

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
**ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАЗМЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО
УПРОЧНЕНИЯ И МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ**

Для студентов, обучающихся по направлению 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

Донецк – 2018 р.

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"

КАФЕДРА «ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
**ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАЗМЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО
УПРОЧНЕНИЯ И МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ**

Для студентов направления 22.04.01 «Материаловедение и технологии
материалов»

Рассмотрено:

На заседании кафедры физического материаловедения
протокол № 1 от 31.08.2018 г.

Зав.кафедрой _____ Н.Т.Егоров

Утверждено:

На заседании учебно-методической комиссии по
направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии
материалов».

Председатель комиссии

_____ В.П. Горбатенко

Донецк – 2018 р.

УДК 608.1
ББК 34.2
М54

Рецензенты:

Штырно Алла Петровна – кандидат технических наук, доцент кафедры физического материаловедения ГОУВПО «ДОННТУ»;

Кузин Андрей Викторович - кандидат технических наук, доцент кафедры руднотермических процессов и малоотходных технологий ГОУВПО «ДОННТУ».

Составитель:

Крымов Виталий Николаевич - кандидат технических наук, доцент кафедры физического материаловедения ГОУВПО «ДОННТУ»

Ответственный за выпуск:

Егоров Николай Тимофеевич - кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой физического материаловедения ГОУВПО «ДОННТУ»

Методические указания к практическим работам по курсу “Теория и технология плазменного поверхностного упрочнения и модифицирования поверхности” (для студентов направления подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов») [Электронный ресурс] / Сост.: Крымов В.Н., – Электрон. дан. (1 файл: 0,7 Мб). - Донецк : ДОННТУ, 2018. - Системные требования: Acrobat Reader.

В методических указаниях приведены теоретические сведения, описана методика выполнения лабораторных работ, составлен перечень контрольных вопросов

Оглавление

Занятие 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ИОНИЗАЦИИ ПЛАЗМЫ.....	5
Занятие 2. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛОМ.....	8
Занятие 3. РАСЧЕТ СКОРОСТИ НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЫ	13
Занятие 4. ЛОКАЛЬНАЯ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ	18
Приложение А.....	23
Приложение Б	24
Приложение В.....	26
ЛИТЕРАТУРА	29

Занятие 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ИОНИЗАЦИИ ПЛАЗМЫ

При очень низких температурах все вещества находятся в твёрдом состоянии. Нагрев вызывает переход вещества в жидкое, а затем и в газообразное состояние.

Пусть в замкнутом сосуде, сделанном из очень тугоплавкого материала, находится небольшое количество какого-либо вещества. Начнём подогреть сосуд, постепенно повышая его температуру. Если первоначально вещество, содержащееся в сосуде, было в твёрдом состоянии, то в некоторый момент оно начнёт плавиться, а при ещё более высокой температуре испариться и образовавшийся газ равномерно заполнит весь объём. Когда температура достигнет достаточно высокого уровня, все молекулы газа (если это молекулярный газ) диссоциируют. В результате в сосуде будет содержаться газообразная смесь элементов, из которых состоит вещество. Атомы этих элементов будут быстро и беспорядочно двигаться, испытывая время от времени столкновения между собой.

Допустим, что стенки сосуда способны противостоять сколь угодно высокой температуре, не разрушаясь и не испытывая никаких изменений. Итак, нагревание продолжается. В таком случае уже при 3 000 – 5 000 градусов мы сможем заметить признаки проявления новых процессов, которые будут связаны с изменением свойств самих атомов вещества. Как известно, каждый атом состоит из положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома, и электронов, вращающихся вокруг ядра и образующих электронную оболочку атома. Эта оболочка и в особенности её внешний слой, содержащий электроны, сравнительно слабо связанные с ядром, обладают довольно хрупкой структурой. При столкновении атома с какой-либо быстро движущейся частицей один из внешних электронов может быть оторван от атома, который превратится в положительно заряженный ион. Именно этот процесс *ионизации* и будет наиболее характерен для рассматриваемой стадии нагревания вещества. При достаточно высокой температуре газ перестаёт быть нейтральным: в нём появляются положительные ионы и свободные электроны, оторванные от атомов.

В условиях, когда нагретое вещество находится в тепловом равновесии с окружающей средой (в нашем случае со стенками воображаемого идеального сосуда) при температуре в несколько десятков тысяч градусов, подавляющая часть атомов в любом газе ионизирована, и нейтральные атомы практически отсутствуют. Например, при $T = 30\,000$ градусов на 20 000 положительных ионов приходится всего лишь один нейтральный атом.

Таким образом, плазма – это частично или полностью ионизированный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически совпадают, т. е. в целом плазма является электрически нейтральной системой. Т.е.,

$$\rho_+ = |\rho_-| \text{ или } \rho_+ + \rho_- = 0 \quad (1)$$

где ρ – плотности положительных и отрицательных зарядов.

Кроме термической, может происходить ударная ионизация заряженными частицами (например, при электрическом разряде в газе), а также ионизация при воздействии электромагнитного (например, рентгеновского, ультрафиолетового и т.п.) излучения – фотоионизация.

При ионизации атом может терять не один, а несколько электронов. Но для этого необходимо применять более высокоэнергетическое воздействие. Например, окончательная ионизация тяжёлых элементов произойдет только при очень высоких температурах (десятки миллионов градусов, см. рис. 1).

Таким образом, учитывая возможность потери атомом нескольких электронов, степень ионизации может превышать 100%.

Степень ионизации определяется как доля ионизованных атомов, относительно общего

количества атомов в системе:

$$\alpha = \frac{n_i}{n_n} \quad (2)$$

В условиях теплового равновесия она определяется формулой Саха:

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 2,4 \cdot 10^{21} \frac{\sqrt[3]{T^2}}{n_n} e^{-\frac{U_i}{kT}} \quad (3)$$

где n_i и n_n - концентрация (число частиц в 1 м^3) ионизованных и нейтральных атомов соответственно;

T - температура газа в К;

k - постоянная Больцмана;

U_i - энергия ионизации, т.е. энергия, необходимая для удаления электрона с внешней электронной оболочки атома.

Полученное из выражения (3) значение представляет собой долю ионизованных частиц. Для получения привычной процентной доли, его необходимо умножить на 100%.

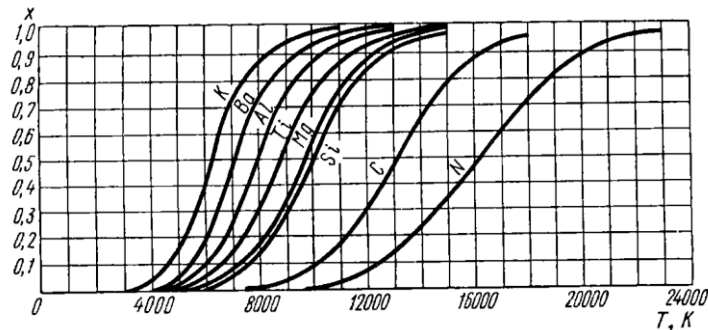


Рисунок 1 – Зависимость степени ионизации некоторых элементов от температуры. Давление атмосферное

При нормальной температуре степень ионизации воздуха ничтожна. Например, для азота она составляет величину 10^{-122} %. С ростом температуры степень ионизации остается низкой до тех пор, пока средняя кинетическая энергия молекул газа не станет всего лишь в несколько раз меньше энергии ионизации U_i . После этого, α резко возрастает и газ переходит в плазменное состояние. При дальнейшем возрастании температуры концентрация нейтральных частиц становится меньше концентрации ионизованных атомов, и плазма, в конечном счете, оказывается полностью ионизованной. Именно поэтому полностью ионизованная плазма составляет астрономические тела температурой несколько миллионов градусов и отсутствует на Земле.

