закаленная сталь, вольфрам, молибден и т.д.), а также при изготовлении деталей нежесткой конструкции. ЭЭО проводится в среде диэлектрической жидкости (керосин, масло, вода).

4.2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрим основные стадии протекания электроэрозионного процесса снятия припуска. По мере сближения электрода инструмента 1 с заготовкой 2 (рис. 13) напряженность электрического поля возрастает обратно пропорционально расстоянию

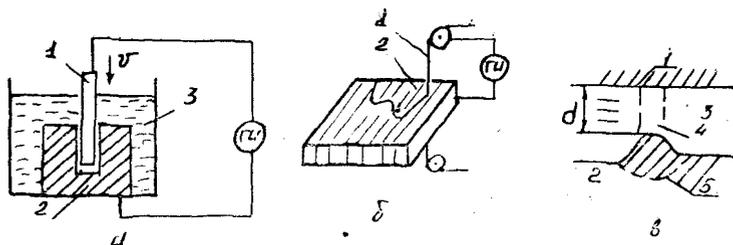


Рис. 13. Схема электроэрозионной обработки: а — прощивание отверстия; б — разрезание непрофильным инструментом; в — зона ввода энергии

между электродами: $E = U/s$, где U — разность потенциалов между электродами, s — зазор между ними. Наибольшая напряженность возникает на участке, где межэлектродный зазор минимален. Расположение этого участка зависит от местных выступов, неровностей на инструменте и заготовке, от наличия электропроводных частиц, находящихся в межэлектродном зазоре.

Если электроды сблизить до расстояния нескольких десятков микрометров, то напряженность поля достигнет значения, при котором произойдет электрический пробой диэлектрической жидкости 3. Причем, электрический разряд возникнет в том месте, где величина промежутка между электродами минимальна. Под действием разряда происходит ионизация диэлектрика на этом промежутке и образуется канал проводимости 4 — сравнительно узкая цилиндрическая область, содержащая ионы и электроны. Возникшие ионы и электроны начинают перемещаться в противоположных направлениях. Электроны, имеющие меньшую массу, быстро достигают положительно заряженной поверхности заготовки и нагревают металл, вызывая его расплавление и испарение в месте прохождения тока. В результате металл микровыступа переносится в межэлектродный промежуток, а на его месте образуется углубление в форме сферической лунки 5. Частицы материала, вылетевшие из заготовки, охлаждаются жидкостью и застывают в виде шариков. При действии серии разрядов поверхность приобретает форму с явно выраженными углублениями в виде лунок. Такие лунки формируют микрорельеф, характеризующий шероховатость поверхности.

Перенос материала с поверхности заготовки в межэлектродный промежуток происходит в результате следующих процессов. В канале проводимости из-за нагрева материала до высоких температур образуется избыточное давление $\Delta P = nk \Delta T$,

где n — число частиц в единице объема, ΔT — разность температур диэлектрика в канале проводимости и вне этого канала, k — постоянная Больцмана. Это избыточное давление может достигать значений $2 \cdot 10^7$ Па. Вследствие такого высокого давления канал проводимости стремится расширяться, образуя газовый пузырь, состоящий из паров жидкости и металла. Граница канала проводимости начинает перемещаться в радиальном направлении, а скорость этого перемещения может достигать 150...200 м/с. На определенном этапе расширения газового пузыря его проводимость уменьшается, и ток через этот промежуток прекращается. Граница же газового пузыря будет перемещаться по инерции. Когда газовый пузырь достигнет наибольших размеров, давление внутри его упадет. Содержащийся на поверхности заготовки расплавленный металл из-за возникшего падения давления вскипает и выбрасывается в межэлектродный промежуток.

В электронискровом режиме большинство ионов не успевает достичь отрицательно заряженного электрода и вызвать удаление материала с его поверхности. Съем материала происходит преимущественно с анода в результате описанных термических процессов, поэтому при электронискровой обработке на заготовку подается положительный потенциал, и она является анодом. Количество ионов, достигших поверхности катода (инструмента), будет определять степень его износа. Очевидно, чем меньше будет износ инструмента, тем точнее можно получить деталь. С целью уменьшения износа стремятся сформировать импульс с меньшей длительностью, чтобы ионы не успели достичь катода. Однако при этом возрастает время обработки и снижается производительность.

Исследованиями было установлено, что с увеличением длительности импульса тока растет интенсивность съема металла с катода потоком ионов. Причем, при определенной величине длительности импульса тока доля материала, удаленного с анода, может составить лишь незначительную часть от доли материала, удаленного с катода. Поэтому при электроимпульсном режиме используется полярность электродов, обратная электронискровому, т. е. деталь является катодом, а инструмент — анодом. Кроме того, для снижения износа электрода-инструмента последний выполняют из материалов, слабо разрушающихся под действием разрядов, графитовых и меднографитовых композиций.

При определенных условиях электронискровой и электроимпульсный режимы могут перейти в дуговой разряд, характеризуемый большей длительностью существования разряда между электродами. В частности, дуговой разряд может возникнуть

при замене диэлектрической среды на воздушную. При этом расплавленный металл может достигать противоположной поверхности и там застывать, т. е. могут протекать одновременно два процесса — размерный съем и наращивание материала. Жидкий металл обоих электродов взаимодействует между собой, образуя на поверхности заготовки новые сплавы, нитриды металлов, а при работе графитовыми электродами — инструментами и карбиды. Возникающий на поверхности заготовки слой покрытия имеет прочную связь с материалом основы и используется для придания поверхности высокой износостойкости. Этот процесс лежит в основе электроэрозионного упрочнения и легирования материала заготовки (анода).

Достаточно широкое применение в технологии получил электроконтактный метод обработки материалов, основанный на комбинации механического и электрофизического методов. Сущность этого метода заключается в следующем. Электрод инструмент, выполненный в виде круглого диска, приводится во вращение и подводится к заготовке, находящейся в диэлектрической жидкости. На определенном расстоянии между электродами возникает разряд, переходящий в дуговой и вызывающий расплавление металла. Расплавленный металл налипает на вращающемся диске и покидает зону разряда. По мере съема металла с заготовки электрод-инструмент перемещается либо вдоль обрабатываемой поверхности (шлифование), либо по нормали к ней (разрезание).

Разновидностью электроконтактного метода обработки является механическая обработка с введением электрического тока в зону обработки. Так, например, электроконтактное фрезерование производится быстровращающимся диском, контактирующим с обрабатываемой поверхностью, электроконтактное точение производится резцом. Все эти процессы проводятся в воздушной среде. Введение тока в зону резания приводит к разогреву и расплавлению поверхности, что обеспечивает значительное снижение усилий резания и повышение производительности труда при обработке твердых и вязких сталей и сплавов. Электроконтактное точение и фрезерование чаще всего применяются для грубой обработки.

Основные технологические показатели процесса (точность, производительность, качество поверхности) зависят от количества выплавленного за один импульс металла из лунки. Это количество определяется энергией импульса, временем его действия и частотой их следования.

Энергия импульса электрического тока определяется выражением

$$A_U = \int_0^{\tau_U} I U d\tau.$$

В первом приближении величину этой энергии рассчитывают по средним значениям силы тока и напряжения: $A_U \cong I_{cp} U_{cp} \tau_U$. Среднее напряжение и средняя сила тока связаны с напряжением холостого хода U_0 на разомкнутых электродах и силой тока короткого замыкания следующими соотношениями: $U_{cp} = (0,5 \dots 0,75) U_0$; $I_{cp} = (0,5 \dots 0,75) I_k$. Выбор величин U_0 и I_k в качестве контрольных параметров процесса определяется тем, что эти величины легко устанавливать при наладке оборудования и легко контролировать в процессе обработки.