Термоионизация газа происходит в тех случаях, когда средняя кинетическая энергия молекул газа превышает энергию ионизации: $\{E\} > U_i$, где

$$\{E\} = \frac{3}{2} kT$$

Нетрудно убедиться, что ионизация газа при тепловых соударениях молекул возможна лишь при очень высоких температурах $T > \frac{2U_i}{3k}$.

Вычисления показывают, что для азота с энергией активации 14,5 эВ термоионизация возможна при температурах более 100000 К.

$$T > T_i = \frac{2 \cdot 14,5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} \text{ К} \approx 1,1 \cdot 10^5 \text{ К}.$$

В технических задачах во многих случаях используется не один газ, а смеси. Самый

простой пример – воздушная плазма, используемая в установках воздушно плазменной резки. В этом случае используют эффективную энергию (или эффективный потенциал ионизации), под которым понимают потенциал ионизации некоторого однородного газа, в котором число заряженных частиц такое же, как и в газовой смеси.

Его рассчитывают по формуле Фролова.

$$U = -\frac{T}{5800} * \ln \sum_1^k C_i^{1/2} * \exp\left(-\frac{5800*U_i}{T}\right),$$

где К- число газов, находящихся в смеси;

C_i - концентрация I-го газа в смеси;

U_i - потенциал ионизации i-го газа.

В зависимости от степени ионизации плазма подразделяется на слабо ионизованную (α составляет доли процента), частично ионизованную (α около нескольких процентов) и полностью ионизованную (α близка к 100 %). Слабо ионизованной плазмой в природных условиях является ионосфера Земли, тлеющий разряд. Во Вселенной слабоионизованная плазма - это солнечный ветер, атмосферы холодных звезд, холодные облака межзвездного газа. Горячие звезды, туманности, солнечная корона и некоторые межзвездные облака - это полностью ионизованная плазма, которая образуется при высокой температуре.

Задание.

Используя приведенные в приложении А справочные данные, по заданию преподавателя выполнить следующий расчет.

1. Определить степень ионизации аргона при температуре 10 000 К.
2. До какой температуры необходимо нагреть пары железа, чтобы получить степень ионизации 50%
3. Рассчитать степень ионизации в плазме установки воздушно-плазменной резки при температуре 15 000 К, считая, что воздух содержит, %: 78 азота, 21 кислорода, 1 аргона.
4. Выполнить расчет для предыдущего задания, считая, что аргона в воздухе нет.
5. Рассчитать степень ионизации воздуха (см. вариант 3) при добавлении к нему 2% паров калия, замещающих, например, 2% азота.

Вопросы по теме.

1. Что называется степенью ионизации?
2. При каком условии происходит термическая ионизация газа?
3. Какое деление плазмы существует по степени ионизации? Приведите примеры.

Занятие 2. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛОМ

Физико-химические процессы при воздействии плазменной струи (дуги)

При воздействии плазменной струи (дуги) на поверхности обрабатываемого материала протекают различные физико-химические процессы. Характер их протекания определяется температурой, скоростью и временем нагрева, скоростью охлаждения плазмотрона, свойств обрабатываемого материала и т.д.

В основе плазменного поверхностного упрочнения металлов лежит способность плазменной струи (дуги) создавать на небольшом участке поверхности высокие плотности теплового потока, достаточные для нагрева, плавления или испарения практически любого металла. Основной физической характеристикой плазменного упрочнения является температурное поле, значение которого дает возможность оценить температуру в разных точках зоны термического воздействия (в разные моменты времени), скорость нагрева и охлаждения, а в конечном итоге структурное состояние и фазовый состав поверхностного слоя материала.

Тепловые процессы при плазменном нагреве

Процессы поверхностного упрочнения требуют применения концентрированного источника нагрева с плотностью теплового потока на поверхности материала $10^3 - 10^6$ Вт/см². Основным фактором, отличающим плазменный нагрев от лазерного нагрева, является механизм взаимодействия источника энергии с материалом. При лазерном нагреве световой поток излучения, направленный на поверхность материала, частично отражается от нее, а частично поглощается материалом в виде излучения. Излучение, проникающее вглубь материала, практически полностью поглощается свободными электронами проводимости в приповерхностном слое толщиной 0,1-1 мкм. Поглощение приводит к повышению энергии электронов, и вследствие этого, к интенсификации их столкновений между собой и передаче энергии кристаллической решетке металла. Тепловое состояние металла характеризуется двумя температурами: электронной T_e и решеточной T_i , причем $T_e \gg T_i$. С течением времени (начиная со времени релаксации $t_p \sim 10^{-9}$ с) разность температур $T_e - T_i$ становится минимальной и тепловое состояние материала можно охарактеризовать общей температурой T_m . Дальнейшее распределение энергии вглубь материала осуществляется путем теплопроводности.

Нагрев поверхности материала плазменной струей осуществляется за счет вынужденного конвективного и лучистого теплообмена:

$$q = q_k + q_l \quad (2.1.)$$

Для приближенных расчетов тепловых потоков в поверхности используется модель лучистого и конвективного теплообмена основанная на теории пограничного слоя, Плотность конвективного теплового потока определяется из выражения:

$$g_i = \sum \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \sum \rho v H + \rho \sum K_T v \quad (2.2.)$$

где λ – коэффициент теплопроводности,
 H - энтальпия единицы массы,
 K_T - термодиффузионный коэффициент,
 y - координата, нормальная к обрабатываемой поверхности.

В общем виде конвективный нагрев поверхности обусловлен переносом энергии плазменной струи под действием теплопроводности, диффузии. На практике используют более простое выражение:

$$q = \lambda(T_{\text{плазм.}} - T_{\text{пов.}}) \quad (2.3.)$$

где λ – коэффициент теплопроводности
 $T_{\text{плаз}}$ – температура плазменной струи на внешней границе пограничного слоя,
 $T_{\text{пов}}$ – температура поверхности.

Связь между λ и параметрами плазменной струи выражается через критериальные зависимости (число Нуссельта, Прандля, Рейнольдса и т.д.).

Доля лучистого переноса энергии от плазменной струи к поверхности металла составляет 2-8% от общего баланса энергии. В случае использования импульсной плазменной струи доля лучистого теплообмена возрастает до 20-30%. Лучистый поток к единице площади поверхности в нормальном направлении определяется следующим образом:

$$g_k = \xi_1 \xi_2 \cdot \sigma_c T \quad (2.4.)$$

где ξ_1 – интегральная поглощательная способность поверхности,
 ξ_2 – степень черноты плазмы;
 σ_c – постоянная Стефана-Больцмана;
 T – температура плазмы.

Учитывая, что теплообмен между струей и поверхностью в основном определяется конвективной составляющей теплового потока, то пренебрегая лучистым теплообменом (за исключением импульсной плазменной струи) можно рассчитать тепловой поток по выражению Фей-Риддела:

$$g = 0,763 P^{-0,6} \sqrt{\mu \rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right)_0} \left(\frac{\rho_0 \mu_0}{\rho \mu} \right)^{0,1} \cdot \left[1 + (L_e^n - 1) \frac{\alpha \Delta h_p}{h} \right] (h - c_p^0 T_n) \quad (2.5.)$$

или

$$g = 0,763 P^{-0,6} (\rho \mu)_\omega^{0,1} (\rho \mu)_s^{0,4} [1 + (L_e^{0,52} - 1)] \cdot \frac{h_d}{h_s} \sqrt{\frac{dv_e}{dr}} (h_s - h_\omega) \quad (2.6)$$

где P_r – усредненное число Прандля¹,
 $(\rho \mu)_\omega$, $(\rho \mu)_s$ – плотность и коэффициент динамической вязкости плазмы при температурах, соответственно, поверхности тела и внешней границы пограничного слоя,
 L_e – число Льюиса – Семенова,
 L_d – энергия диссоциации, умноженная на весовую долю атомов, соответствующую температуре струи,
 (dv_e/dr) – градиент скорости в критической точке, равный $\sim V_{\text{плазм}} / d_{\text{сопла}}$
 h_s – полная энтальпия плазменной струи.