При электроискровой обработке обычно используют $U_0 = 40 \dots 180$ В, при электроимпульсной $U_0 = 18 \dots 36$ В, при электроконтактной в жидкой среде $U_0 = 18 \dots 40$ В, а при электроконтактной в воздухе $U_0 = 3 \dots 12$ В. Силу тока выбирают в зависимости от обрабатываемого материала и требуемой шероховатости поверхности. Например, для стали при черновой обработке $I_k = 20 \dots 120$ А, при чистой обработке $I_k = 0,5 \dots 5$ А, а для твердых сплавов $I_k = 0,05 \dots 0,2$ А.

Математическое моделирование физико-химического механизма электроэрозионной обработки основывается главным образом на изучении тепловых процессов на электродах. Определяется доля энергии импульса электрического тока, которая затрачивается на нагрев анода, катода и технологической среды. После этого формулируется математическая модель для расчета температур в зоне обработки. Расчет температур позволяет определить границу проплавления лунки и, следовательно, ее размеры, а также размеры зоны фазовых и структурных превращений в прилегающей к лунке области. Полученные размеры лунки в результате действия единичного электрического разряда позволяют рассчитать шероховатость поверхности после действия серии разрядов, требуемое время обработки и глубину поверхностного слоя, подвергшегося фазовым и структурным превращениям в процессе обработки.

4.3. ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

Математическое моделирование и экспериментальные исследования позволили установить, что шероховатость поверхности пропорциональна A_U^P , где $P \cong 0,3$. Повышение частоты следования импульсов приводит к уменьшению величины R_z до некоторого минимального значения, определяемого энергией A_U и видом материала заготовки. Так, при оптимальном электроискровом режиме обработки твердых сплавов и сталей шероховатость поверхностей составляет $R_a = 0,2 \dots 0,6$ мкм, при электроимпульсном режиме — $R_z = 20 \dots 40$ мкм, а при электроконтакт-

ном разрезании на воздухе $R_z = 150 \dots 400$ мкм. Высота неровностей при упрочнении и легировании также растет после обработки и достигает величины $R_z = 10 \dots 200$ мкм.

Поверхностный слой детали после обработки формируется за счет части расплавленного металла, оставшегося в лунке, и прилегающего к ней слоя металла, подвергнутого структурным изменениям от быстрого нагрева и охлаждения материала. Поверхностный слой состоит из трех основных зон: так называемого белого слоя, в котором прошли химико-термические превращения; переходного слоя, в котором прошли только термические превращения; основного материала. Зона, образованная у поверхности, содержит продукты диэлектрической среды, соединения углерода и азота, а также элементы, входящие в состав электрода-инструмента.

Глубина измененного слоя h , так же как и величина шероховатости, пропорциональна энергии импульса в степени $P \approx 0,3 \dots 0,04$, но в 2...4 раза больше величины R_z . Так, при черновой электроимпульсной обработке и разрезании на воздухе $h = 0,1 \dots 0,5$ мм, при чистовой обработке $h = 0,04 \dots 0,1$ мм, а при электроконтактной обработке на воздухе может достигать значений в несколько миллиметров. При $h \geq 0,1$ мм у всех сплавов, как правило, наблюдаются на поверхности микротрещины.

При электроэрозионной обработке в результате воздействия на поверхность импульса высокой энергии происходит образование лунки. Это приводит к большой разнице температур по глубине детали. Наружные слои лунки, как более нагретые, разрушаются больше, внутренние — меньше, поэтому в поверхностном слое детали возникают значительные внутренние напряжения, вызывающие разрыв материала. В конце действия импульса из-за резкого охлаждения нагретого материала жидкой рабочей средой вновь возникает большой перепад температур под лункой и появляются внутренние напряжения, которые также вызывают трещинообразование.

Таким образом, после ЭЭО поверхностный слой приобретает свойства, по-разному влияющие на эксплуатационные характеристики детали. Положительным является повышение твердости поверхности при сохранении пластических свойств внутри детали. К недостаткам следует отнести возможность появления трещин, растягивающих напряжений, трудность получения поверхности с малой шероховатостью.

5. ПЛАЗМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

5.1. ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИИ

Плазма — это ионизированный газ с достаточно высокой концентрацией заряженных частиц, обладающий свойством квазинейтральности. Физические свойства плазмы и прежде всего высокие значения температуры, энтальпии и электропроводности позволяют осуществлять принципиально новые технические проекты. Например, «горячая» плазма с температурой выше 10^6 К рассматривается как средство проведения управляемого термоядерного синтеза. Функционирует ряд магнетогидродинамических (МГД) генераторов, в которых высокоскоростной плазменный поток служит для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. Существуют электрореактивные плазменные двигатели (ЭРПД), используемые как двигательные установки космических аппаратов, выведенных на орбиту. Впервые такие двигатели были использованы в СССР в 1964 году на межпланетном аппарате «Зонд-2», а в США — на баллистической ракете «Блю Скаут» и ионосферной станции «Янтарь» (1964, 1966 гг.). Интерес к ЭРПД и их развитие вызваны стремлением увеличить скорость истечения рабочего тела и тем самым уменьшить при данной тяге расход вещества, поскольку тяга, развиваемая двигателем, $F = \dot{m} v$, где \dot{m} — расход массы, v — скорость ее истечения. В обычных термохимических двигателях скорость истечения продуктов горения ограничена пределом $4,5 \cdot 10^3$ м/с, тогда как ион водорода, прошедший разность потенциалов всего в 100 В, приобретает скорость около $1,5 \cdot 10^6$ м/с. В этом примере проявляются важнейшие свойства плазмы — возможность плавного и практически неограниченного управления энергией ее частиц.

Технологическое применение плазма нашла прежде всего в процессах, требующих высококонцентрированного нагрева (металлургия, сварка, напыление), и в процессах, требующих нетермического активирования реакций (плазмохимические реакции, нанесение покрытий, очистка материалов от окисных пленок). В промышленности широко используется плазменная резка, сварка, нанесение покрытий, плазменные методы получения новых материалов. Как правило, для этих операций используется «низкотемпературная» плазма ($10^3 \dots 10^5$ К).

5.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ

Плазму получают чаще всего в таких электрофизических процессах, как тлеющий разряд, дуговой разряд, высокочастотный разряд, электронно-лучевое облучение, лазерное облучение и лазерная искра.

Для получения плазмы, используемой в технологических целях, разработаны специальные устройства, называемые плазмотронами (плазменными горелками), плазменными генераторами, плазменными ускорителями и плазменными реакторами.

Плазмотроны применяются в промышленности в тех случаях, когда необходимо производить как нагрев газа или подаваемого в плазменный поток вещества, так и нагрев отдельных деталей или конструкций. При нагреве материала плазмой передача энергии может осуществляться как за счет процессов теплообмена нагретого газа с твердой или жидкой фазой (материал электрически не связан с источником питания), так и за счет суммарного действия теплообмена и электрического взаимодействия заряженных частиц с материалом, который является одним из электродов. В практике плазменной технологии известны три основные принципиальные схемы плазмотронов (рис. 14). В плазмотроне плазмообразующий газ подается через водоохлаждаемое сопло 2. В дуговых плазмотронах (рис. 14,а,б) между катодом (центральным стержнем) и анодом подается разность потенциалов и зажигается электрическая дуга 3. Схема, изображенная на рис. 14,а, получила название схемы с плазменной дугой, а плазмотроны для ее получения — плазмотроны прямого действия. В плазмотроне прямого действия анодом является деталь 1. В случае, показанном на рис. 14,б, деталь электрически не связана с целью питания плазмотрона, а анодом является часть сопла 4. Такая схема получила название схемы с плазменной струей, а плазмотрон имеет название плазмотрона косвенного действия или струйного плазмотрона. В схе-

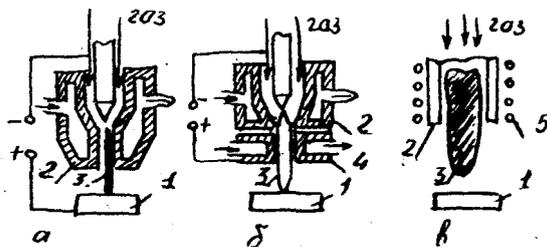


Рис. 14. Основные схемы плазмотронов

ме, изображенной на рис. 14,в, нагрев плазмообразующего газа и образование плазмы осуществляются за счет безэлектродного высокочастотного индукционного разряда, получаемого с помощью ВЧ-индуктора 5. Надо отметить, что в настоящее время в промышленности начинают применяться плазмотроны и некоторых других типов.

Таким образом, в рассмотренных видах плазменных источников нагрев газа до необходимой температуры осуществляется либо дугowym разрядом, либо высокочастотным индукционным разрядом. Кроме того, в схеме на рис. 14,а частицы плазмы взаимодействуют с материалом детали, увеличивая эффективность ее нагрева, а также оказывая очищающее действие за счет катодного распыления.

Электрическая дуга в рассмотренных плазмотронах относится к типу так называемых электрических дуг высокого давления. Такая электрическая дуга горит в газе или паре с плотностями, которые соответствуют давлениям выше 1,33 кПа (10 мм рт. ст.). В технологии обработки материалов в последние годы все чаще начинают применяться плазменные генераторы, в которых использованы дуги низкого давления с холодным катодом. Дуга низкого давления возникает в газе или паре давлением ниже 1,33 кПа (10 мм рт. ст.). Граница разделения дуг на дуги низкого и высокого давления довольно условна и во многом зависит от тока и материалов электрода. Дуга низкого давления, как правило, характеризуется наличием достаточно протяженного столба плазмы, причем между компонентами этой плазмы (электронами, ионами, нейтральными частицами) отсутствует тепловое равновесие. В то же время для дуг высокого давления характерно наличие ограниченного столба плазмы с высокой температурой газа (обычно $4 \cdot 10^3 \dots 20 \cdot 10^3$ К) и тепловым равновесием между компонентами плазмы.

Катодные явления в дуге низкого давления с холодным катодом поразительно отличаются от тех, которые типичны для термоэмиссионной дуги высокого давления. Это отличие заключается в том, что катодное пятно состоит из большого числа катодных микропятен, хаотически перемещающихся по поверхности металла. В отличие от дуги с термоэмиссионным катодом, процессы на котором хорошо объясняются явлением термоэлектронной эмиссии, физические явления в катодных микропятнах еще плохо поняты и требуют объяснения.

Основные типы плазменных генераторов, выполненных с использованием дуги низкого давления с холодным катодом, приведены на рис. 15. Обрабатываемая деталь 2 помещается в вакуумную камеру 1. Между катодом 3 и анодом зажигается дуга. В первом случае (рис.15,а) анодом является стенка вакуумной

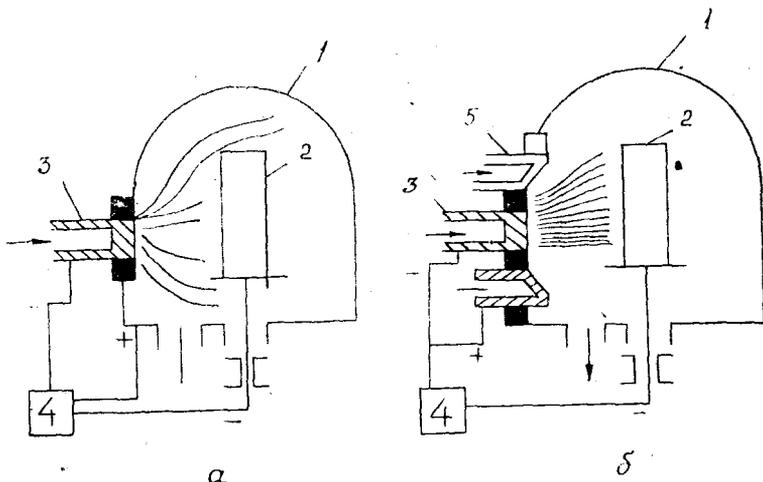


Рис. 15. Плазменные генераторы, выполненные на основе дуги низкого давления

камеры, а во втором случае (рис. 15,б) анодом служит специальное сопло 5. Материал катода эродирует с катодных микропятен и в плазменном состоянии взаимодействует с обрабатываемой деталью. Для регулирования энергии ионов плазмы на деталь подается отрицательный потенциал 4. Установка, приведенная на рис. 15,а, получила название электродугового испарителя, а на рис. 15,б — электродугового ускорителя. Такие плазменные генераторы применяют в настоящее время для очистки поверхности детали, нанесения на нее покрытия на основе материала катода и для ионного легирования поверхности детали.

Для обработки материалов применяют также плазменные генераторы, работающие на тлеющих разрядах. Схема такого генератора приведена на рис. 16. Деталь 2 помещается в вакуумную камеру 1. Между деталью и электродом 3 создается разность потенциалов с помощью источника 4. В вакуумную камеру напускается газ. При определенных соотношениях между геометрическими параметрами электродного промежутка, напряжением и давлением газа в камере загорается тлеющий разряд.

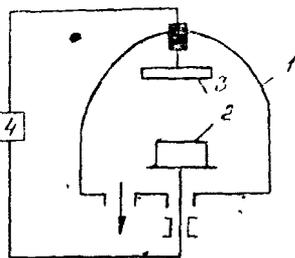


Рис. 16. Схема обработки материалов в тлеющем разряде

В том случае, когда деталь находится под отрицательным потенциалом (является катодом), ионы газа ускоряют свое движение к поверхности детали и очищают ее поверхность за счет катодного распыления, а также активируют плазмохимические реакции на поверхности детали. В результате таких реакций в зависимости от вида плазмообразующего газа в поверхностном слое происходит образование нитридов, карбидов, боридов и т. д. В случае, когда изменяется полярность подключения источника питания, происходит распыление материала электрода 3. Образующиеся атомы металла мишени 3 диффундируют через плазму и, осаждаясь на детали, образуют покрытие.

Все рассмотренные плазменные генераторы в настоящее время постоянно совершенствуют с целью увеличения ресурса их работы и с целью увеличения степени ионизации плазмы и энергии их частиц. Одним из направлений является применение магнитных полей. Магнитное поле обычно используется в источниках, приведенных на рис. 14, для стабилизации и обжатия струи; в источниках, приведенных на рис. 15, — для повышения степени ионизации, энергии ионов и уменьшения микрокапельной фазы. Применение магнитного поля в генераторе (см. рис. 16) позволило создать принципиально новый класс устройств — магнетронные генераторы плазмы. В таких генераторах, в отличие от катодных, разряд загорается при давлениях на 1...2 порядка ниже, а скорость очистки или получения покрытия в 100...1000 раз больше.

5.3. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СВОЙСТВА ПЛАЗМЫ

Одной из основных характеристик плазмы является степень ее ионизации x , определяемая как отношение числа заряженных частиц одного знака n к числу нейтральных частиц n_0 до начала ионизации, т. е. $x = n/n_0$. Степень ионизации зависит от многих факторов и для низкотемпературной плазмы может изменяться от 0 до 1.