где — кинематическая вязкость; — динамическая вязкость; — плотность; — коэффициент теплопроводности; — коэффициент температуропроводности; — удельная теплоёмкость среды при постоянном давлении.

При нагреве поверхности металла плазменной дугой (плазмотрон прямого действия), эффективность нагрева возрастает за счет электронного тока q_e

$$q = q_k + q_{л} + q_e \quad (2.7.)$$

Эффективный КПД плазменно-дугового нагрева на 10-30 % выше, чем при использовании плазменной струи и может достигать 70=85 %. Энергетический баланс плазменного нагрева при атмосферном давлении выглядит следующим образом:

70 % - конвективный теплообмен;

20 % - электронный ток;

10 % - лучистый теплообмен.

При использовании плазменной струи (дуги), как источника тепловой энергии, наибольший интерес представляет распределение теплового потока по пятну нагрева. Распределение удельного теплового потока q_z в пятне нагрева приближенно описывается законом нормального распределения Гаусса:

$$q_z = q_{2m} \exp(-Kr^2) \quad (2.9.)$$

где Kr - коэффициент сосредоточенности, характеризующий форму кривой нормального распределения, а следовательно концентрацию энергии в пятне нагрева, q_{2m} - максимальный тепловой поток.

Коэффициент сосредоточенности играет большое значение в процессах плазменного упрочнения, т.к. - регулирует скорость нагрева поверхностного слоя металла. Максимальная плотность теплового потока в центре пятна нагрева связана коэффициентом сосредоточенности выражением:

$$g = g_{2m} \frac{\pi}{K} \quad (2.10.)$$

Теплообмен между плазменной струей и упрочняемой поверхностью происходит в области пятна нагрева, условный диаметр которого равен:

$$d_n = 3.46/(K)^{1/2}$$

На границе этого пятна нагрева удельный тепловой поток составляет 0.05 % от максимального g_{2m} .

Параметры режима работы плазмотрона оказывают сильное влияние на коэффициент сосредоточенности. С увеличением силы тока K возрастает. Уменьшение диаметра сопла ($d_c \leq 5$) увеличивает K . С увеличением расхода плазмообразующего газа коэффициент сосредоточенности имеет максимум, рис.2.

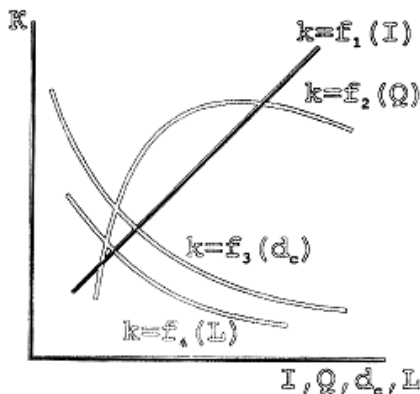


Рисунок 2.1 – Зависимость коэффициента сосредоточенности от силы тока дуги (I), расхода газа (Q), диаметра сопла (d_c), и расстояния от сопла до поверхности (L)

На коэффициент сосредоточенности оказывает большое влияние способ подачи газа, геометрия сопла и электрода. В таблице Б.1. приведены экспериментальные и расчетные величины эффективного КПД нагрева, коэффициента сосредоточенности, тепловой плазменной

дуги в зависимости от способа подачи плазмообразующего газа, геометрии сопла и катода. Видно, что переход от максимальной к тангенциальной подаче газа в сопло (при постоянном расходе) увеличивает коэффициент сосредоточенности на 15-40 % при одновременном увеличении эффективного КПД нагрева. Параболическая форма сопла формирует хорошо направленный плазменный поток, по сравнению с другими формами, однако степень сжатия дуги при этом снижается.

Использование кольцевого катода предпочтительнее при тангенциальной подаче газа, т.к. в случае аксиальной подачи нарушается однородность столба дуги

При использовании сопла с фокусирующим газом коэффициент сосредоточенности увеличивается. От степени обжатия столба дуги зависят энергетические характеристики плазмотронов (напряжение дуги, эффективная тепловая мощность, концентрации теплового потока и др.). Так, сжатие дуги, горящей в аргоне при силе тока 150-200 А (за счет изменения диаметра сопла и его положения по длине вольфрамового катод а), привело к увеличению напряжения дуги и напряженности электрического поля в столбе дуги, рис.2.2.

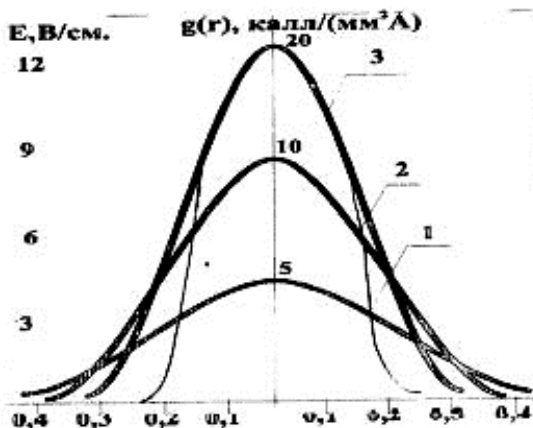


Рис.2.2 - Распределение теплового потока дуги $q(r)$ по радиусу пятна нагрева малоамперной дуги в зависимости от степени сжатия. 1-свободно горящая электрическая дуга; 2- незначительно сжатая электрическая дуга; 3- сжатая электрическая дуга

На коэффициент сосредоточенности аргоновой плазменной дуги оказывают влияние добавки WF_6 , SF_6 , $SiCl_4$, CCl_4 и других газов. Так небольшая добавка (0,02-0,5 %) BP_3 к аргону при одинаковых начальных условиях увеличивает эффективный КПД нагрева в среднем на 10-15 %, табл.2.2.

Таблица 2.2. - Влияние добавок галогенидов к плазмообразующему газу на коэффициент сосредоточенности и эффективный КПД нагрева.

Плазмообразующий газ	Эффективный КПД нагрева, %	Коэффициент сосредоточенности, $см^2$
Ar	60	11,6
Ar + BF_3	68	14,5
Ar + CCl_4	66	13,8
Ar + WF_6	70	15,2

Увеличение коэффициента сосредоточенности объясняется деионизирующим воздействием галогенов в периферийной области столба дуги, что приводит к уменьшению сечения области проводимости и к повышению температуры.

Известно положительное влияние галогенов на увеличение глубины проплавления при аргоно-дуговой сварке, что также связывается с эффектом контрагирования столба сварочной дуги. Проведенные эксперименты показали, что при плазменном поверхностном упрочнении в режиме дуги через слой галогенида, глубина уточненного слоя стали 45 увеличивается в 1,2-2,5 раза. Эффект увеличения глубины упрочнения тем выше, чем больше атомов галогена содержит флюс, а также выше потенциал ионизации металла, входящего в соединение с галогеном. Галогены, увеличивающие глубину упрочненного слоя можно расположить в следующем порядке: фтор>бром>хлор>йод. Нанесение галогенов на поверхность металла связано с определенными трудностями, что ограничивает применение этого эффекта на практике.

При использовании импульсной плазменной струи старость нагрева поверхности

металла при длительности теплового импульса в пределах 100 мкс, достигает 10^7 град/с, а скорость охлаждения 10^6 град/с. При сокращении длительности импульса до 10 мкс, скорость нагрева и охлаждения увеличивается на порядок. Распределение теплового потока импульсной струи описывается кривой нормального распределения, а коэффициент сосредоточенности имеет несколько большее значение:

$$K = \frac{12 \div 16}{d_n^2} \quad (2.11)$$

По концентрации теплового потока в пятне нагрева импульсные плазменные струи приближаются к электронному лучу и намного превосходят стационарные плазменные струи.

Вопросы по теме.

1. В чем отличие между механизмами передачи энергии при плазменном и лазерном воздействии? Какие технологические преимущества низкотемпературной плазмы, в связи с этим, можно назвать?
2. Какую роль играет распределение энергии по сечению струи плазмы?

Занятие 3. РАСЧЕТ СКОРОСТИ НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЫ

Тепловые процессы при плазменном поверхностном упрочнении наиболее просто можно вычислить по известным аналитическим выражениям, которые представляют собой решение дифференциальных уравнений теплопроводности в линейной постановке при линейных граничных условиях.

Уравнение процесса распространения тепла в массивном полубесконечном теле от мощного быстро движущегося нормально-распределенного источника нагрева, каким является плазменная струя, имеет вид

$$T_{(y,z,t)} = T_0 + \frac{g}{2\pi\lambda v} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right)}{\sqrt{t(t_0+t)}} \quad (3.1)$$

где T_0 - температура нагрева;
 y, z - ширина и глубина пятна нагрева;
 t - время;
 t_0 - начальная температура тела;
 g - эффективная мощность плазменной струи, Вт/см²;
 λ, α - коэффициенты теплопроводности и температуропроводности;
 v - скорость перемещения источников, мм/с.

Уравнение распространения тепла для случая упрочнения плазменной дугой для точек, расположенных под центром анодного пятна, при скорости перемещения $v < 36$ м/ч имеет вид:

$$T_{(z,t)} = \frac{2g\sqrt{at}}{\lambda} [i\Phi(R_0) - i\Phi(R)], \text{ где}$$

$$i\Phi(R) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-R^2) - R \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_R^0 \exp(-\xi^2) d\xi$$

$$R_0 = Z / (2\sqrt{at})$$

$$R = \sqrt{z^2 + r^2} / (2\sqrt{at}) \quad (3.2)$$

где, r - радиус анодного пятна;
 z - координата по глубине.

При действии на поверхность полубесконечного тела теплового источника движущегося вдоль оси X, следует различать медленно движущийся, быстро движущийся и импульсный источники тепла. Первый случай имеет место тогда, когда теплонасыщение успевает произойти раньше, чем пятно нагрева пройдет расстояние, равное радиусу пятна нагрева. При этом максимальная температура нагрева материала находится в центре пятна нагрева. По мере увеличения скорости перемещения теплового источника максимум температуры сдвигается к краю нагрева, в сторону, противоположную направлению перемещения теплового источника. Если тепловой источник движется с постоянной скоростью, то через определенный промежуток времени температурное поле вокруг движущегося источника стабилизируется. При упрочнении импульсной плазменной струей,

время распространения теплового потока соизмеримо со временем воздействия плазменной струи на материал. В реальных условиях после прекращения действия теплового источника происходит выравнивание температуры. При этом в начальный момент времени, после прекращения действия происходит продвижение изотермы с фиксированной температурой вглубь материала и после достижения определенной глубины Z_{max} имеет место, обратное перемещению данной изотермы. Для одномерного случая температура любой точки материала на оси теплового источника, расположенного ниже плоскости $Z = 0$, определяется из выражения:

$$T_{(z,t)} = \frac{q}{\lambda} 2(at)^{1/2} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right) - \frac{z}{2(at)^{1/2}} \Phi\left(\frac{z}{2(at)^{1/2}}\right) \right\} \quad (3.2)$$

где Z - расстояние по оси;

Φ - функция ошибок (ierfc);

$\tau_{им}$ - длительность нагрева;

r - радиус пятна нагрева;

a, λ - коэффициенты температуропроводности и теплопроводности.

При $0 < \tau < \tau_{им}$ в уравнении (3.2) приводится к упрощенному виду:

$$T_{(z,t)} = \frac{2W}{\lambda} (\sqrt{at} \text{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right)) \quad (3.3)$$

Плотность энергии в пятне нагрева W выражается следующей зависимостью:

$$W = \frac{4g_{эф}\tau}{\pi d^2} \quad (3.40)$$

где $g_{эф}$ - эффективная тепловая мощность плазменной струи (дуги),

τ - длительность нагрева,

d - диаметр пятна нагрева.

С целью последующего вычисления протяженности по глубине зоны нагрева до температуры T удобно использовать выражение для расчета температур в неявном виде, полученное при допущении $\tau_n \gg \sqrt{at}$

$$T_{(z,t)} \approx \frac{W}{\lambda} \left(2\sqrt{\frac{at}{\pi}} - Z\right) \quad (3.5)$$

где Z - глубина нагрева до температуры $T(z, t)$.

Из выражения (3.5) можно получить простую формулу определения протяженности по глубине зоны нагрева до заданной температуры за счет плазменного нагрева.

$$Z = \frac{2\sqrt{(a*\tau_{им})}}{\pi} - \frac{T\lambda}{w} \quad (3.5)$$

Для получения за один проход широкой упрочненной дорожки, при упрочнении применяют сканирование (магнитные или механические системы) плазменной струи (дуги) по поверхности в направлении перпендикулярном поступательному перемещению. С целью упрощения модель для приближенной оценки параметров сканирования можно представить

в виде плоской задачи.

Известно, что в случае использования модели одновременного нагрева полубесконечного тела поверхностным тепловым источником с постоянной во времени интенсивностью, можно получить соотношения плотности мощности g_m , требуемой для достижения на поверхности максимальной температуры T_{max} .

$$g_m = T_{max} \alpha C_p \sqrt{\pi} / (4 \alpha \tau) \quad (3.6)$$

где α – коэффициент температуропроводности;

C_p - объемная теплоемкость;

τ - время нагрева.

Для нагрева плазменной струей (дугой)

$$t = d/v, \quad g = g_n/S \quad (3.7)$$

где d - диаметр пятна нагрева в направлении движения;

v - скорость перемещения пятна, относительно детали;

g_n - полная мощность, подводимая к плазмотрону;

S - площадь, обрабатываемая плазменной струей.

В случае упрочнения без оплавления поверхности, необходимо, чтобы T_{max} на поверхности материала не превышала температуру плавления.

Тогда, согласно должно выполняться условие

$$g_m \sqrt{t} \leq T_{пл} \alpha c_p \sqrt{\pi} / 4a \quad (3.8)$$

где знак равенства соответствует максимальной глубине закалки, без оплавления поверхности.

При разработке технологических процессов на практике необходимо иметь простые и удобные аналитические выражения для расчета основных параметров упрочнения. Скорость нагрева локальной зоны определяется из выражения:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{g_s \sqrt{a}}{\lambda \sqrt{\tau}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2/4at}$$

где g_s - плотность мощности плазменной дуги;

α, λ - коэффициенты температуропроводности и теплопроводности;

τ - время воздействия;

h - глубина упрочнения.

Значение плотности мощности плазменной дуги достаточной для фазовых превращений определяют:

$$g_s = \frac{\sqrt{\pi} T_{зак} B}{2\sqrt{\tau}}$$

где $T_{зак}$ - температура закалки;

B - коэффициент аккумуляции теплоты.

Глубина закаленного слоя определяется из выражения:

$$h = \frac{P}{vd} \frac{4K_n}{\pi \rho (Q + C_T (T_c + \Delta T)) K_B}$$

где P - мощность плазменной дуги;

v - скорость перемещения плазменной струи;
 d - диаметр пятна нагрева;
 ρ - плотность материала;
 C_T - удельная теплоемкость;
 Q - теплота плавления;
 K_b - коэффициент, учитывающий качество обрабатываемой поверхности.