Плазма — ионизированный газ, состоящий из ионов, электронов и нейтральных частиц. Каждая из компонент плазмы характеризуется своей концентрацией и кинетической энергией, приходящейся на одну частицу. В тех случаях, когда все частицы плазмы находятся в термодинамическом равновесии и их распределение по энергиям описывается законом Максвелла-Больцмана, можно ввести понятие температуры как меры средней кинетической энергии частиц. В плазме очень часто наблюдается ситуация, когда термодинамическое равновесие установ-

ливается не между всеми ее частицами, а, например, между электронами или только ионами. Причем, средние кинетические энергии этих компонент могут быть существенно различными. В этом случае вводятся понятия электронной и ионной температур, имеющих различное значение. Температура электронной компоненты вводится на основе формулы

$$T_e = \frac{2}{3} \frac{\langle \epsilon_{\text{кин}} \rangle}{k} = \frac{m_e \langle v_e^2 \rangle}{3k},$$

где $\epsilon_{\text{кин}}$ — средняя кинетическая энергия электронов, m_e — масса электронов, k — постоянная Больцмана, $\sqrt{\langle v_e^2 \rangle}$ — средняя квадратичная скорость электронов.

Аналогичным соотношением вводится температура для ионов и нейтральных частиц плазмы.

Рассмотрим процессы установления термодинамического равновесия между компонентами плазмы. Допустим, плазме передается энергия от электрического поля. Тогда под действием поля с напряженностью E электроны и ионы получают на длине свободного пробега λ энергию $\lambda e E$. Поскольку массы и линейные размеры нейтральных частиц и ионов соизмеримы, то соударения между ними сопровождаются интенсивным обменом энергиями. В результате устанавливается некоторое распределение энергии, практически одинаковое для обоих видов частиц. Это приводит к приближительному равенству газокинетической и ионной температур. В то же время из-за малых размеров электронов вероятность их столкновения между собой гораздо меньше, чем вероятность их столкновения с тяжелыми частицами. Поэтому, если бы в системе были только электроны, то энергия электрического поля проявилась бы лишь как кинетическая энергия движения их центра масс и не привела бы к повышению температуры. Только наличие тяжелых частиц, на которых вектор скорости электрона претерпевает хаотическое, в среднем равномерное рассеяние по всем направлениям, делает возможным превращение кинетической энергии в энергию беспорядочного теплового движения. Благодаря этому установление единой температуры электронов достигается уже после небольшого числа столкновений их с тяжелыми частицами.

При определении времени выравнивания температур тяжелых частиц и электронов следует учесть, что при каждом упругом столкновении электроны отдают ионам в среднем энергию $\Delta W = W_e (2 m_e / m_i)$, где W_e энергия электрона, m_e и m_i — массы электрона и иона соответственно. Для передачи «всей» кинетической энергии электрона тяжелой частице требуется $m_i / 2 m_e \approx 10^4$ соударений, поэтому время выравнивания температур между электронами и ионами будет в 10^4 раз больше,

чем время термализации электронной и тяжелой компонент между собой.

Таким образом, обычно в плазме между температурами электронов T_e , ионов T_i и нейтральных частиц T_n существует соотношение $T_e \gg T_i \gg T_n$. Разница между температурами T_e и $T_i \approx T_n$ может достигать сотен и тысяч градусов. Такая ситуация, в частности, всегда реализуется в плазме тлеющего разряда. Надо отметить, что при наложении на плазму магнитного поля определенной величины соотношение между температурами может изменяться. С увеличением давления растет концентрация частиц в плазме, а следовательно, увеличивается и частота их столкновения. Это приводит к тому, что разность между температурами различных компонент уменьшается, и уже при концентрации частиц более, чем 10^{21} м^{-3} ($P > 133 \text{ Па}$), можно с достаточной точностью считать, что $T_e \approx T_i \approx T_n$ — в дугах высокого давления плазма является термической.

В связи с тем, что существует соотношение $T_e \gg T_i$, а $m_i \gg m_e$, скорость электронов всегда гораздо больше скорости ионов и нейтральных частиц. Отношение этих скоростей можно представить следующим образом

$$\frac{v_e}{v_i} \approx \sqrt{\frac{\langle v_e^2 \rangle}{\langle v_i^2 \rangle}} = \sqrt{\frac{T_e}{T_i} \frac{m_i}{m_e}}$$

или для случая $T_e \approx T_i$

$$v_e/v_i \approx (m_i/m_e)^{0.5}.$$

Как уже отмечалось, плазма дуг высокого давления используется в основном для нагрева материала. Возникает вопрос: какая из компонент, электронная или ионная, греет сильнее металл? Плотности тока электронов и ионов даются соотношениями

$$j_e = n_e v_e, \quad j_i = n_i v_i.$$

Плотности потоков их энергий равны:

$$q_e = \frac{j_e e_e}{e} = n_e v_e m_e \langle v_e^2 \rangle / 2, \quad q_i = \frac{j_i e_i}{e} = n_i v_i m_i \langle v_i^2 \rangle / 2,$$

поэтому отношение плотностей токов и потоков энергий компонент будут определяться выражениями

$$\frac{j_e}{j_i} = \frac{v_e}{v_i} \approx \sqrt{\frac{m_i}{m_e}};$$

$$\frac{q_e}{q_i} = \frac{m_e v_e \langle v_e^2 \rangle}{m_i v_i \langle v_i^2 \rangle} \approx \sqrt{\frac{m_i}{m_e}}$$

Таким образом, если на поверхность, находящуюся в плазме, подать сначала положительный потенциал (на поверхность пой-

дет только электронный поток), а затем отрицательный (на поверхность пойдет только ионный поток), то в первом случае плотность тока и плотность потока энергии, попадающей на поверхность, будут в $(m_i/m_e)^{0,5}$ раз больше, чем во втором. Такой случай, например, реализуется в аргонно-дуговой сварке алюминия. При подаче на алюминиевую пластину положительного потенциала ток на нее и плотность выделяемой энергии в пластине в 27 раз больше, чем при подаче на нее отрицательного потенциала.

Возбуждение и ионизацию атомов, молекул и ионов в плазме могут вызывать электроны, ионы, атомы, молекулы и фононы ультрафиолетового, рентгеновского или жесткого излучения. Процессы возбуждения и ионизации, а также диссоциации молекул относятся к процессам с неупругими соударениями, так как в этом случае кинетическая энергия частиц переходит в их внутреннюю энергию. При соударении двух частиц с массами m и M максимальная величина кинетической энергии, которая может быть передана при абсолютно неупругом соударении частицы m о частицу M , определяется соотношением $W_{\max} = W_k \frac{M}{M+m}$. Из этого соотношения видно, что если налетающей частицей является электрон, а ударяемой — атом (или ион), то $W_{\max} \approx W_k$. Следовательно, кинетическая энергия электрона при неупругом соударении может быть полностью передана атому. При столкновении же частиц с близкими массами может быть передано не более половины кинетической энергии, поэтому эффективность ионизации газа электронами гораздо выше, чем тяжелыми частицами.

Для существования плазмы необходимо, чтобы под действием каких-то процессов происходила ионизация атомов, компенсирующая уход электронов из плазмы на стенки или их нейтрализацию. В тех случаях, когда скорость образования ионов будет равна скорости их исчезновения, в плазме наступит динамическое равновесие. Образование ионов возможно в процессе ионизации газа электронным ударом: $A + e \rightarrow A^+ + 2e$, где A и A^+ — нейтральная частица и ион соответственно. Скорость протекания процесса определяется соотношением $u_1 = K_1 n_n n_e$, здесь K_1 — константа скорости реакции, n_n и n_e — плотность нейтральных частиц и электронов.