Скорость обработки определяется как:

$$v = \frac{8a \cdot v \Delta T^3}{\pi(T_c + \Delta T)^2 \sqrt{h^3}}$$

Экспериментальные исследования процесса плазменного упрочнения сталей 9ХФ, 40Х, У8, Х12М, показали, что максимальная поверхностная твердость после упрочнения пропорциональна величине углеродного эквивалента $C_{эkv}$, а глубина упрочнения зависит от коэффициента температуропроводности. Это позволило установить зависимость вида:

$$HV_{max} = f(g, v, C_{эkv});$$

$$h = f(g, v, a)$$

В виде аппроксимационных моделей этих зависимостей выглядят следующим образом:

$$HV_{max} = (-0.308271 v^2 + 1.23441 g^2 + 12.792 a^2 + 1.71723 v g - 1.54273 v C_{эkv} - 1.7919 v + 0.36981 g - 18.2439 C_{эkv} + 11,223) \cdot 10^{-3}$$

$$h_{max} = 262.5v^2 + 50.3g^2 + 1466.7a^2 + 107.7vg + 53.1va - 47.1ga - 938.1v + 199.4g - 5.6734a + 687$$

Таблица 2.1 - Экспериментальные и расчетные значения поверхностной твердости HV_{max} , в зависимости от входных параметров ($g, v, C_{эkv}$)

V, м/с	g, кВт/м ²	C, %	HV _{эксп} , Н/мм ²	HV _{рас} , Н/мм ²
5	10	0,05	6000	6383
5	15	1,05	10500	10156
5	25	0,9	9000	8702
1	10	0,9	6700	6359
1	15	0,45	5900	6045
1	25	0,6	5300	5852
2,5	10	0,45	3100	2961
2,5	15	0,75	4200	4369
2,5	20	0,6	4900	5202
2,5	25	0,9	9800	8000

Таблица 2.2. - Экспериментальные и расчетные значения глубины упрочнения от h_{max} входных параметров

№	v, м/с	g, кВт/м ²	a, см ² /с	h _{эксп} , мкм	h _{рас} , мкм
1	2	3	4	5	6
1.	0,5	10	0,1	600	623
2.	0,5	15	0,15	890	831
3.	0,5	20	0,12	920	882
4.	0,5	25	0,06	930	945

5.	0,5	30	0,08	1250	1167
6.	1,5	10	0,15	310	335
7.	1,5	15	0,08	250	162
8.	1,5	20	0,06	130	173
9.	1,5	25	0,1	410	390
10.	2,5	10	0,06	45	53
11.	2,5	15	0,1	120	196
12.	2,5	20	0,08	140	150
13.	2,5	25	0,12	330	343
14.	2,5	30	0,15	500	529
15.					

Используя данные, представленные в табл. 2.3 определить по заданию преподавателя следующие величины:

- максимальную температуру на поверхности полубесконечного тела;
- распределение температуры по нормали к поверхности в точке, находящейся на оси плазменной струи;

Таблица 2.3 – Характеристики плазменной струи

№ варианта	Упрочняемый материал	Плотность теплового потока плазмы, Вт/см ²	Скорость перемещения плазмотрона, м/ч	Длительность воздействия плазмы, с
1	Сталь 40	$2,3 \cdot 10^3$	25	0,2
2	Сталь Р6М5	$4,5 \cdot 10^4$	38	0,1
3	Сталь 12Х18Н10	$4 \cdot 10^4$		0,3
4	30ХГСА	$4,5 \cdot 10^4$	35	0,2
5	Сталь У8	$2 \cdot 10^4$	20	0,2

Занятие 4. ЛОКАЛЬНАЯ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

Локальная ХТО с применением ВИЭ (чаще применяется термин «поверхностное легирование»), является перспективным вариантом поверхностного упрочнения. Это объясняется более радикальным изменением свойств, чем при поверхностном термическом упрочнении. Локальная ХТО с плазменным воздействием может применяться для упрочнения небольших участков поверхности деталей или инструмента. Например, режущих кромок резцов. Однако известны примеры экспериментального применения плазменного легирования для обработки довольно больших поверхностей, например, различных частей химических аппаратов.

Поверхностное легирование с применением ВИЭ и, в том числе, с применением низкотемпературной плазмы, имеет следующие характерные особенности:

- 1) Поверхностное легирование осуществляется почти исключительно при обработке с оплавлением поверхности. При этом происходит повышение шероховатости поверхности. Иногда это может сопровождаться образованием характерного рельефа в виде волны. Это является следствием динамического давления, оказываемого плазменной струей (дугой).
- 2) Упрочненный слой с измененным химическим составом характеризуется высокой локальностью. Практически, он ограничен только зоной воздействия плазменной струи. При этом между упрочненным слоем и сердцевиной существует огромный градиент концентрации – слой, в котором происходит изменение концентрации, имеет толщину 5-40 мкм (рис. 4.3). Этот слой образуется как за счет твердофазной диффузии, так и за счет капиллярной диффузии по каналам жидкой фазы, которые образуются по границам зерен.
- 3) Поверхностно легированные слои имеют не диффузионную природу. Поэтому их структура радикально отличается от строения слоев, полученных при обычной ХТО. Проникновение легирующего элемента в ЗО происходит путем его перемешивания с расплавом. Потоки расплава возникают как из-за динамического воздействия плазменной струи (дуги), так и вследствие различия сил поверхностного натяжения на поверхности ЗО. В результате этого расплав начинает двигаться от центра ЗО к периферии с постепенным вовлечением в циркуляцию более глубоких слоев. Скорость таких потоков может достигать нескольких м/с. При недостаточном времени перемешивания распределение легирующего элемента в ЗО может быть неоднородным (рис. 4.1).
- 4) Вследствие высокой скорости охлаждения, при поверхностном легировании могут образовываться метастабильные фазы и пересыщенные твердые растворы. В литературе описываются примеры получения твердых растворов, концентрация которых в десятки раз превышала равновесную.

Плазменная ХТО состоит из следующих процессов:

- подачи легирующего вещества в зону обработки;
- воздействия плазменной струи (дуги), вызывающей оплавление поверхности и насыщение расплава легирующим компонентом;
- кристаллизации за счет теплоотвода в холодную сердцевину изделия.

При необходимости могут выполняться и другие технологические операции, например, отпуск (отжиг), шлифовка.



Рисунок 4.1 – Распределение вольфрама при легировании стали из обмазки, выявленное травлением, х400

Легирующие компоненты могут подаваться в зону обработки разными способами:

- легирование из порошка, свободно подаваемого на поверхность в зону обработки. Такой способ трудно реализуем при плазменном упрочнении из-за сдувания порошка струей плазмы. При использовании ферромагнитного порошка, возможно его удержание с помощью магнитного поля.

- в виде обмазки. Это наиболее распространено. Обмазка наносится с помощью связующего, в качестве которого используется раствор клея БФ-2, этилсиликат, жидкое стекло и др. После нанесения слоем требуемой толщины обмазка должна быть высушена.

- в виде покрытия (например, гальванического, газотермического).

- путем накатки фольги, сделанной из легирующего металла и сплава. Этот способ реализуется только на изделиях простой формы. Естественно, должна быть в наличии фольга требуемого состава.