Обратным этому процессу является процесс рекомбинации (нейтрализации), требующий участия в столкновении трех частиц: $A^+ + 2e \rightarrow A + e$. Скорость этого процесса $u_2 = K_2 n_i n_e^2$. Для динамического равновесия необходимо, чтобы $u_1 = u_2$, откуда получаем

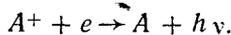
$$\frac{n_i n_e}{n_n} = \frac{K_1}{K_2} = K,$$

где K — константа равновесия процесса. Полученное уравнение является законом действующих масс применительно для реакции ионизация \rightleftharpoons рекомбинация.

Образование ионов возможно в процессе ионизации излучением:



Скорость протекания этого процесса определяется соотношением $u_1' = \pm K_1' n_n I$, где I — интенсивность излучения. Обратным этому процессу является процесс рекомбинации с излучением:



Скорость протекания этого процесса задается выражением

$$u_2' = k_2' n_i n_e.$$

При наступлении динамического равновесия $u_1' = u_2'$, откуда получаем опять соотношение закона действующих масс

$$\frac{n_i n_e}{n_n} = \frac{K_1' I}{K_2'} = K.$$

Как уже отмечалось, кроме указанных процессов исчезновение ионов может происходить за счет их ухода из плазмы под действием полей или из-за их адсорбции на поверхностях, ограничивающих плазму.

Известно, что константа равновесия реакции зависит только от температуры и энергий перехода. Следовательно в случае плазмы она зависит от температуры (считаем, что $T_i \approx T_e \approx T$) и энергии ионизации атома eU_i :

$$K = A (kT)^{3/2} \exp \{ -(eU_i/kT) \}.$$

Выразим плотность частиц в законе действующих масс через степень ионизации плазмы. Учитывая, что $x = n_i/n = n_e/n$, $n_n + n_i + n_e = n + n_i$, $n_n + n_i + n_e = P/kT$, получаем

$$\begin{aligned} \frac{n_i n_e}{n_n} &= \frac{[n_i/(n+n_i)][n_e/(n+n_i)]}{n_n/(n+n_i)} \cdot (n+n_i) = \\ &= \frac{[x/(1+x)][x/(1+x)]}{(1-x)/(1+x)} \cdot \frac{P}{kT} = \frac{x^2}{1-x^2} \cdot \frac{P}{kT} = K. \end{aligned}$$

Используя соотношение для K , получаем

$$\frac{x^2}{1-x^2} P = A (kT)^{5/2} \exp \left\{ - \frac{eU_i}{kT} \right\}.$$

Полученное уравнение характеризует термодинамическое равновесие частично ионизированного газа (плазмы) и называется уравнением Саха. Из этого уравнения вытекает, что

с ростом давления P при неизменной температуре степень ионизации газа убывает, а при постоянном давлении увеличение температуры ведет к повышению степени ионизации газа.

Плазма — это ионизированный квазинейтральный газ. Квазинейтральный означает электрически нейтральный в среднем по достаточно большому числу частиц или за достаточно большой промежуток времени. Величины объемов и промежутков времени, в которых проявляется квазинейтральность плазмы, определяются пространственным и временным масштабами разделения зарядов. Если взять достаточно большой объем или точнее объем, в котором находится достаточно большое число частиц, то общий заряд этого объема должен быть равен нулю. В противном случае возникает электрическое поле, приводящее к перераспределению заряда. Действительно, пусть в мысленно выделенном плоском слое плазмы толщиной Δx и площадью S электроны сместились на одну из ограничивающих этот слой плоскостей. В результате возникает плоский конденсатор с емкостью $C = \epsilon_0 S / \Delta x$ и зарядом на пластине $Q = n_e e S \Delta x$, где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума. Разность потенциалов между этими слоями будет $V = Q/C = n_e e (\Delta x)^2 / \epsilon_0$, поэтому между разделенными зарядами возникает электрическое поле с напряженностью

$$E = V / \Delta x = n_e e \Delta x / \epsilon_0.$$

Это поле стремится компенсировать возникшее разделение зарядов, сообщая каждому электрону ускорение

$$\frac{d^2 \Delta x}{dt^2} = \frac{F}{m_e} = - \frac{e E}{m_e} = - \frac{n e^2}{\epsilon_0 m_e} \Delta x.$$

Полученное уравнение описывает гармонические колебания с частотой $\omega_0^2 = n_e e^2 / \epsilon_0 m_e$, поэтому всякое разделение зарядов в плазме приводит к колебаниям плотности электрического заряда. Эти колебания получили название плазменных, а частота ω_0 — плазменной или ленгмюровской. Плазменная частота является обычно очень большой величиной, поэтому даже за небольшой промежуток времени изменение плотности электрического заряда в некотором объеме многократно успевают изменить знак, что и приводит к квазинейтральности плазмы. Поэтому в произвольном, но достаточно большом объеме плазмы плотности отрицательных и положительных частиц равны. Однако, как мы видели, для малого объема это неверно. Плотность электрического заряда в малом объеме периодически изменяется с частотой ω_0 . Объем плазмы, где нарушается ее квазинейтральность, определяется дебаевским радиусом. По порядку величины этот радиус должен быть равен расстоянию, кото-

рое проходит электрон со средней скоростью $\langle v_e \rangle \sim (kT_e/m_e)^{0.5}$ за половину периода собственных колебаний, т. е. дебаевский радиус r_D имеет порядок $r_D \sim (kT_e \epsilon_0/n_e e^2)^{0.5}$. Точный расчет для дебаевского радиуса дает результат

$$r_D = \left(\frac{\epsilon_0 kT_e}{2 e^2 n_e} \right)^{0.5}.$$

Как уже отмечалось, дебаевский радиус характеризует размеры области, в которой нарушается квазинейтральность плазмы. Однако он же характеризует и глубину проникновения электрического поля в плазму. Действительно, при приложении электрического поля к плазме в ней произойдет перераспределение электрических зарядов таким образом, чтобы произошла экранизация поля, действующего на плазму. В связи с этим потенциал внешнего электрического поля на границе с плазмой убывает по закону

$$\varphi = (A/r) \exp\{- (r/r_D)\},$$

где A — постоянная, значение которой находят из граничных условий, r — расстояние от поверхности тела в глубину плазмы.

В реальных технологических устройствах плазма всегда ограничена стенками. Между стенками и плазмой также возникает дебаевский слой величиной порядка r_D , в котором нарушается квазинейтральность плазмы и в котором происходит ускорение частиц плазмы под действием электрических сил со стороны этой стенки. В частности, по этим причинам электроизолированное тело в плазме всегда заряжается отрицательно. Действительно, в начальный момент времени плотность электронного тока на тело будет больше плотности ионного j_i в $(m_i/m_e)^{0.5}$ раз, поэтому тело начнет заряжаться отрицательно. Возникающее электрическое поле будет уменьшать плотность электронного тока. В стационарном состоянии суммарная плотность тока на тело будет равна нулю, а это возможно только в том случае, когда число электронов, приходящее на тело, меньше числа ионов. Но поскольку заряд на теле не изменяется, то он должен быть отрицательным. Таким образом, электроизолированное тело в плазме заряжается отрицательно, и вокруг него возникает дебаевский слой с недостатком электронов.

5.4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ВЕЩЕСТВОМ

Взаимодействие частиц плазмы с веществом характеризуется комплексом разнообразных физико-химических явлений. В разд. 2 и 3 было рассмотрено взаимодействие электронов и фотонов с твердым телом. Рассмотрим основные процессы, протекающие при взаимодействии тяжелых частиц с твердым телом.