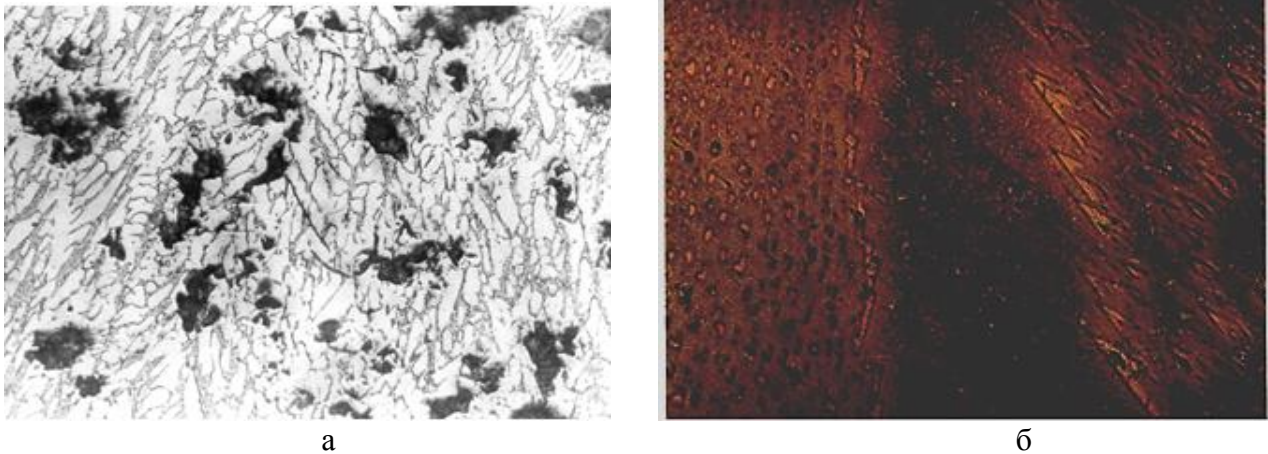
- легирующий компонент может поступать в зону обработки из жидкой или газовой фазы, в которую изделие погружается полностью. Например, науглероживание может осуществляться в среде жидких углеводородов: керосина, ацетона и пр. При легировании из газовой фазы давление газов должно быть намного выше атмосферного. В противном случае, в зоне оплавления невозможно получить сколько ни будь значимую концентрацию легирующего элемента.

Кроме перечисленных способов, низкотемпературная плазма позволяет вводить легирующий компонент, непосредственно подавая его в виде газа или порошка в струю плазмы.

Легирующий элемент может подаваться как в чистом виде (например, углерод в виде сажи, металлический хром, аморфный бор и т.п.), в виде сплава (феррохром, ферробор) или в виде химического соединения (карбид бора, аммиак, соли аммония и пр.). В последнем случае происходит диссоциация соединения. При этом надо иметь в виду, что другие элементы соединения также могут попадать в зону оплавления. Например, при борировании с использованием карбида бора углерод полностью переходит в упрочненный слой.

Упрочненный слой состоит из двух зон: оплавления и термического влияния. Изменение химического состава происходит именно в ЗО. Строение ЗО зависит от концентрации легирующего элемента и от условий кристаллизации. Как правило, кристаллизующаяся из жидкости фаза имеет дендритное строение. В ряде случаев, особенно карбиды или бориды, имеют ограненную или «уголковую» форму (рис. 4.2).

Граница между ЗО и ЗТВ имеет вид размытой со стороны ЗТВ полосы. Её структура зависит как от достигаемой концентрации легирующего элемента, так и от способа травления. В случае легирования углеродом (рис. 4.3) она проявляется в виде полосы со структурой троостита или мартенсита.



а

б

Обмазка: а - карбид бора; б – бор аморфный

Рисунок 4.2 – Строение ЗО низкоуглеродистой стали, легированной бором из обмазки; черные включения – частицы нерастворившегося карбида бора; б – окрашивающее травление, x500



Рисунок 4.3 – Граница зон оплавления и термического влияния образца низкоуглеродистой стали, легированного углеродом, x500

Дендритное строение кристаллизующихся фаз в ЗО является обычным для поверхностного легирования. Как правило, рост дендритов ограничивается осями второго порядка (см. рис. 4.3). Это связано с тем, что оси второго порядка растут в значительном интервале скоростей охлаждения при кристаллизации: 10^2 - 10^6 град/с. Практически, этот интервал охватывает все возможные режимы обработки. При более высокой скорости охлаждения оси второго порядка исчезают, а при дальнейшем ускорении охлаждения образуется структура тонкого конгломерата фаз.

Изменение скорости охлаждения в указанном интервале приводит к изменению расстояния между осями второго порядка. Это расстояние называют дендритным параметром. Установлено, что параметр дендритов (d) связан со скоростью охлаждения зависимостью (4.1).

$$d = A * v^n \quad (4.1)$$

где A и n – коэффициенты, зависящие от состава сплава.

Для ряда сталей и сплавов значения этих констант получены из экспериментов (см. табл 4.1).

Таблица 4.1 – Значения коэффициентов в уравнении (4.1) для некоторых сталей

Сталь	P18	10X20H18	ШХ15
$A * 10^{-2}$	16	2,2	3,6
n	0,45	0,45	0,45

Определив по структуре величину d по выражению (4.1) можно рассчитать примерное значение скорости охлаждения. Опыт показывает, что используя коэффициенты из табл. 4.1 можно определять скорости охлаждения близких по составу сталей и сплавов.

Ниже приведены некоторые экспериментальные результаты плазменного поверхностного легирования сталей.

Плазменное поверхностное легирование из газовой фазы

Установлено, что при 60 % добавке азота к аргону начинает протекать процесс азотирования. На поверхности стали 20 образуется диффузионный слой со структурой γ^1 -фазы и азотистой α - фазы (рис. 4.1). Однако наиболее интенсивно поверхностный слой насыщается азотом при 80-100 % содержании азота в плазмообразующем газе. В результате чего формируется слой внутреннего азотирования протяженностью 0,02-0,04 мм. Обработка стали 9ХФ плазменной струей (100 % азота) приводит к перераспределению легирующих элементов V, Cr, Mn. Наиболее интенсивное перераспределение происходит в центре упрочненной зоны, так содержание марганца повышается до 1,5% (0,45 в исходном), хрома до 0,83 % (0,6 % в исходном), ванадия до 0,31 (0,25 в исходном). Рентгенофазовый анализ показал наличие цементита, высокоазотистых нитридов Fe_2N нитридов хрома при 18 % содержании остаточного аустенита.

При упрочнении плазмой сложного состава (80 % N_2 + 10 % Ar + 10 % CO_2) содержание углерода в поверхностной зоне карбонитридного слоя полученного на стали 20, достигает 0,3 %. Толщина карбидной зоны 0,03-0,04 мм, а микротвердость 7800-8000 МПа при общей глубине упрочненного слоя 0,8 мм.

При обработке стали 20 азотосодержащей плазменной струей с оплавлением поверхности упрочненный слой имеет структуру ϵ и γ' - фаз, соответствующих твердому раствору на базе нитридов Fe_2N и Fe_4N . При травлении этот слой выявляется в виде светлой полоски, толщиной $\approx 0,1$ мм с микротвердостью 6200-6500 Н/мм². Ниже поверхностного слоя располагается диффузионная зона со структурой γ' - фазы (Fe_4N) и α - фазы, где наблюдается провал микротвердости до 4200-3800 МПа. Непосредственно к диффузионному слою примыкает нетравящийся слой с аномально высокой микротвердостью 12500-13000 МПа. Это связано с увеличением содержания углерода в этом слое, по сравнению с основным металлом. Увеличение содержания углерода способствует повышению устойчивости аустенита при охлаждении и, как следствие, образование карбидного мартенсита и небольшого количества остаточного аустенита (≈ 7 %). Общая глубина упрочнения составила 0,8 мм., а азотированного слоя – 0,35 мм.