Анализ влияния различных факторов взаимодействия частицы с поверхностью показывает, что результат такого взаимодействия определяется энергетическим и зарядовым состоянием частицы, ее структурой и углом падения, а также фазовым, химическим и кристаллическим составом поверхности, ее температурой и потенциалом, а также возможностью протекания на ее поверхности химических реакций. Основным параметром, определяющим кинетику взаимодействия частицы с веществом, является энергия падающей частицы. Виды процессов, протекающих при взаимодействии частиц с твердым телом в зависимости от энергии частиц, приведены на рис. 17.

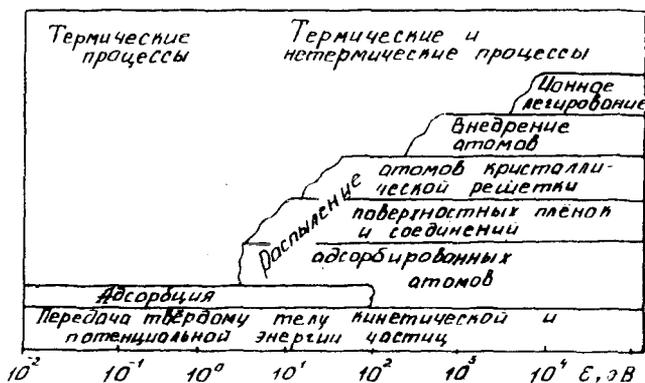


Рис. 17. Виды процессов, происходящих при взаимодействии частиц с веществом

Тяжелые частицы (атомы и молекулы), полученные в термических процессах (при нагреве и испарении), имеют среднюю энергию $\epsilon = 2kT$, где T — температура поверхности. Эта величина, например, для алюминия и вольфрама равна 0,43 эВ и 1,00 эВ соответственно. Частицы с этой энергией, соударяясь с поверхностью, могут отражаться или быть захваченными ею (адсорбироваться). В первом случае частица передает поверхности только часть своей энергии, а во втором случае частица, колеблясь около поверхности, передает той свою избыточную энергию и переходит в состояние термодинамического равновесия с атомами кристаллической решетки. В то же время частицы, полученные в плазме, могут иметь практически любую величину энергии. Действительно, ион, подлетая к поверхности с отрицательным потенциалом U , ускоряется в дебаевском слое и приобретает энергию $\epsilon = \epsilon_0 + ZeU$, где ϵ_0 — начальная энергия иона, Z — кратность его ионизации. Например, ион, про-

шедший разность потенциалов только в 10 В, приобретает энергию в 10 раз больше максимально возможной энергии термической частицы.

Таким образом, регулируя потенциал обрабатываемой детали, можно регулировать в широких пределах энергию заряженных частиц, попадающих на поверхность. В области энергии 1...10 эВ налетающая частица может очищать поверхность от адсорбированных на ней атомов, а в области энергий 10...20 эВ очищать поверхность от пленок окислов, карбидов и других соединений. Широко известно использование процесса ионной очистки поверхности от окисных пленок при аргоно-дуговой сварке алюминия. В этом случае ионы аргона с энергией порядка 10...20 эВ разбивают молекулы Al_2O_3 , а образовавшийся свободный кислород десорбируется с поверхности.

При дальнейшем увеличении энергии падающих частиц начинается процесс катодного распыления (ионного травления) атомов кристаллической решетки твердого тела. Процесс катодного распыления начинается с величины энергии частиц, превышающей определенное пороговое значение энергии. Пороговая энергия распыления материалов зависит от вида вещества и имеет для твердых тел значение порядка 20...40 эВ. При росте энергии ионов от порогового значения до 100 эВ интенсивность распыления поверхности увеличивается в $10^3...10^4$ раз и достигает 1—4 выбитых атомов на десять падающих ионов. Количество распыленных атомов определяется соотношением $j_{расп} = S(\epsilon)j$, где $j_{расп}$ и j — плотности потоков распыленных атомов и падающих ионов соответственно, $S(\epsilon)$ — коэффициент распыления материала. При $j > j_{расп}$ на поверхность падает атомов больше, чем уходит с нее, а при $j < j_{расп}$ с поверхности уходит больше атомов, чем падает на нее, т. е. в случае, когда $j > j_{расп}$ или $S(\epsilon) > 1$, происходит перемещение границы твердого тела вглубь материала. Величина энергии ϵ , при которой $S(\epsilon) = 1$, получила название энергии инверсии. Ионное травление поверхности позволяет получать химически чистые поверхности материалов и применяется для подготовки материалов под напыление, размерной обработки в микроэлектронике, а также для исследования химического и фазового состава поверхностного слоя.

Дальнейшее увеличение энергии падающих частиц приводит не только к распылению поверхности, но и внедрению атомов в кристаллическую решетку. Внедрение бомбардирующих частиц в материал подложки зависит от многих факторов и начинается сказываться, в основном, при энергиях выше 500 эВ. Внедряясь в подложку, частицы смещают атомы кристалла из их равновесных положений, а последние, в свою очередь, вызыва-

Ют смещение других атомов кристаллической решетки. В результате вдоль траектории внедренных атомов образуются цепочки так называемых рациональных повреждений. Этот процесс получил распространение при ионном легировании материалов. Ионное легирование в последние годы начинает широко применяться в машиностроении для упрочнения поверхностного слоя деталей.

Естественно, что при любых значениях энергий частиц происходит передача их кинетической и потенциальной энергий атомам кристаллической решетки. Атомы кристаллической решетки, сталкиваясь между собой, передают эти энергии вглубь твердого тела и нагревают его. В связи с тем, что тяжелые частицы передают энергию атомам кристаллической решетки, энергия электронов кристалла в течение определенного промежутка времени остается неизменной. Поэтому в течение этого времени температура ионной подсистемы кристалла выше температуры его электронной подсистемы. В дальнейшем из энергообмена между этими подсистемами происходит выравнивание температур.

5.5. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ПЛАЗМОЙ ДУГИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Плазменная обработка материалов плазмой газа, полученной в плазмотроне на основе электрической дуги высокого давления, используется для нагрева, плавления, сварки, наплавки, нанесения покрытий и резки. Основными характеристиками плазменного источника энергии являются его эффективная тепловая мощность и коэффициент сосредоточенности. Эффективная тепловая мощность нагрева изделия определяется соотношением $N_u = \eta IU$, где IU — электрическая мощность дуги, η — коэффициент полезного действия, учитывающий потери энергии дуги при передаче ее изделию. Коэффициент сосредоточенности характеризует распределение потока энергии плазменной струи по поверхности тела.

Эффективная тепловая мощность зависит от конструктивных особенностей плазмотрона, режима его работы и энтальпии плазмообразующего газа. Энтальпия — величина, равная количеству тепла поглощенного газом в изобарных условиях, зависит от рода газа и его температуры. Как видно из рис. 18, плотность энтальпии h моноатомных газов (Ar, He) увеличивается с повышением температуры благодаря повышению энергии теплового движения атомов и их последующей ионизации. У молекулярных газов (O_2 , H_2 , N_2) в процессе нагрева энталь-

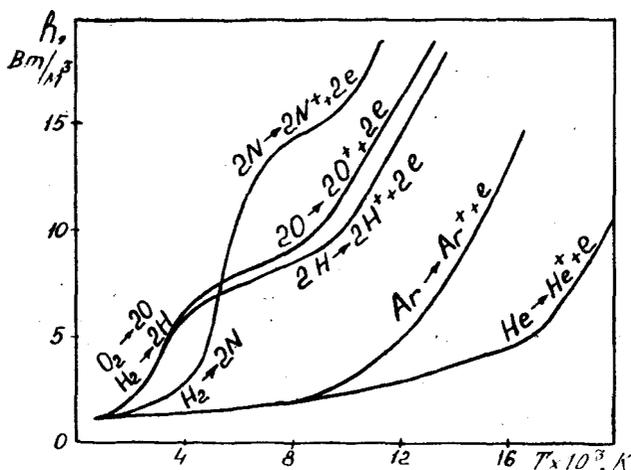


Рис. 18. Зависимость энтальпии плазмообразующего газа от температуры

пия даже при сравнительно невысоких температурах резко возрастает за счет процесса диссоциации молекул на атомы, а затем уже начинается повышение энтальпии за счет ионизации. Поэтому для технологических процессов, когда нужны температуры ниже 10^4 К, в качестве плазмообразующих газов целесообразно использовать азот, водород, кислород и т. д. Для получения более высоких температур применяют одноатомные газы.