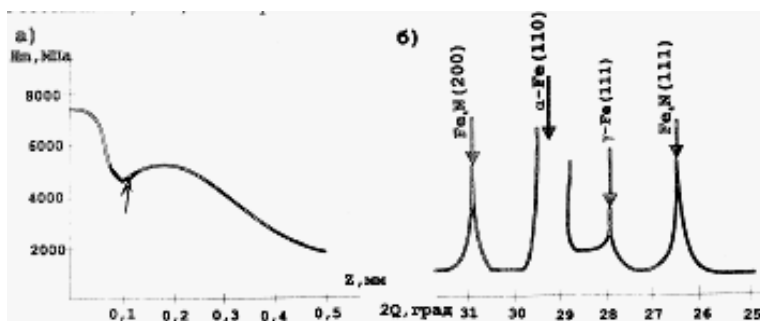


Рис. 4.1 - Распределение микротвердости по глубине азотированного слоя (а) и рентгенограмма поверхностной нитридной зоны на стали 20 (без оплавления)

Дальнейшее увеличение мощности плазменной азотосодержащей струи при упрочнении с оплавлением поверхности вызывает интенсивное порообразование. Происходит «азотное кипение» ванны расплавленного металла, что связано с увеличением скорости поглощения азота поверхностью из плазмы - предел растворимости азота в стали наступает почти мгновенно.

Плазменное легирование из жидкой фазы

Для насыщения поверхностного слоя углеродом или азотом обрабатываемую деталь

погружают в жидкость, содержащую углерод (толуол, минеральное масло и др.) или азот (водяной раствор хлористого аммония и др.).

Установлено, что процесс азотирования наблюдается только при оплавлении поверхности. Азотированный слой на стали 20 представляет собой белую плохо травящуюся полоску карбонитридного состава, содержащую $\approx 4\%$ азота, $\approx 1,5\%$ углерода, $\approx 10-15\%$ остаточного аустенита. Содержание остаточного аустенита на стали 20 возрастает с увеличением длительности насыщения и концентрации азота в растворе.

Задание.

1. Рассмотреть, по заданию преподавателя, различные варианты легирования сталей. Сравнить диаграммы состояния «Fe – легирующий элемент» с фазовым составом реальных образцов, легированных с помощью плазмы.
2. Измерить на микрошлифах параметры дендритов в ЗО 2-3 образцов с разной глубиной упрочненного слоя. По уравнению (4.1) рассчитать скорости охлаждения расплава в ЗО.
3. Сделать вывод о влиянии скорости охлаждения ЗО на строение и фазовый состав.

Вопросы по теме.

1. С какими целями может выполняться поверхностное легирование сплавов?
2. В чем заключается принципиальное отличие поверхностного легирования с применением ВИЭ от традиционной ХТО?
3. Какими, по вашему мнению, преимуществами и недостатками характеризуются технологии поверхностного легирования с помощью ВИЭ по сравнению с традиционной ХТО?

Приложение А

Характеристики плазмы и некоторые справочные данные по элементам

Таблица А.1 - Параметры плазмы

Плазменное состояние	lg Te, К	Te, К	lg Ne, см ⁻³	Ne, см ⁻³
Внешний радиационный пояс Земли	1	10 ⁹	-1	0,1
Внутренний радиационный пояс Земли	8,1	10 ⁸	0	1
Ионосфера, слой D	2,2	10 ²	1,5-3,5	10 ² -10 ⁴
Ионосфера, слой E	2,2	10 ²	3,5-5,5	10 ⁴ -10 ⁶
Ионосфера, слой F1	2,5	10 ³	5-6	10 ⁵ -10 ⁶
Ионосфера, слой F2	3	10 ³	5-6	10 ⁵ -10 ⁶
Фотоионосфера Земли	3,1-3,8	10 ³ -10 ⁴	3-4	10 ³ -10 ⁴
Солнечный ветер	6,9	10 ⁷	1	10
Солнечное ядро	7,2	10 ⁷	25,5	10 ²⁶
Солнечная корона	6,5	10 ⁷	6-9,5	10 ⁶ -10 ¹⁰
Фотосфера Солнца	3,9	10 ⁴	13,5	10 ¹⁴
Хромосфера Солнца	3,8-4,2	10 ⁴	10,5-12	10 ¹¹ -10 ¹²
Молния, искра	4,2	10 ⁴	17,5	10 ¹⁸
Плазмотрон	4,5	10 ⁵	11,5-12,6	10 ¹² -10 ¹³
Гелий – неоновый лазер	4,7	10 ⁵	11,5	10 ¹²

Таблица А.2 - Ионизационные потенциалы различных атомов (эВ)

H 13,598	O+ 35,15	Cl 13,0	Co 7,86	Nb 6,77	Cs 3,89
He 24,58	O++ 54,94	Ar 15,76	Ni 7,63	Mo 7,18	Ba 5,21
He+ 54,4	F 17,42	K 4,34	Cu 7,72	Tc 7,1	Ba+ 9,96
Li 5,39	Ne 21,65	Ca 6,11	Zn 9,39	Ru 7,5	La 5,61
Li+ 75,6	Na 5,14	Ca+ 11,87	Ga 6,00	Rh 7,7	W 7,98
Be 9,32	Na+ 47,30	Sc 6,56	Ge 7,88	Pd 8,33	Pt 8,96
B 8,30	Mg 7,64	Ti 6,83	As 9,8	Ag 7,57	Au 9,22
C 11,27	Mg+ 15,03	Ti+ 13,58	Se 9,75	Cd 8,99	Hg 10,44
C+ 24,38	Al 5,38	V 6,74	Br 11,84	In 5,79	Tl 6,11
C++ 47,87	Al+ 18,83	Cr 6,76	Kr 14,00	Sn 7,33	Pb 7,42
N 14,54	Al++ 28,45	Mn 7,43	Rb 4,18	Sb 8,64	Rn 10,75
N+ 29,61	Si 8,15	Fe 7,90	Sr 5,69	Te 9,01	Ra 5,28
N++ 47,43	P 10,6	Fe+ 16,18	Y 6,6	J 10,44	
O 13,62	S 10,36	Fe++ 30,65	Zr 6,95	Xe 12,13	

Постоянная Больцмана, К - $8,62 \cdot 10^{-5}$ эВ/К; $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Приложение Б

Конструктивные характеристики плазмотронов

Таблица Б.1 - Влияние способа подачи газа (аргона) в сопло, геометрия сопла и катода на эффективный КПД нагрева и коэффициент сосредоточенности плазменной дуги

Диаметр сопла, мм	Длина канала сопла, (мм)	U,В	I,А	Способ подачи газа в сопло	Геометрия сопла		Эффективный КПД нагрева, %	Kr, см.
2	4,4	35	100	тангенциальный	цилиндр	стержень	68	13,2
2	4,4	35	100	-----/-----	парабола	-----/----- -	60	10,1
2	4,4	35	100	-----/-----	раструб	-----/----- -	49	6,5
2	4,4	35	200	-----/-----	цилиндр	-----/----- -	70	15,1
2	4,4	25	200	-----/-----	парабола	-----/----- -	63	11,8
2	4,4	25	200	-----/-----	раструб	-----/----- -	51	6,9
3	4,4	25	200	аксиальный	цилиндр	стержень	58	10,8
3	3,0	25	200	-----/-----	цилиндр	-----/----- -	50	7,2
3	3,0	25	200	-----/-----	цилиндр	-----/----- -	39	4,8
3	3,0	25	200	аксиально-тангенциальный	цилиндр	-----/----- -	61	11,2
4	5,0	23,5	300	аксиальный	цилиндр	стержень	63	11,5
4	5,0	23,5	300	аксиальный	парабола	-----/----- -	54	8,1
4	5,0	23,5	300	аксиальный	раструб	-----/----- -	50	5,1
4	5,0	23,5	300	Аксиально-тангенциальный	цилиндр	-----/----- -	70	15,2
5	6,2	23	150	тангенциальный	цилиндр	кольцо	50	5,9
5	6,8	24	200	-----/-----	-----/----- -	-----/----- -	55	6,2
5	6,9	26	300	-----/-----	-----/----- -	-----/----- -	60	6,8
2	4	35	150	тангенциальный	цилиндр	стержень	65	17,8
3	3,5	24	300	-----/-----	-----/----- -	-----/----- -	60	16,8
4	6,2	28	300	-----/-----	-----/----- -	-----/----- -	64	17,1