Очень часто для регулирования энтальпии газа ΔH и его температуры используют смеси газов с различными энтальпийными характеристиками. Наиболее высокими удельными значениями энтальпии обладает водород, однако его применение в плазмотронах в чистом виде ведет к быстрому разрушению электрода. В технологических процессах используют азотно-водородную и аргоно-водородную смесь газов, в которых объемное содержание водорода составляет 10..20%.

Эффективный КПД дугового нагрева газа, или так называемый внутренний КПД плазмотрона, представляет собой отношение тепла (энтальпии), уносимого газом из плазмотрона, к мощности дуги: $\eta_0 = G \Delta H / UI$, где G — расход плазмообразующего газа, $\text{м}^3/\text{с}$, ΔH — удельная энтальпия, $\text{Дж}/\text{м}^3$.

Исследованиями установлено, что η определяется выражением

$$\eta_b = \frac{E C_p G}{\pi d \alpha_k U} \left[1 - \exp \left(- \frac{\pi d \alpha_k l}{C_p G} \right) \right],$$

где E — усредненный по длине градиент падения напряжения в столбе дуги (напряженность поля); l — длина дуги, d — диаметр канала, в котором горит дуга; α_k — коэффициент полной теплоотдачи от плазмы к каналу; C_p — изобарная теплоемкость плазмы; U — напряжение на дуге.

Используя связь температуры с энтальпией $\Delta T = \Delta H / C_p$ и выражение для η_e , получают выражения для среднемассовой температуры и мощности газа на выходе из плазмотрона:

$$T_n = \eta_b (IU / C_p G), \quad N_n = G \Delta H = IU \eta_b.$$

Анализ этих выражений показывает, что при увеличении тока дуги значения T_n и N_n возрастают, а η_b не меняется. Повышение расхода газа G приводит к уменьшению T_n и сначала к возрастанию N_n и η_b , а после перехода через максимум к их уменьшению. С увеличением l значения T_n и N_n возрастают, стремясь к некоторому пределу, а η_b имеет максимум.

В зависимости от параметров плазмотрона и режима его работы тепловую мощность и температуру плазменной струи можно изменять в широких пределах, причем η_b составляет 40...80%.

Электрическая энергия, потребляемая дугой, превращаясь в тепловую, расходуется на нагрев плазмообразующего газа. Часть энергии струи идет на обработку материала. В струйном плазмотроне часть энергии дополнительно расходуется на нагрев сопла — анода, поэтому с энергетических позиций для нагрева изделия рационально пользоваться плазмотроном прямого действия.

Распределения температуры в плазме плазмотрона прямого действия (рис. 19,а) и плазмотрона косвенного действия (рис. 19,б) по радиусу струи r и по длине z крайне неравномерны. Максимальная температура наблюдается на оси плазменного потока, причем она значительно выше у плазмотрона косвенного действия. Плотность теплового потока у этого типа плазмотронов также выше, чем у открытой дуги, и достигает 10^{10} Вт/м².

Нагрев газа в плазмотроне приводит к резкому уменьшению плотности газа, за счет чего увеличивается скорость его истечения. Распределение скорости струи v по радиусу r и длине струи показано на рис. 20. Скорость потока максимальна в центре, где наблюдается максимальная температура T и минимальный расход газа ρv . В связи с таким распределением параметров струи в зависимости от r и z в расчетах структуру свободно расширяющейся плазменной струи пред-

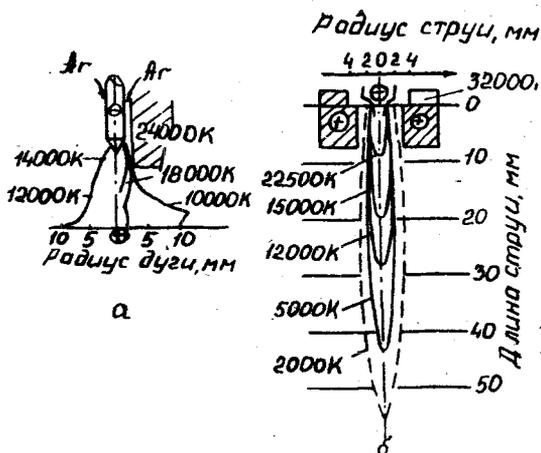


Рис. 19. Распределение температуры в плазматроне прямого (а) и косвенного (б) действия

ставляют в виде (рис. 21) ядра, зоны смешения и основного участка. В ядре скорость и температуру струи обычно принимают постоянными и равными их средним значениям в начальном сечении (на срезе сопла).

Большая скорость истечения плазмы из плазматрона позволяет получать значительный газодинамический напор, который также используется в различных технологи-

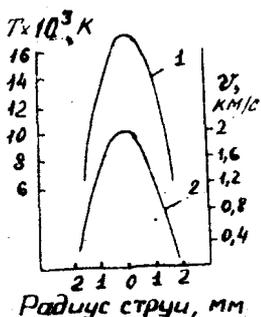


Рис. 20. Распределение температуры (1) и скорости (2) плазменной струи по ее оси

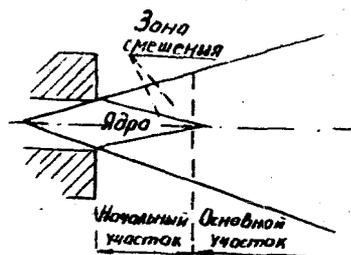


Рис. 21. Схема плазменной струи

ческих целях. При расходах газа в плазмотроне более, чем 10^{-4} м³/с, течение газа носит турбулентный характер. Уменьшение расхода плазмообразующего газа до значения меньше 10^{-4} м³/с позволяет получать ламинарные плазменные струи с длиной до 0,4 м и высокой стабильностью.

Когда ось струи перпендикулярна обрабатываемой поверхности, плотность теплового потока $q(r)$ распределяется симметрично относительно оси струи. В этом случае распределение плотности теплового потока по площади пятна нагрева обычно может быть описано законом нормального распределения

$$q(r) = q_0 \exp \{-kr^2\},$$

где q_0 — наибольшая плотность теплового потока на оси струи, r — расстояние от рассматриваемой точки до оси струи, k — коэффициент сосредоточенности теплового потока струи, характеризующий форму кривой нормального распределения.

По мере удаления от оси струи значение $q(r)$ быстро уменьшается и обычно ее считают практически несущественной при $0,05 q_0$. Это позволяет найти диаметр пятна нагрева

$$d_n = 2 r_n = 2 \left(\frac{1}{k} \ln \frac{q}{q_0} \right)^{0,5} = \frac{3,46}{\sqrt{k}}.$$

Связь q_0 и k с мощностью плазменной струи определяется из условия

$$N_n = \int_0^{\infty} q_0 \exp \{-kr^2\} 2 \pi r dr = \frac{\pi q_0}{k}.$$

Т. е. при постоянной q_0 плотность потока на оси плазменной струи возрастает с увеличением коэффициента сосредоточенности.