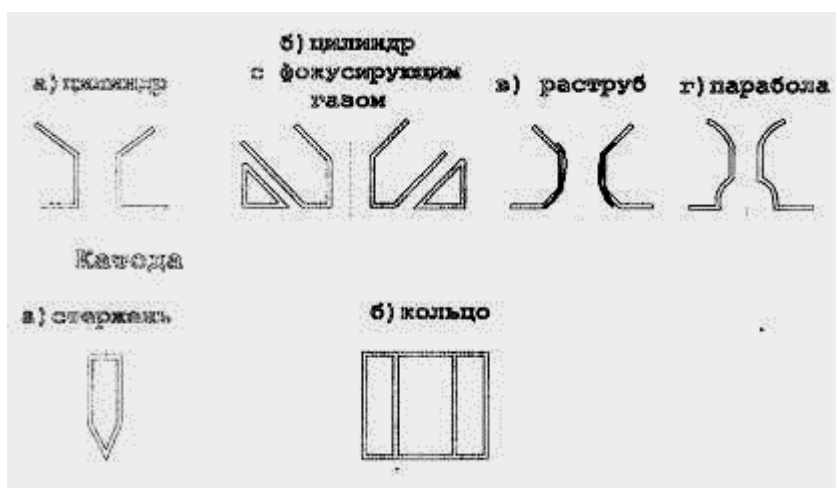


Рисунок Б.1 – Разновидности геометрии сопла плазматрона

Приложение В

Теплофизические константы материалов

Таблица В.1 – Коэффициент теплопроводности сталей при разных температурах

Марка стали	Температура, °С	Теплопроводность стали, Вт/(м·град)
Железо Армко	27...327...727...910...1127	71...52...32...32...38
10	27...327...527	83...57...44
20	27...327...527...627...800...900...1000...1100...1200	86...54...38...31...26...27...28...29...30
20Х13 (2Х13)	100...200...300...400...500...600...700...800...900	26...26...26...26...27...26...26...27...28
30	20...100...200...300...400...500...600...700	52...51...49...46...43...39...36...32
35	27...327...527	85...50...36
38Х2М ЮА	20...100...200...300...400...500...600...700...800	33...33...32...31...29...29...28...27...27
40ХН	100...200...300...400...500	44...43...41...39...37
45	27...327...527	79...43...30
50	20...100...200...300...400...500...600...700...800	48...48...47...44...41...38...35...31...27
50ХФА	20...100...200...300...400...500...600...700...800	40...39...38...37...36...33...31...29...28
55	100...200...400...500	68...55...36...32
60	100...200...400	68...53...36
70С3А	20...100...200...300...400...500...600...700...800	25...26...27...28...29...29...29...28...27
12Х17	100...200...300...400...500	24...24...25...26...26
Х18Н9Т	-73/100/200/300/400/500/600/700/800/900	13...16...18...20...21...23...25...26...28...29
Х20Н80	100...200...300...400...600	14...16...17...19...23
P18	27...100...200...300...400...500...600...700	22...26...27...28...29...28...27...27
У8, У8А	27...100/200...300...400...500...600...700...800...900	50...49...46...42...38...35...33...30...24...25
У12, У12А	100/200/300/400/500/600/700/800/900/1000/1100/1200	45...43...40...37...35...32...28...24...25...26...27...29
Чугуны:		
СЧ10	20	60
СЧ20	20	54

Таблица В.2 – Коэффициент температуропроводности сталей при разных температурах, $\text{м}^2/\text{с} \times 10^{-5}$

Интервал температур, $^{\circ}\text{C}$	Углеродистые стали					
	08кп	08	20	40	У8	У12
50–100	16,39	15,28	13,61	13,33	12,78	11,94
100–150	14,72	14,44	12,78	12,78	11,67	11,11
150–200	13,89	13,33	12,22	12,22	11,11	10,56
200–250	13,06	12,50	11,39	11,39	10,28	10,00
250–300	12,22	11,67	10,56	10,83	9,72	9,44
300–350	11,11	11,11	10,00	10,28	8,89	8,89
350–400	10,28	10,00	9,17	9,44	8,33	8,06
400–450	9,44	9,17	8,61	8,61	7,78	7,78
450–500	8,33	8,06	7,78	7,78	6,94	7,22
500–550	7,50	7,22	7,22	6,94	6,39	6,67
550–600	6,67	6,39	6,39	6,39	6,11	6,11
600–650	6,11	5,83	5,83	5,83	5,83	5,56
650–700	5,28	5,00	5,00	5,28	5,28	4,72
700–750	3,89	3,61	2,78	2,50	1,94	1,67
750–800	4,72	3,89	3,89	5,56	5,56	5,28
800–850	4,72	4,17	4,72	5,00	5,28	5,28
850–900	4,17	4,44	5,28	5,28	5,28	5,28
900–950	5,28	5,28	5,28	5,28	5,59	5,28
950–1000	5,28	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56
1000–1050	5,56	5,56	5,83	5,56	5,56	5,56

Легированные стали

Интервал температур, $^{\circ}\text{C}$	Марки стали				
	30X	30НЗ	30ХНЗ	30Г2	50С2Г
50–100	12,22	10,17	9,17	12,31	7,19
100–150	11,81	9,58	9,11	11,92	7,39
150–200	11,00	9,39	9,00	11,39	7,39
200–250	10,50	9,28	8,81	10,81	7,39
250–300	10,00	9,19	8,39	10,31	7,31
300–350	9,31	8,50	8,19	9,89	7,00
350–400	8,61	8,11	7,89	9,00	6,81
400–450	7,89	7,50	7,39	8,19	6,50
450–500	7,19	6,89	6,69	7,61	6,08
500–550	6,50	6,19	6,31	6,92	5,81
550–600	5,81	5,58	5,81	6,19	5,50

600–650	5,19	5,08	5,28	5,78	5,00
650–700	4,58	2,22	3,06	5,00	4,58
700–750	2,50	2,50	3,19	2,69	4,50
750–800	3,81	5,50	6,11	4,50	2,50
800–850	5,50	5,03	5,39	5,58	5,31
850–900	5,56	5,28	5,56	5,89	5,39
900–950	5,81	5,31	5,69	5,94	5,50
950–1000	5,89	5,33	5,69	6,00	5,56
1000–1050	6,00	5,81	5,81	6,08	5,56
1050–1100	5,56	5,89	5,89	6,08	5,69

ЛИТЕРАТУРА

1. Плазменное поверхностное упрочнение /; Л.К. Лещинский, С.С. Самотугин, И.И. Пирч, В.И. Комар. - К. : Тэхника, 1990. - 109 с.
2. Донской А. В. Клубникин В. С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении.- Л.: Машиностроение, 1979.-221с.
3. Ораевский В.Н. Плазма на земле и в космосе / В. Н. Ораевский. - 1980.
4. Уманский В. Б., Маняк Л. К. Новые способы упрочнения деталей машин.– Донецк: Донбасс, 1990.-142с.
5. Денбновецкий С. В., Барченко В. Т., Шмырева Л. Н. Физические основы генерации плазмы в ионно-плазменных установках технологического назначения.– К.: УМКВО, 1989.-152с.
6. Фролов В. Я., Лисенков А. А., Барченко В. Т. Физические основы применения низкотемпературной плазмы: учеб.пособие. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 220 с.
7. Юрьева А.В. Введение в плазменную технологию и водородную энергетику: уч.пособие / А.В. Юрьева, А.Н. Ковальчук / Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 90 с.