Нагрев деталей и материалов до невысоких температур (ниже температуры плавления) с помощью плазменных горелок используется сравнительно редко. Однако в последнее время все чаще начинает применяться плазменно-механическая обработка. Сущность метода состоит в том, что при резании высокопрочных металлов и сплавов перед резцом устанавливается плазмотрон, нагревающий узкую полоску обрабатываемого материала. Так как при нагреве прочность материала снижается, а пластичность повышается, можно без существенного ущерба для качества поверхности увеличить подачу и глубину резания. Плазменно-механическая обработка применяется также для сплавов на основе вольфрама и молибдена, материалов, в поверхностных слоях которых при обычной механической обработке образуются микротрещины.

В промышленности широко применяется плазменная плавка металлов, сплавов и неметаллических материалов. Данный способ отличается высокой стабильностью, простотой и гибкостью технологического процесса, при этом улучшается качество металла отливок. Плазменный нагрев используется для плавки металлов с последующим измельчением расплава и кристаллизации его в виде малоразмерных капель. Такой измельченный материал является исходным сырьем для порошковой металлургии.

Сварка с использованием плазменных источников энергии по сравнению с обычной, выполняемой свободной электрической дугой, позволяет получить большую глубину проплавления и меньшую ширину шва и соответственно более узкую зону термического влияния. За один проход плазменной сваркой удается сваривать детали толщиной до 20 мм. Для сварки заготовок толщиной 0,025...1,0 мм используется микроплазменная сварка, характеризующаяся током дуги 0,1...10 А.

Широкое применение в промышленности нашла плазменная наплавка, заключающаяся в нанесении на поверхность детали специальных слоев материала. Для наплавки обычно применяются материалы со специальными свойствами (высокая твердость, повышенная износостойкость и т.д.). Толщина наплавленных за один проход слоев может достигать 4...5 мм. Наплавку проводят плазменными горелками косвенного действия, что дает возможность регулировать глубину проплавления основного материала посредством изменения расстояния между горелкой и заготовкой. С помощью плазменной наплавки в ремонтных цехах восстанавливают дорогостоящие узлы и детали (штампы, пресс-формы, валки и т.д.).

Плазменное напыление отличается от наплавки тем, что напыляемый материал нагревается в плазмотроне и затем осаждается на подложку. При этом температура подложки может изменяться в широких пределах. В некоторых случаях температура детали при напылении может составлять 100...200°C. Существует две основные разновидности процесса: напыление материала из прутка или проволоки и напыление порошкового материала.

Плазменное напыление также используется для формирования деталей. При этом материал напыляется на шаблон, который в дальнейшем растворяется или разбирается на части. Такое формирование деталей используется для получения тиглей, деталей ракетных двигателей и МГД-генераторов.

Плазменная резка наряду с кислородной и воздушно-дуговой относится к группе процессов термической резки, которые имеют целый ряд преимуществ по сравнению с резанием меха-

ническим инструментом. Это прежде всего малая зависимость производительности операции от механических свойств разрезаемых материалов, возможность разрезания заготовок значительной толщины, получение резов любой конфигурации. Плазменной резкой можно разрезать практически любые металлы и сплавы, в то время, как, например, кислородная резка пригодна только для углеродистых сталей. Существуют две основные разновидности плазменной резки: разделительная, когда материал разрезается на всю глубину; поверхностная, называемая строжкой.

В основе физико-химического механизма данной операции лежит локальное расплавление металла в зоне реза и удаление его в жидкой фазе за счет газодинамического напора, создаваемого потоком плазмы. Операция является бесконтактной. В прилегающем к зоне реза металлу остается слой оплавленного металла толщиной в несколько десятых долей миллиметра.

При плазменной резке чаще всего используются плазмотроны прямого действия благодаря их более высокому КПД, и только для тонких (менее 1...2 мм) заготовок и неэлектропроводных материалов применяется схема резки в режиме плазменной струи. При резке листовых материалов из углеродистых и легированных сталей в качестве плазмообразующего газа применяют в основном воздух, реже кислород и кислородосодержащие смеси. Цветные металлы и сплавы лучше разрезать с использованием аргона, азота, водорода и их смесей.

В последнее время в самостоятельное направление выделяют микроплазменную резку, которая проходит при сравнительно малой силе тока (5...100 А). Этот процесс позволяет производить разделение металлов толщиной до 6...8 мм при ширине реза не более 0,8...1,0 мм. Оборудование для микроплазменной резки имеет меньшие габариты и массу, более высокую стойкость плазмотрона, меньший расход газов. В дальнейшем, по-видимому, микроплазменная резка заменит механическую резку тонколистовых металлов в заготовительном цикле производства.

Микроплазменная резка в режиме струи находит применение для раскроя неметаллических материалов: тканей, сеток, пленок. При плазменной резке синтетических тканей происходит оплавление их кромок, что позволяет фиксировать волокна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богданович В. И., Барвинок В. А., Цидулко А. Г. Системный анализ технологических методов обработки: Учеб. пособие / Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1989. 68 с.
2. Смеляков Е. П. Электрогидроимпульсная штамповка деталей из лис-

товых и трубчатых заготовок: Учеб. пособие / Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1987. 54 с.

3. *Лебедев Г. М.* Магнитно-импульсная штамповка деталей летательных аппаратов: Конспект лекций / Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1988. 64 с.

4. *Дудин А. А.* Физические основы высокоскоростной обработки материалов в авиастроении: Конспект лекций / Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1986. 40 с.

5. *Артамонов Б. А., Волков Ю. С., Дрожалов В. И.* Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: Учеб. пособие (в 2-х томах) / Под ред. *В. П. Смоленцева*. М.: Высшая школа, 1983. 455 с.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
1. Классификация электрофизических методов	4
2. Электронно-лучевая обработка материалов	6
2.1. Основные сведения об электронно-лучевых методах обработки материалов	6
2.2. Физические принципы получения и формирования электронного пучка	7
2.3. Взаимодействие электронного пучка с веществом	9
3. Лазерная обработка материалов	14
3.1. Физические принципы получения полихроматических и лазерных пучков излучения	14
3.2. Взаимодействие излучения ОКГ с веществом	19
3.3. Применение лазерных методов обработки материалов	23
4. Электроэрозионная обработка материалов	26
4.1. Основные сведения об электроэрозионных методах обработки	26
4.2. Физико-химические закономерности электроэрозионной обработки материалов	26
4.3. Формирование поверхностного слоя при электроэрозионной обработке	30
5. Плазменные методы обработки материалов	32
5.1. Применение плазмы в технике и технологии	32
5.2. Физические принципы получения плазмы для технологических целей	33
5.3. Основные физические характеристики и свойства плазмы	36
5.4. Взаимодействие плазмы с веществом	42
5.5. Основные закономерности обработки материалов плазмой дуги высокого давления	45
Библиографический список	51

Богданович Валерий Иосифович

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ
В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Редактор Е. Д. Антонова
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор Н. С. Куприянова

Свод. тем. пл. № 120.

Сдано в набор 06.03.90 г. Подписано в печать 28.06.90 г.

ЕО 00444. Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная.

Гарнитура литературная. Печать высокая.

Усл. п. л. 3,25. Усл. кр.-отт. 3,3. Уч.-изд. л. 3,15.

Тираж 500 экз. Заказ 313. Цена 10 коп.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С. П. Королева,
443086, Куйбышев, Московское шоссе, 34.

Тип. ЭОЗ Куйбышевского авиационного института,
443001, Куйбышев, ул. Ульяновская, 16.